

SISTEMA DE ENTRENAMIENTO DE OPERADORES: EXPERIENCIA EN UNA REFINERIA DE VENEZUELA

Andrés Barcia

Honeywell SAIC

andres. barcia@honeywell.com

SINOPSIS

En el presente trabajo desarrollaremos la ejecución de un proyecto de entrenamiento de operadores para una importante compañía de refinación de petróleo venezolana. Dentro de esta experiencia, describiremos los intereses particulares que llevaron a la refinería a solicitar un sistema de entrenamiento de operadores (OTS). Describiremos también el sistema de entrenamiento de operadores diseñado para y como se ejecutó el proyecto (etapas).

Luego, para desarrollar aspectos técnicos más específicos, haremos foco en un modelo particular que representa una planta dentro de la refinería. Allí se analizarán los desafíos a nivel simulación, la integración del modelo con las demás partes que componen el sistema, el uso de herramientas específicas creadas para desarrollar sistemas OTS y los beneficios del uso de las mismas.

INTRODUCCION

En 1991, co-esponsoreado por el gobierno de los Estados Unidos, se establece el programa de investigación *Abnormal Situation Management* (ASM) [1]. En el, participan las principales compañías de la industria de refinación y petroquímica, con operación en el territorio de los Estados Unidos, incluyendo empresas no estadounidenses. Dentro de las actividades que desarrolla el ASM se puede mencionar: desarrollo de software basado en sistemas de diagnóstico, desarrollo de prototipos, desarrollo de mejores prácticas y métricas y auditorías en plantas de operación.

De acuerdo al ASM, las operaciones en Estados Unidos pierden en situaciones anormales alrededor de 20 billones de U\$D al año. De estos 20 billones de U\$D, 10 Millones (50%) son directamente atribuibles a errores humanos. Generalmente la causa de estos errores refiere a falta de capacitación y errores en la operación de la planta, tanto del sector de operaciones como del sector mantenimiento.

Esto ha generado en la industria de procesos, varias iniciativas para tratar de resolver esta problemática, que se presenta como una significativa fuente de reducción de costos y mejoras en la eficiencia de la operación.

Por más de 30 años, la simulación dinámica de procesos se ha utilizado alrededor del mundo como una herramienta efectiva para el entrenamiento de operadores y verificación de diseños [2]. Adicionalmente, el uso de los sistemas de entrenamiento de operadores se ha aplicado a través del ciclo de vida de plantas [3] como se muestra en la figura 1.

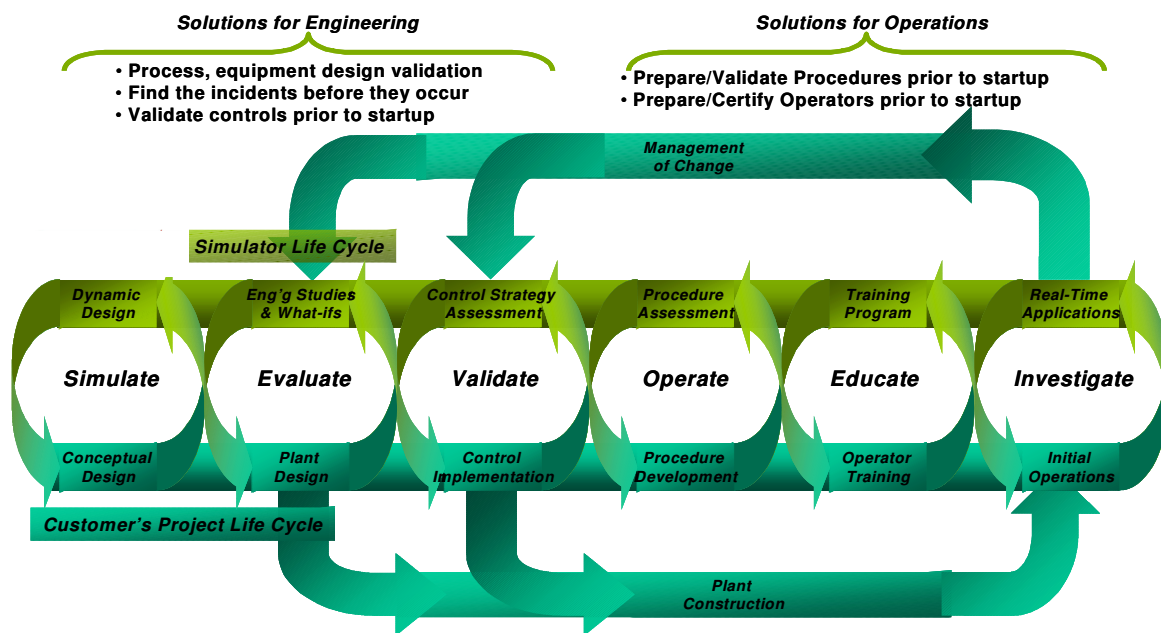


Figura 1: El ciclo de vida de un proyecto asociado al ciclo de vida de un simulador

Un sistema de entrenamiento de operadores aplicado al ciclo de vidas de plantas permite obtener los siguientes beneficios:

- Identificar restricciones en la fase de diseño conceptual antes de realizar los gastos de capital
- Identificar y corregir errores en el diseño del sistema de control antes del comisionamiento y su operación
- Desarrollar procedimientos de operación: start up y shut down, situaciones de emergencia
- Capacitar a los operarios en los procedimientos
- Capturar las habilidades de los operadores a través de una certificación objetiva
- Certificar y entrenar a operadores re asignados a otras plantas
- Transferir mejores practicas a nuevos operadores
- Evitar o minimizar incidentes recuperando las condiciones normales con mayor rapidez
- Cumplir con las regulaciones gubernamentales para certificación de operadores y medio ambiente
- Mejorar la operación y el control en tiempo real
- Investigar procesos propuestos y cambios en el sistema de control como parte de la operación de los procesos

A través de todas las etapas del ciclo de vida de una planta, el efecto acumulativo de ahorro de costos y mejora en la operación es significativo. Generalmente, el retorno a la inversión se realiza dentro del primer año de operación.

