

NUEVOS DESAFÍOS DE LA INDUSTRIA: UNA SOLUCIÓN ORIENTADA A LA MODERNIZACIÓN INTEGRAL Y LA OPTIMIZACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE EJECUCIÓN

Sofía Belén Gallo, Hytech Ingeniería S.A., sgallo@hytech.com.ar

Camila Aurrecoechea, Hytech Ingeniería S.A., caurrecoechea@hytech.com.ar

Guadalupe Urriza, Hytech Ingeniería S.A., gurriza@hytech.com.ar

Patricio Higgins, Hytech Ingeniería S.A., phiggins@hytech.com.ar

1. SINOPSIS

Ante un crecimiento poblacional acelerado, satisfacer una creciente demanda energética de manera confiable, rentable y sostenible representa un desafío significativo. El ámbito de refinación en Argentina enfrenta nuevos desafíos relacionados con la mayor disponibilidad de crudos más livianos (no convencionales), una demanda en aumento de combustibles de mejor calidad y regulaciones ambientales más exigentes. Las refinerías, a causa de esto, se encuentran inmersas en un proceso de modernización de sus unidades más importantes que se encuentran al límite de su capacidad, especialmente las que fueron inicialmente diagramadas para operar con crudos más pesados. Simultáneamente, normas cada vez más estrictas en relación a la disminución de azufre están impulsando revamps o, directamente, la incorporación de nuevas y modernas unidades de hidrotratamiento, acompañadas por una tendencia en alza hacia el incremento de la eficiencia energética y la disminución de emisiones.

Se presenta un caso real en ejecución sobre la ampliación de una refinería, donde se propone una solución de ingeniería global que no solo busca modernizar, sino también optimizar la estrategia de ejecución del proyecto, minimizando el riesgo y reduciendo tiempos de construcción. La solución integra la instalación con un enfoque innovador mixto entre modular y tailor-made de una nueva Unidad de Destilación Atmosférica en conjunto con un revamp de la Unidad de Vacío existente, un nuevo Hidrotratamiento de Diesel y un nuevo Sistema de Recuperación de Gases de Antorcha.

Este caso de aplicación invita a replantear estrategias tradicionales y explorar oportunidades de mejoras de alto impacto, redefiniendo así un nuevo horizonte en el revamp de refinerías maduras como las que actualmente dispone la región.

2. INTRODUCCIÓN

La infraestructura de refinación en América Latina presenta una configuración predominantemente heredada de mediados del siglo XX, con plantas diseñadas para procesar crudos pesados locales y construidas mediante técnicas tradicionales “en sitio”. Esta base histórica ha condicionado el tipo de proyectos que predominan en la región.

La mayoría de las inversiones recientes se han concentrado en ampliaciones y modernizaciones profundas, debido a que las refinerías existentes, aunque funcionales, requieren adaptaciones significativas para responder a la evolución de la demanda. Entre 1998 y 2008, la demanda regional de combustibles creció, con un fuerte incremento en los destilados medios, mientras que la capacidad instalada se mantuvo prácticamente constante(1). Esta situación obligó a muchos países a importar productos refinados, lo que evidenció la necesidad de mejorar la conversión interna de las plantas. A su vez, de forma reciente, surge la necesidad de adaptar instalaciones viejas a estándares ambientales más rigurosos.

Por volumen de obra, los proyectos más comunes han sido los revamps, como por ejemplo ampliaciones de unidades de destilación atmosférica existentes, o la instalación de unidades de conversión para crudos pesados. Un caso emblemático es la expansión de la refinería de Cartagena (Colombia), que aumentó su capacidad de destilación primaria de aproximadamente 90 000 a 200 000 barriles por día (2). También se han desarrollado nuevas unidades de destilación atmosférica dentro de complejos existentes, con incrementos de capacidad más modestos y, en menor medida, proyectos greenfield de gran escala como Abreu e Lima (Brasil) y Dos Bocas (México).

La elección de la estrategia constructiva es un factor determinante en la ejecución de proyectos de refinación, especialmente en un contexto donde la mayoría de las instalaciones existentes presentan limitaciones de espacio, operación continua y antigüedad estructural. En América Latina, la construcción tradicional “in situ” ha sido históricamente la metodología predominante, debido a su flexibilidad para adaptarse a terrenos ya ocupados y a su capacidad de generar empleo local. Esta modalidad permite ajustar diseños sobre la marcha y responder a condiciones específicas del sitio, lo cual resulta especialmente útil en refinerías activas con configuraciones complejas.

Sin embargo, esta estrategia también presenta desventajas significativas: mayores plazos de ejecución, elevados costos asociados a la mano de obra local, alta sensibilidad a las condiciones climáticas, una mayor interferencia con las operaciones en curso, entre otras. Estas limitaciones han impulsado el interés por alternativas más eficientes, entre las cuales la construcción modular ha ganado protagonismo en los últimos años.

En la práctica, muchos proyectos adoptan enfoques mixtos, combinando construcción tradicional y modular según las características del sitio y los objetivos del proyecto. Las refinerías greenfield o

las nuevas unidades dentro de complejos existentes tienden a incorporar módulos de gran tamaño, mientras que las intervenciones menores o en áreas operativas activas suelen ejecutarse mediante métodos tradicionales.

Esta evolución en las estrategias constructivas refleja una tendencia hacia la optimización integral de los proyectos, donde la elección del enfoque adecuado puede marcar la diferencia en términos de plazos, costos, seguridad y continuidad operativa.

Bajo esta coyuntura, una Refinería existente de la región se encontraba interesada en modernizar y expandir la capacidad de su planta. Para alcanzar este objetivo, se propuso la ejecución de un proyecto integral de ampliación en tres plantas clave en el desarrollo del negocio:

- I. Instalación de una nueva unidad de destilación atmosférica (CDU 3)
- II. Revamp de la unidad de destilación al vacío existente (VDU)
- III. Instalación de una nueva unidad de hidrotratamiento de diesel (DHT)

En función del contexto actual, desde las etapas iniciales del proyecto, la empresa contratista de ingeniería junto con el cliente, definieron adoptar un enfoque EPCM integral, con una planificación articulada que contempló ingeniería, procura, contrataciones y ejecución dentro de un cronograma único e integrado. Esta visión, incorporada desde la factibilidad, permitió alinear tempranamente aspectos clave como la constructibilidad, la modularización y la estrategia de ejecución. En este marco, se realizó un estudio de distribución dentro de la refinería para identificar unidades cuello de botella, definir capacidades de diseño específicas y proponer mejoras a tecnologías tradicionales, lo que dio lugar al diseño de plantas tailor-made. Para este diseño a medida, se logró aplicar una estrategia constructiva mixta entre en-sitio y modularizada, optimizando la ejecución de una nueva unidad de destilación atmosférica en el contexto de un proyecto integral de ampliación y modernización.

