



---

# MODELADO Y SIMULACIÓN POR COMPUTADORA PARA ANALIZAR LA INSTALACIÓN DE EQUIPOS Y SISTEMAS DE UNA EMPRESA MANUFACTURERA

MODALIDAD DE TITULACIÓN:

“EXPERIENCIA PROFESIONAL”

TRABAJO QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO MECATRÓNICO

P R E S E N T A :

**EMILIO CRUZ MARTINEZ**

**No. de Cuenta: 305294852**

ASESORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN:

M.I. SILVINA HERNÁNDEZ GARCÍA

MÉXICO, DISTRITO FEDERAL, 2014



## INDICE:

Introducción

Capítulo 1 - La empresa: *Procter & Gamble Manufactura*

Capítulo 2 - Descripción del trabajo realizado

Capítulo 3 - Desarrollo y resultados de los proyectos

Conclusiones

Bibliografía



## INTRODUCCIÓN

El siguiente trabajo expone los proyectos que desarrollé en el departamento de Ingeniería Regional para Latinoamérica de la empresa Procter & Gamble Manufactura en las instalaciones de Planta Vallejo. El área de Ingeniería Regional se encarga de gestionar el inicio y el seguimiento de los proyectos de Ingeniería que se desarrollan dentro de su línea de negocio en Latinoamérica.

Yo me encontraba realizando una estancia en el área de Modeling & Simulation, la cual tiene un gran impacto para el negocio de la compañía directamente en la manufactura de sus productos, ya que genera ahorros o retrasos de inversión en los distintos procesos productivos que la empresa tiene. Además, esta área estaba muy bien estructurada en otras regiones del mundo y se estaban realizando esfuerzos para empezar a desarrollarla en Latinoamérica.

El objetivo de mi estancia en la empresa, era explotar el potencial de las herramientas que la empresa ya tenía desarrolladas en otras partes del mundo y aprovechar la experiencia de otros colaboradores de la misma área con el objetivo de comenzar a formar un equipo sólido en México, que conociera estas herramientas y fuera capaz de introducir el modelado y la simulación en los proyectos de ingeniería para América Latina en los que el equipo estaba trabajando, con el fin de generar soluciones más rápidas y confiables mediante análisis matemáticos y programas de computadora especializados. Así como encontrar o desarrollar nuevas herramientas que ayudaran a resolver problemas específicos.

Una de mis actividades dentro de la estancia que desarrollé, fue el aprendizaje de los programas comerciales que la empresa utilizaba para este tipo de proyectos, así como las herramientas que el mismo personal de la empresa había desarrollado con fines específicos, de esta manera sería capaz de replicar el conocimiento que se estaba utilizando en otras partes del mundo, dentro de proyectos en edad temprana que se estaban desarrollando o se iban a desarrollar en Latinoamérica.

Debido a que la empresa es extranjera y a que el mayor conocimiento de modelado y simulación había sido desarrollado en Estados Unidos y Europa, uno de los retos más importantes fue el trabajar desde el inicio con personas nativas de habla inglesa fuera de México, lo cual fue muy enriquecedor profesional y personalmente.

Durante mi estancia en la empresa desarrollé 4 proyectos diferentes, cada uno enfocado a resolver problemáticas específicas de ingeniería con el fin de encontrar soluciones óptimas. Por lo anterior el contenido del presente trabajo describe el análisis y las actividades que se realizaron para el desarrollo de cada uno de los proyectos.



## **CAPÍTULO 1: LA EMPRESA PROCTER & GAMBLE MANUFACTURA**

Procter & Gamble Corporation (P&G) es una empresa estadounidense multinacional de bienes de consumo con sede en la ciudad de Cincinnati, Ohio, Estados Unidos, fundada por William Procter y James Gamble. Comercializa una gran cantidad de productos que incluyen alimentos para mascotas, productos de limpieza y productos de cuidado personal.

William Procter y James Gamble fundaron P&G como una asociación en 1837 mediante la fusión de la compañía de velas de Procter con la compañía de jabones de Gamble. La compañía creció a \$1 millón de dólares en ventas en 1859. La imagen inicial de la marca era la luna y las estrellas, una imagen que apareció en todos los productos de la empresa a partir de la década de 1860. En 1887, P&G se convirtió en una de las primeras empresas en EE.UU. en ofrecer un programa de reparto de beneficios para sus empleados. En 1924, P&G fue una de las primeras compañías en crear un departamento de investigación de mercado para estudiar las preferencias del consumidor y su comportamiento.

El sistema de gestión de la organización de marketing y la marca de la compañía comenzó a desarrollarse a principios de 1930. Después de la Segunda Guerra Mundial, P&G comenzó su expansión internacional, en 1948 se estableció una división en el extranjero. P&G entró en Europa en 1954, en Arabia Saudita en 1961 y en Japón en 1973. En 1980, P&G estaba operando en 23 países y la presentación de informes eran de más de \$10 millones de dólares en ventas anuales.

A mediados de la década de 1990, más de la mitad de sus ventas provenían de fuera de los EE.UU. Como su expansión global progresó, P&G continuó modificando su estructura y procesos internos para maximizar el apalancamiento global. Se pusieron en marcha diversas iniciativas para facilitar el intercambio de conocimientos y mejores prácticas en toda la empresa.

Los productos de P&G se dividen en los siguientes grupos principales:

<b>Segmento</b>	<b>Marcas</b>
<b>Baby Care</b>	Pampers, Bibsters, Luvs
<b>Beauty Care</b>	Old Spice, Cover Girl, Max Factor, Head & Shoulders, Pantene, Oil of Olay, Vidal Sassoon, Wash & Go, Circ, Secret, Zest, Fairy Toilet Soap, Hugo Boss, Laura Biagiotti
<b>Fabric and Home</b>	Febreze, Cascade, Comet, Mr.Clean, Swiffer, Dreft, Tide, Fairy, Lenor, Bounce



<b>Feminine Care</b>	Always, Tampax
<b>Food and Beverage</b>	Sunny Delight, Jif (has just been sold to Smucker), Pringles
<b>Health Care</b>	Crest, Iams, Dantrium, Vicks
<b>Tissues &amp; Towel</b>	Bounty, Charmin, Puffs

Tabla 1: Marcas de P&G

Con la gran variedad de categorías de productos y marcas para producir, los insumos van desde telas y agentes químicos hasta ingredientes alimenticios.

La innovación de P&G se centra en dos enfoques principales, por lo que se convierte en una empresa líder en la tecnología:

- Establecer nuevos estándares de rendimiento en las categorías existentes
- Creación de categorías totalmente nuevas con beneficios

P&G está a la cabeza de en la aplicación de la integración vertical a través de la adquisición, asociación, colaboración y fusiones. La empresa puede tomar el control de la línea de negocio y aumentar la variedad y la cuota de mercado, la asociación permite a la empresa reducir los costos de los insumos y de transporte, la colaboración que la empresa pueda realizar genera una mejora significativa de cadena de suministro.

P&G está trabajando en dos frentes para mejorar la eficiencia de la cadena de suministro, es decir, en el exterior la atención se centra en el establecimiento de la conectividad con los socios de la cadena de suministro, e internamente, se trata de volver a evaluar los procesos de negocio.

### **Gestión de la Demanda**

El rango de los productos de P&G es muy amplio, con más de 300 marcas. Con el fin de tomar el control de los niveles de inventario de las poblaciones, P&G se ha embarcado en un camino que mueve a la empresa más cerca de un sistema de fabricación dinámico: planificación dinámica, y la reposición dinámica. P&G inició la red de abastecimiento *Consumer-Driven*, como resultado de ello se está moviendo a un sistema que ha traído varias ventajas, como el poder dirigir ciertos productos a diferente público, garantizando volúmenes de venta altos. Está buscando lo que desencadena la demanda en tiempo real, como la información del punto de venta, que viene directamente desde el escáner de un minorista.

Además P&G está cambiando la forma en que planifica y fabrica sus productos; en vez de hacer lotes de planificación en las plantas, que la compañía tiene actualmente una vez al día, se dio cuenta de que podía realizar una actualización a su programa de producción de dos a tres veces durante el transcurso del mismo día, esto gracias a que la información con la que cuenta es en



## UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA



tiempo real y como si tuviera vida propia; es decir se actualiza automáticamente e informa a la compañía que productos se están consumiendo y cuáles no.

Las marcas de P&G se hacen presentes en la vida de las personas de todo el mundo gracias a que cuenta con una de las carteras más sólidas e importantes, que incluye marcas de confianza y calidad como Pampers, Tide, Ariel, Always, etc. Casi 98,000 empleados trabajan en más de 80 países para garantizar que las marcas de P&G cumplan con su misión de mejorar la calidad de vida todos los días.

Por último, se debe de reconocer que la innovación es el alma de P&G ya que invierte más de \$2,000 mdd cada año en investigación y desarrollo de productos, procesos y servicios.



## CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DE LOS PROYECTOS

Los diferentes proyectos que se explican en éste trabajo de titulación fueron desarrollados en el departamento de Ingeniería Regional de la planta de Procter & Gamble Vallejo ubicada en Poniente 146 No.850, colonia Industrial Vallejo en la ciudad de México. En esta planta se fabrican productos de limpieza tanto líquidos como en polvo.

El departamento de Ingeniería Regional de esta Planta se dedica a gestionar los proyectos relacionados con la línea de negocio de “Fabric and Home Care” que se llevan a cabo en América Latina. Por ejemplo: la integración de nuevos equipos, la construcción de nuevas plantas de producción, o la ampliación de capacidad de las plantas actualmente instaladas.

Muchos de los proyectos que se desarrollan en el departamento requieren de soluciones innovadoras y esto se logra mediante un extraordinario dominio de las problemáticas técnicas. Por ejemplo, se fabrica papel y materiales absorbentes que son fuertes pero suaves; envases y contenedores de líquidos que permiten la filtración, pero que no se rompen. Las formulaciones de lavandería protegen la tela, pero eliminan las manchas.

La forma en la que se alcanzan todos estos avances tecnológicos es gracias al trabajo de *Modeling and Simulation*.

Modeling and Simulation es un área dentro de la Ingeniería de Procter & Gamble que se encarga de hacer análisis de numerosos escenarios tanto de productos como de procesos productivos, con el fin de reducir las posibles problemáticas de producción antes de que sean una realidad.

Las principales responsabilidades de ésta área son:

- Definir las acciones para cada uno de los problemas.
- Definir un mecanismo de desarrollo (modelo de prueba).
- Definir la estrategia de desarrollo.
- Definir entregables y criterios de éxito.
- Estimar el tiempo de entrega
- Estimar el costo y la estrategia de financiamiento.

Las actividades del área de Modelado y Simulación de pueden dividir en 3 grandes grupos:

- Empaque: en el cual se realizan análisis de elemento finito para evaluar la resistencia de cada uno de los empaques utilizados para cada producto.
- Empresa: en dónde se realizan análisis de capacidad para evaluar la demanda de producción de las líneas de producción.
- Procesos: en dónde se evalúa la factibilidad de fabricar los productos mediante cierto tipo de proceso



Actualmente las áreas en las que el Modelado y la Simulación se están enfocando son:

- Resolver problemas técnicos en las iniciativas a través del uso de los Planes de formación técnica.
- Promover el uso de las herramientas en toda la organización.
- Desarrollar y aprovechar a los practicantes avanzados para explotar el modelado y la simulación en el trabajo diario.
- El desarrollo de capacidades se verá impulsado por los planes maestros de 5M + Plataforma de Innovación.
- Conducir y apoyar oportunidades integradas de modelado

## **SIMULACIÓN Y SISTEMAS**

La creciente capacidad de las computadoras y la inmensa investigación en el campo de la Ciencia de la Computación otorgan nuevas herramientas para apoyar el proceso de la toma de decisiones en diversas disciplinas y áreas de diseño y manejo de la industria. La Simulación es una de las herramientas más importantes y más interdisciplinarias. En pocas palabras podemos decir, que la simulación se realiza cuando la computadora finge ser una tienda, un avión o un mercado de abarrotes; el usuario define la estructura del sistema que quiere simular. Una corrida del programa de simulación correspondiente, le dice al usuario cuál será el comportamiento dinámico de su empresa o de la máquina que está diseñando. Así podemos ver los pronósticos para la demanda y utilidad de nuestro producto, o ver cuando un mecanismo pueda fallar en las condiciones adversas del ambiente donde funcionará.

Las aplicaciones de la simulación parecen no tener límites. Actualmente se simulan los comportamientos de las partes más pequeñas de un mecanismo, el desarrollo de las epidemias, el sistema inmunológico humano, las plantas productivas, sucursales bancarias, el sistema de repartición de pizzas, crecimiento de poblaciones de especies de animales, partidos y torneos de fútbol, movimiento de los planetas y la evolución del universo, para mencionar unos pocos ejemplos de las aplicaciones de esta herramienta. Cabe mencionar la creciente importancia de la Simulación en la Investigación de operaciones y en sus aplicaciones industriales. En los países altamente desarrollados la simulación es una herramienta principal en los procesos de toma de decisiones, en el manejo de empresas y en la planeación de la producción. Además, la Simulación es cada vez más “amigable” para el usuario, que no tiene que ser un especialista en computación.



## TIPOS DE MODELOS DE SIMULACIÓN

### MODELOS DE SIMULACIÓN ESTÁTICA VS. DINÁMICA

Un modelo de simulación estática se entiende como la representación de un sistema para un instante (en el tiempo) en particular o bien para representar un sistema en el que el tiempo no es importante, por ejemplo la simulación Montecarlo; en cambio un modelo de simulación dinámica representa a un sistema en el que el tiempo es una variable de interés, como por ejemplo en el sistema de transporte de materiales dentro de una fábrica, una torre de enfriamiento de una central termoeléctrica, etc.

### MODELOS DE SIMULACIÓN DETERMINISTA VS ESTOCÁSTICA

Si un modelo de simulación no considera ninguna variable importante, comportándose de acuerdo con una ley probabilística, se le llama un modelo de simulación determinista. En estos modelos la salida queda determinada una vez que se especifican los datos y relaciones de entrada al modelo, tomando una cierta cantidad de tiempo de cómputo para su evaluación. Sin embargo, muchos sistemas se modelan tomando en cuenta algún componente aleatorio de entrada, lo que da la característica de modelo estocástico de simulación.