En la figura 2 se observa un diagrama cualitativo de las mejoras esperadas durante un start up de una planta nueva, utilizando un simulador dinámico. Los beneficios esperados, por una mejora en la operación y reducción de incidentes, podría alcanzar los 20 Millones de USD en un período de 10 años.

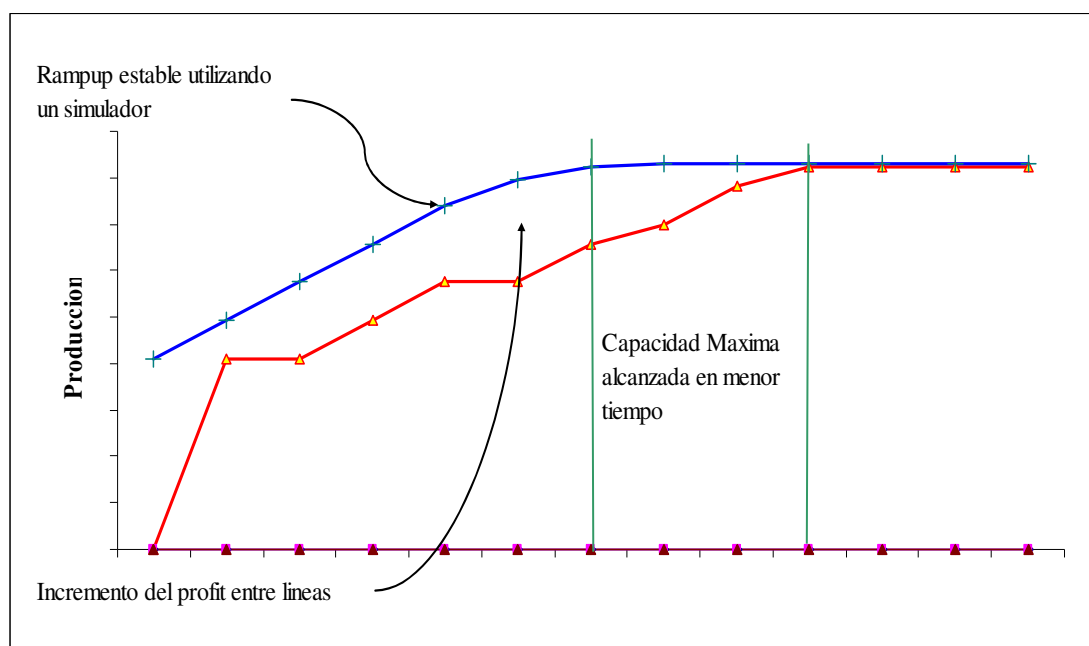


Figura 2: Mejoras en un arranque de planta utilizando un simulador dinámico

La figura muestra un ramp-up mucho más estable y suave utilizando un simulador. Además, se alcanza la capacidad de operación con anterioridad, dado que los operadores se han capacitado en el procedimiento varias veces antes del start up real. La diferencia entre las dos líneas de arranque muestran los posibles beneficios que se pueden obtener.

El sistema de entrenamiento de operadores contiene tres estaciones principales: la estación de ingeniería (donde reside el modelo dinámico), la estación del instructor (donde se llevan a cabo las sesiones de entrenamiento) y la estación de operación (réplica exacta de la estación en la sala de control). De esta forma el operador que esta en la consola de operación del OTS, no debería notar ninguna diferencia respecto de la consola ubicada en la sala de control. Ver figura 3.

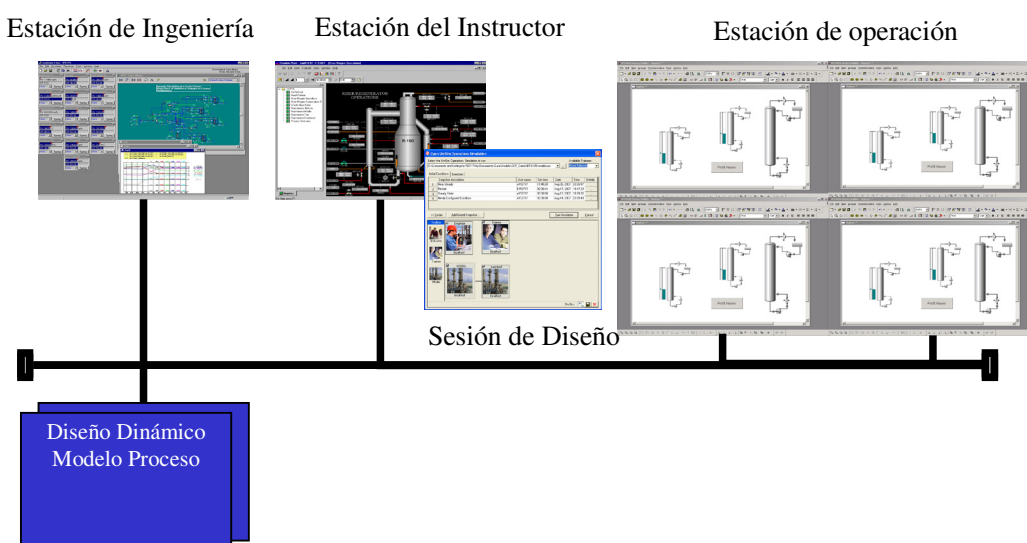


Figura 3: Arquitectura de un sistema de entrenamiento de operadores

Se han desarrollado diversas herramientas de ingeniería para configurar, emular, mantener y verificar los controles y la lógica del sistema. Esto permite incrementar la eficiencia del proyecto. Por ejemplo, las configuraciones de PLCs son fácilmente transportables entre el sistema y el simulador aunque en algunos casos es necesario desarrollar la lógica a nivel del modelo de simulación. La replica del sistema de control puede ser a través del actual sistema de control o utilizando una emulación de los controles. La decisión de qué método utilizar depende del tipo de tecnología, los objetivos del proyecto y de sus restricciones.

El modelo dinámico del proceso debe ser de alta fidelidad, permitiendo representar una amplia gama de condiciones, desde el cold-start up hasta la operación normal, desde el shut down hasta situaciones anormales.

