

3er. Congreso Ibero Americano de Gerencia de Proyectos  
8 al 12 de Julio de 2002  
Caracas - Venezuela

## **SIMULACIÓN DINÁMICA OPERACIONAL EN EL DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DE HIDROCARBUROS BAJO INCERTIDUMBRE.**

Enrique Laya. ExcelTec, C.A. Caracas, Vzla.  
Carlos Velarde. PDVSA. Caracas, Vzla.  
Antonio Cavero. ExcelTec, C.A. Caracas, Vzla.

### **Resumen**

El dimensionamiento de sistemas de manejo, transporte y almacenaje de productos de hidrocarburos frecuentemente se estima sobre conocimiento incierto de los procesos de demanda y capacidad.

El pronóstico de la demanda, por lo general, se hace con base a interpolaciones lineales de escenarios descritos de forma estática. Los escenarios estimados con base a sus combinaciones posibles no considera la interacción entre los procesos de demanda y capacidad.

La capacidad del sistema por lo general se estima sobre la reducción de disponibilidad (coeficientes de disponibilidad) de sus elementos o sistemas. Sin embargo el efecto de la disponibilidad parcial de ciertos elementos no se puede modelar de manera precisa. Igualmente, la interrupción, bloqueo, sorteo y el re inicio de procesos, planificados o involuntarios, no se puede estimar con una descripción simplificada de la demanda y la capacidad.

Por este motivo, es frecuente observar sistemas cuya capacidad no guarda relación con los requerimientos funcionales detallados. Las consecuencias de estas aproximaciones se reflejan en riesgos de funcionalidad parcial o, por el contrario, de capacidad inútil.

La estimación apropiada de requerimientos de capacidad con base a pronósticos de demanda requiere la descripción dinámica de eventos del sistema tal como ocurriría durante la operación real del mismo. Esto implica modelar la incertidumbre sobre los procesos de la demanda y la disponibilidad total o parcial de los elementos que soportan el sistema.

La descripción dinámica de los procesos de demanda y suministro requieren una caracterización estadística de dichos procesos. A partir de técnicas de simulación se pueden generar escenarios de demanda determinísticos que permiten modelar la interacción entre estos y con el sistema. De esta manera se implementan procedimientos de diseño a capacidad alineados con prácticas de incremento de valor para ejecución de proyectos y optimización de infraestructura.

Se describe la metodología de modelaje operacional soportada con herramientas de simulación digital en ambientes discreto y continuo. Se presenta un caso de estudio para el terminal de Aguas Profundas (TAP) realizado en 1999.

**PALABRAS CLAVE:** *Planificación de capacidad - Simulación operacional – Demanda - Capacidad - Soporte de decisiones*

## **1. Introducción**

La planificación de un sistema de transporte y distribución de hidrocarburos debe responder a criterios de rendimiento óptimo dentro de una descripción generalmente incierta de los parámetros operacionales en vigencia durante la vida operativa. La información de entorno, de mayor dificultad de precisar, concierne por lo general a:

1. La irregularidad de llegada de los insumos.
2. Los escenarios de servicio en cuanto a los posibles mercados visualizados en el plan de negocios y, en consecuencia, respecto a los escenarios de despacho de productos en distintas modalidades y combinaciones.
3. La irregularidad en la llegada de los clientes para ejecutar las transacciones.
4. Las interrupciones no planificadas en el transporte por motivos técnicos o ambientales (fallas eléctricas, mecánicas, tormentas, etc.)

## **2. Selección de una metodología.**

Un sistema de transporte y distribución de hidrocarburos comprende típicamente elementos de almacenaje en el origen y en el destino. De acuerdo al mercado servido en el destino, los productos pueden distribuirse a través de llenaderos en tierra (cisternas o ferrocarril) o terminales fluviales o marítimos. El caso que nos concierne es el de un sistema como el que muestra la Fig. 1. En este sistema, se recibe la producción de diferentes segregaciones desde campos de producción aguas arriba en un patio de acopio para luego transportar a través de un poliducto hacia un patio de tanques y terminal marítimo en el que se efectúan operaciones de almacenaje, reposo, certificación, medición fiscal (aforo), mezclas de distintos productos y despacho a tanqueros.

La planificación de un sistema como el mostrado requiere de un proceso complejo en el que deben ser tomadas en consideración una variedad de elementos físicos y operacionales. Por una parte, la metodología seleccionada debe permitir el análisis del sistema en distintas configuraciones que se presentan en la medida que crece la demanda. Esto es, generalmente, una etapa inicial a baja producción y otra posterior a capacidad plena.