Un ejemplo sería un sistema de inventarios de una fábrica, o bien el sistema de líneas de espera de una fábrica, etc. Estos modelos producen una salida que es en sí misma de carácter aleatorio y ésta debe ser tratada únicamente para estimar las características reales del modelo, esta es una de las principales desventajas de este tipo de simulación.

### MODELOS DE SIMULACIÓN CONTINUOS VS DISCRETOS

Los modelos de simulación discretos y continuos, se definen de manera análoga a los sistemas discretos y continuos respectivamente. Pero debe entenderse que un modelo discreto de simulación no siempre se usa para modelar un sistema discreto. La decisión de utilizar un modelo discreto o continuo para simular un sistema en particular, depende de los objetivos específicos de estudio. Por ejemplo: un modelo de flujo de tráfico en una supercarretera, puede ser discreto si las características y movimientos de los vehículos en forma individual es importante. En cambio si los vehículos pueden considerarse como un agregado en el flujo de tráfico entonces se puede usar un modelo basado en ecuaciones diferenciales presentes en un modelo continuo.

Otro ejemplo: Un fabricante de comida para perros, requiere el auxilio de una compañía consultora con el objeto de construir un modelo de simulación para su línea de fabricación, la cual produce medio millón de latas al día a una velocidad casi constante. Debido a que cada una de las latas se representó como una entidad separada en el modelo, éste resultó ser demasiado detallado y por ende caro para correrlo, haciéndolo poco útil. Unos meses más tarde, se hizo una reformulación del modelo, tratando al proceso como un flujo continuo. Este nuevo modelo



produjo resultados precisos y se ejecutó en una fracción del tiempo necesario por el modelo original.

### **VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE LA SIMULACIÓN**

Aunque la técnica de simulación generalmente se ve como un método de último recurso, recientes avances en la metodología de simulación y la gran disponibilidad de software que actualmente existe en el mercado, han hecho que esta técnica sea una de las herramientas más ampliamente usadas en el análisis de sistemas. Además de las razones antes mencionadas, un estudio de simulación es muy recomendable porque presenta las siguientes ventajas:

- A través de un estudio de simulación, se puede estudiar el efecto de cambios internos y externos del sistema, al hacer alteraciones en el modelo del sistema y observar los efectos de esas alteraciones en el comportamiento del sistema.
- Una observación detallada del sistema que se está simulando puede conducir a un mejor entendimiento del mismo y por consiguiente a sugerir estrategias que mejoren la operación y eficiencia del sistema.
- Puede ser utilizada como un instrumento pedagógico para enseñar a estudiantes habilidades básicas en análisis estadísticos, análisis teórico, etc.
- Puede ayudar a entender mejor la operación del sistema, a detectar las variables más importantes que interactúan en él y a entender mejor las interrelaciones entre estas variables.
- Puede ser utilizada para experimentar con nuevas situaciones, sobre las cuales tiene poca o ninguna información. A través de esta experimentación se puede anticipar mejor a posibles resultados no previstos.
- Se puede utilizar también para entrenamiento de personal. En algunas ocasiones se puede tener una buena representación de un sistema (por ejemplo los juegos de negocios), y entonces a través de ella posible entrenar y dar experiencia a cierto tipo de personal.
- Cuando nuevos elementos son introducidos en un sistema, la simulación puede ser usada para anticipar cuellos de botella o algún otro problema que puede surgir su comportamiento.



- Los sistemas que son sujetos de investigación de comportamiento, no necesitan existir actualmente para ser sujetos de experimentación basados en la simulación. Sólo necesitan existir en la mente del diseñador.
- El tiempo puede ser comprimido en los modelos de simulación. El equivalente de días, semanas y meses de un sistema real en operación frecuente, pueden ser simulados en sólo segundos, minutos u horas en una computadora. Esto significa que un largo número de alternativas de solución pueden ser simuladas y los resultados pueden estar disponibles de forma breve y pueden ser suficientes para influir en la elección de un diseño para un sistema.
- En simulación cada variable puede mantenerse constante excepto algunas cuya influencia está siendo estudiada. Como resultado, el posible efecto de descontrol de las variables en el comportamiento del sistema puede ser disminuido, lo cual es algo que no se puede hacer cuando el experimento está desarrollado sobre un sistema real.
- Es posible reproducir eventos aleatorios idénticos mediante una secuencia de números aleatorios. Esto hace posible usar las técnicas de reproducción de varianzas para mejorar la precisión con la cual las características del sistema pueden ser estimadas para dar un valor que refleje el esfuerzo de la simulación.

A diferencia de las ventajas mencionadas, la técnica de simulación presenta algunas desventajas, como las que se presentan a continuación:

- Falla en producir resultados exactos. Si supone que un sistema está compuesto de uno o más elementos que están sujetos a un comportamiento al azar, cuando una simulación es desarrollada con un modelo del sistema, los valores de cada variable son registrados y los promedios de estos valores son dados en una post simulación. Pero el promedio en una muestra de observación solo a veces provee un estimado de lo esperado, es decir, una simulación solo provee estimados, no resultados exactos.
- Fallas al optimizar. La simulación es usada para contestar preguntas del tipo “¿qué pasa si?”, pero no de “¿qué es lo mejor?”. En este sentido, la simulación no es una técnica de optimización. La simulación no generará soluciones, solo evalúa esas que han sido propuestas.
- Costos para proveer capacidad de simulación. El establecimiento y mantenimiento de capacidad de simulación, requiere tener mejor personal, software, hardware y entrenamiento, además de que involucra otro tipo de costos.



## UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA



- Abuso de simulación. Una persona debe tener conocimiento de una gran variedad de áreas antes de llegar a ser un practicante de la simulación. Este hecho es algunas veces ignorado; sin embargo, como resultado, cada estudio puede incorrectamente ser desarrollado, o podría estar incompleto, o podría caer en otro tipo de caminos, quizá resultado de una falla del esfuerzo de la simulación. Además, se debe de tener un correcto equilibrio entre el saber qué tipo de problemas pueden solucionarse mediante herramientas de simulación y cuáles no, ya que en ocasiones se puede caer en el abuso de la simulación, queriendo resolver todo tipo de problemas utilizando esta técnica, cuando en realidad existe un gran abanico de herramientas para resolver diferentes tipo de problemáticas

## CAPÍTULO 3: DESARROLLO Y RESULTADOS DE LOS PROYECTOS

### **ANTARES: Problema de análisis de capacidad**

En la planta de producción ubicada en Industrial Vallejo, se iba a comenzar con la manufactura de un nuevo producto. Hay que tener en cuenta que la principal materia prima de los productos que se fabrican aquí es el agua, por lo cual, se necesitaba realizar un análisis para determinar si la planta de tratamiento de agua era capaz de soportar la demanda actual de agua más la demanda futura que se tendría cuándo comenzará la fabricación del nuevo producto.

La planta de tratamiento de agua tenía una cierta capacidad de salida, que a manera de ejemplo establecemos en 850 kg/min. La producción actual requería un flujo de agua de aproximadamente 800kg/min, por lo cual el flujo disponible aproximado con el que contábamos era de 50 kg/min.

Esto era sólo una estimación, por lo que no podíamos dar por hecho que contaríamos en todo momento con ese flujo, debido a que como en toda operación, hay muchas variables, algunas de las cuales no se pueden controlar, por ejemplo: fallas inesperadas en las máquinas de las líneas de producción, cambios en la programación de la producción, falta de personal, entre otras. Por lo anterior, debíamos de tener en mente que el análisis se debería de realizar contando con un flujo de entrada de 50 kg/min en el mejor de los escenarios.

Para hacer el análisis del problema, se utilizó un software de simulación, llamado VENSIM:

VENSIM es un programa para crear simulaciones que nos ayuda a mejorar el rendimiento de los sistemas reales. Es utilizado para el desarrollo, análisis y retroalimentación de modelos dinámicos. Entre sus principales características se encuentran las siguientes:



Figura 1: Logotipo de Vensim

- ✓ “Alta calidad de simulaciones con consistencia dimensional y revisiones en tiempo real.
- ✓ Conexiones a información externa y sofisticados métodos de calibración.
- ✓ Obtención instantánea de información con simulaciones continuas.
- ✓ Herramientas flexibles para la publicación de los modelos.
- ✓ Análisis del modelado de los sistemas, incluyendo la optimización de la simulación de Monte Carlo.”<sup>1</sup>



VENSIM es una herramienta muy amigable que puede resolver una gran variedad de problemas de diferentes áreas de estudio, por ejemplo:

- ✓ Problemas de consumo y capacidad
- ✓ Problemas de exploración robótica
- ✓ Experimentos aerodinámicos
- ✓ Sistemas de distribución
- ✓ Sistemas de producción en línea

Se tenía muy claro que para poder soportar la fabricación del nuevo producto con el flujo sobrante de la actual planta de tratamiento de agua era necesario instalar un tanque de almacenamiento que funcionara como “buffer” para la operación, de ésta manera las probabilidades de que no se tuvieran problemas en la operación debido a la falta de agua se disminuirían.

**a. Objetivo:**

El objetivo de la simulación era determinar el tamaño óptimo del tanque “buffer” de almacenamiento así como saber el flujo mínimo de entrada de agua con el que se podía operar sin que se quedará sin agua el tanque debido al consumo de la operación. Los resultados de esta simulación eran particularmente esenciales, debido a que esto desembocaría en una inversión económica para la empresa.

**b. Alcance:**

- ✓ Si la simulación demostraba que no era posible operar con la actual planta de tratamiento de agua: Adquirir una nueva planta de tratamiento para la nueva operación.
- ✓ Si la simulación demostraba que sí era posible operar con la actual planta de tratamiento de agua: Instalar el tanque de almacenamiento para la nueva operación utilizando el flujo restante de la actual planta de tratamiento.
- ✓ Si la simulación demostraba que sí era posible operar con la actual planta de tratamiento de agua: Retrasar la inversión de la adquisición de una nueva planta de tratamiento instalando el tanque de almacenamiento para la nueva operación mientras las demandas se mantuvieran constantes.

**c. Variables de decisión y de respuesta**

Para el desarrollo de la simulación se debieron de tomar en cuenta diferentes variables:

- ✓ Tamaño del tanque de almacenamiento [kg]
- ✓ Nivel inicial de agua del tanque de almacenamiento [%]
- ✓ Flujo de entrada de agua al tanque [kg/min]
- ✓ Agua necesaria para cada lote de producción [kg]



- ✓ Número de lotes continuos en un día de producción.

Sin embargo, debido a las condiciones específicas para la fabricación de ese producto, debíamos de considerar una cierta configuración del lote de producción. Esto es, para la producción de un lote, se tenían que introducir diferentes compuestos en diferentes tiempos, entre los que estaba el agua que se tenía que adicionar en tiempos específicos a la producción debido a las diferentes condiciones de cada aditivo, así como a su densidad específica y temperatura. Un ejemplo de la manera en la que se realizaban las diferentes adiciones en cada lote de producción se muestra en la tabla 1:

Componente	Cantidad [kg]	Tiempo inicial [min]	Tiempo final [min]
Agua	6000	0	6
Aditivo 1	700	6	11
Agua	4000	11	14
Aditivo 2	80	14	15
Aditivo 3	800	15	23
Aditivo 4	5	23	25
Aditivo 5	9	25	25
Aditivo 6	20	25	40
Aditivo 7	30	40	45

Tabla 2: Cantidades y tiempos de adiciones del proyecto ANTARES

En el ejemplo anterior podemos observar, que el agua es el componente que más se utiliza, y se está adicionando en 2 momentos diferentes. Para efectos de la simulación se tenía que configurar el consumo de agua en los tiempos correspondientes. Por lo tanto, teníamos que considerar también la siguiente variable dentro de la simulación:

- ✓ Tiempo de adición de agua al lote [min]

Además de lo anterior, teníamos que considerar el factor microbiológico en la producción, es decir, eliminar cualquier tipo de bacteria o contaminante que pudiera tener el agua dentro del tanque de almacenamiento.

Para lograr lo anterior debíamos que asegurar que toda el agua que estaría almacenada en el tanque estuviera en contacto por un determinado tiempo mínimo con el agente sanitizante que se le agregaría al tanque. Por lo cual, se agregaban las siguientes variables a la simulación:

- ✓ Tiempo mínimo de contacto del agua con el agente sanitizador.
- ✓ Número de partes por millón [ppm] del agente sanitizador en el agua.

La simulación en VENSIM se realizó de una manera relacional, es decir todas las variables están conectadas en algún momento de la simulación, ya sea directa o indirectamente mediante alguna

otra variable. La conexión de éstas se realiza mediante ecuaciones y operaciones algebraicas, que se definen dentro de la interfaz de programa.

La simulación se realizó bajo una base de 5 días, con el fin de ver un escenario completo de una semana de producción. La filosofía de la simulación es considerar el peor de los escenarios con el fin de tener un factor de seguridad mayor en los resultados, la gran ventaja de esta simulación es de que se pueden modificar los valores de las variables en tiempo real y observar los resultados directamente en las gráficas de la simulación al mismo tiempo, lo cual permite una gran interactividad y rapidez en la obtención de resultados.

La simulación se desarrolló esquemáticamente explicando la idea general como se muestra en la figura 2.

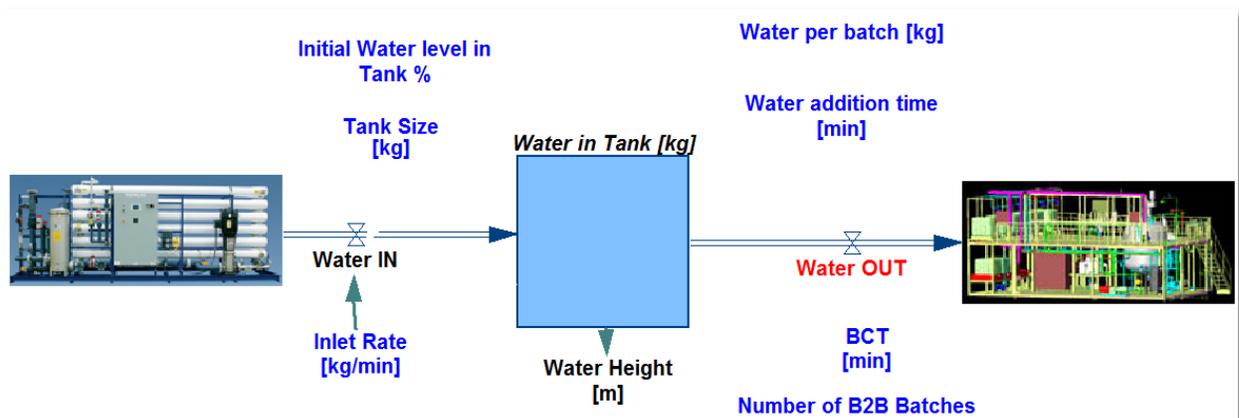


Figura 2: Esquema de la simulación del proyecto ANTARES

En la figura 2 podemos observar del lado izquierdo la planta de tratamiento de agua, que es el sistema de donde vamos a obtener nuestra materia prima. En la parte central podemos observar nuestro tanque de agua “buffer” el cual está conectado tanto a la planta de tratamiento como a la línea de producción. También podemos observar las variables involucradas en la simulación.