Las simulaciones dinámicas requieren modelos dependientes del tiempo y sofisticados para las operaciones unitarias [4]. El desarrollo de modelos dinámicos es de un orden de magnitud más complejo que los tradicionales en estado estacionario y debe seguir los fundamentos de la dinámica del proceso desde el inicio. Un modelo dinámico que utiliza un modelo en estado estacionario como punto inicial, generalmente falla al tratar de reproducir el amplio rango de condiciones de operación.

Las propiedades físicas como entalpía, densidad, propiedades de transporte, y equilibrios L-V etc. deben ser calculadas con un alto grado de precisión. En los últimos años, dado el incremento de la capacidad de procesamiento de las nuevas computadoras, es posible utilizar ecuaciones de estado para aplicaciones en tiempo real, aún en modelos complejos, de muchos componentes y de gran tamaño.

CASO DE ESTUDIO EN UNA REFINERIA VENEZOLANA

La refinería esta ubicada en el norte de Venezuela, procesa actualmente 130.000 barriles de crudo por día. Debido a la alta rotación del personal de operación y por la necesidad específica de disminuir el tiempo de entrenamiento de los operadores, la Gerencia de la refinería decidió implementar un OTS. El proyecto implementado ha tenido un alcance considerable, incluyendo sistemas para 7 unidades:

- Alquilación
- Aminas y Aguas Amargas
- Crudo y Vacío
- MTBE/TAME
- Complejo de recuperación de azufre (SRU)
- Merox
- FCC

El proyecto considero las estaciones de operación para las diferentes unidades y los PLCs. Para el caso de los PLCs se utilizaron traductores en algunos casos y en otros las matrices de causa & efecto que tienen los simuladores de procesos para emular la lógica de los PLCs. Para cada uno de los modelos se entregaron dos condiciones iniciales: cold case y operación normal.

También se consideraron los *Instructor features* (IF). Estos representan el corazón de un sistema de entrenamiento de operadores dado que, a través de ellos los instructores tienen la posibilidad de ejecutar ejercicios, activar variables de campo y realizar fallas en equipos.

En la figura 4 se observa la arquitectura del proyecto. La misma incluye 3 sistemas compuestos cada uno por 2 PCs (donde residen los modelos de simulación dinámicos y las interfases del

instructor), 1 estación de operación GUS para el sistema de control y un nodo APP que comunica el hardware de simulación con el hardware de control. Para el caso del modelo de FCC, es necesario utilizar 2 estaciones GUS. Para crudo y vacío, se requirió dos nodos APP.

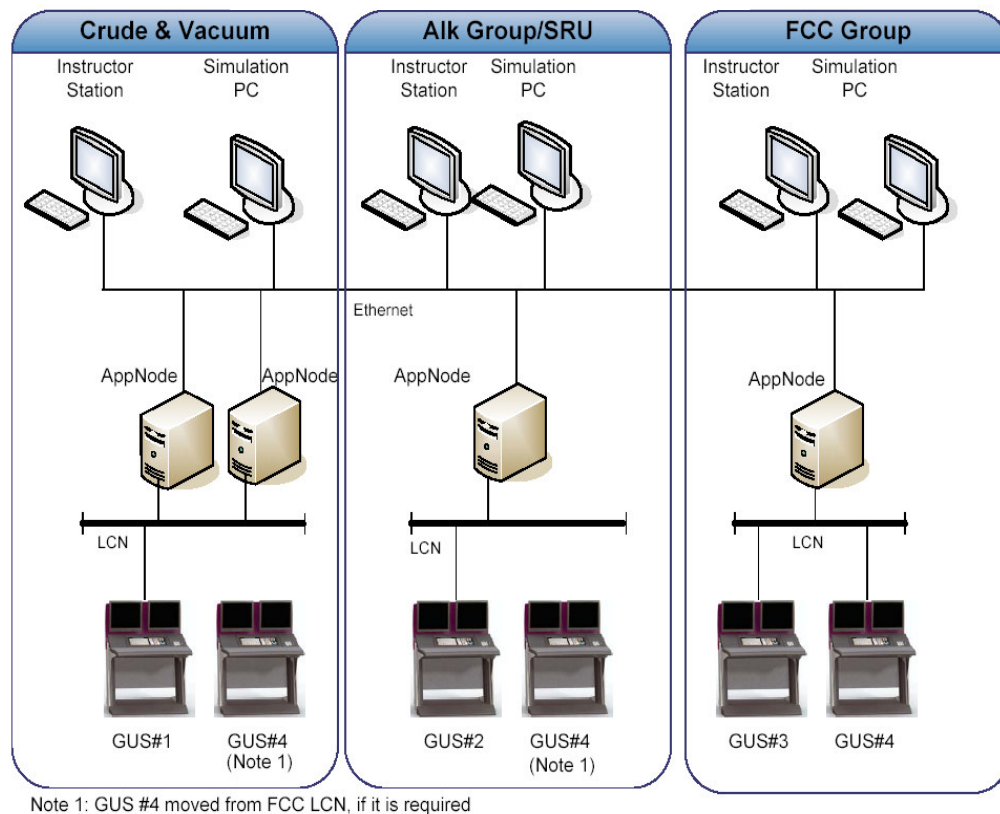


Figura 4: Arquitectura del sistema implementado

Debido a la cantidad de modelos desarrollados, el proyecto se ejecuto para entregar los modelos independientes en forma escalonada. El proyecto comenzó en el año 2006 y el último modelo se entregó a principios del 2008. Las etapas principales del desarrollo de cada uno de los modelos fueron:

- *Kick of meeting*: reunión con el cliente para definir alcance del proyecto y cronograma inicial de todas las actividades
- *Collect information*: recolección de datos de planta (hoja de datos de equipos, balances de masa y energía, procedimientos de operación, narrativas de control, etc.)
- *Model development*: Desarrollo del modelo dinámico
- *MAT*: reunión con el cliente para revisar la respuesta del modelo dinámico a través de la condición normal de operación y procedimientos
- *DCS/PLC integration work*: integración del modelo de simulación con la lógica de control
- *FAT*: reunión con el cliente para verificar la respuesta completa del sistema (modelo dinámico + DCS)
- *Training, delivery & use*: entregable final del sistema y transferencia del *know-how* del sistema a través de entrenamientos