Por otra parte el sistema, de acuerdo a condiciones específicas de espacio, restricciones fiscales y tecnologías disponibles puede dotarse de diversas funcionalidades que le

permitan una mayor eficiencia operativa. Para el caso de un sistema como el comentado las funcionalidades de interés son:

- Tanques compartidos o dedicados a cada segregación
- Medición fiscal en línea o mediante tanque calibrado (tanque de aforo)
- Puestos de atraque de diferentes tamaños para tanqueros de diferentes capacidad
- Servicios de productos distintos para cada puesto (en lugar de disponibilidad total para todos los puestos)
- Capacidad de almacenaje repartida en pocos tanques de gran tamaño o en un mayor número de tanques de menor tamaño

Adicionalmente, es deseable medir el rendimiento del sistema y sus configuraciones frente a distintas condiciones físicas y operacionales. Las mas relevantes son:

- Interrupción accidental de operación de transporte por parada accidental, total o parcial, del poliducto
- Interrupción temporal de operaciones en el terminal por mal tiempo
- Efecto limitaciones en la disponibilidad de tanques por mantenimiento

Un procedimiento que metodológicamente soporte un número de escenarios como el mostrado bajo las distintas posibles configuraciones y funcionalidades requiere de herramientas computacionales adaptadas al requerimiento de análisis dinámico de sistemas. La solución basada en la simulación de procesos continuos y discretos en un ambiente integrado es la opción propuesta en este caso. Estas herramientas combinan operaciones puntuales como transacciones discretas con el transporte y acumulación de fluidos. Para realizar un análisis integral del sistema la simulación debe complementarse con procedimientos de ingeniería de valor, para lo cual se requiere simular las configuraciones específicas para estimar su efecto respecto al costo incurrido. Esta metodología complementaria debe basarse en la medición del rendimiento.

### **3. Metrología de rendimiento.**

A los efectos de comparar las bondades y limitaciones de las diversas configuraciones propuestas se hace necesario contar con una metodología que permita cuantificar el rendimiento de cada configuración. El rendimiento se estima sobre la base de un costo presente neto de suministro que toma en cuenta los egresos, inversiones y gastos operacionales, e ingresos en términos de volúmenes de producto despachado descontados a una tasa que refleja el costo del capital de la corporación operadora. Los siguientes elementos forman parte del costo presente neto:

**Inversiones:** Se refiere a las inversiones iniciales o adicionales que requiriese un sistema nuevo o un sistema en operación para cumplir con una configuración específica.

**Gastos operativos:** Comprenden:

Directos: Personal, inspección y mantenimiento, logística y consumibles, tarifas o servicios, seguros y soporte de planes de contingencia.

Indirectos: Reflejan gastos de administración, soporte operacional y overhead.

**Despachos:** Se refiere a los volúmenes cuantificados de productos despachados a clientes durante el período de evaluación.

**Penalidades por atrasos:** De acuerdo a las reglas de negocio existentes cabe esperar que apliquen diversas penalidades como i) Penalidad por atraso en la recepción de tanqueros de suministro como combustible u otros insumos al sistema y, ii) Penalidad por atraso en el llenado de tanqueros. Esta última se relaciona al tamaño del tanquero cliente y se estima con base a una fórmula que depende del tiempo transcurrido entre el aviso de entrada del tanquero (“Notice of Readiness (NOR)”) y la finalización de la operación de carga.

**Ventas diferidas:** Comprende el efecto de diferir ventas de productos por incapacidad física de recuperar la cola de ventas no efectuadas. La pérdida por diferir ventas se estima como:

$$\text{Venta Diferida} = \text{Venta Perdida} \times (\text{Valor de Venta} - \text{Costo de Suministro})$$

Una forma aún mas simple de estimar este efecto es suponer que el costo de suministro es del orden del 30 % del valor de venta para luego estimar la venta diferida como un 30 % del valor de la venta no efectuada.

**Costo Técnico Unitario de suministro:** Es el indicador base en términos del rendimiento del sistema. Refleja el costo descontado de suministro por unidad de volumen. El costo descontado comprende la acumulación de inversiones y gastos indistintamente descontada durante el período de evaluación.

#### **4. Solución basada en simulación.**

La posibilidad de construir un modelo altamente configurable bajo el sistema WITNESS [1] permitió el análisis de las diversas opciones y planes alternos mencionados. A través de este sistema es posible la presentación de los elementos del sistema “en vivo” para facilitar la interpretación de un proceso que puede ser bastante complejo. La interfaz que permite esta visualización presenta los elementos de interés en interacción entre ellos así como aquellos interconectados como tanques y líneas de alimentación.