En un nivel más inferior de esta simulación, nos encontramos con la configuración de la lógica del sistema como se muestra en figura 3.

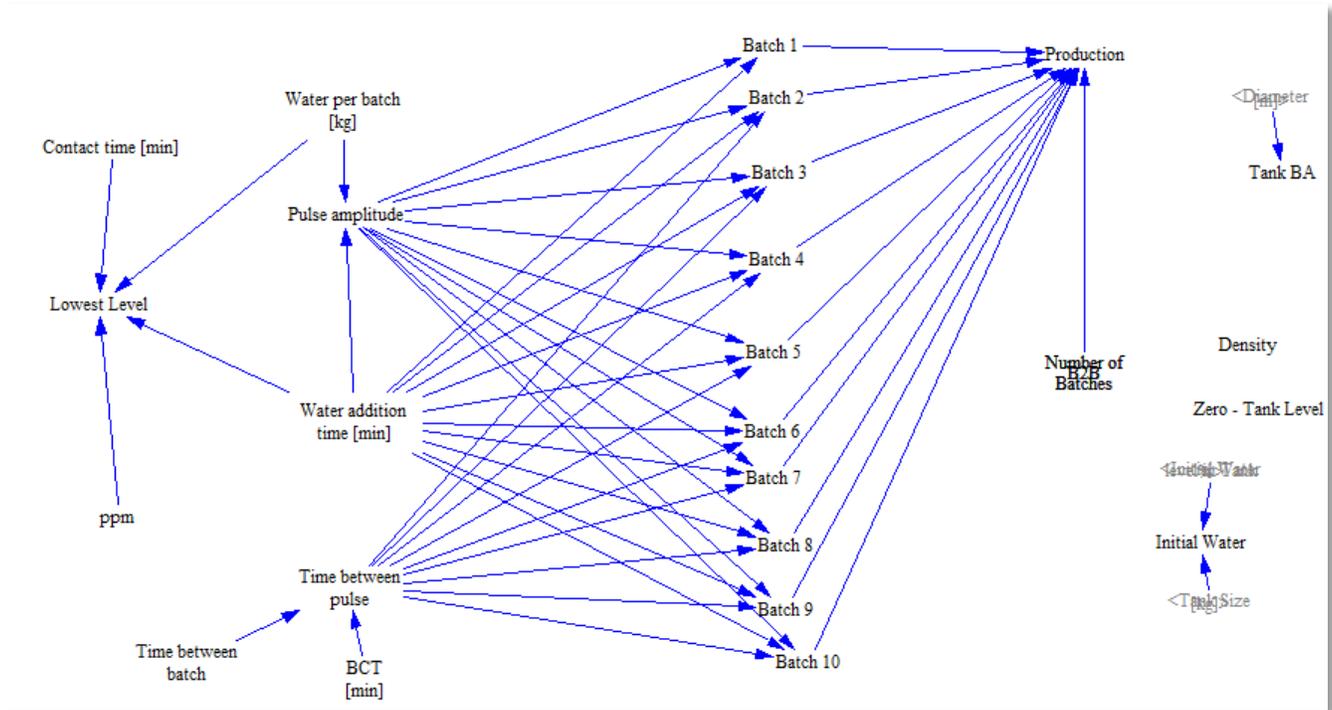


Figura 3: Relación de variables de la simulación del proyecto ANTARES

Cada una de estas variables tiene programada su lógica de operación. Como un ejemplo podemos observar la ecuación de la variable “Batch1” o lote1, donde podemos observar cómo está configurado el consumo de agua de un solo batch durante 1 semana de producción utilizando lenguaje algebraico en conjunción con las demás variables involucradas, lo anterior se muestra en la figura 4:

```

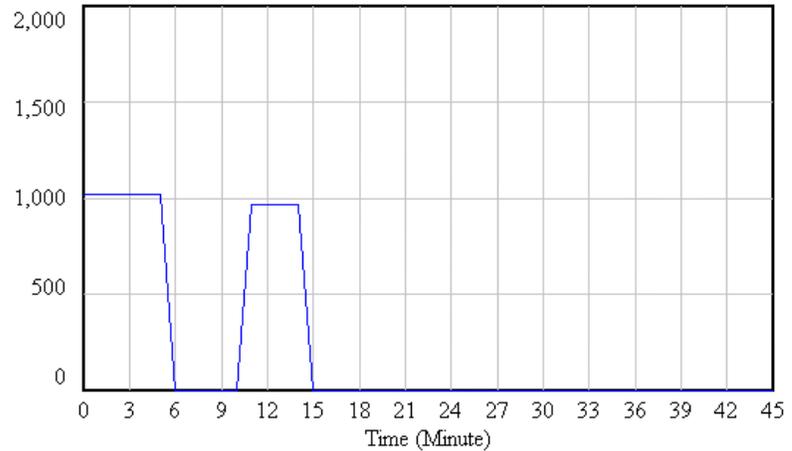
Batch 1
= Pulse amplitude*PULSE(10,"water addition time [min]") + Pulse amplitude*PULSE(10+1440,"water addition time [min]") + Pulse amplitude*PULSE(10+2880,"water addition time [min]") + Pulse amplitude*PULSE(10+4320,"water addition time [min]") + Pulse amplitude*PULSE(10+5760,"water addition time [min]") + Pulse amplitude*PULSE(10+7200,"water addition time [min]") + Pulse amplitude*PULSE(10+8640,"water addition time [min]") + Pulse amplitude*PULSE(10+10080,"water addition time [min]") + Pulse amplitude*PULSE(10+11520,"water addition time [min]") + Pulse amplitude*PULSE(10+12960,"water addition time [min]") + Pulse amplitude*PULSE(10+14400,"water addition time [min]")
    
```

Figura 4: Programación de una de las variables de la simulación del proyecto ANTARES

**d. Escenarios de solución:**

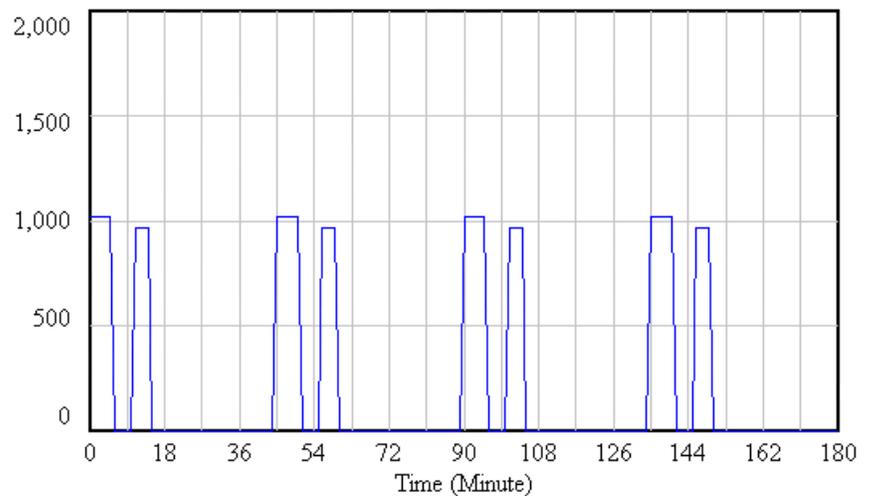
Gráficamente, podemos observar la configuración de un lote de producción:

En la gráfica 1 podemos observar que el lote de producción dura 45 minutos, durante los cuales existen 2 momentos en los que se utiliza agua del tanque de almacenamiento, el área que se ve delimitada por la línea azul es la cantidad de agua que se está requiriendo durante la producción de un lote. De esta manera, la simulación sabe en qué momento exacto debe de tomar esa cantidad de agua del flujo entrante de la planta de tratamiento.



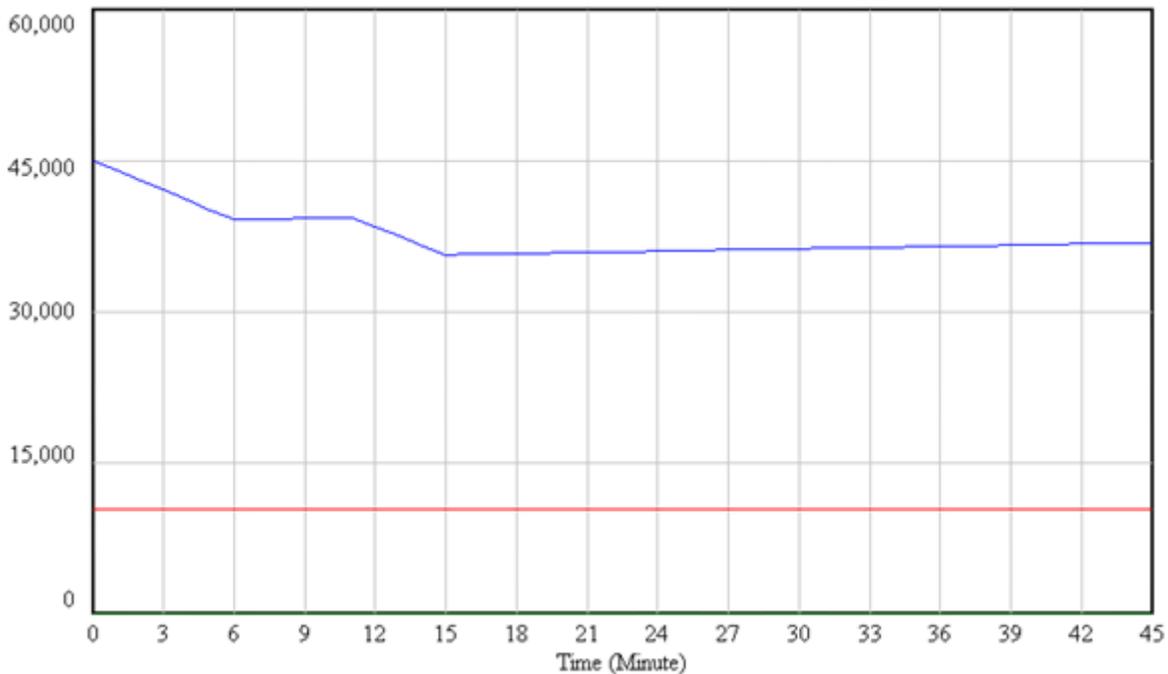
Gráfica 1: Consumo de agua de un lote de producción en 45 [min]

Ahora, si quisiéramos utilizar la configuración anterior para trazar la gráfica de la producción de un día entero, obtendríamos la gráfica 2. Los lotes de producción están programados bajo el esquema de BackToBack, esto significa, que en el momento en el que uno de ellos termina, inmediatamente el otro empieza. Para efectos de la simulación, uno de los objetivos secundarios es saber cuántos lotes consecutivos es posible producir sin que nos quedemos sin agua en el tanque de almacenamiento.



Gráfica 2: Consumo de agua de 4 lotes de producción continuos

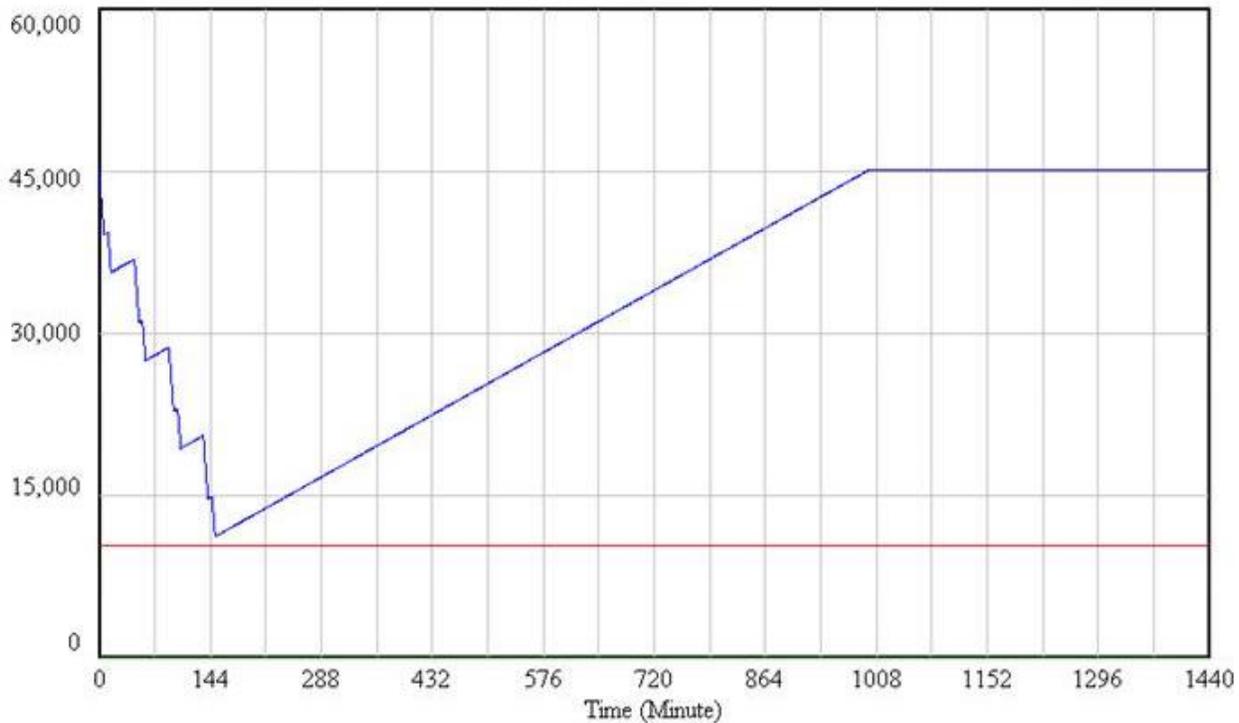
La simulación realizada para resolver éste problema de capacidad es muy amigable, por lo que permite hacer un análisis tan profundo como desee el usuario; por ejemplo, en la gráfica 3 podemos observar el comportamiento del nivel de agua en el tanque de almacenamiento debido a la demanda de agua necesaria para la fabricación de un lote de producción.