3. DESARROLLO

BLOQUE 1 -Topología de la Refinería y definición de Proyecto Integral de Ampliación

La topología de la refinería responde a la configuración de las unidades principales de la misma así como también a la interconexión entre ellas. Al momento de iniciarse el proyecto de ampliación integral de la refinería, el escenario topológico se encontraba compuesto por las siguientes unidades de principal interés para la determinación de los límites en la ampliación:

- Unidad Desnaftadora (CNSU)
- Dos unidades de destilación atmosférica (CDU 1 y CDU 2)
- Unidad de destilación al vacío (VDU)
- Unidad de estabilización de nafta (NSU)
- Unidad de cracking catalítico (FCCU)
- Unidad de Visbreaking (VBU)

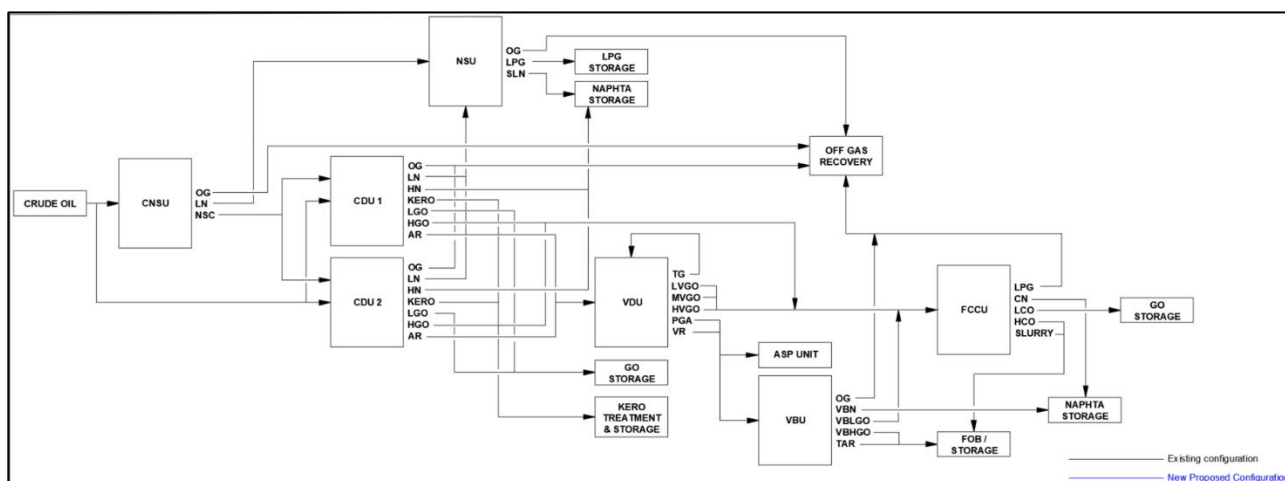


Figura 1. Configuración topológica de la refinería existente.

A fines de poder incrementar la capacidad de procesamiento de crudo de la refinería, así como también atenerse a las nuevas regulaciones en calidad de combustibles, se propuso la ejecución de un Proyecto Integral de Ampliación que comprendía:

- Instalación de una nueva unidad de destilación atmosférica (CDU 3) con una capacidad de diseño que permita aumentar un 73% la capacidad de procesamiento previa de la refinería.
- Revamp de la unidad de destilación al vacío existente (VDU) proyectado con un aumento de capacidad del 30% tal que permita absorber el incremento de residuo atmosférico producto de la instalación de la CDU 3.
- Instalación de una nueva unidad de hidrotratamiento de diesel (DHT) para atenerse a las nuevas normativas en calidad de combustibles.

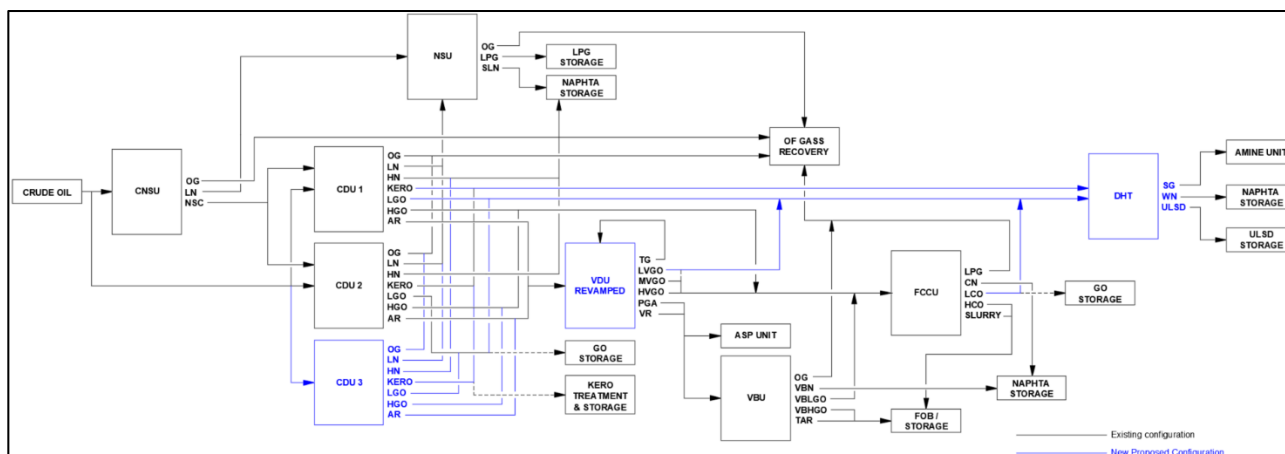


Figura 2. Nueva configuración topológica de la refinería.

En el marco de este Proyecto Integral de Ampliación, también fue necesario realizar la verificación del sistema de antorcha existente. En consecuencia, el cliente optó por instalar un sistema de recuperación de gases de antorcha con el objetivo de reducir su huella de carbono.

Determinación de fases constructivas y capacidades de diseño

Como punto de partida para la definición del proyecto de ampliación, se llevó a cabo un estudio para evaluar el impacto de la instalación de una nueva unidad de destilación atmosférica (CDU 3) sobre la distribución de carga en las unidades existentes del complejo. Este análisis permitió construir una visión integral del comportamiento del esquema de refinación ante el incremento de capacidad primaria, y sirvió como base tanto para la determinación de capacidades de diseño específicas como para la planificación de la secuencia constructiva del proyecto.