## **5. Estructura de la solución.**

A efectos de permitir la evaluación sistemática de distintas configuraciones y escenarios se prepara el modelo de forma genérica, esto es, los parámetros del modelo se definen mediante un archivo externo en el que se declaran los valores y “status” de las variables y configuraciones. Tanto el modelo como el archivo de data deben planificarse para soportar la evolución del modelo durante la vida del proyecto. El modelo evoluciona a medida que avanza el proyecto ya que las necesidades de análisis son diferentes.

La herramienta complementaria que se presta de gran utilidad para generar archivos de data es un libro “Excel” a partir del cual se genera toda la información necesaria para definir una sesión de análisis. La información más relevante se resume en la Tabla 1. Un modelo como el descrito requiere cerca de 350 parámetros para definir la sesión. La consistencia de la data es importante a efectos de no desperdiciar tiempo valioso de simulación. Para validar la data se construyen sobre el libro de data de entrada rutinas (“Macros”) que verifican y alertan sobre data inconsistente. En general, se debe verificar un balance de masas detallado entre la producción por segregación aguas arriba, las tasas de bombeo por segregación (incluyendo tiempos de bombeo por lotes) y frecuencia promedio de llegada de tanqueros por su respectivo tamaño.

La Fig. 2 muestra un diagrama simplificado del procedimiento de definición, preparación y ejecución de una sesión de simulación. La estabilidad de un modelo complejo es delicada, esta es susceptible de ser afectada por desbalances menores de masa (flujos) y / o tamaños de lotes o tanqueros sin correspondencia exacta. Cada sesión generalmente implica ciertas revisiones y ajustes antes de generar resultados útiles.

Igualmente, para visualizar los resultados de una sesión de análisis (corrida) se cargan en otro libro “Excel” para procesar y visualizar los resultados. La Fig. 3 muestra la histórica del nivel de una segregación en los tanques asignados para una sesión de simulación de 3 años (26,280 HRS).

## **6. Estructura del modelo.**

La Fig. 4 muestra el modelo WITNESS de un sistema de suministro y distribución planificado entre Caripito y Guiria. Se presenta en el modelo una descripción esquemática de los patios de tanques y línea (poliducto) entre los patios. Existe un patio de tanques dedicados en Caripito para 3 segregaciones de crudos livianos y mediano – pesado. Estas segregaciones se bombean a través de un poliducto de aproximadamente 120 Km a Guiria en orden y duración pre establecida. Estas tres segregaciones se distribuyen en Guiria en un patio de tanques dedicados junto con dos segregaciones adicionales provenientes de áreas costa afuera y de áreas nuevas en planificación. Existe un total de 5 puestos de carga de productos, disponibles para la fase 2 del

terminal (1.5 MMBLS / DIA). En la medida que se efectúa una simulación se muestra el movimiento de fluidos (segregaciones) y disminución e incremento de nivel en cada tanque. Igualmente, el modelo muestra el “status” de los elementos relevantes en tiempo de simulación. Existe una descripción matemática de las reglas operacionales detalladas del sistema como procedimientos de llenado y vaciado de tanques, reglas de acceso y procesamiento de tanqueros a la cola del terminal así como secuencias de servicio de carga (productos) y descarga (lastre) de tanqueros. La Fig. 5 muestra un detalle del despliegue del modelo del lado del terminal.

## 7. Resultados

El modelo elaborado sobre WITNESS permitió, a través de sus facilidades de visualización e interpretación, la validación de las hipótesis de operación concertadas con operadores de sistemas similares así como la discusión y actualización de reglas operativas adaptadas al sistema. Una gran ventaja de la utilización de un modelo de simulación durante etapas tempranas de planificación de un sistema es la posibilidad de someter a pruebas las ideas relevantes antes de decidir sobre configuraciones para su diseño.

Para el caso particular del sistema presentado algunos resultados relevantes son:

- Las capacidades de almacenamiento en el patio de tanques de origen es fuertemente dependiente de la hipótesis de reglas de bombeo por lotes utilizada. Sin embargo, el requerimiento de almacenamiento es controlado por la hipótesis de paro accidental de bombeo del poliducto.
- Los porcentajes de ocupación en el terminal varían ligeramente (5 a 10%) de acuerdo a la descripción de la flota utilizada. Para tamaños de tanqueros menores la ocupación es mayor ya que hay que utilizar mas tanqueros para despachar la producción.
- La simulación permite establecer sobre la configuración base y cualquiera de sus variantes el número de puestos mínimo para una producción de 1,5 MMBPD. Esto se establece sobre la base de la ocupación medida en las corridas. Un mínimo de 5 puestos de carga muestra ocupaciones aceptables de 70 – 80 % sobre la configuración base.
- El efecto de la utilización de tanque de aforo en lugar de procedimientos de medición fiscal en línea es investigado de manera efectiva mediante simulación. En configuraciones en las que se utiliza tanque de aforo el número total de tanques requerido en el terminal para 0.5 MMBPD es de 2 tanques adicionales respecto a 15 tanques de 275 MBLS. Esto demuestra los posibles ahorros de la medición fiscal en línea.