Gráfica 3: Nivel de agua del tanque de la simulación del proyecto ANTARES durante 45 [min]

Para este ejemplo, se está suponiendo que nuestro tanque de almacenamiento es de 45 toneladas y podemos observar que el nivel de agua cae dramáticamente en 2 momentos, que es cuando nuestro lote de producción demanda consumo de agua. El escenario anterior muestra un tiempo de 45 minutos, suponiendo que ese fuera el tiempo que tarda en producirse un lote. En la gráfica 3 también se puede observar una línea de color rojo, en este caso, es nuestro nivel mínimo de agua que debemos de tener en el tanque en todo momento, ya que con esto estamos asegurando que toda el agua estará en contacto con el agente sanitizante durante el tiempo que se establece.

Recordemos que punto importante es saber el número máximo de lotes que se pueden producir durante un día sin quedarnos sin agua en el tanque, para lograr esto, se configura en la simulación un arreglo de varios lotes de producción continuos, los cuales recibirán agua del tanque en los momentos establecidos. Para esto se está asumiendo que el tanque está recibiendo el flujo restante de la planta de tratamiento de agua en todo momento, por lo que siempre existirá un cierto factor de recuperación del nivel de agua. En la gráfica 4 podemos observar la configuración antes explicada:



Gráfica 4: Nivel de agua del tanque de la simulación del proyecto ANTARES durante 1 día de producción

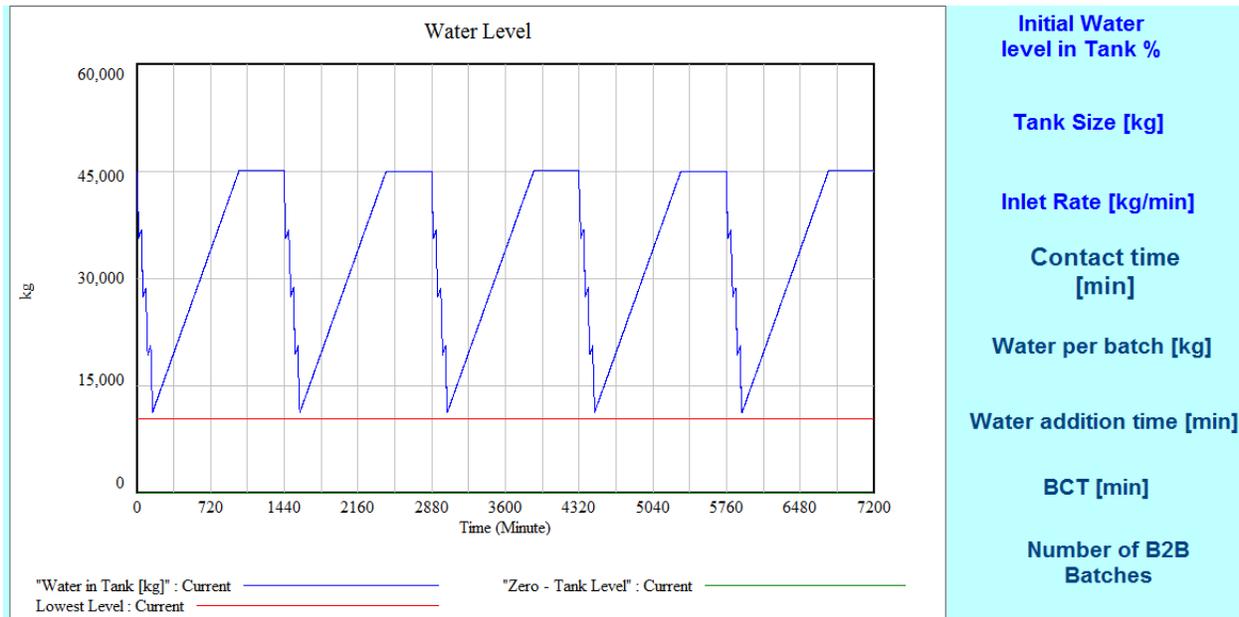
Siguiendo con el mismo ejemplo, bajo las condiciones de consumo establecidas, al iniciar la producción del día con nuestro tanque de 45 toneladas lleno, podemos llegar a producir 4 lotes seguidos durante un día, lo cual para nuestro ejemplo es más que suficiente para cubrir la demanda de producción, además, estamos asegurando que nuestro límite microbiológico no es rebasado. El comportamiento que estamos observando más adelante es cuando dejamos de utilizar agua del tanque, y este se comienza a llenar de nuevo a una razón de 40 [kg/min], podemos observar que aproximadamente a las 16 horas el tanque alcanza su nivel máximo de llenado de nuevo; sin embargo, debido a que la demanda de la producción no es tan grande por el momento, no es necesario comenzar con los lotes de producción inmediatamente, por lo que podemos comenzar con la producción al día siguiente.

#### e. Análisis de resultados

Para obtener los resultados finales de la simulación, decidimos ver el comportamiento del nivel de agua en el tanque de almacenamiento por un periodo de 5 días, para esto se analizaron nuevamente todas las variables cuidando de que los valores que se estaban utilizados, si bien no eran los reales, fueran lo más parecido a la realidad. Gracias a la ventaja que ofrece VENSIM, se pudieron simular una gran variedad de escenarios, desde el más ideal, donde los resultados eran totalmente satisfactorios desde cualquier ángulo del que se viera, hasta el peor de los escenarios, en donde lo más probable era que el nivel de agua en el tanque colapsara. Para nuestro análisis,



este último escenario era el que nos interesaba, ya que si obteníamos que nuestro sistema funcionara en éste, las probabilidades de que la operación fuera exitosa al instalar el sistema real y ponerlo en funcionamiento, eran mayores. En la gráfica 5 se pueden observar los resultados finales de la simulación bajo las condiciones del ejemplo que se está manejando:



Gráfica 5: Resultados finales de la simulación ANTARES

Del lado derecho podemos observar las variables que podemos modificar durante la simulación, y se pueden observar los resultados de esas modificaciones en tiempo real en la gráfica del nivel de agua. Para nuestro ejemplo, tenemos lo siguiente:

Dadas las condiciones de configuraciones de cada lote de producción y las particularidades de consumo de agua que se requieren para cada uno de ellos, así como las condiciones establecidas para asegurar que se cumplen con los requerimientos microbiológicos, obtuvimos que con un flujo constante de 40 [kg/min] de agua proveniente de una planta de tratamiento, somos capaces de superar la demanda de producción, trabajando con un máximo de 4 lotes por día, utilizando un tanque de almacenamiento de 45 toneladas. Con lo anterior se está asegurando que el tanque no se quedará sin agua y no rebasará el nivel mínimo de agua que debe de tener en todo momento, por el requerimiento microbiológico. Es importante mencionar que este es el peor de los casos, en donde tenemos un flujo de entrada de agua de la planta de tratamiento menor al máximo disponible, una demanda de producción de lotes mucho mayor a la requerida, un límite microbiológico exigente y el tamaño más pequeño del tanque de almacenamiento capaz de soportar esas condiciones. Por lo que si cualquier de las variables anteriores, o varias de ellas, se movieran a nuestro favor, por ejemplo: contar con flujo de entrada de agua mayor, una menor



producción requerida, un límite mínimo de agua menor o espacio para instalar un tanque más grande, las probabilidades de éxito de nuestro sistema aumentan considerablemente.

**f. Recomendaciones**

En la simulación real, se obtuvo un escenario muy similar al que obtuvimos en nuestro ejemplo. Las condiciones establecidas por todas las variables en el sistema hasta ese momento, nos decían que era viable soportar la operación del nuevo producto utilizando el flujo de agua remanente de la planta de tratamiento de agua con la que se contaba. Con base en los siguientes resultados:

Inlet Rate [kg/min]	Tank Size [ton]					
	45	50	60	70	80	90
25	✘	✘	✘	✘	✘	✘
30	✘	✘	✘	✘	✘	✘
35	✘	✔	✔	✔	✔	✔
40	✘	✔	✔	✔	✔	✔
45	✘	✔	✔	✔	✔	✔
50	✔	✔	✔	✔	✔	✔

**Water per Batch: 9955 [kg]**  
**Water addition time: 7 [min]**  
**BCT: 45[min]**  
**Number of B2B Batches: 5**  
**Contact Time: 9 min.**

Tabla 3: Resultados finales de la simulación ANTARES

Se hizo la recomendación a la gerencia y a los actores involucrados en tomar la decisión de que instalando un tanque de almacenamiento de agua de cierta capacidad, se podría retrasar la inversión de capital para la compra de una nueva planta de tratamiento, hasta que las condiciones del sistema cambiaran o se aumentara la demanda de producción de la operación actual, de la nueva, o de ambas.



## GUARANÁ: Problema de análisis de capacidad

En esta ocasión el proyecto para el cual se estaba trabajando consistía en el aumento de la capacidad de producción de una de las plantas de una línea de negocio de la compañía que se encuentra en Sudamérica.

### a. Objetivo

El objetivo de la simulación era obtener el tamaño óptimo del tanque “buffer” de almacenamiento con el que se podía operar con el fin de soportar el aumento de producción de la planta, pero sin afectar a la producción actual. Los resultados de esta simulación eran particularmente esenciales, debido a que esto desembocaría en una inversión económica para la empresa.

El escenario del proyecto era el siguiente:

- Se tenía la fabricación de 2 productos, y para cada operación se tenía una planta de tratamiento de agua y un tanque de almacenamiento de agua para soportar el gasto instantáneo de cada una de ellas.
- Se pretendía instalar una segunda unidad de producción para la fabricación del producto 1 con el fin de cumplir con la demanda.
- El agua que entregaba la planta de tratamiento del producto 1 no era suficiente para soportar la operación de la segunda unidad de producción.
- El agua que entregaba la planta de tratamiento del producto 2 era más de la que se necesitaba.
- La idea de utilizar el agua sobrante de la planta de tratamiento del producto 2 para cubrir el aumento de producción del producto 1, se descartó desde el principio, ya que por simple análisis algebraico se demostraba que el agua no era suficiente.

### b. Alcance

La instalación de una nueva planta de tratamiento de agua de mayor capacidad era un hecho; sin embargo, esto ocurriría en una segunda fase del proyecto, por lo que para soportar la producción en el corto plazo, se habían considerado las siguientes 3 alternativas:

- Sustituir el tanque de almacenamiento de agua de la operación del producto 1, para poder contar con más “buffer” para la operación de la segunda unidad de producción soportando así el gasto instantáneo, además, este tanque sería alimentado por el sobrante de agua de la planta de tratamiento del producto 2.

- Rentar una planta de ósmosis inversa que nos suministrara el consumo excedente necesario de agua hasta que se instalará la nueva planta de tratamiento.
- Expandir la planta de tratamiento de agua actual con nuevos trenes de resinas que nos entregarían una capacidad extra de lo que se tenía actualmente.

La solución económicamente más viable para este problema era la instalación del tanque de almacenamiento de agua que serviría para soportar el gasto de las 2 unidades de producción del producto 1. Para dimensionar este tanque correctamente considerando todas las variables de producción era necesario hacer la simulación de la operación de fabricación de los 2 productos, y analizar su comportamiento en conjunto al obtener agua de una de ellas para llenar el tanque de almacenamiento.

Para la realización de la simulación de este problema, se decidió trabajar con misma herramienta que en la simulación anterior, *VENSIM*, debido a que ya se contaba con la experiencia de su uso y los resultados habían sido favorables, por lo que se esperaba que el análisis y la solución fueran rápidos.

El modelado de la producción antes mencionado dentro de la simulación fue el siguiente:

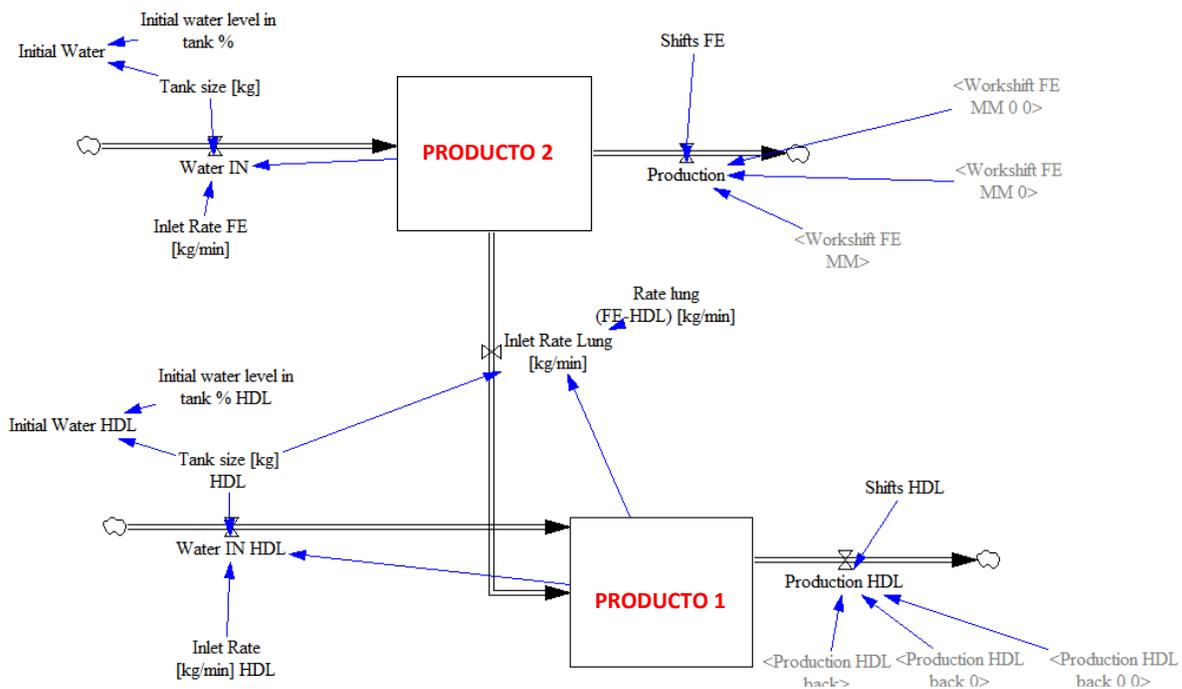


Figura 5: Esquema de la simulación del proyecto GUARANÁ

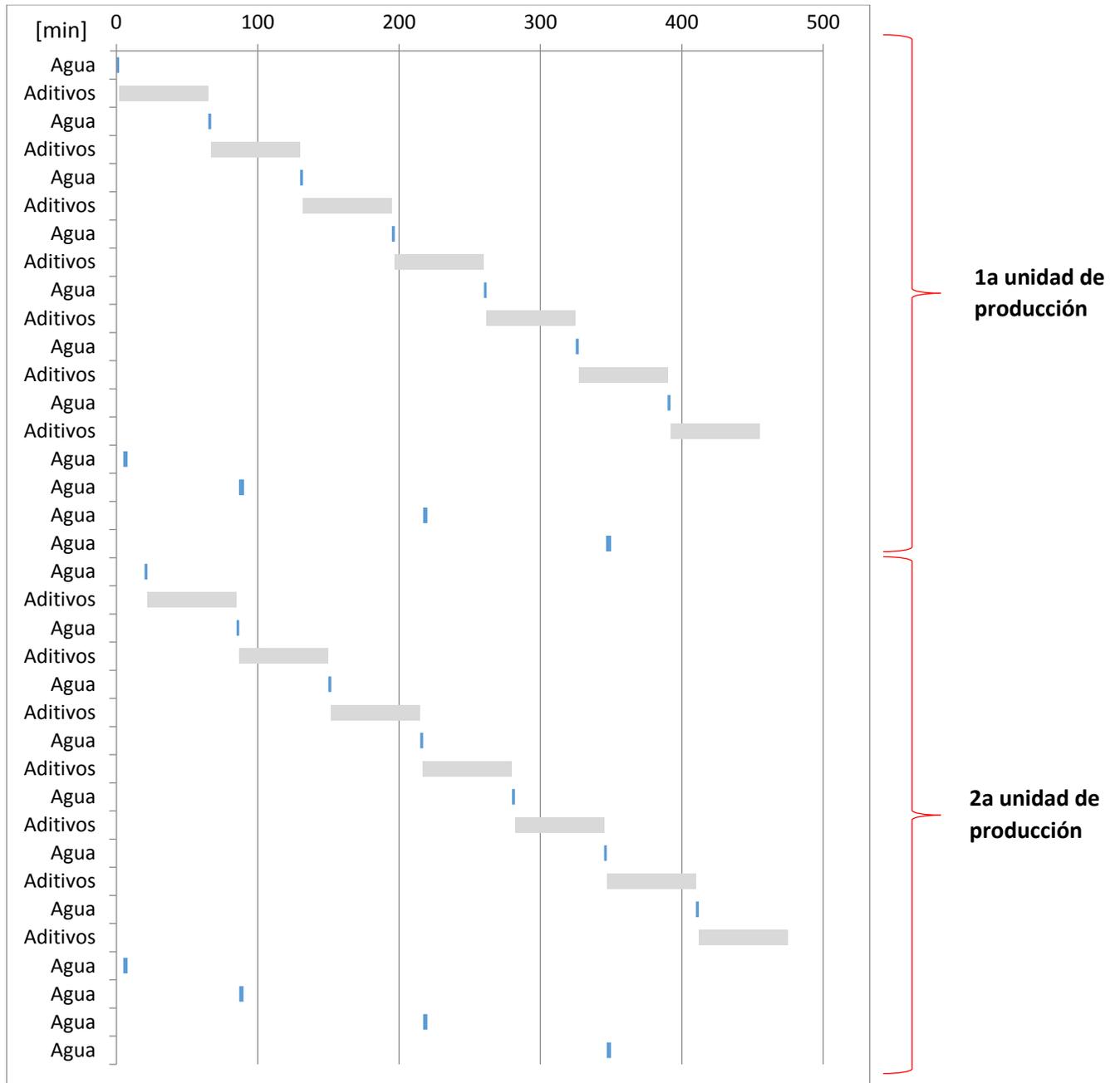
Como se puede observar en el diagrama anterior, tenemos las 2 entradas de agua provenientes de las plantas de tratamiento actuales, esta agua a su vez, alimenta a los tanques de almacenamiento correspondientes. Del lado derecho están modeladas las producciones de cada



producto considerando turnos de producción y la configuración de consumo de agua. También observamos la conexión de tanque de almacenamiento de agua del producto 2 hacia el tanque de almacenamiento de agua del producto 1, éste último es el tanque del cual queremos determinar la dimensión más adecuada.

Recordemos que en este primer plano sólo vemos el diagrama general del problema, ya que todas las variables que vemos alrededor están programadas en un segundo plano de la simulación, en donde se establece la lógica de funcionamiento y las interacciones entre variables.

La gráfica 6 muestra la nueva configuración de consumos del producto 1 durante 1 turno de producción, incluyendo la segunda unidad de producción.



Gráfica 6: Consumos del producto 1 durante 1 turno de producción

Como se puede observar, las configuraciones de consumos y aditivos son exactamente las mismas y estas ocurren en los mismos momentos. El hecho de que los aditivos tengan un periodo más largo de adición, no implica que sea una mayor cantidad, en realidad es el agua el elemento que más se utiliza para la fabricación de ambos productos.

Para efectos de esta simulación, al igual que para la de ANTARES, se está asumiendo que las adiciones tanto de las plantas de tratamiento de agua como del flujo “pulmón” que vendrá del tanque de almacenamiento del producto 2 al nuevo tanque de almacenamiento del producto 1 tendrán físicamente alguna clase de control, el cual hará que se activen las adiciones cuando el tanque lo necesite, es decir si el nivel del agua en el tanque llega a un máximo, esta adición se detendrá y se volverá a activar cuando se empiece a vaciar

Además, también se está considerando la mitigación del riesgo microbiológico para el flujo del agua “pulmón” que vendrá del tanque de almacenamiento del producto 2 al nuevo tanque de almacenamiento del producto 1, por lo cual, la manera de realizar este flujo de agua será mediante la instalación de un “loop” de agua con el fin de cumplir estos requerimientos que especifican que el agua debe de estar un tiempo de contacto mínimo con el agente sanitizante alrededor de 8 minutos.

Debido a que el equipo de modelado y simulación contaba también con otro software de simulación llamado *IDEAS*, y a que había dado resultados favorables en otros proyectos de simulación, se decidió simular el mismo problema también en este software, con el fin de verificar los resultados y validar el uso de la nueva herramienta.

“El simulador dinámico IDEAS, es una de las herramientas de simulación más importantes del mundo, ayuda a las industrias a hacer sus procesos más rápidos, más suaves, más seguros y más económicos, también es el estándar de simulación para muchas empresas de minería.”<sup>2</sup>



Figura 6: Logotipo del software IDEAS

Contiene muchas bibliotecas específicas de la industria que permiten el modelado de una instalación a un nivel macro. Sus potentes capacidades de estado estable permiten la realización de balances de masa y energía en estado estacionario, el seguimiento de los componentes, compuestos, elementos, flujo y la concentración, y el manejo de las distribuciones de tamaño de partícula.

### c. Variables de decisión y de respuesta

Para esta simulación establezcamos a manera de ejemplo las siguientes condiciones para la operación de fabricación de nuestros 2 productos:



Producto 1	Producto 2
✓ 2 unidades de producción	✓ 1 unidad de producción
✓ 3 turnos de producción	✓ 3 turnos de operación
✓ Tanque de almacenamiento de X [ton]	✓ Tanque de almacenamiento de 15 [ton]
✓ Planta de tratamiento de agua de 5 [ton/hr]	✓ Planta de tratamiento de agua de 15

Tabla 4: Variables de producción

### Escenarios de solución

Para este proyecto se simularon los siguientes 2 escenarios:

#### 1er escenario

Contemplaba todas las variables y consideraciones antes mencionadas, con el objetivo de determinar el tamaño ideal del tanque de almacenamiento con el que seríamos capaces de soportar la segunda unidad de producción del producto 1 y los gastos instantáneos de la fabricación de los dos productos.

#### 2do escenario

Este escenario contemplaba el momento en el que la nueva planta de tratamiento de agua para la fabricación del producto 1 sería instalada, por lo que solamente tendríamos agua proveniente del sobrante del tanque de almacenamiento del producto 2 y queríamos saber si íbamos a ser capaces de soportar la producción de ambos productos solamente utilizando la planta de tratamiento de agua del producto 2 y los tanques de almacenamiento de ambos productos, o en su defecto, cuál sería la producción máxima que podríamos soportar con el agua que teníamos disponible.

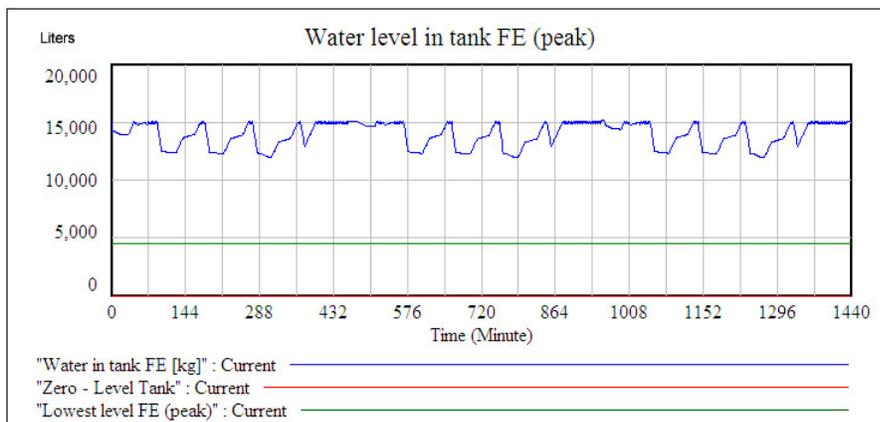
Para obtener este resultado final, se realizaron diversos ejercicios jugando entre el tamaño del tanque de almacenamiento del producto 1 y el flujo “pulmón” que estaríamos tomando del tanque de almacenamiento del producto 2, ya que no teníamos que afectar a esta última producción, por lo que un objetivo secundario de la simulación era obtener este flujo “pulmón” ideal.

d. Análisis de resultados

1er escenario

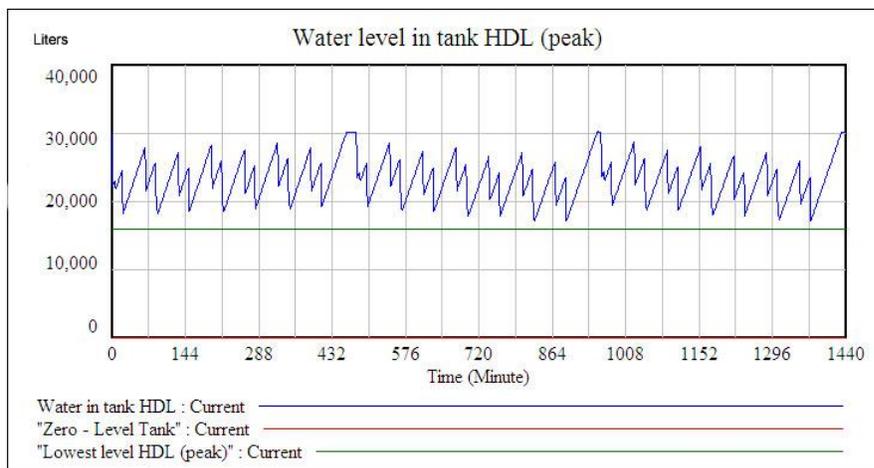
En las gráficas 7 y 8 podemos ver los niveles de agua de los tanques de almacenamiento de ambos productos al estar interactuando con las condiciones de producción previamente establecidas, las cuales, se pueden observar del lado derecho de ambas gráficas.

Para efectos de este escenario, las variables del lado derecho que están escritas en color azul y verde son prácticamente fijas, las variables que están en la parte de en medio de color naranja son realmente con las cuales se tuvo que interactuar para obtener los valores óptimos.