Para la ejecución del proyecto, y particularmente para el desarrollo de los modelos dinámicos, se definieron una serie de prácticas y métricas con el objetivo de lograr un modelo de alta fidelidad. Algunas de ellas fueron:

- Los equipos fueron modelados utilizando las operaciones estándares del simulador, incluyendo modelos rigurosos para el reactor y el regenerador.
- Correspondencia de uno a uno entre los equipos en planta y los equipos en el simulador, excepto casos específicos (intercambiador de calor con control de nivel)
- Fidelidad Estado estacionario
 - 50 variables críticas: $\pm 5\%$
 - 100 variables no críticas: $\pm 10\%$
- Realismo Dinámico
 - La respuesta dinámica fue similar a la de la planta (dirección, magnitud del cambio) en un orden de $\pm 10\%$
- Se consideraron las contribuciones de las alturas estáticas
- Las válvulas de control tuvieron una dinámica de actuador asignada
- Intercambiadores de calor: se definió un UA, K shell, K tubo. Se utilizó flujos de referencia para el UA y para la pérdida de carga
- Aero enfriadores: se definió un UA, K tubos. Se definió # ventiladores, velocidad y flujo de diseño de aire. Se utilizó flujos de referencia para el UA y para la pérdida de carga
- Tanques /Separadores: Se definió volumen, orientación, *level taps* y posición y diámetro de las conexiones. Se utilizó una transferencia de calor con el medio simplificado
- Bombas: se utilizó una curva de 5 puntos basada en la velocidad de operación. Se implementó a la salida válvulas check. Se utilizó una función transferencia para el encendido /apagado
- Compresores: se utilizó múltiples curvas de 5 puntos. Se consideró la inercia de rotación. Se desarrolló un control anti-surge dado que en el sistema real no era parte del DCS
- Columnas: Se definieron diferentes secciones de platos; se definieron diferentes tipos de internos y/ o rellenos. Se definieron eficiencias reales. Se ajustaron los K para obtener la caída de presión correspondiente. El fondo de la columna se simuló con un separador para el control de nivel

En cuanto a las limitaciones y/ o suposiciones se mencionaron las siguientes:

- No se consideraron instrumentaciones para monitoreo de equipos como vibraciones. En estos casos se indicó un valor de referencia
- No se consideraron inyecciones de químicos (anti-espumantes, etc.)
- No se consideraron sistemas auxiliares (aire de instrumentos)
- No se consideraron componentes con baja composición que no afecte al balance de masa y energía
- El *lumping* de equipos se permitió en los casos donde no hubo instrumentación en los equipos individuales con interfase en el DCS

Dado que el alcance del proyecto sobrepasa el presente trabajo, se ha seleccionado la unidad de FCC para describir con algunos detalles el modelo. Los equipos que se modelaron en la unidad fueron:

- Almacenamiento de catalizador
- Soplador de aire tambor
- Separador de vapor
- Tambores de purga de vapor
- Calentador de aire
- Regenerador
- Reactor
- Reactor

- Risers de servicios de fluidización
- Sistema de carga unidad FCC
- Columna principal
- Bombas de la columna principal
- Despojadores de LCO y nafta pesada
- Condensador de tope columna y sistema de inyección de condensado
- Enfriadores de nafta pesada condensadores de tope
- Acumulador y bombas del tope de la columna principal
- Compresor de gas húmedo
- Sistema de interetapa y alta presión del compresor
- Sistema de interetapa y alta presión del compresor
- Absorbedor primario y secundario
- Sección de la torre depentanizadora
- Sección de la torre deetanizadora
- Secadora de propano
- Fraccionamiento de nafta
- Sección fraccionamiento de nafta
- Circuito aceite pesado de ciclo

En la figura 5 se observa la columna fraccionadora, incluyendo la sección de platos y el fondo de la columna. El fondo de la columna se modeló con un separador, ya que existía un control de nivel y los platos de la columna no tienen la posibilidad de tener un *hold up*.

En la figura 6 se muestra la sección de platos con mayor detalle a la figura anterior. En este caso, al igual que el fondo de la columna, hay indicadores de nivel. Por tal motivo, se tuvo que fraccionar la sección de platos principal en varias partes, de tal forma de poner separadores entre cada una de las secciones de platos restantes para colocar los indicadores de nivel en cada una de ellas.