## **8. Referencias.**

1. WITNESS. Lanner Group Limited. Redditch. UK

## **Agradecimientos**

Se agradece la gentileza y colaboración de las siguientes personas al permitir la difusión de este documento:

Steven Burchell. British Petroleum. Applied Science Group.

Maria Alejandra Keil. Inelectra. Caracas.

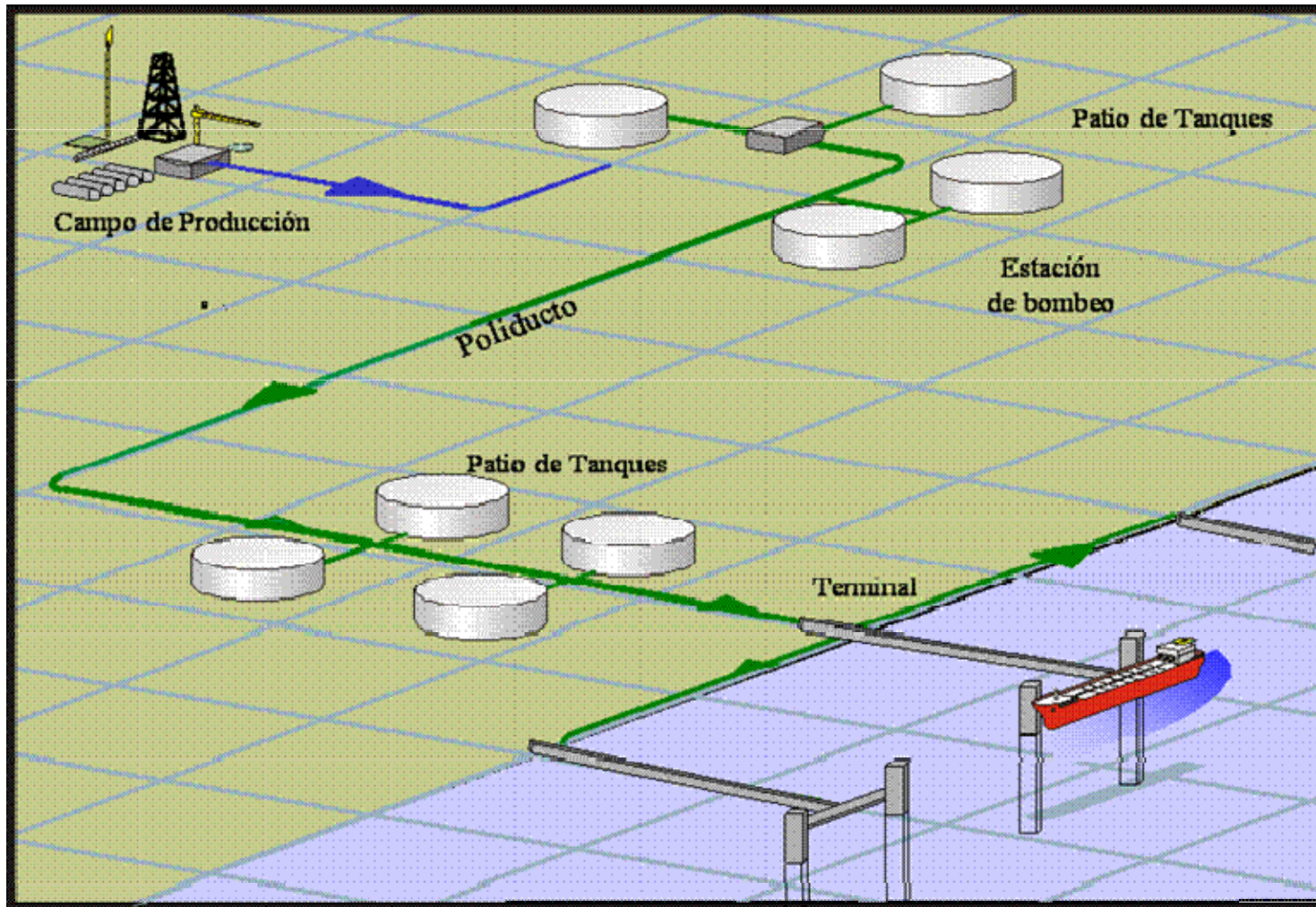


Figura 1. Disposición de elementos del sistema de transporte y distribución



1	Parámetros generales Reglas de protocolo de procesamiento de cola de llegada (ej. FIFO u otra regla) Disponibilidad de facilidades de tratamiento de lastre (si o no) Disponibilidad de facilidades VRU (si o no) Número de remolcadores Número de operadores de muelle Número de operaciones simultáneas de atraque / zarpe.
2	Tasas de bombeo para cada segregación
3	Tasas de bombeo para cada puesto de servicio
4	Disponibilidad de cada puesto de servicio
5	Disponibilidad de facilidades de descarga de lastre en cada puesto
6	Disponibilidad de facilidades de VRU en cada puesto
7	Capacidad de cada puesto (en MMBLS)
8	Accesibilidad de cada puesto a tanqueros de Fuel Oil
9	Accesibilidad de cada puesto a tanqueros de MDO (combustible)
10	Plan de mantenimiento anual de cada puesto (HRS / duración)
11	Disponibilidad de carga de cada segregación para cada puesto
12	Tasas de producción promedio diarias de cada segregación (6 segregaciones)
13	Especificación de mezclas de productos a venta en terminal (proporciones)
14	Detalles de tanques en patio aguas arriba (volumen de trabajo, volumen inicial, máxima succión (BPH), ID)
15	Detalles de tanques en patio terminal (volumen de trabajo, volumen inicial, máxima succión (BPH), ID)
16	Detalles de tanques de combustible en patio terminal (volumen de trabajo, volumen inicial, máxima succión (BPH), ID)
17	Detalles de tanques de lastre en patio terminal (volumen de trabajo, volumen inicial, máxima succión (BPH), ID)
18	Reglas de bombeo por lote (tamaño máximo y mínimo de lotes, secuencia de bombeo)
19	Detalles de procedimiento de recuperación de bombeo en poliducto luego de paro o caída accidental.
20	Detalles de flota de tanqueros (tamaños para cada segregación, parcelas en tanqueros de 250, 500 y 1000 MMBLS)
21	Estadística de variabilidad en tamaños de parcela (% por debajo y % por encima del tamaño para 250, 500 y 1000 MMBLS)
22	Función de atraso adelanto en llegada de tanqueros (Función de densidad de probabilidad)
23	Función de tasa de carga (producto) y descarga (lastre) (Función de densidad de probabilidad)
24	Tiempos de servicio. Llegada, salida, primer servicio y segundo servicio (Función de densidad de probabilidad)
25	Función de tasa de descarga (combustible)