Gráfica 7: Nivel de agua del tanque de almacenamiento del PRODUCTO 2

Shifts FE  
← 3 →  
Inlet Rate FE  
[kg/min]  
← 250 →



Gráfica 8

Rate lung  
(FE-HDL) [kg/min]  
← 150 →  
Tank size [kg]  
HDL  
← 30000 →  
Shifts HDL  
← 3 →  
Inlet Rate  
[kg/min] HDL  
← 83.33 →  
Main mixes  
← 2 →

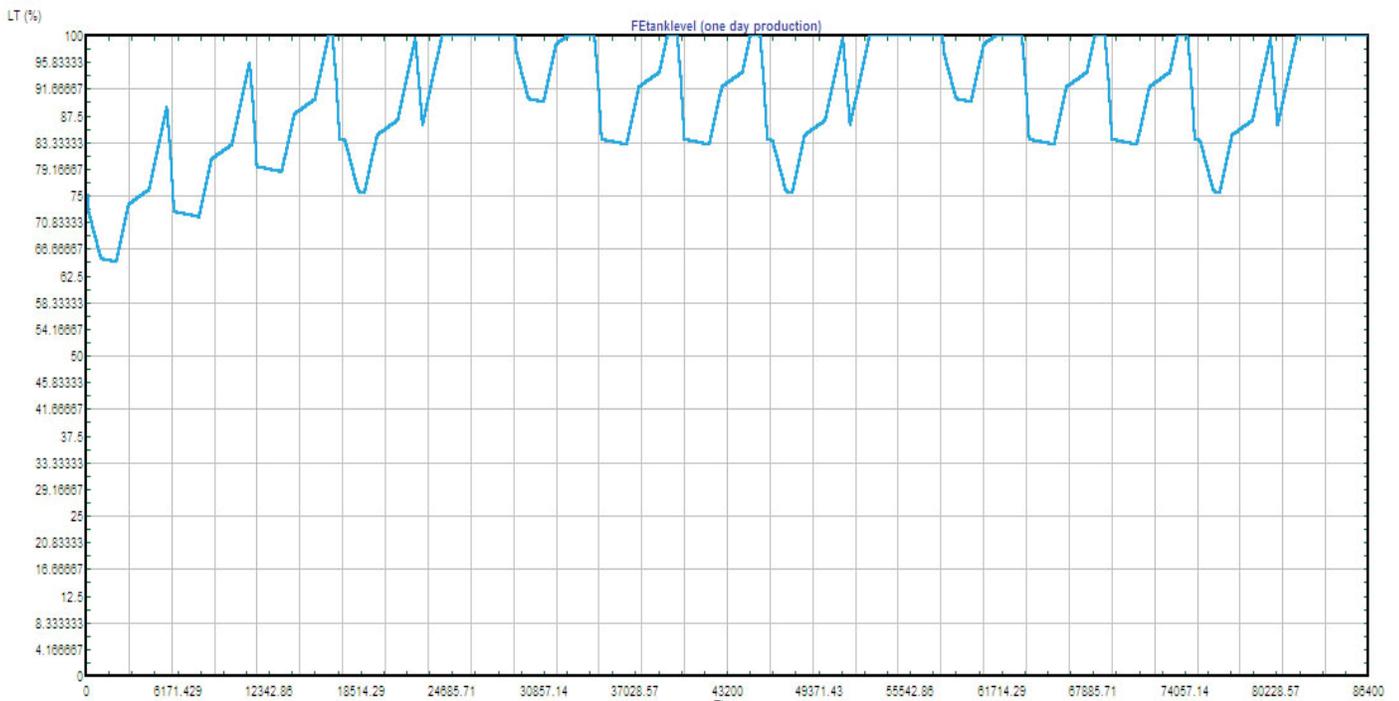
Gráfica 8: Nivel de agua del tanque de almacenamiento del PRODUCTO 1



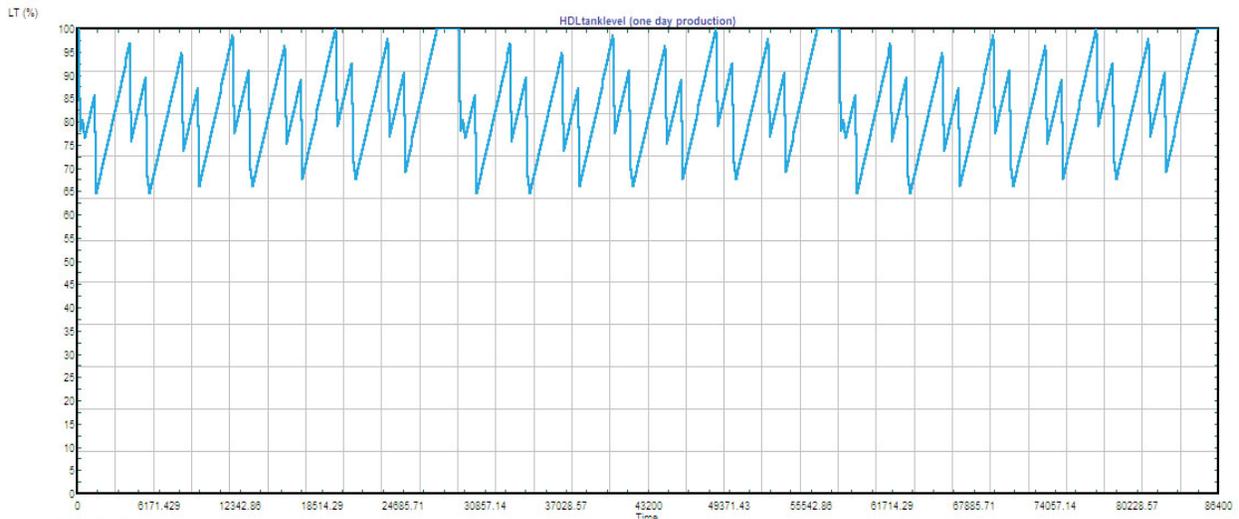
En este ejercicio se observa que el tamaño del nuevo tanque de almacenamiento de agua para el producto 1 era de 30 [ton] y que el flujo “pulmón” óptimo era de 9[ton/hr], con lo que no afectábamos la operación de fabricación del producto 2 y soportábamos la operación de la nueva unidad de producción del producto 1. Para ambas gráficas, observamos una línea de color verde, la cual indica el nivel mínimo de agua que debemos de tener en todo momento para cumplir con los requerimientos microbiológicos y que prácticamente es el nivel de agua que estamos manejando como límite para la simulación, aun cuando tenemos más agua disponible.

Como se mencionó anteriormente, con el fin de realizar una doble verificación de esta simulación, se modeló y simuló el mismo problema con otro software llamado IDEAS, el cual permite realizar simulaciones más avanzadas. Lo que se quería lograr, era evaluar la calidad de los resultados de ambos programas aplicados al mismo problema y con esto garantizar la confiabilidad de estos y así tener más opciones de herramientas a utilizar.

Los resultados obtenidos con el programa IDEAS fueron contundentes, corroboraron la primera simulación.



Gráfica 9: Nivel de agua del tanque de almacenamiento del PRODUCTO 2



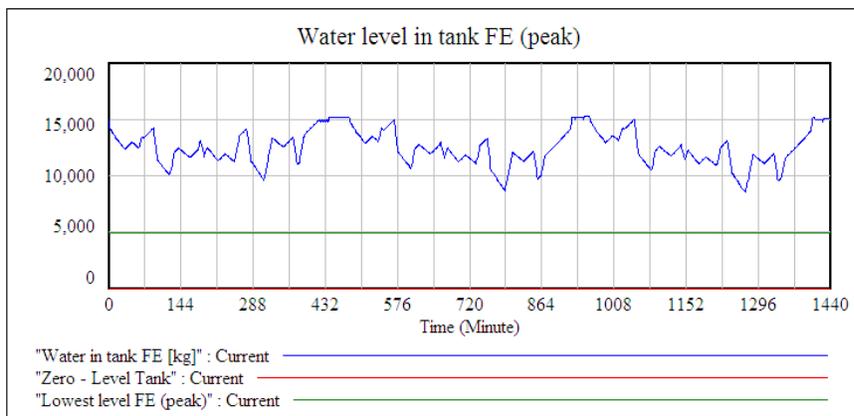
Gráfica 10: Nivel de agua del tanque de almacenamiento del PRODUCTO 1

Como se puede observar en las gráficas 9 y 10, los resultados son prácticamente los mismos. Se pueden notar algunas diferencias en las curvas de las gráficas; sin embargo, éstas no son relevantes para nuestros resultados. Una las diferencias es que en las gráficas de IDEAS, las unidades para el nivel de agua de los tanques de almacenamiento están expresadas en porcentaje, mientras que VENSIM las maneja con valores absolutos.

Se concluyó que este escenario de producción era viable, utilizando los valores para el tamaño del tanque y el flujo “pulmón” antes mencionados

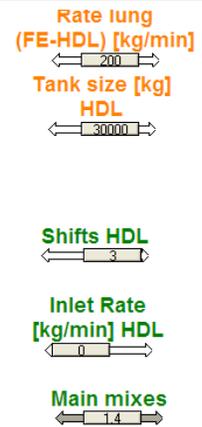
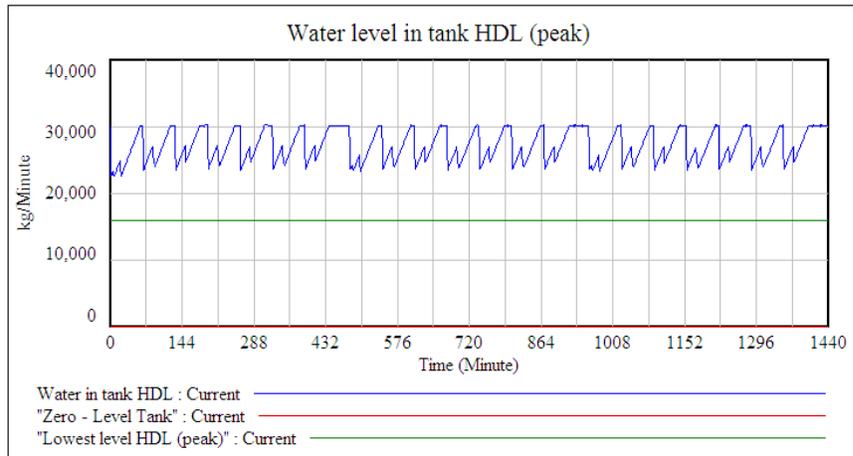
### 2do escenario

Para efectos de nuestro ejemplo los resultados fueron los siguientes:



Gráfica 11

Gráfica 11: Nivel de agua del tanque de almacenamiento del PRODUCTO 2



Gráfica 12: Nivel de agua del tanque de almacenamiento del PRODUCTO 1

En las gráficas 11 y 12 podemos observar como el nivel de agua del tanque de almacenamiento del producto 2 se ve más afectado, debido a que le estamos exigiendo mayor flujo para cubrir las necesidades de producción del producto 1; sin embargo, el agua disponible no es suficiente para soportar las 2 unidades de producción del producto 1, y de acuerdo a nuestra simulación, lo máximo que podríamos soportar es 1.4 unidades de producción.

Se concluyó que el segundo escenario no era viable con las condiciones establecidas y que la única manera de no afectar la operación del producto 2, sería disminuyendo la carga de producción del producto 1.

**e. Recomendaciones**

En la simulación real los resultados de ambos escenarios fueron los mismos a los que se plantearon en este ejercicio. Se obtuvo el tamaño óptimo para un nuevo tanque de almacenamiento de agua que sería instalado para soportar el gasto instantáneo de la operación del producto 1 el flujo “pulmón” óptimo que podríamos extraer del tanque de almacenamiento de agua del producto 2 sin afectar su operación

De los 2 escenarios planteados. El primero de ellos es completamente viable, mientras que el segundo no lo era, ya que si quería cubrir toda la necesidad de agua del producto 1 solamente tomando el agua remanente del producto 2, afectaríamos esta última producción.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**



Los resultados obtenidos se entregaron al equipo de trabajo encargado de este proyecto para la toma de decisiones; junto con la recomendación de producción que la simulación comprobaba.

Inlet Rate [kg/min] lung	Tank Size [ton]	Initial Water: 100% of Tank Size [TON]			
		15	20	25	30
50		✗	✓	✓	✓
100		✗	✓	✓	✓
150		✗	✓	✓	✓
200		✗	✓	✓	✓
250		✗	✓	✓	✓

**Inlre rate FE: 15 ton/hr**

**Inlet rate HDL: 30 ton/hr**

**BCT FE: 99 min**

**BCT HDL: 65 min**

**B2B batches per shift FE: 4**

**B2B batches per shift HDL: 7**

**Contact time: 8 min.**

Tabla 5: Resultados finales de la simulación del proyecto GUARANÁ

## REVOLUTIONS: Validación de modelo de integración de línea

Este proyecto nació de una iniciativa del equipo global de modelado y simulación, en la cual se pretendía modelar una línea completa de producción de la planta Vallejo en un software llamado PlantSimulation, incluyendo las características físicas de la línea de transporte, las máquinas y la lógica de producción, con el fin de simular lo que pasaba en la línea de producción cuando teníamos algún problema, que máquinas se detenían y por cuánto tiempo. Lo anterior se hacía mediante una serie de pruebas estáticas y dinámicas que verificaban la integridad del modelo.

### a. Objetivo

El objetivo de este proyecto era comprobar el protocolo de validación de modelos de integración de líneas usando PlantSimulation e identificar áreas de oportunidad en la línea física que pudieran mejorar la producción.

“Plant Simulation es una herramienta de simulación de eventos discretos que nos ayuda a crear modelos digitales de los sistemas logísticos (como la producción), de modo que se pueden explorar las características de un sistema y optimizar su rendimiento. Estos modelos digitales

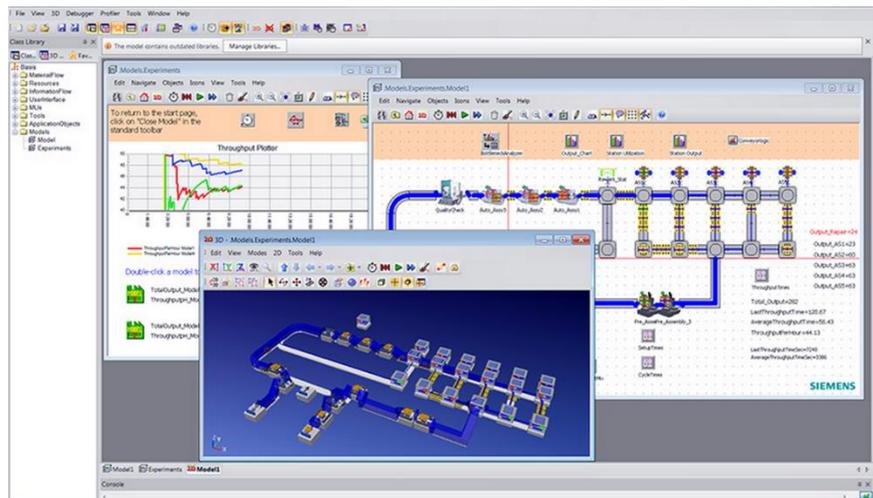


Figura 7: Software PlantSimulation

permiten ejecutar experimentos y escenarios hipotéticos sin perturbar los sistemas de producción existentes, o cuando se utiliza en el proceso de planificación, mucho antes de que se instalen los sistemas de producción reales. Herramientas de análisis extensivos, como el análisis de cuello de botella, las estadísticas y los gráficos permiten evaluar diferentes escenarios de fabricación. Los resultados proporcionan la información necesaria para tomar decisiones rápidas, confiables y más inteligentes en las primeras etapas de la planificación de la producción.”<sup>3</sup>

Para este proyecto ya se tenía un modelo construido; sin embargo, debido a que era un modelo viejo y algunos elementos de la línea física no estaban considerados, fue necesario rehacerlo prácticamente desde cero. Para esto contábamos con 2 protocolos de pruebas: “Procedimiento de pruebas estáticas” y “Procedimiento de pruebas dinámicas”, los cuales sirvieron de guía para la creación y validación del modelo.