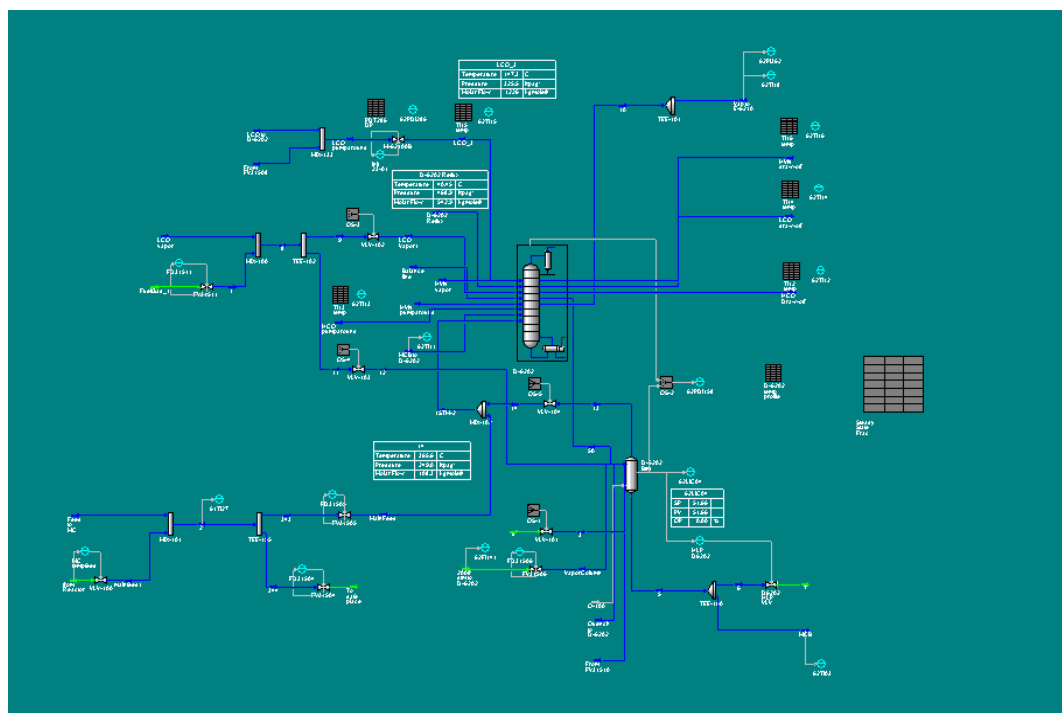


Figura 5: Modelo de la sección de platos y fondo de la fraccionadora

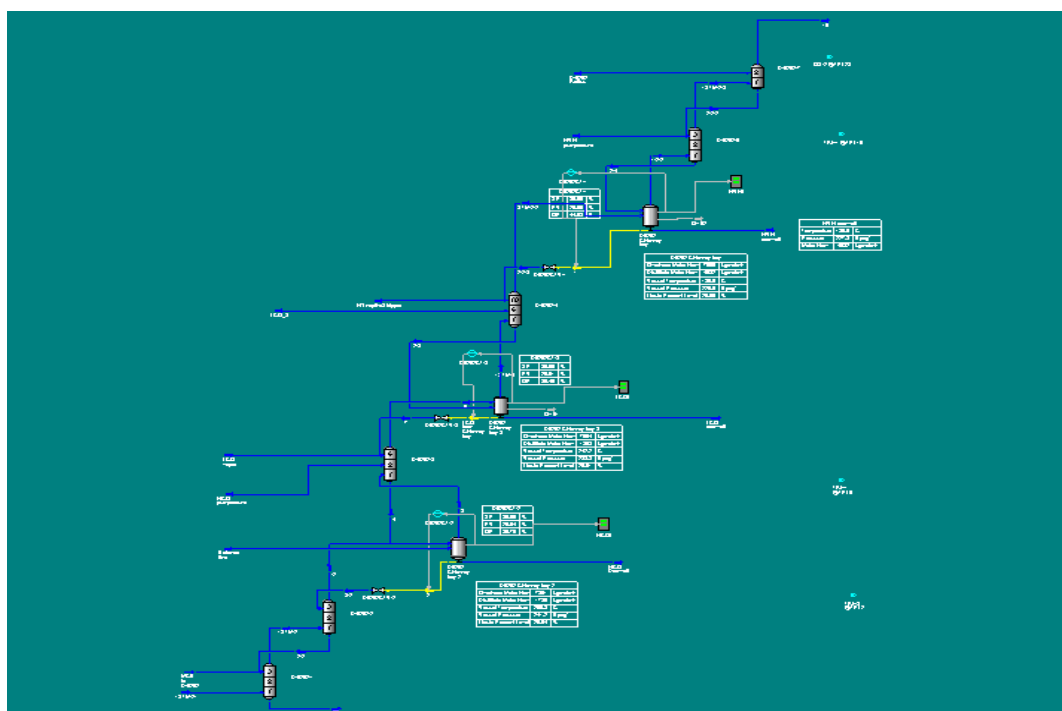


Figura 6: Modelo detallado de la columna fraccionadora

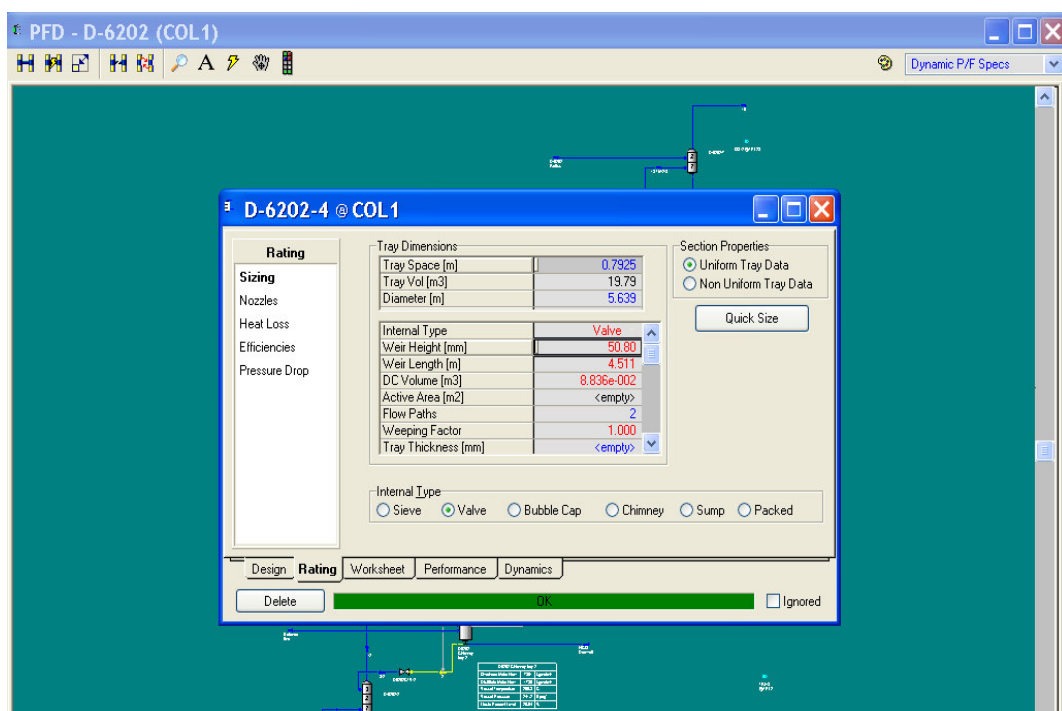


Figura 7: Pantalla de entrada de datos de la sección de platos de la columna

En figura 7 se encuentra la configuración de las distintas variables de la sección de platos, por ejemplo: tipo de interno, espaciado entre platos, altura del rebosadero, etc.