Tabla 1. Resumen de parámetros de definición de sesión de análisis

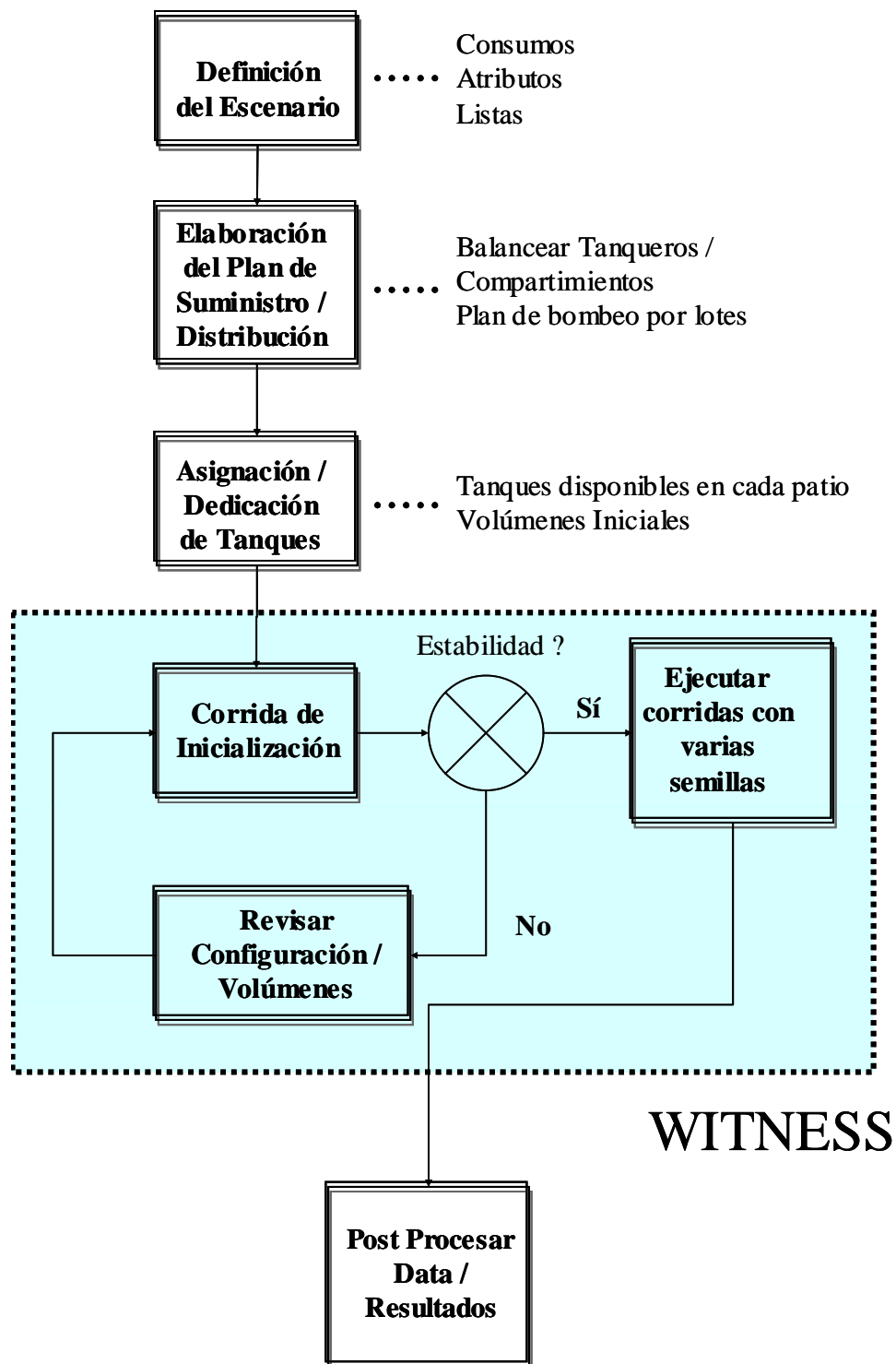


Figura 2. Sumario del proceso de definición, preparación y ejecución de sesión de simulación