Además del objetivo principal de aumentar la capacidad de procesamiento de crudo, la incorporación de la CDU 3 respondió a la necesidad de adaptar el esquema de destilación a una nueva canasta de crudos, más liviana que la procesada históricamente en CDU 1 y CDU 2. Esta nueva configuración fue diseñada considerando la evolución del slate de crudos actualmente disponible en la región.

Los principales objetivos perseguidos con el estudio de distribución de cargas estuvieron orientados a validar las capacidades operativas y de diseño de las unidades involucradas, considerando las condiciones particulares del complejo y las restricciones internas identificadas.

En primer lugar, se identificó que la capacidad de diseño de la nueva CDU 3 requerida por el cliente resultaba comparativamente grande frente a las unidades aguas abajo considerando que, con su incorporación, la capacidad de procesamiento de crudo total de la refinería aumentaría en un 73%. En segundo lugar, el análisis reveló que la unidad de vacío (VDU) ya se encontraba operando al límite de su capacidad original, razón por la cual prácticamente todo el crudo reducido de esta unidad debería

enviarse a FOB (Fuel Oil Blending). Este resultado dejó en evidencia la necesidad de aumentar la capacidad de procesamiento de la unidad de vacío (VDU).

En relación con lo anterior, se validó la magnitud del incremento de capacidad proyectado para VDU, observándose que el valor de diseño del revamp se encontraba condicionado por la unidad de cracking catalítico (FCCU) aguas abajo, cuya alimentación podía incrementarse hasta un 14% para alcanzar su carga máxima. Considerando que aproximadamente el 50% de la carga del VDU se alimenta luego al FCCU, se definió un objetivo de revamp del VDU del orden del 30% de su capacidad de diseño original.

Asimismo, el estudio permitió validar la capacidad definida para la nueva unidad de hidrotratamiento de diésel (DHT) como también permitió validar el diseño seleccionado. En consecuencia se optó por una tecnología patentada que contempla la operación del reactor en fase líquida, reduciendo el consumo de energía y aumentando la vida útil del catalizador, y que logra alcanzar niveles de azufre inferiores a los exigidos en el gasoil grado 3 conforme a la nueva normativa de combustibles.

Finalmente, la unidad de recuperación de gases de antorcha fue diseñada con una capacidad tal que permitiese recuperar la mayor parte de los venteos continuos en base a datos históricos de venteos disponibles y de estimaciones de venteos continuos futuros asociados a las nuevas unidades. El diseño de esta unidad corresponde a un módulo provisto por un tecnólogo especializado en este tipo de sistemas, lo que implicó el desarrollo en sitio del ruteo de cañerías para su interconexión tanto con el sistema de venteos como servicios auxiliares.

En conjunto, estos resultados permitieron definir capacidades de diseño ajustadas a la realidad operacional del complejo, asegurando una implementación técnica afín a las limitaciones y oportunidades detectadas sin recurrir a soluciones estándar o adquisición de plantas prearmadas para dar respuesta a los requerimientos específicos de la refinería.

En función de las conclusiones anteriores y de las restricciones operativas asociadas al manejo progresivo de carga, se definió una secuencia de implementación en tres fases: primero, la puesta en marcha de CDU 3 operando en turndown, luego, la entrada en servicio de la unidad de vacío (VDU) revampeada y, finalmente, la incorporación de la nueva unidad de hidrotratamiento de diésel (DHT). Si bien esta secuencia respondió en parte a la necesidad de dosificar el incremento de carga en el sistema, también reflejó decisiones económico-estratégicas del cliente, ya que algunas fases podrían haberse ejecutado en paralelo desde el punto de vista técnico.

Ante este cronograma desafiante, definido por las prioridades operativas de la refinería y condicionado por restricciones técnicas y logísticas, se propuso una solución integral que combinó criterios técnicos de diseño con una estrategia proactiva de gestión del riesgo, estructurando la

planificación del proyecto de forma que cada etapa pudiera ejecutarse con certidumbre, mínima interferencia y control sobre las variables críticas de ejecución.

BLOQUE 2 - Nueva Unidad de Destilación de Crudo (CDU 3)

Diseño de CDU 3: Soluciones técnicas para una operación robusta y eficiente

El diseño de la nueva unidad de destilación atmosférica (CDU 3) partió de un conjunto de condiciones base definidas por el cliente, que incluyeron un amplio rango de canastas de crudos, basado en la variabilidad identificada en los pronósticos de los crudos no convencionales de la región, una capacidad de procesamiento objetivo y una especificación para los productos de mayor valor. Durante la etapa de diseño, se identificaron una serie de mejoras orientadas a maximizar el desempeño operativo y alinearse con los objetivos estratégicos del proyecto y del cliente. Estas mejoras apuntaron a responder a tendencias operativas y de mercado, y se caracterizan por su alto impacto en variables clave como la eficiencia energética, la recuperación de productos valiosos y la reducción de emisiones.

- **Optimización del Horno de Procesos:**

En el marco de las mejoras implementadas en el horno de procesos, se destacan tres iniciativas clave orientadas a optimizar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental. En primer lugar, se incorporó precalentador de aire que permitió elevar la eficiencia de quemado en hasta un mínimo de 90% y un mazo convectivo dedicado para sobrecalentar vapor de baja presión (LPS), utilizado posteriormente en la inyección al fondo de la Torre Atmosférica y los Sidestrippers. En segundo lugar, se implementaron quemadores Ultra Low NOx, capaces de reducir significativamente las emisiones de NOx y CO, alcanzando valores de hasta 30 ppm según la tecnología y el fabricante. Finalmente, se aplicó un sistema de control avanzado del consumo de gas combustible, permitiendo mantener una relación óptima aire/gas y reduciendo tanto el consumo como las emisiones de contaminantes asociadas.

- **Separador Preflash:**

Se propuso la incorporación de un separador preflash aguas arriba del horno de la nueva torre de destilación atmosférica. Esta disposición permite remover anticipadamente los componentes más livianos de la alimentación, inyectando directamente los vapores generados en la torre de fraccionamiento. Al reducir la cantidad de líquido que ingresa al horno, se disminuyó el caudal volumétrico a lo largo de este equipo, lo que se tradujo en una reducción significativa en su dimensionamiento. Entre los beneficios asociados se destacan la reducción de la pérdida de carga en el horno, la disminución de la potencia requerida por la bomba de alimentación a la torre y la posibilidad de optimizar el diseño termohidráulico del sistema.