La figura 8 muestra una impresión de pantalla del diagrama del proceso principal del modelo FCC. Se observa que en el desarrollo del modelo, se optó por utilizar *subflowsheets* para cada uno de los

The diagram illustrates the process flow of a methanol plant. Key components include:

- Feed to D-6101:** Receives "TO to D-6104" and "RO to RX".
- Reactor Bypass:** A stream that bypasses the reactor.
- Distillation Columns:** D-6103/04, D-6101/02, and B-6102.
- Heat Exchangers:** SM-1003-4", G-6101, and B-6102.
- Streams:** "Lift gas", "RX-Feed", "M-6101", "Spent-cat", "Regen-Cat", "stm/quench", "Torch oil/Steam", "Air to D-6103", "Air to D-6104", "Flue Gas", "To Expander", and "To B-6102".
- Control Points:** Indicated by 'T' in a diamond shape.

Feed to MC		
Temperature	526.1	C
Pressure	344.8	kPa
Molar Flow	6280	kgmole/h

La figura 9 muestra el desarrollo de la lógica de parada de emergencia (ESD). Se utilizó una operación unitaria que emula a la matriz de causa y efecto comúnmente usada en el diseño y

operación de los sistemas de seguridad. La matriz tiene conectadas variables de procesos y basados en los criterios de la lógica, determina si ciertos equipos o válvulas deben ser parados.

Su funcionamiento es similar a una spreadsheet; toma valores de entrada llamados causas y envía una señal de salida llamada efecto. Las entradas pueden ser variable de simulación o un simple switch (el cual no necesariamente tiene que estar conectado a alguna variable). Cada entrada genera los estados *Healthy* (1) o *tripped* (0).

Respecto a la interfase del instructor, para controlar el proceso se desarrollaron gráficos en tiempo real similares a las pantallas de un DCS. Estos gráficos permiten visualizar información estática y dinámica utilizando símbolos, texto, valores numéricos, cambios de color, gráficos de barras, etc. Los símbolos dinámicos y valores numéricos indican medidas del proceso como flujo, temperatura, nivel y presión de tal forma que el instructor puede monitorear la operación del modelo.

El instructor tiene la posibilidad de realizar cambios en setpoints, OPs, y modo de control. Adicionalmente, puede activar o desactivar los IF. Es posible entonces, monitorear los siguientes tipos de puntos en las sesiones de entrenamiento:

- Indicadores analógicos
- Indicadores digitales
- Salidas analógicas
- Salidas digitales
- Controladores

Para el modelo de FCC se desarrollaron 40 gráficos. Las figuras 10 y 11 muestran los gráficos en tiempo real para la fraccionadora principal y la despojadora de nafta y ALC.

En la figura 12 se presenta el panel de control local emulado utilizando una serie de objetos disponibles a tal efecto (FODs).