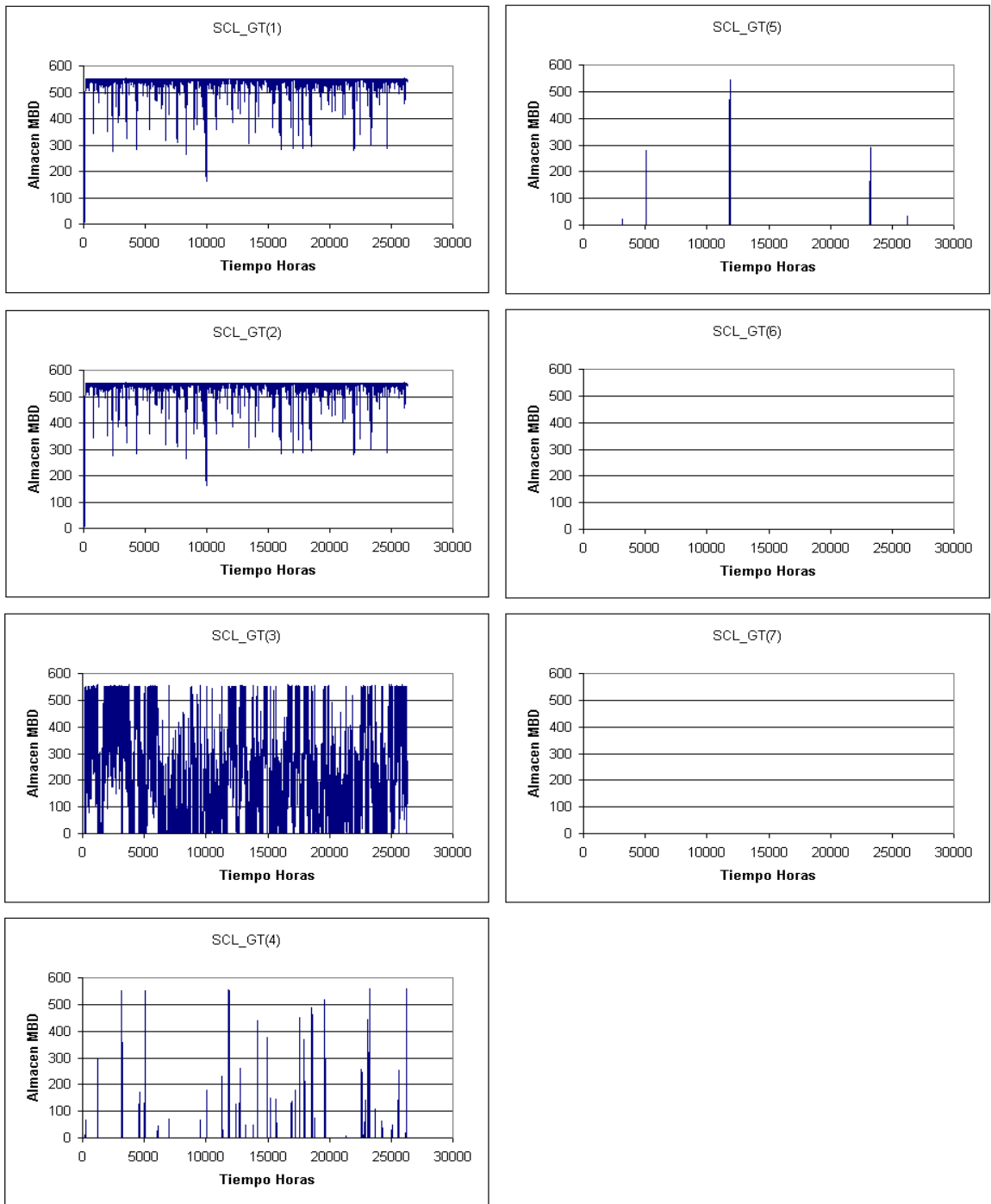


Figura 3. Simulación de nivel de tanques segregación SCL en Guiria.