- **Reutilización del agua condensada en el sistema de gases de tope:**

Los gases de tope de la columna de destilación son condensados mediante el uso de aeroenfriadores y de intercambiadores de calor. El condensado resultante incluye una fase acuosa asociada al vapor inyectado en el proceso aguas arriba. Los diseños tradicionales, por limitaciones de CAPEX, suelen enviar esta corriente acuosa a un sistema de tratamiento para luego realizar su

disposición final. Sin embargo, durante el desarrollo de esta ingeniería se propuso reutilizar el agua condensada para el lavado del crudo previo al ingreso al desalador, reduciendo de esta forma los efluentes industriales y, el consumo de agua fresca para el lavado.

- **Incorporación de integraciones energéticas:**

Si bien la integración energética, particularmente en los trenes de precalentamiento de unidades de destilación atmosférica, forma parte del diseño habitual de estas plantas, se propuso un conjunto de mejoras que permitieran acrecentar aún más el ahorro energético dentro de la CDU 3.

En primer lugar, la instalación de un sistema de intercambio térmico entre el agua efluente del desalador y el agua de lavado permitió recuperar calor residual de la corriente caliente, reduciendo así la demanda de gas combustible en el horno en aproximadamente un 2%. Este ahorro se debe a que el precalentamiento del agua de lavado evita el enfriamiento del crudo al mezclarse con agua fría previo a su ingreso al horno, manteniendo así una temperatura más estable y disminuyendo la carga térmica del horno.

Adicionalmente, la incorporación de un intercambiador para aprovechar el calor de la corriente de crudo reducido del fondo de la columna con el crudo de alimentación al horno permitió optimizar el esquema de enfriamiento de crudo reducido a tanques, posibilitando la reducción del consumo de energía en el aeroenfriador de salida en unos 500 kW y también reducir el consumo de fuel gas del horno, y emisiones asociadas, en un 30%.

Por último, se incorporó un intercambiador integrado entre los gases de tope de la torre y el crudo que ingresa a la unidad en un esquema serie-paralelo. El arreglo de equipos se definió considerando el amplio rango de caudales de operación (diseño/turndown) y canastas de crudo, así como también la flexibilidad operativa del sistema. Este tipo de diseño optimizado de intercambio de calor permitió, a su vez, una reducción en el consumo de gas combustible en el horno estimado en un 29%.

- **Utilización de Variadores de Frecuencia en bombas principales:**

Conforme al esquema de fases de ejecución del proyecto integral de ampliación, es esperable que la planta opere a baja carga (turndown) durante periodos prolongados. Con la implementación de un variador de frecuencia, fue posible regular las potencias consumidas en bombas de mayor porte ajustando sus presiones de descarga logrando un uso eficiente de energía a lo largo de toda la operación.

Se presenta, a continuación, un diagrama de flujo simplificado de las instalaciones del CDU 3:

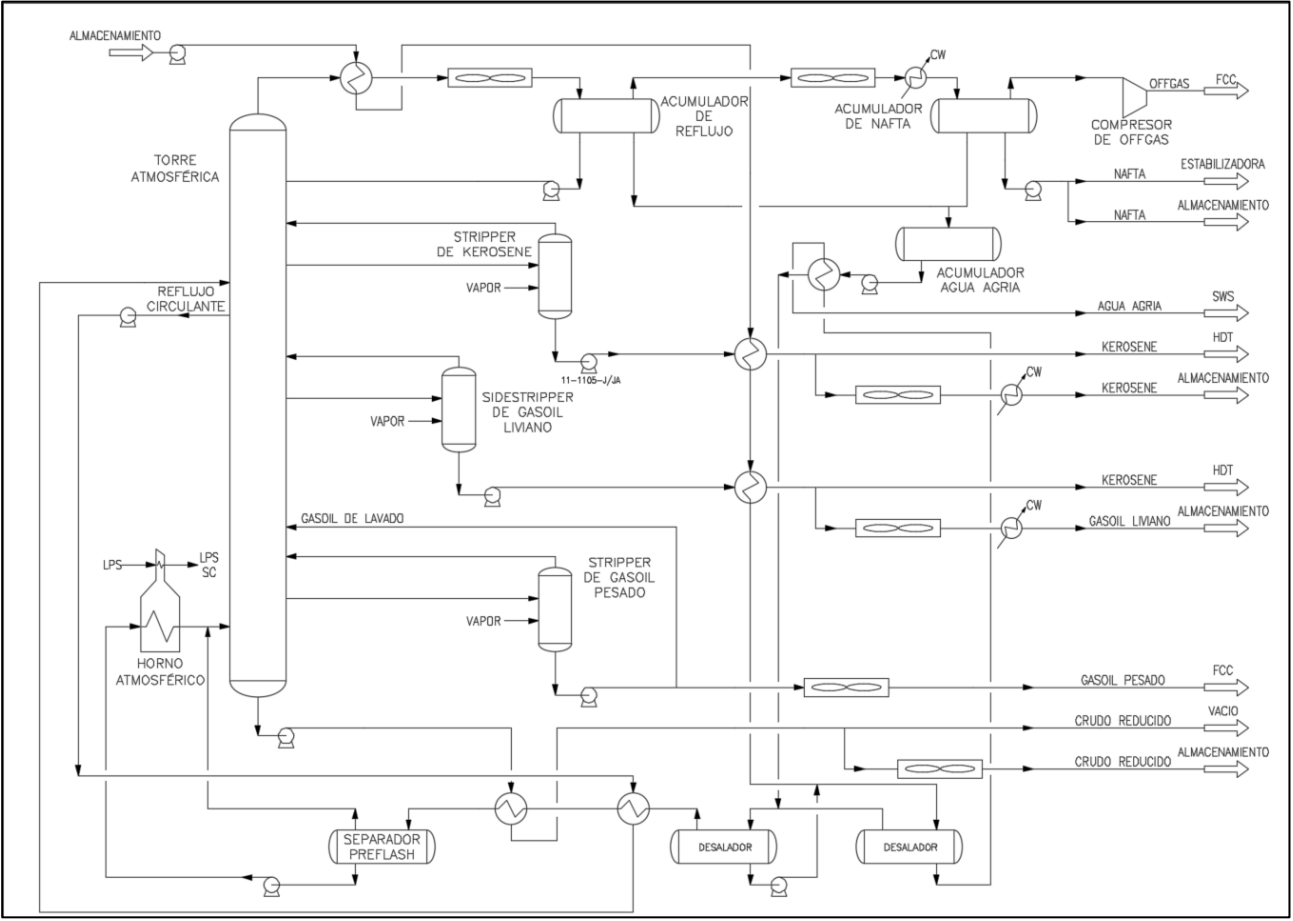


Figura 3 - Diagrama de Flujo simplificado de CDU 3.