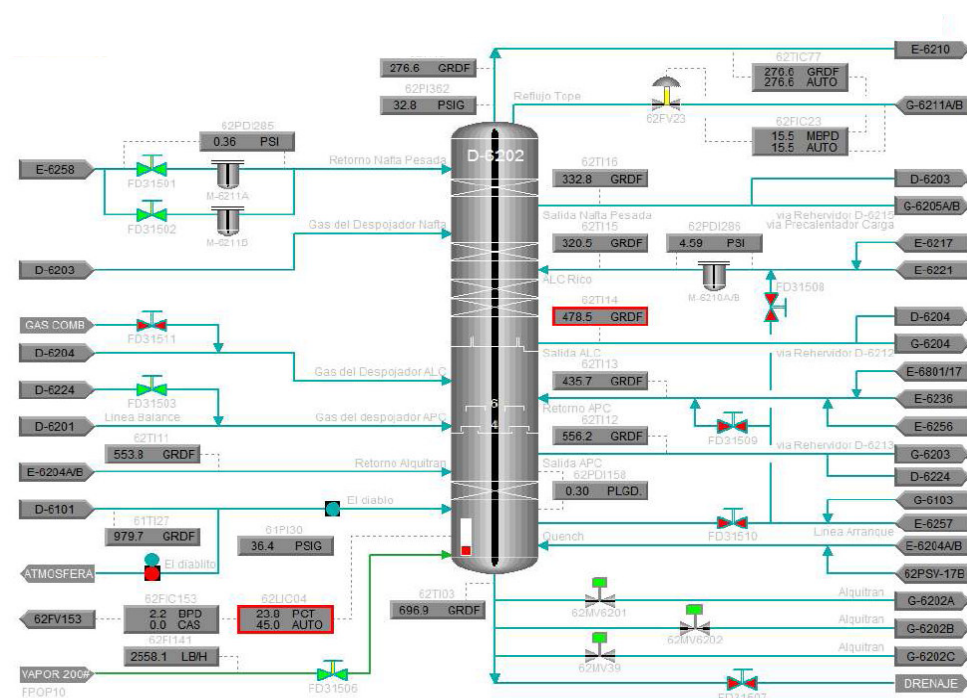


Figura 10: Fraccionadora principal de la unidad FCC

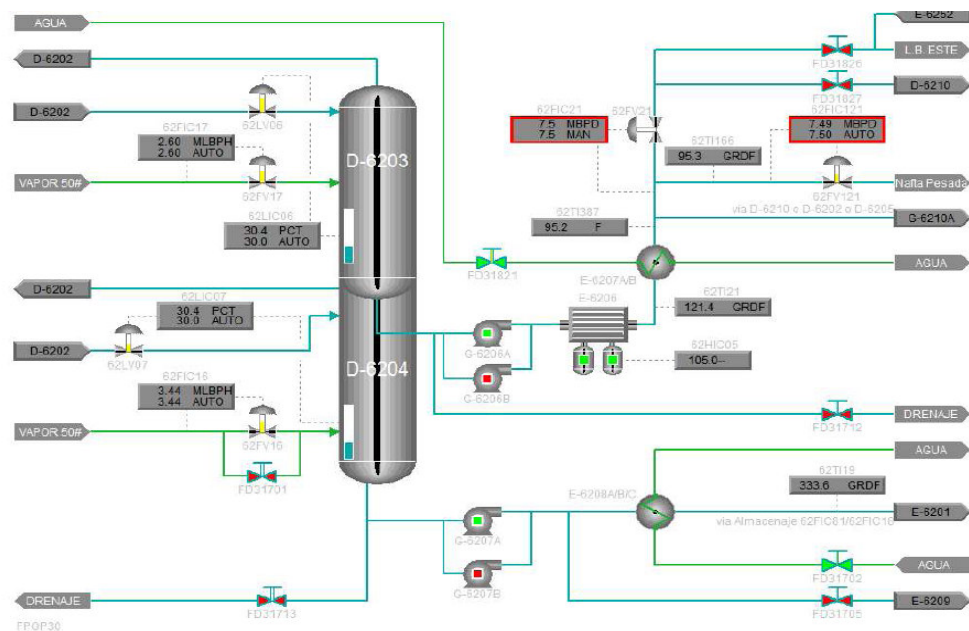
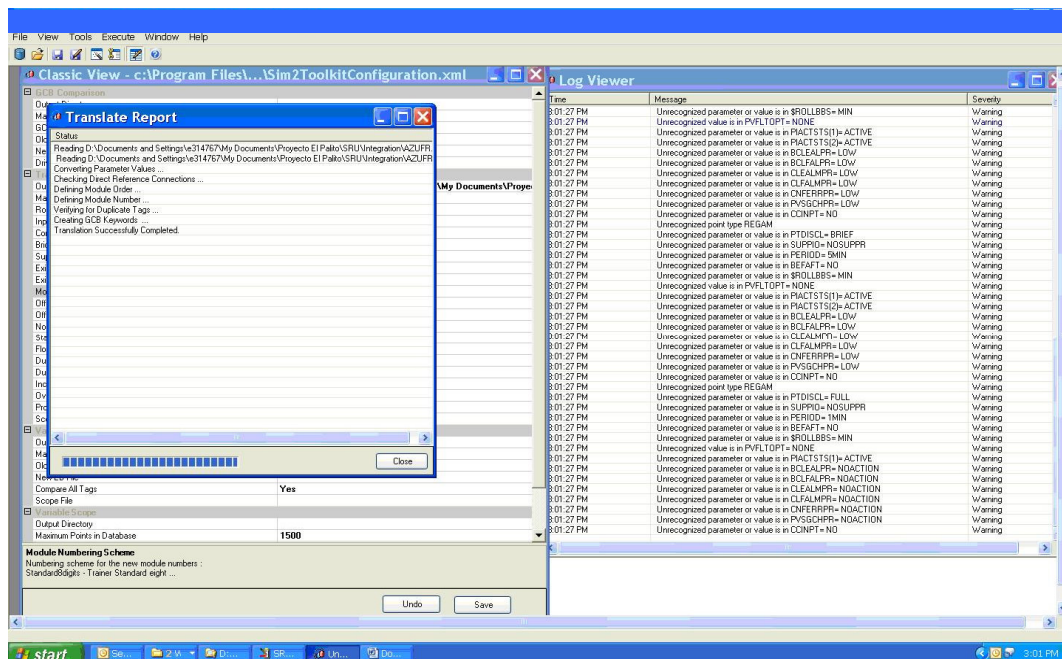


Figura 11: Despojadora de nafta y ALC



Figura 12: Panel de Control Local del Horno

Una de las etapas cruciales del proyecto fue la integración entre el modelo dinámico del proceso y el sistema de control. Se disponía de un gran número de herramientas de ingeniería a tal efecto. Utilizando una de estas, se tradujo la base de datos del DCS en un formato entendible para el sistema de entrenamiento. La misma se encuentra en la estación del instructor (fig. 13).



La herramienta de traducción genero los archivos necesarios para la integración de datos del DCS al simulador de procesos. Posteriormente a través de la herramienta de generación de tablas de datos, se comparo el archivo de simulación con el archivo de la base de datos ya traducido, de tal forma de que cada uno de los puntos tenga una correspondencia. Luego, se genero un archivo de referencia que comunica cada uno de los puntos en forma bidireccional (fig. 14).

En la estación del instructor, se encuentran los archivos necesarios para el correcto funcionamiento del sistema. Desde aquí se procedió al diseño del sistema, conectando la PC, que contiene el modelo dinámico, con el modelo del DCS traducido (fig. 15).