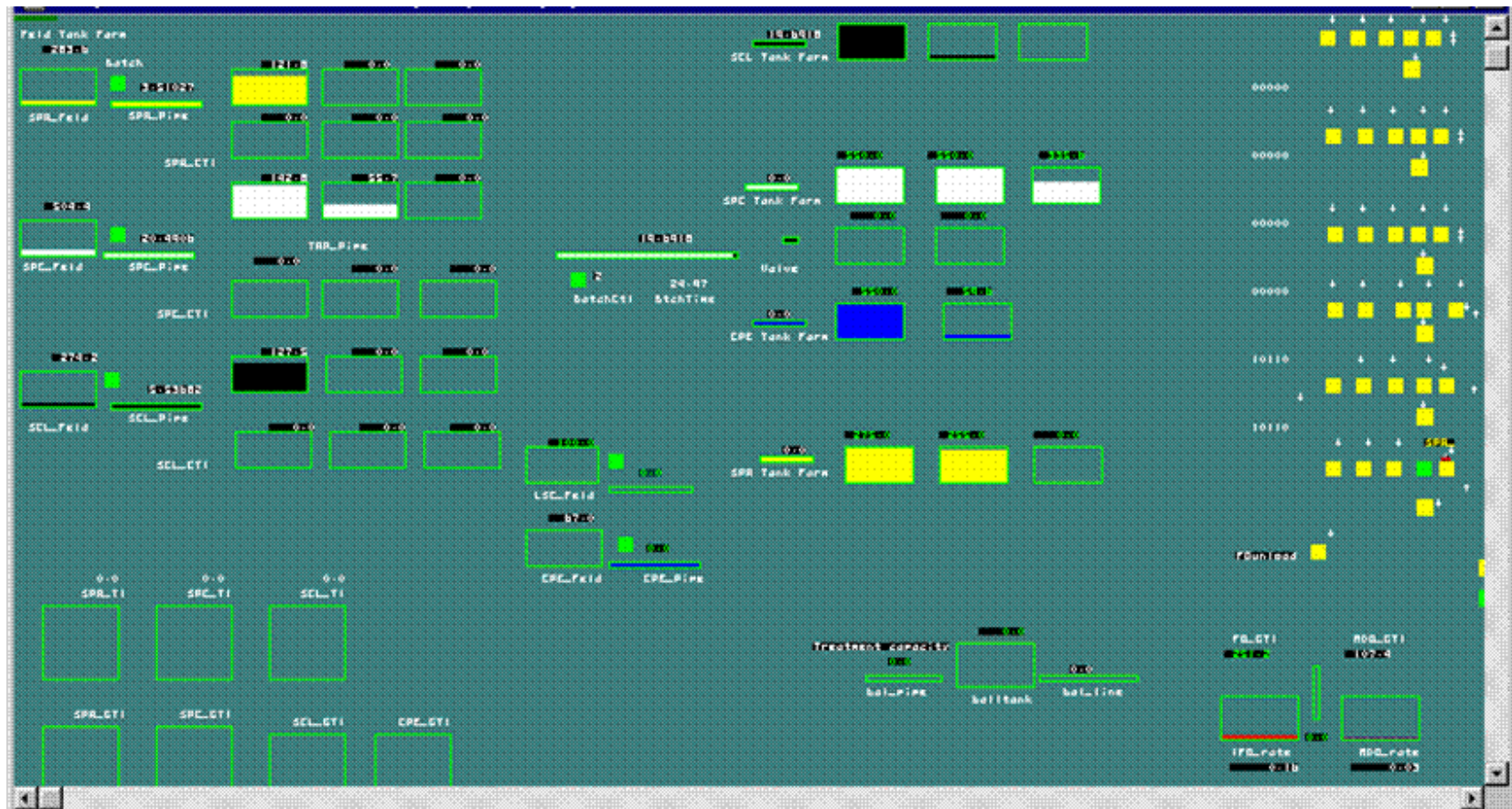


Figura 4. Despliegue del modelo mostrando patios de tanques en el origen, poliducto y patio de tanques en destino y elementos del terminal.