Las mejoras técnicas implementadas, junto con las necesidades específicas del cliente, considerando una capacidad de diseño específica y canastas de crudo condicionadas por la disponibilidad regional, condujeron, tal como se mencionó, al desarrollo un diseño tailor-made. El principal desafío no residía únicamente en el diseño en sí, sino en cómo materializarlo dentro del contexto de una refinería en operación. La construcción e integración de la nueva unidad debía llevarse a cabo en un entorno con significativas restricciones de espacio, tanto para la implantación como para el transporte y montaje de equipos, lo que demandaba soluciones innovadoras no solo desde lo técnico, sino también desde lo logístico y constructivo. En este contexto, se adoptó una estrategia de ingeniería constructiva integral que contempló no solo un diseño eficiente, sino también una ejecución optimizada.

Mientras que en la actualidad lo más común en las refinerías maduras de América Latina sigue siendo la construcción mediante el método tradicional en sitio, en este caso se buscó lograr una disminución de los trabajos en campo, un uso más eficiente del espacio disponible y una reducción de las interferencias con la operación normal de la refinería, adoptando un enfoque híbrido con una modularización parcial de equipos y sistemas.

Estrategia de definición de módulos

La definición de qué equipos formarían parte de cada módulo en la nueva unidad CDU 3 respondió a un enfoque orientado a la integración funcional del proceso, la optimización de trazas de cañerías y la reducción del número de interfaces entre paquetes. Esta estrategia buscó evitar particiones arbitrarias que generaran puntos de conexión adicionales entre equipos que operan directamente secuencial o se encuentran estrechamente vinculados desde el punto de vista del proceso. Además de favorecer la lógica operativa y constructiva, este criterio permite facilitar el seguimiento del proceso en campo una vez montada la planta, favoreciendo una interpretación clara de los recorridos de este.

Desde el inicio se adoptó una visión integral que incluyó la identificación temprana de los equipos de mayor plazo de entrega (Long Lead Items, LLIs), priorizando su ingeniería con el objetivo de evitar demoras en su adquisición y en la secuencia de construcción de la Unidad. Esta estrategia anticipativa fue clave para ordenar las decisiones de modularización y asegurar la coherencia entre el diseño del sistema, los tiempos de entrega y los paquetes de compra.

Otro aspecto fundamental a la hora de la definición de la estrategia constructiva de la Unidad fue el respeto a las prácticas operativas y constructivas del cliente, que definieron criterios específicos a tener en cuenta en el diseño modular. Un ejemplo claro es la preferencia por mantener las bombas principales fuera de los módulos, alineadas sobre el pasillo central de la planta, tanto por cuestiones de mantenimiento como de familiaridad operativa. Esta pauta se respetó de forma general salvo existieran excepciones justificadas desde el punto de vista funcional, como en el caso del módulo de desalación desarrollado más adelante.

Con base en estos lineamientos, se agruparon dentro de un mismo módulo los equipos que formaban parte de una misma etapa funcional del proceso. Por ejemplo, se definieron módulos independientes para la primera y segunda etapa de condensación de gases de tope, integrando en cada uno los acumuladores e intercambiadores asociados a su respectiva función. Del mismo modo, el sistema de desalación fue integrado en un único módulo que incluyó tanto los desaladores de primera y segunda etapa como la bomba de recirculación y el intercambiador de agua de lavado. En este caso, a diferencia de otras bombas que se mantuvieron fuera de los módulos, se decidió incorporarla dentro del paquete para simplificar el diseño hidráulico y facilitar la responsabilidad integral del proveedor sobre el sistema.

En cuanto a los equipos no modularizados, las bombas principales se gestionaron como equipos sueltos (loose items), alineadas sobre el parral conforme a la práctica habitual del cliente. Asimismo, los aeroenfriadores, careciendo de sentido su integración en módulos debido a su gran tamaño y requerimientos de montaje, se mantuvieron como equipos individuales, siendo instalados posteriormente sobre las estructuras metálicas del parral.

En el caso de los equipos de gran porte y provisión prolongada, como la Torre Atmosférica y el Horno de Proceso, se adoptó un enfoque tradicional. Ambos fueron adquiridos como equipos individuales, sin modularización, debido a sus dimensiones, criticidad técnica y el hecho de que no existe una ganancia real en intentar integrarlos a módulos prefabricados. La torre se implantó como un único cuerpo, conectando su instrumentación y líneas asociadas en campo. El horno, por su parte, se concibió como equipo autónomo, aunque sí se modularizó su skid de gas combustible.

Por otro lado, el Sistema de Compresión de Offgas fue modularizado en su totalidad. Este tipo de sistemas se ve particularmente favorecido por la estrategia modular, ya que permitió al proveedor diseñar de forma integrada los compresores, scrubbers y elementos auxiliares, asegurando relaciones geométricas críticas (alturas relativas, pendientes, distancias mínimas) y reduciendo considerablemente el trazado de cañerías entre equipos.

De forma complementaria, y como parte de una estrategia constructiva orientada a reducir la intervención en campo, se evaluó e implementó la modularización de parrales de cañerías, permitiendo que grandes tramos de líneas de proceso y servicios fueran premontados en taller. Esta decisión aportó beneficios tanto en términos de tiempo como de calidad de ejecución, aunque también implicó ciertos compromisos a nivel estructural: cada módulo de parral debía ser autoportante, transportable y autoalineable, lo que exigió diseños más robustos que los convencionales.

Dado el alcance de la instalación y la longitud total del parral, la estrategia modular ya contemplaba la división en múltiples módulos a lo largo de la planta, acorde a la extensión del trazado de cañerías y las restricciones logísticas del montaje. Sin embargo, debido a la magnitud de las cargas involucradas y a los límites dimensionales para el transporte, fue necesario dividir también el ancho del parral, lo que implicó el desarrollo de dos módulos paralelos por tramo, en lugar de una sola estructura transversal. Esta configuración obligó a duplicar las columnas centrales respecto de una solución convencional, en la cual dichas columnas se comparten en una única estructura integrada.

Como consecuencia, el diseño modular del parral implicó no solo un incremento en el número de apoyos y elementos estructurales, sino también un ensanchamiento total del conjunto, que impactó directamente en el consumo de acero.

Aunque el impacto neto en materiales es difícil de cuantificar, se estima que esta estrategia resultó en un incremento del orden de 9.3% en el tonelaje de acero estructural y un ancho de parral de 8.7 metros, es decir, aproximadamente 0.6 metros más que el parral requerido bajo una estrategia convencional. El aumento de tonelaje se atribuye a la incorporación de elementos estructurales adicionales para garantizar la estabilidad, el izaje y transportabilidad de los módulos. Por su parte, el mayor ancho se debe tanto a la duplicación de componentes como al espaciamiento entre ellos, requerido para asegurar la disponibilidad de espacio necesario para un correcto montaje.