### b. Alcance

Fue necesaria una ventana de tiempo de la línea de producción completa para realizar algunas de las pruebas y medir los tiempos de aceleración y desaceleración de las máquinas. El resultado de estas pruebas fue un documento que detallaba las características físicas de la línea de producción necesarias para realizar el modelo electrónico. Además, se realizó un esquema como el que se muestra en figura 8:

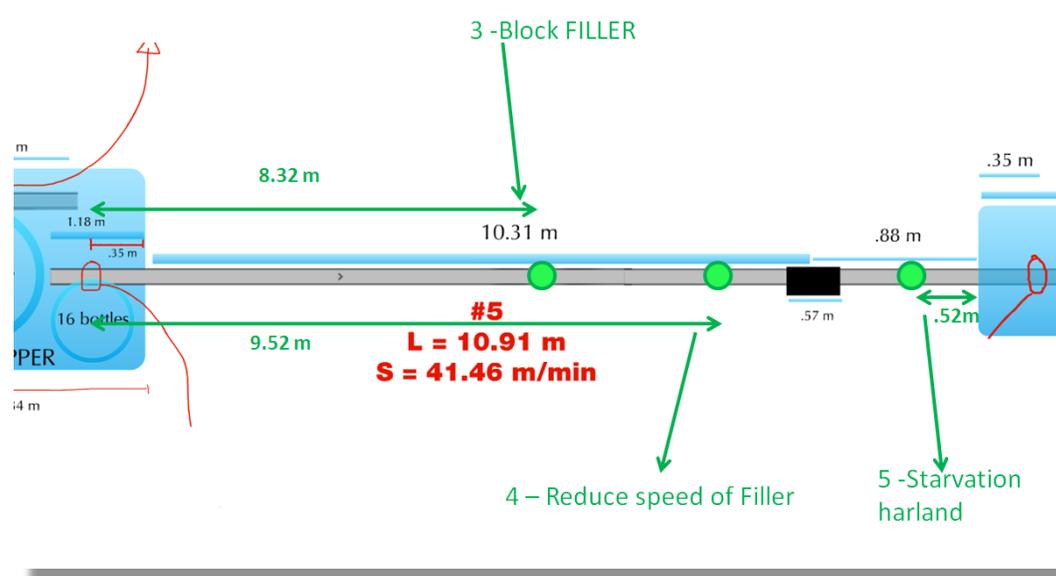


Figura 8: Diagrama de la línea de producción

En el esquema anterior se puede observar que las distancias de la cinta transportadora así como su velocidad están especificadas, de la misma manera se ubicó cada uno de los sensores de bloqueo y de reinicio a lo largo de la línea de producción. Por último, se tomaron medidas de las máquinas para poder obtener las distancias de las cintas transportadoras que estaban dentro de ellas y a las que se les podía medir fácilmente debido a su ubicación. Este primer esquema fue de mucha ayuda para poder ir depurando el modelo final en el programa PlantSim, ya que fueron necesarios varios recorridos por la línea física para corroborar que todo estuviera en orden y no existiera algún problema de funcionamiento durante la simulación. Además de la construcción del modelo, tuve que aprender a utilizar el lenguaje de programación de PlantSim para incluir la lógica de la línea de producción. En la figura 9 se puede observar una parte de este modelo:

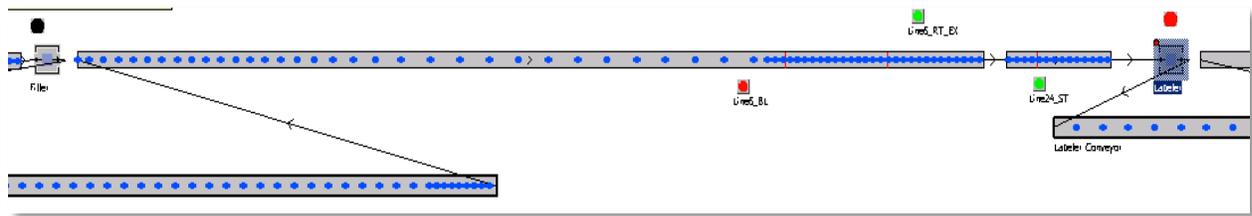


Figura 9: Línea de producción en PlantSim

Las pruebas dinámicas proporcionan entendimiento acerca de las interacciones entre cada par de máquinas en el sistema, como resultado de una cierta falla de algunas de las máquinas, así como la ubicación y los retrasos de tiempo de cada sensor, la longitud y la velocidad de cada cinta transportadora y la velocidad de las máquinas. En particular, en estas pruebas dinámicas, nos centramos exclusivamente en los efectos de los sensores que detienen y reinician cada par de máquinas. En general, el modelo de estudio de cada par de máquinas es el siguiente:

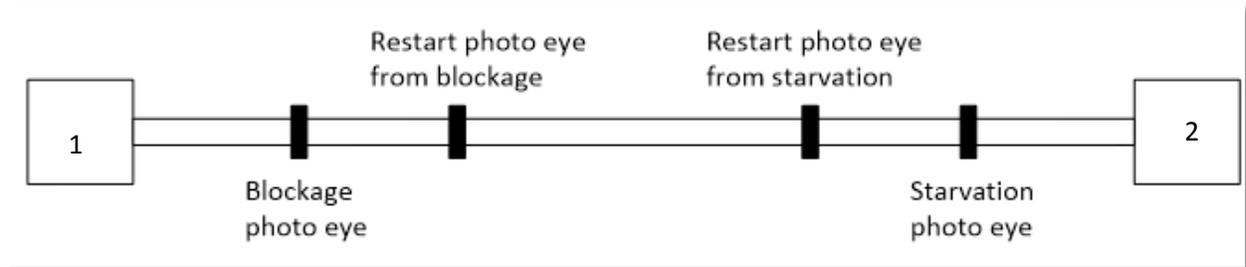


Figura 10: Diferentes tipos de sensores que se pueden tener entre cada par de máquinas

En la figura 10, una vez que se activa el sensor de bloqueo debido al acumulamiento del material, la máquina 1 se detendrá, y es hasta que el sensor de reinicio de bloqueo se activa, cuando vuelve a funcionar. Cuando sensor de falta de material se activa, la máquina 2 se detiene y no es hasta que se activa el sensor de reinicio de falta de material, cuando vuelve a reiniciar la operación.

### c. Variables de decisión y de respuesta

La estrategia de los procedimientos de pruebas es usada para validar que el modelo se comporta como realmente lo hace la línea física; con lo anterior, se pueden hacer predicciones de lo que pasará en la línea física bajo diferentes escenarios en el futuro.

Las pruebas estáticas se realizan fuera de línea y se enfocan principalmente en medir las características físicas de la línea de producción:

- ✓ Tamaño de la botella del producto
- ✓ Tamaño de la caja
- ✓ Longitud de cada banda transportadora
- ✓ Velocidad de cada banda transportadora
- ✓ Ubicación de cada sensor

- ✓ Tiempo de encendido y tiempo de apagado de cada sensor
- ✓ Velocidad de cada máquina involucrada en la línea
- ✓ Tiempo que tarda cada máquina en alcanzar su velocidad operativa partiendo desde 0
- ✓ Tiempo que tarda cada máquina en llegar a 0 a partir de su velocidad operativa
- ✓ Lógica del separador de botellas

Para realizar este tipo de pruebas se utilizó vernier, cinta métricas, calculadora, cronómetro, tacómetro, cámara de video y de fotografías con el fin de realizar un análisis lo más exacto posible de la línea de producción.

Debido a que estas pruebas contemplaban tiempos de activación y desactivación de sensores, fue necesario revisar directamente en la configuración y/programación de los PLC, los tiempos que tenían asignados los sensores de cada una de las máquinas y los que se encontraban a lo largos de las cintas transportadoras.

#### d. Escenarios de solución

Teníamos 6 diferentes tipos de pruebas dinámicas en las cuales comprobábamos la lógica de errores de cada par de máquinas consecutivas. Lo que se tuvo que hacer en esta etapa era provocar los errores que estaban descritos en cada una de las pruebas dinámica y analizar el comportamiento de la línea de producción, así como medir tiempo de reinicio de máquinas y activación de sensores:

- ✓ 1.- Una falla en la segunda máquina provoca un bloqueo de la primer máquina:

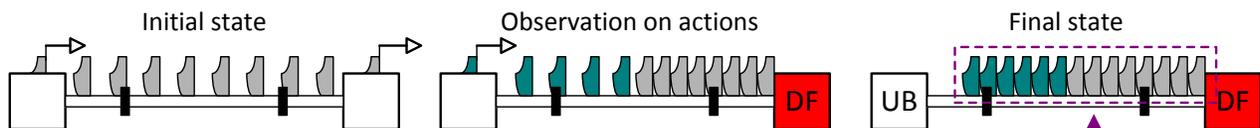


Figura 11: Prueba dinámica 1

1. If upstream gets blocked during ramp-down
2. # of bottles on conveyor after upstream gets blocked
3. Time to block upstream (optional)

- ✓ 2.- Un reinicio de la segunda máquina causa que ésta se quede sin material:

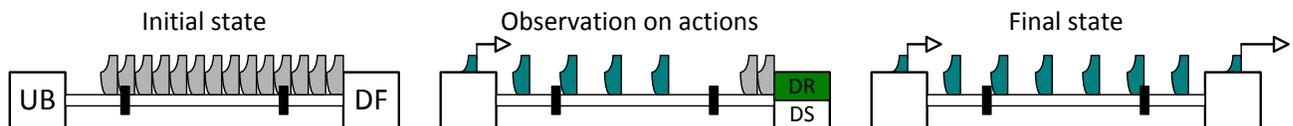


Figura 12: Prueba dinámica 2

1. If downstream will be starved
2. Time before starvation

- ✓ 3.- Un reinicio de la segunda máquina causa que la primer máquina quede bloqueada

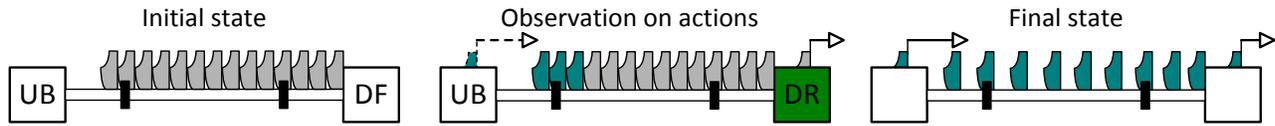


Figura 13: Prueba dinámica 3

1. If upstream will be blocked
2. # of blockages during observation period
3. Time to 1st upstream block (optional)

- ✓ 4.- Una falla de la primer máquina causa que la segunda máquina se quede sin material:

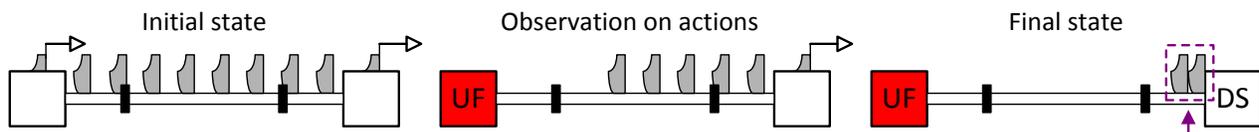


Figura 14: Prueba dinámica 4

1. If downstream gets starved during ramp-down
2. # of bottles on conveyor after downstream gets starved
3. Time to starve downstream (optional)

- ✓ 5.- Un reinicio de la primer máquina causa que ésta misma quede bloqueada:

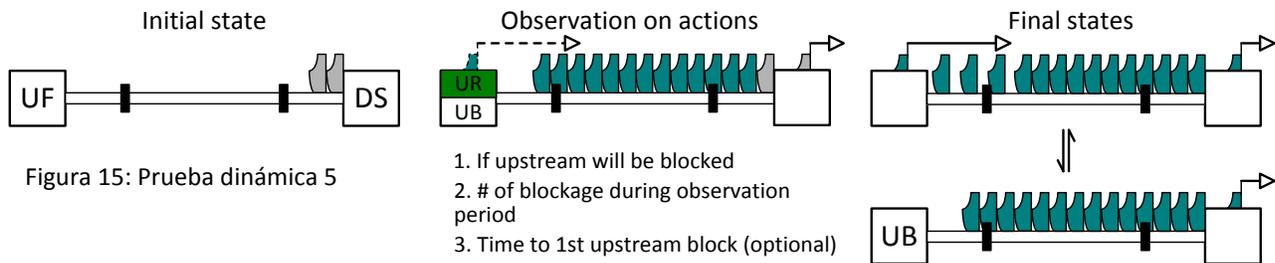


Figura 15: Prueba dinámica 5

1. If upstream will be blocked
2. # of blockage during observation period
3. Time to 1st upstream block (optional)

- ✓ 6.- Un reinicio de la primer máquina causa que la segunda máquina se quede sin material:

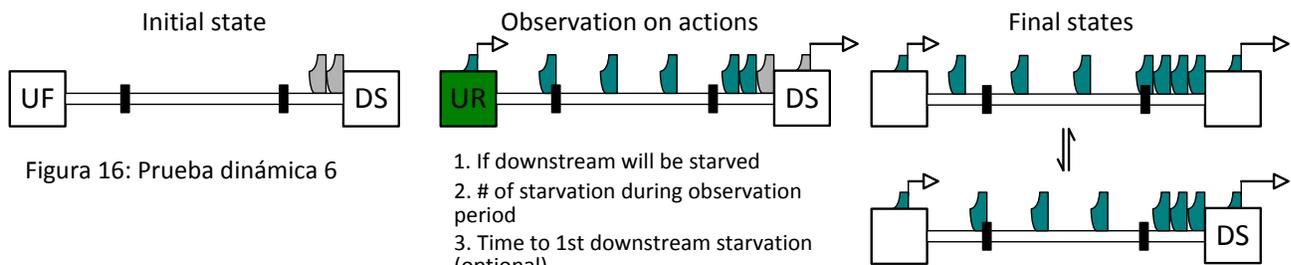


Figura 16: Prueba dinámica 6

1. If downstream will be starved
2. # of starvation during observation period
3. Time to 1st downstream starvation (optional)



#### e. Análisis de resultados

Estas 6 pruebas dinámicas son el estándar que se usó para corroborar la lógica de fallas de la línea de producción. Para realizar este tipo de pruebas se tomó en cuenta que los sensores tanto de bloqueo como de reinicio de cada máquina y de las cintas transportadoras no estaban en la misma posición en todos los casos, ni tampoco era necesario que estuvieran juntos (que en algunos casos sí sucedía). Además, se requirió del apoyo del personal operativo para realizar cada una de las 6 pruebas en cada par de máquinas, como se puede inferir, esto tomó varias sesiones en donde se nos concedieron ventanas de tiempo para terminar con estas pruebas. También tomamos en cuenta que algunas máquinas contaban con sensores que hacían que la velocidad aumentara o disminuyera; lo cual, también fue aplicado al modelo con ayuda de programación.