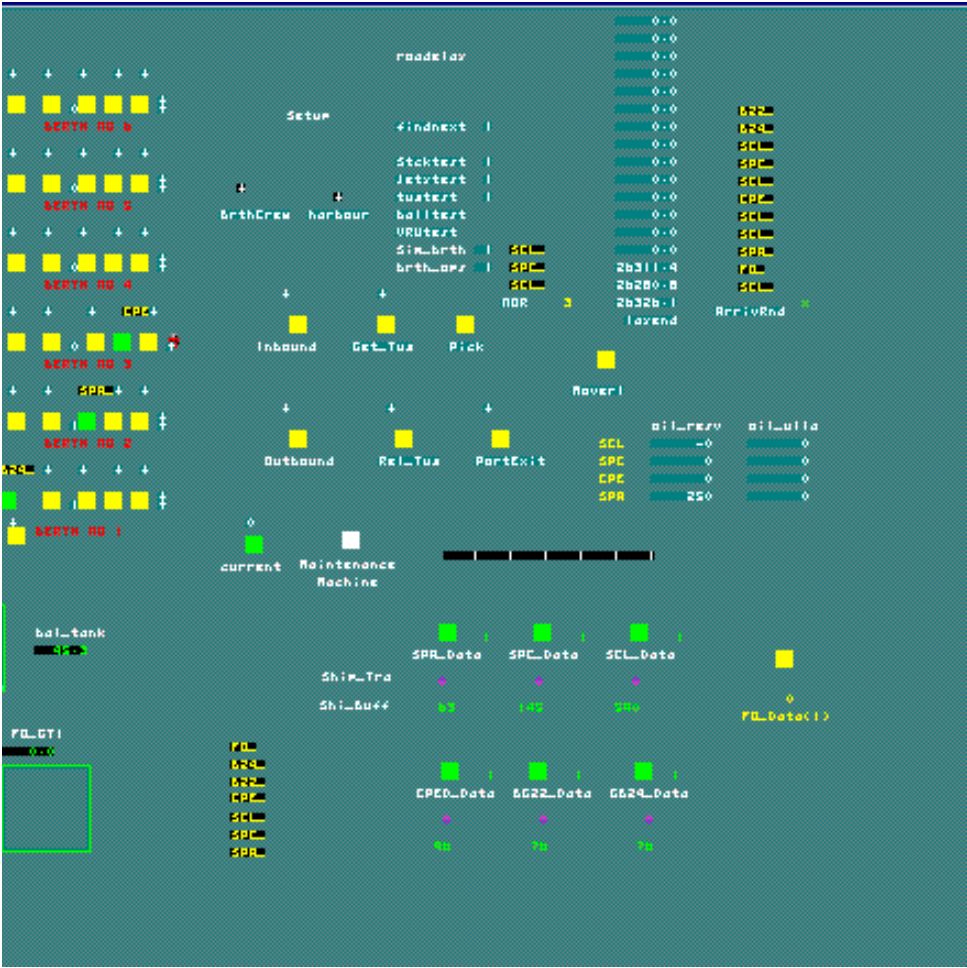


Figura 5. Detalle del modelo mostrando elementos del terminal y de las colas de tanqueros en proceso y espera de acceso