No obstante, debe considerarse que, frente a una construcción tradicional, la modularización permite contar con un control de calidad anticipado en taller minimizando errores de montaje y retrabajos, lo que contribuye a equilibrar el análisis técnico-económico entre ambas alternativas.

Criterios de diseño e integración en planta modular: diseño de Layout

Una vez establecida la partición modular de equipos, se dio inicio a la etapa de diseño preliminar del Layout general de planta, con el objetivo de definir la disposición física de los módulos, equipos sueltos y estructuras auxiliares. Esta instancia se abordó haciendo uso del know-how interno, aprovechando tanto el desarrollo de modelos preliminares como la experiencia acumulada en proyectos previos de naturaleza similar. El proceso incluyó la revisión de casos análogos de Unidades de Destilación Atmosférica, lo que permitió anticipar restricciones operativas y constructivas, y acelerar la toma de decisiones durante las primeras etapas del diseño.

Uno de los principales condicionantes en esta instancia fue la limitación de espacio ya que el área disponible había sido anteriormente reservada para la instalación de una CDU de la mitad de la capacidad de la CDU 3 proyectada. Esto implicó desafíos relevantes en cuanto al aprovechamiento del espacio y la disposición secuencial de los módulos, exigiendo un diseño sumamente eficiente que combine criterios de acceso, mantenimiento y cumplimiento normativo. El desafío no radicaba únicamente en la escasa superficie disponible, sino en que dicha superficie debía permitir la disposición de los equipos respetando las restricciones impuestas por la normativa vigente, lo que condiciona directamente el footprint mínimo que puede alcanzar una unidad de este tipo.

En particular, el diseño del layout se ajustó estrictamente a los requisitos establecidos por legislación y prácticas de diseño del cliente, aplicables no solo a distancias mínimas de seguridad entre equipos de la propia CDU 3, sino también a la separación respecto de otras unidades de proceso adyacentes, así como de zonas donde pudiera haber presencia de personas, como oficinas, talleres y áreas auxiliares. Estas restricciones normativas, sumadas a los resultados de estudios de riesgo, impusieron un marco exigente que fue contemplado desde las etapas preliminares de ingeniería, asegurando que las limitaciones espaciales no comprometieran la conformidad regulatoria del diseño ni los principios de operación segura y mantenibilidad dentro de una refinería en funcionamiento.

Se presenta a continuación un gráfico donde puede observarse la tendencia de footprint requerido para una CDU de construcción tradicional (No Modular) en función de la carga de la misma. Dicha tendencia fue elaborada a partir de un mínimo de 30 puntos de plantas existentes y nuevas en Latinoamérica. Adicionalmente se identifica el área de implantación de la nueva CDU 3 (Modular).

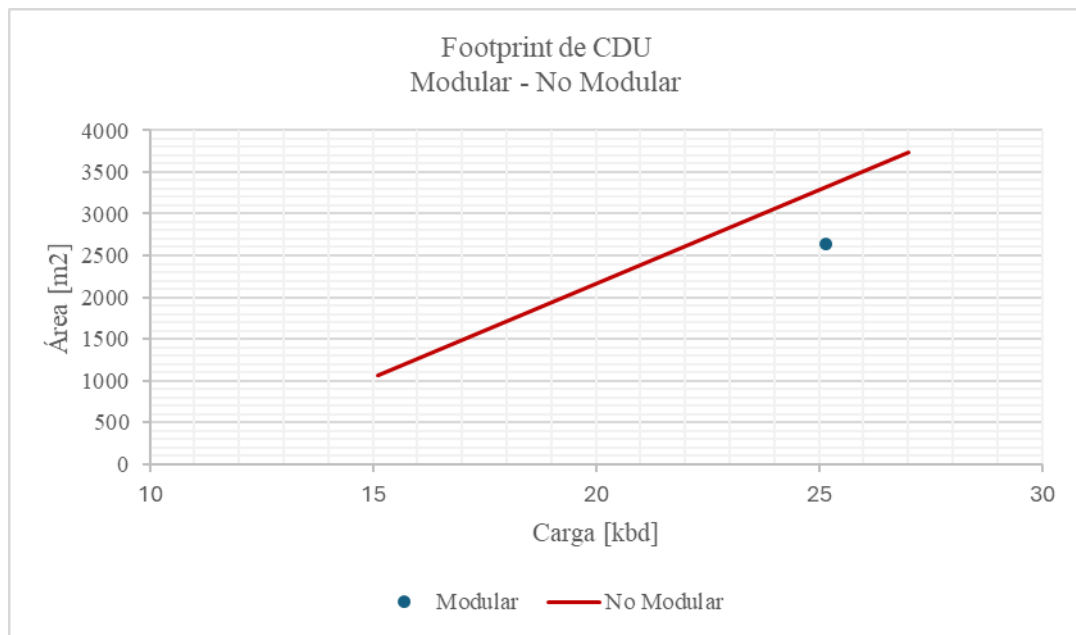


Figura 4. Comparación entre footprint requerido para CDUs no modulares vs CDU 3.

Se observa en el gráfico anterior, que el área requerida para una CDU de 25 kbd bajo una construcción tradicional, resulta aproximadamente un 20% mayor que la disponible para la instalación de la CDU 3.

Finalmente, se presenta a continuación un recorte del Modelo 3D de la CDU 3 donde puede visualizarse los principales equipos, módulos y parrales de la Unidad:

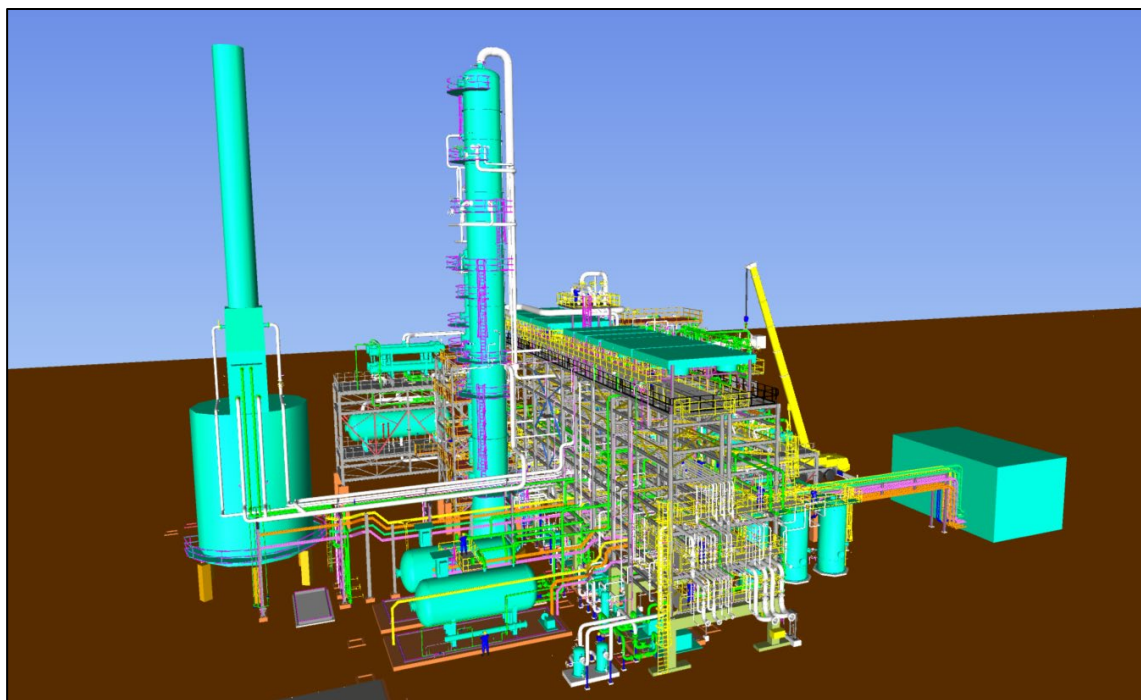


Figura 5. Modelo 3D de CDU 3.

BLOQUE 3 – Optimización de la Estrategia de Ejecución

En proyectos industriales complejos, como los vinculados al sector de refinación, la selección de una estrategia constructiva adecuada resulta determinante para el éxito técnico y económico de la ejecución. En este tipo de desarrollos, la planificación anticipada cumple un rol central, ya que permite abordar tempranamente los aspectos clave de viabilidad técnica y seguridad, identificar los principales riesgos asociados y asignarlos de manera eficiente según las capacidades de los distintos actores involucrados.

En este marco, la estrategia de modularización se presenta como una alternativa particularmente eficaz para reducir la complejidad y los riesgos propios de la construcción tradicional en sitio. Al trasladar parte significativa del trabajo a talleres especializados, se mejora la trazabilidad, se acortan los plazos mediante la ejecución paralela de actividades, y se disminuyen las interferencias con la operación de plantas existentes. Además, esta estrategia permite mitigar riesgos en contextos de alta conflictividad sindical, limitaciones de espacio o logística desafiante. Aunque puede implicar costos adicionales en fabricación y transporte, dichos sobre costos tienden a ser compensados por la mejora en predictibilidad y la menor exposición a imprevistos durante la obra.

Durante la planificación de este proyecto, la filosofía de la estrategia constructiva adoptada fue reducir el riesgo allocating la responsabilidad al actor más capacitado para hacerlo. Esto requiere una coordinación intensiva desde etapas tempranas entre disciplinas de ingeniería, adquisiciones, logística y construcción. Cuando se implementa la modularización con esta planificación robusta y una gestión de riesgos efectiva es posible reducir la cantidad de frentes de trabajo en obra, disminuir la presencia prolongada de personal en campo y acortar la duración total del montaje.

Este enfoque representa una evolución frente a los modelos tradicionales de ejecución, permitiendo una mejor gestión del riesgo, una asignación más racional de responsabilidades y una mayor robustez del proyecto frente a incertidumbres externas. Esta estrategia favorece una ejecución más ordenada, predecible y con menor exposición a desvíos en plazo y costo.

Gestión del riesgo y Minimización de la Incertidumbre

El desarrollo de una estrategia de ejecución modular híbrida para este proyecto no respondió únicamente a un objetivo de reducción de plazos constructivos, sino, fundamentalmente, a una filosofía integral de gestión del riesgo, en la cual Hytech, como empresa de ingeniería/OE (owner de ingeniería), cumple un rol activo en la protección del cliente frente a las múltiples fuentes de incertidumbre que se presentan en proyectos que resultan particularmente complejos en plantas de downstream.

El punto de partida fue reconocer que, una vez aprobados los fondos CAPEX y abierta la ventana de ejecución, todo retraso o desviación pasa a representar un riesgo directo para la Refinería como owner del proyecto. En este contexto, la propuesta de la empresa de ingeniería consistió en planificar

y estructurar el proyecto de forma tal que cada riesgo fuera anticipado, analizado y asignado de forma explícita al actor más competente para gestionarlo. Esta asignación inteligente del riesgo es el eje central de la estrategia, y se materializó en múltiples decisiones a lo largo del desarrollo.

El primer paso fue avanzar con un alto grado de definición de ingeniería desde las etapas iniciales. Esta decisión respondió a la necesidad de reducir incertidumbre técnica y a una lectura realista del contexto del proyecto, particularmente en relación con el mercado local de contratistas y proveedores. Si bien muchas de estas empresas cuentan con sólida experiencia en ejecución y gestión constructiva, se identifica actualmente una limitación en la oferta de firmas con disponibilidad técnica inmediata para asumir ingeniería de diseño, en parte debido a una sobredemanda relativa de servicios especializados. Dado este escenario, delegar definiciones técnicas clave a los contratistas habría implicado trasladarles un riesgo que no podrían gestionar eficientemente, con el consiguiente impacto en cronograma, calidad y costos.

La ingeniería realizada contempló el desarrollo de una WBS (Working Breakdown Structure) orientada a la compra, que permitió identificar tempranamente los componentes críticos del sistema modular (instrumentación especializada, materiales aleados, long lead items internos de cada provisión), anticipar sus restricciones logísticas y coordinar su entrega con la estrategia de fabricación en talleres. De esta manera, al momento de licitar la construcción y provisión de módulos, cada paquete incluía los elementos técnicos necesarios para su ejecución, permitiendo reducir márgenes de contingencia, mejorar la calidad de las ofertas y facilitar la transición hacia obra.

Esta visión se complementó con una estrategia de procura y seguimiento (E+P: Engineering + Procurement) activa por parte de la empresa de ingeniería, en la cual Hytech no solo especificó técnicamente los equipos y materiales, sino que también asumió el seguimiento de proveedores con la revisión documental, el control de calidad en taller, el monitoreo del cronograma, activación y control de costos. En este enfoque end-to-end se priorizó un acompañamiento activo y desarrollo conjunto, brindando soporte técnico donde fuera necesario, permitiendo acompañar y fortalecer a los proveedores durante el proceso de fabricación y así no depender de contratistas de plena autonomía y gran porte.