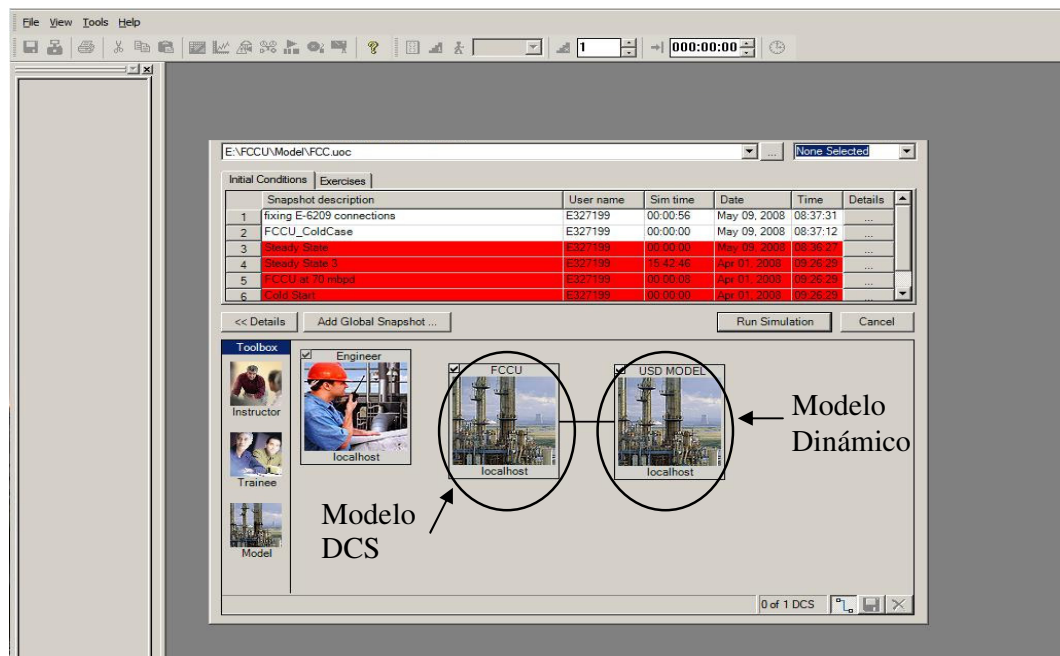


Figura 15: Sesión de diseño para configurar el sistema de entrenamiento

Como se comentó anteriormente, los IFs son claves para el entrenamiento de operadores. Estos grupos de variables permiten realizar cambios que están fuera del alcance del operador en la sala de control pero, que afectan a la operación de las plantas. Utilizando los IFs, el sistema puede representar todas aquellas situaciones que se presentan en la vida cotidiana de una operación.

Las variables de instructor (IV) son condiciones que pueden cambiar en la operación real de las plantas, pero que no son cambios inherentes al simulador. Generalmente las IVs son condiciones en los límites de baterías, por ejemplo composición, temperatura y presión. Otro ejemplo es la temperatura del medio ambiente que afecta particularmente en el modelo a los equipos con transferencia de calor hacia el medio y a los aero-enfriadores. Se logra acceder a las IVs desde los gráficos del instructor.

Algunas de las variables de instructor que se configuraron junto con sus respectivos rangos para la unidad FCC fueron:

- Temperatura ambiente (20-40 C)
- Flujo de vapor compresor de gas húmedo (0-120% del valor de estado estacionario)
- Flujo de gas del reformer (0-120% del valor de estado estacionario)
- Flujo de la unidad de crudo (0-120% del valor de estado estacionario)
- Flujo de la unidad de platformer (0-120% del valor de estado estacionario)

Las fallas (MF) son aquellos incidentes en planta donde los equipos fallan o entran fuera de servicio. Estos incidentes están configurados en el modelo dinámico dado que los modelos de las operaciones en el simulador no tienen fallas inherentes.

Las MFs pueden ser *custom* o *generic*. Las genéricas son las MFs que se producen en los transmisores, swiches y válvulas. Las *custom* requieren un desarrollo específico. Frecuentemente son: obstrucciones en línea, taponamiento de tubos, disminución de la performance de bombas, disminución de la performance compresores. Se logra acceder a las MFs desde la sesión del instructor.

Algunos ejemplos de MF que se configuraron para el modelo de FCC fueron:

- Disminución en la eficiencia del soplador de aire (causa una condición de operación cercana a la línea de anti-surge)
- Obstrucción en las conexiones de alimentación al reactor (causa una disminución del flujo de vapor al reactor)
- Taponamiento del rebolier de la de-etanizadora (causa un incremento en la circulación de la nafta debido a la disminución en la transferencia de calor)
- Falla en la válvula de control del reactor (causa un incremento en la temperatura de reacción)
- MFs genéricas

Los dispositivos de operación de campo (FOD) son funciones relativas a equipos que no puede ser operados desde el DCS. Típicamente, las FODs son switches y luces de paneles de control local o dispositivos físicos como válvulas manuales (by pass, líneas de start up). Se logra acceder a las FODs desde los gráficos del instructor.

Por su definición, el número de FODs necesarias es significativamente mayor que para cualquiera de las otras IFs. En el modelo de FCC se configuraron 240 FODs. Como ejemplo, solo se listan algunas de las FODs:

- Válvula de aislación para el agua de enfriamiento al intercambiador de la turbina de vapor (abierto-cerrado)
- Numero de líneas habilitadas para la circulación del torch oil (# 0-4)
- Arranque /parada de bombas de fondo de columna fraccionadora
- Válvula de drenaje de Fraccionadora principal
- Válvula de aislación de línea de arranque a la columna fraccionadora (0-100%)

CONCLUSION

Es necesario identificar los beneficios directos para justificar la implementación de un proyecto de entrenamiento de Operadores. La refinería localizada en Venezuela ha logrado obtener beneficios utilizando el simulador dinámico a través de sus diversas aplicaciones.

Se designo una sala de capacitación destinada exclusivamente al entrenamiento de los operadores. La gerencia de RRHH confecciono un plan de capacitación para certificar a sus operadores, donde los operadores de mayor experiencia, han sido asignados para conducir las sesiones de entrenamiento. A la vez, los mismos estuvieron involucrados a lo largo de todo el proyecto, esto permitió un importante conocimiento del sistema al momento de entrega. Para los entrenamientos, se utilizaron manuales de trabajo que contienen procedimientos de arranque y parada de planta, análisis de variables claves del proceso y corrección de fallas.

La gerencia se ha comprometido a mantener el sistema actualizado y sincronizado con la operación de planta, de tal forma de continuar con los beneficios logrados y mantener la inversión.

En la figura 16 se muestra el sistema completo: hardware de simulación, nodo APP y estación del operador.



Figura 16: Sistema de entrenamiento de operadores

REFERENCIAS

1. <http://www.asmconsortium.net/Pages/default.aspx>
2. McMeekin, Russel, "Cost reduction through simulation", Hydrocarbon Asia, March 1996, pp70-76.
3. Anderson, Rich; Whittlesey, Vicki; Schindler, Henry, "Lifecycle Uses of Dynamic Simulation at ConocoPhillips", NPRA Plant Automation & Decision Support Conference, September 2003
4. Barcia, Andres; Discioscio Mariana, "Process Simulators: Why and when use (History, applicability, benefits)", InTech, Brazil, November 2006.

NOMENCLATURA

ASM: Abnormal Situation Management

FOD: Field Operator Device

IF: Instructor Feature

IV: Instructor Variable

MF: Malfunction

OTS: Operator Training System