Lo primero que se realizó fue correr la línea completa en condiciones normales durante 2 minutos y observar si teníamos algún problema, como paros de máquinas o caídas de botellas en las cintas transportadoras, y posteriormente se provocaron manualmente las fallas en cada par de máquinas así como la falta de material y se documentó lo que sucedía en cada uno de los casos mencionados anteriormente. El resultado de las pruebas dinámicas fue un documento en el que se detalló el comportamiento de cada par de máquinas en cada caso, principalmente se mencionaba lo siguiente:

- ✓ Si existía un sensor de bloque o no
- ✓ Si existía un sensor de reinicio o no
- ✓ Si las cintas transportadoras se llenaban de botellas debido a una falla o no
- ✓ El número de botellas que quedaban atoradas después de una falla
- ✓ Si las cintas transportadoras se quedaban sin material después de alguna falla
- ✓ Cuantas veces sucedía la misma falla

Como ya teníamos el modelo electrónico creado y también se había implementado mediante programación la lógica de la línea de producción que se había obtenido gracias a las pruebas dinámicas, lo que se tuvo que hacer fue correr la simulación de la línea y probar cada uno de los escenarios y se tuvo que comprobar si obteníamos el mismo comportamiento tanto en la línea física como en la simulación. En caso de que encontráramos incongruencias significativas de comportamiento, checábamos si los valores medidos eran correctos y se ajustaban, de lo contrario se podía dar el caso de que existiera algún problema con la operación de la línea física.



#### f. Recomendaciones

Al final se logró exitosamente la validación de la línea de producción, confirmado el comportamiento del modelo de electrónico con la línea física que se tenía instalada en la planta Vallejo. Con lo anterior, quedaba verificado el protocolo para validación de la integración de líneas utilizando el software PlantSimulation, lo cual significaba que ahora se podía utilizar con seguridad para su aplicación global en las líneas de producción de la empresa y en futuro crear un estándar de diseño y fabricación de líneas de producción para un producto en específico.

Además, mediante la simulación del modelo de la línea se lograron detectar algunos puntos de mejora de la línea física que podrían ayudar a mejorar el rendimiento de esta.

## MAKE-PACK SURGE MODEL

### a. Objetivo

El objetivo del proyecto era desarrollar una herramienta que solventara la necesidad que tenía la compañía de poder obtener información que le sirviera de guía para diseñar líneas de producción considerando tanto la etapa de fabricación y la etapa de empaque de algún producto en específico. En este caso no estamos hablando de dimensiones de la línea de producción física o de la ruta que deberían de seguir las bandas transportadoras. Esta herramienta lo que te daba era la configuración más óptima en cuanto al número de líneas de empaque en combinación con el número de unidades de producción con las cuales la compañía podría solventar su demanda de producción.

### b. Alcance

Este trabajo de simulación es un modelo realizado con dos programas diferentes, el primero de ellos es Microsoft Excel que es la herramienta con la cual todos los datos son procesados y todos los cálculos se realizan, el segundo es un software llamado IDEAS, una herramienta de simulación dinámica que toma la información digerida de Excel y realiza un análisis dinámico con el fin de dar a los usuarios información gráfica y datos detallados de lo que está sucediendo en cada escenario.

Para nuestros propósitos específicos IDEAS está trabajando como un solucionador, debido a su gran dinamismo nos permite obtener resultados gráficos para un mejor análisis de las soluciones.

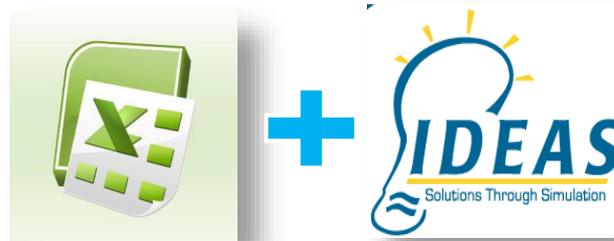


Figura 17: Herramientas utilizadas en el modelo

La estructura del modelo se basa en las necesidades de análisis de rendimiento de la empresa.

El modelo tiene 3 partes principalmente:

- Fabricación.
- Plan de producción.
- Empaque.



Para la parte Fabricación se está asumiendo un número concreto de unidades de producción que son capaces de operar una cierta cantidad de líquido por año. El modelo es capaz de interactuar con 1 o 2 unidades de producción.

Se consideró un número específico de tanques para nuestro líquido, que funciona como un amortiguador para las líneas de envasado. El modelo es capaz de manejar hasta 8 tanques, lo que significa que se pueden utilizar cualquiera de estos, dependiendo de sus necesidades de producción.

También se utilizó una herramienta desarrollada por la compañía para crear programas de producción que se importan a nuestro modelo y le da la entrada para el consumo del material.

El modelo es capaz de manejar hasta 10 líneas de empaque diferentes, lo que significa que se pueden utilizar cualquiera de estas 10 líneas, dependiendo de sus necesidades de producción.

### c. Variables de decisión y de respuesta

Todo es variable en el modelo, al igual que el número de tanques y el número de líneas de envasado. El usuario puede especificar todas las características de los escenarios que el modelo va a simular.

Esta parte del modelo (figura18) se construye la estructura de su escenario, por lo que el usuario tiene que introducir las variables que quiere considerar de acuerdo a las necesidades de producción.

# Packing Lines:	3
White Base Tanks:	2
Use GTO Filling rates?:	Yes
BCT[min]:	35
WB tanks size[TON]:	100
Simulation Duration [min]:	8640
Addition Time [min]:	5
Batch Size[mt]:	10
Compaction Factor[%]	0

Create Model Structure

Figura 18: Variables del modelo

El modelo fue programado para ser capaz de manejar información sobre las características específicas de líneas de envasado, por ejemplo demanda para diferentes marcas, así como algunos factores de eficiencia.

#### d. Escenario de solución

El modelo de IDEAS es complejo, porque estamos usando una lógica específica para el control de nuestro sistema, además, el modelo fue construido para manejar desde el más simple de los escenarios hasta el más complejo de ellos.

Con todas las entradas, el modelo realiza los cálculos y preparar los datos para ser exportados a nuestras solucionador en IDEAS:

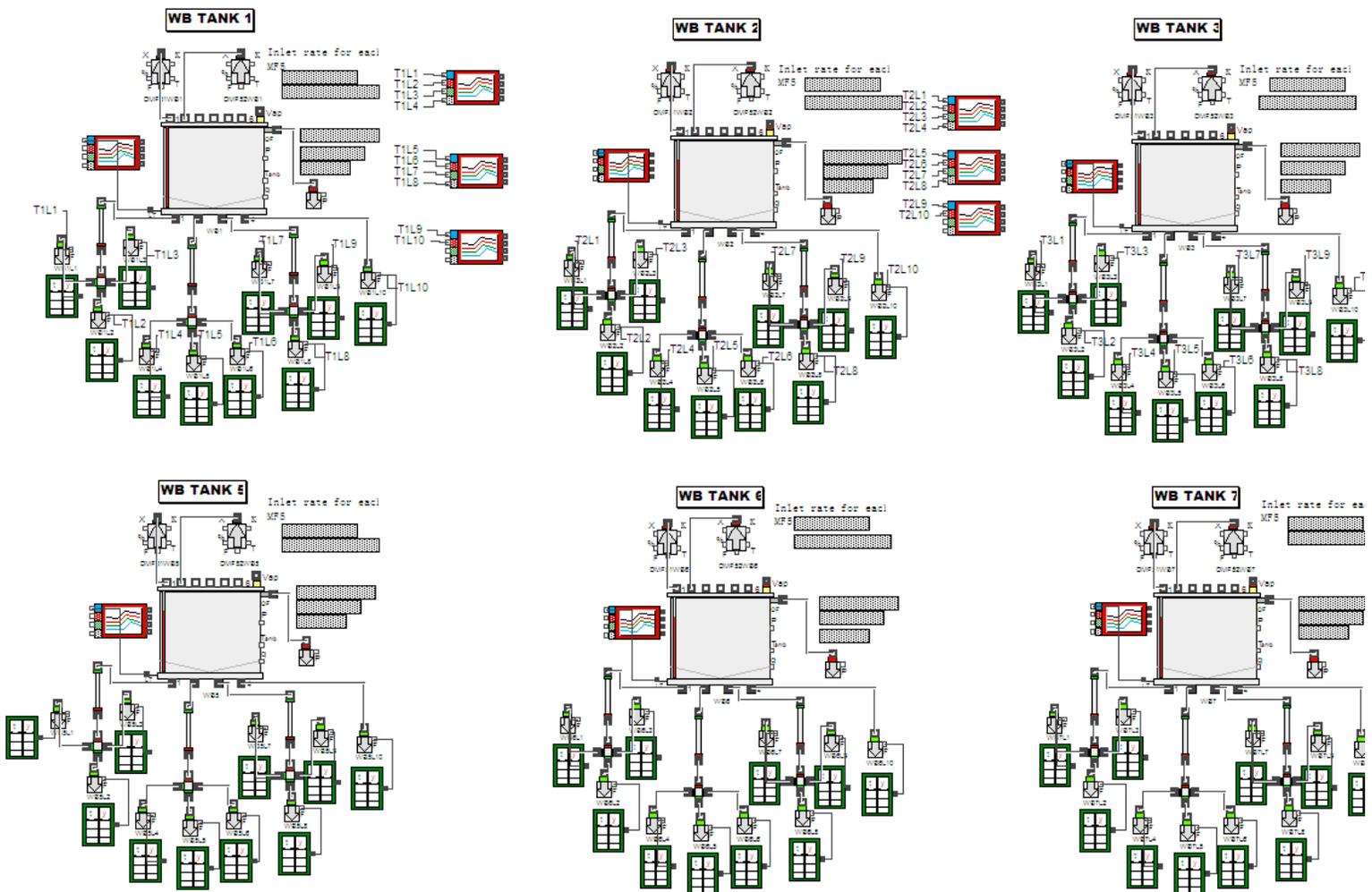


Figura 19: Esquema del Make-Pack Surge Model



## UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA



El modelo se pone en marcha de forma automática, y al final nos está dando una gran cantidad de salidas tanto gráficas como datos en bruto en excel, que puede ser fácilmente analizada con el fin de tener una mejor comprensión de lo que está sucediendo en cada momento de la simulación.

Debido a que mi estancia en la empresa terminó, yo ya no utilicé la simulación anterior para obtener resultados de algún proyecto en específico; sin embargo, al final el trabajo que se realizó era capaz de hacer el análisis de rendimiento para diferentes escenarios de producción con el fin de ayudar a las diferentes plantas de la empresa a tomar decisiones sobre el diseño de ingeniería de una línea de producción, así como la planificación y el control de la producción.



---

## CONCLUSIONES

Con el trabajo desarrollado se lograron obtener muy buenos resultados en cada uno de los proyectos en los que se aplicó el modelado y la simulación, de hecho, el diseño de los elementos de algunos de los proyectos en la realidad se basó en los resultados obtenidos para su implementación, generando ahorros a la empresa al retrasar o incluso evitar la inversión.

El departamento de Ingeniería Regional decidió continuar con el desarrollo e implementación del modelado y simulación en otros proyectos y a expandir el grupo, gracias a los resultados favorables que se habían obtenido.

Se pudo concluir que la simulación ofrece poderosas ventajas, aún ahora en medio de tantas alternativas tecnológicas y es muy probable que el desarrollo de su potencial continúe a través del tiempo. Aunque también tiene algunas desventajas, éstas irán disminuyendo con el paso del tiempo, gracias a las herramientas que se están empezando a emplear en conjunto con la simulación como son: metodologías, desarrollo de hardware y de software más avanzado, y decrementos en los costos de los mismos.

Mi estancia en la empresa Procter & Gamble me apoyó a crecer tanto profesionalmente como personalmente, ya que desde el inicio trabajé en proyectos importantes para la compañía y siempre tuve el apoyo de todos mis compañeros; por lo cual me sentí muy comprometido con mi trabajo, además estaba realizando cosas que me apasionaban, y esto me motivó a dar mejores resultados y a seguir aprendiendo, no sólo de los ámbitos técnicos de mis actividades en específico, sino también de los procesos productivos de la planta de manufactura, los cuales me parecieron muy interesantes al analizar la variedad de equipos y sistemas que tienen que interactuar para poder fabricar un producto. Además, mi dominio y seguridad en el idioma inglés mejoró significativamente, lo cual me ha abierto nuevas oportunidades laborales y me ha ayudado a continuar desarrollándome en mi actual campo laboral.

Por lo anterior le agradezco infinitamente a la empresa la oportunidad que me brindó de desarrollarme en un campo retador e innovador.



---

## Bibliografía:

- Autor: Ventana Systems Inc.
  - Año: 2014
  - Título del sitio: Vensim Software
  - Recuperado de <http://vensim.com/vensim-software/>
  
- Autor: Procter & Gamble Corporation
  - Año: 2014
  - Título del sitio web: La Compañía
  - Recuperado de: [http://www.pg.com/es\\_LATAM/MX/compania-p-and-g.shtml](http://www.pg.com/es_LATAM/MX/compania-p-and-g.shtml)
  
- Autor: ANDRITZ
  - Año: 2014
  - Título del sitio web: IDEAS simulation software downloads
  - Recuperado de: <http://www.andritz.com/products-and-services/pf-detail.htm?productid=18154>
  
- Autor: Siemens
  - Año: 2014
  - Título del sitio web: Plant Simulation
  - Recuperado de: [http://www.plm.automation.siemens.com/en\\_us/products/tecnomatix/plant\\_design/plant\\_simulation.shtml](http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/tecnomatix/plant_design/plant_simulation.shtml)
  
- Autor: Mauricio Amigo
  - Año: 2012
  - Título del documento: Modelado y Simulación Introducción
  - Recuperado de: [https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2012/1/CC5607/1/material\\_docente/](https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2012/1/CC5607/1/material_docente/)