Desde el punto de vista operativo, la modularización también aportó una reducción tangible en la exposición a riesgos durante la etapa de ejecución en sitio. Al trasladar la mayor parte del trabajo de construcción a talleres especializados, se logra minimizar la ventana de ejecución, reduciendo así la probabilidad de ocurrencia de eventos externos disruptivos: conflictos sindicales, restricciones climáticas, interferencias con unidades existentes o cambios regulatorios. Cuanto más breve es esa ventana, menor es la posibilidad de que estos se materialicen.

Como resultado de la aplicación de esta estrategia modular híbrida, el horizonte de plazo total del proyecto se redujo en cuatro meses, pasando de 27 a 23 meses desde el inicio de la ingeniería básica

extendida. Esta mejora confirma el valor de una planificación integrada basada en la anticipación de riesgos y en la ejecución técnica coordinada.

Desarrollo y Ejecución del Enfoque Constructivo Híbrido

Esta estrategia se diseñó e implementó en un contexto particularmente desafiante. El proyecto se desarrolló en medio de restricciones severas a las importaciones, conflictos geopolíticos que afectaron las cadenas de suministro y limitaciones estructurales del mercado nacional de construcción industrial. Ante este marco, se propuso una estrategia híbrida-modular como una herramienta de resiliencia técnica y logística, capaz de anticipar y aislar variables externas del camino crítico del proyecto.

Asimismo, la estrategia implementada se alinea con las tendencias actuales impulsadas por los departamentos de HSE, que priorizan minimizar la cantidad y duración de trabajos activos dentro de plantas operativas. Las intervenciones en sitio no solo representan un riesgo inherente para el personal, sino que además abren una ventana de exposición a incidentes operativos, interferencias con unidades en servicio o situaciones no previstas que puedan extender los trabajos más allá de lo planificado. En este sentido, la modularización permite acotar estas ventanas de ejecución a su mínima expresión, trasladando gran parte del trabajo constructivo a entornos controlados, reduciendo la probabilidad de aparición de contingencias.

Finalmente, cabe destacar que el enfoque adoptado no se limitó a replicar prácticas internacionales, sino que supuso una adaptación innovadora al contexto argentino, combinando estándares globales de ejecución modular con un conocimiento profundo del entorno operativo local. Este tipo de estrategia, si bien habitual en proyectos upstream o en instalaciones nuevas en regiones remotas, no es comúnmente implementada en plantas downstream existentes, donde las restricciones espaciales, normativas y de operación continua imponen desafíos adicionales. Por ello, el presente proyecto representa un caso singular dentro del sector, y un modelo potencial para futuras aplicaciones industriales en la región.

4. CONCLUSIONES

La implementación de una estrategia híbrida-modular para la ejecución integral de proyectos complejos en refinerías maduras se presenta como una solución altamente efectiva y replicable, especialmente en contextos operativos exigentes con restricciones espaciales y regulatorias significativas. La integración de un diseño tailor-made con una modularización estratégica tiene el potencial de superar desafíos que tradicionalmente limitan este enfoque a instalaciones nuevas o condiciones ideales. Esta visión innovadora permite reducir considerablemente los tiempos de construcción en campo, minimizar interferencias con las operaciones existentes, optimizar el uso del espacio disponible y aumentar sustancialmente la certidumbre en costos y cronogramas.

La clave del éxito de esta estrategia reside en la definición temprana y precisa de responsabilidades, riesgos y alcances entre los distintos actores involucrados (proveedores, empresa de ingeniería y cliente) junto con una planificación detallada desde etapas iniciales, enfocada en la constructibilidad y la integración modular anticipada. Este enfoque integral y proactivo facilita la gestión eficiente de los recursos críticos y mitiga riesgos típicos de la construcción tradicional en campo, tales como conflictos laborales, retrasos logísticos e incertidumbres económicas.

En resumen, esta propuesta híbrida-modular no solo responde adecuadamente a las necesidades actuales del mercado, caracterizadas por nuevas regulaciones ambientales, variabilidad en las canastas de crudo disponibles y una creciente demanda de combustibles de alta calidad, sino que también establece un nuevo estándar de ejecución aplicable para refinerías existentes. La metodología desarrollada proporciona un precedente valioso, abriendo camino hacia una nueva era en la modernización de infraestructura de refinación, caracterizada por soluciones innovadoras, resilientes y altamente adaptadas al contexto operativo regional.

5. BIBLIOGRAFÍA

- (1) C. Alfonsi, *Actualidad y proyecciones: Contexto de la refinación en Latinoamérica*, Petrotecnia, 2009.
- (2) Refinería de Cartagena, “*Nuestra historia*”. Disponible en el sitio web:
<https://www.refineriadecartagena.com.co/es-ES/Nuestra-historia/>.

6. BREVE CV DE LOS AUTORES

Sofía Belén Gallo

- **Título y lugar de estudio:** Ingeniera Química, Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA).
- **Cargo actual en la empresa:** Ingeniera Ssr. de Procesos, Hytech Ingeniería.
- **Trayectoria (diferentes empresas en las que hizo su carrera):** Inició su carrera profesional en Chevron (2019). Desde 2021 se desempeña en Hytech Ingeniería, desempeñándose actualmente Ingeniera Ssr. en el área de Procesos.

Camila Aurrecoechea

- **Título y lugar de estudio:** Ingeniera Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires (UBA), Argentina.
- **Cargo actual en la empresa:** Ingeniera Ssr. de Procesos, Hytech Ingeniería S.A.
- **Trayectoria (diferentes empresas en las que hizo su carrera):** Inició su carrera profesional en Hytech Ingeniería en el año 2020, desempeñándose actualmente como Ingeniera Ssr en el área de Procesos.

Guadalupe Urriza

- **Título y lugar de estudio:** Ingeniera Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires (UBA), Argentina.
- **Cargo actual en la empresa:** Ingeniera Ssr. de Procesos, Hytech Ingeniería S.A.
- **Trayectoria (diferentes empresas en las que hizo su carrera):** Inició su carrera profesional en Hytech Ingeniería en el año 2020, desempeñándose actualmente como Ingeniera Ssr en el área de Procesos.

Patricio Higgins

- **Título y lugar de estudio:** Ingeniero Químico, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires (UBA), Argentina.
Posgrado: Análisis Numérico de Flujos usando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), ESSS.
- **Cargo actual en la empresa:** Consultor de Procesos, Hytech Ingeniería S.A.
- **Trayectoria (diferentes empresas en las que hizo su carrera):** Inició su carrera profesional en Hytech Ingeniería en 2014 como Ingeniero de Procesos. Desde entonces ha evolucionado a Ingeniero Sr. y actualmente se desempeña como Consultor de Procesos. Adicionalmente, se desempeñó como Jefe de Trabajos Prácticos de Introducción a la Ingeniería Química en la Universidad de Buenos Aires.