

Posibilidades y riesgos en la modularización. Diseño de módulos móviles aplicables a mantenimiento

Por **Astrid Hardtke y Aníbal Mellano** (Tecnología ARMK S.A.)

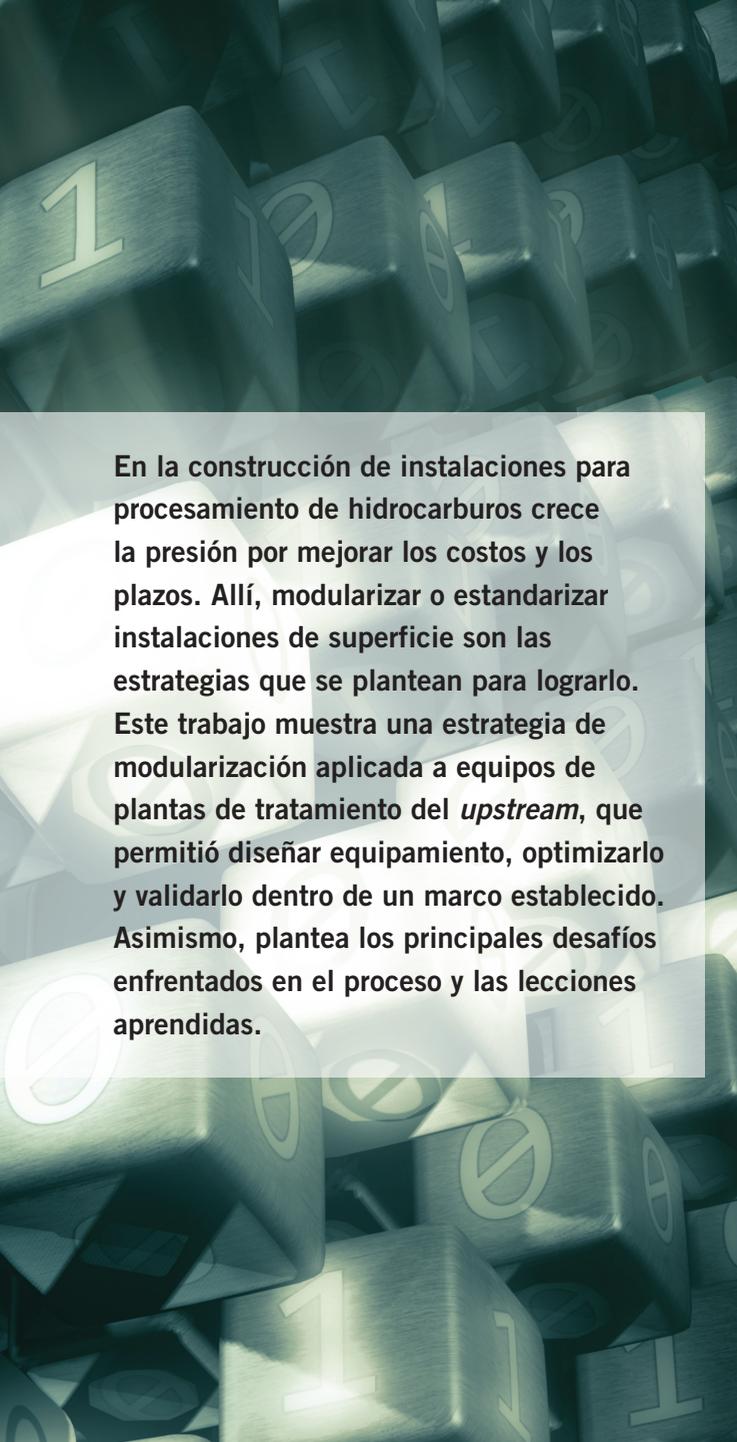
Hacia finales de 2015, a partir de necesidades urgentes de mantenimiento de equipos de procesos, detectadas en una de las operadoras nacionales, Tecnología ARMK desarrolló un proyecto. La solución tenía la premisa básica de desarrollar módulos transportables para sustituir temporariamente y que permitiera el mantenimiento de los equipos centrales de las Plantas de Tratamiento de Crudo (PTC) y las Plantas de Tratamiento de Agua (PTA).

El proyecto fue denominado, al interior de Tecnología ARMK, Modularización de Unidades de Procesos para Mantenimiento (MUPM). Implicó un desarrollo conceptual, completo y complejo. Debía incluir diseños para fabricación local y su comparación con el empleo de tecnologías importadas. El parque de módulos diseñados o seleccionados debía ser el mínimo para abarcar todos los procesos en PTC y PTA.

Se definió como “módulo” a una unidad de proceso equivalente a uno o varios tipos de unidades existentes en las PTC y/o en las PTA operativas. La equivalencia estaría dada con el cumplimiento de las mismas funciones de proceso con niveles de calidad y confiabilidad similar o mayor.

Los diseños debían ser optimizados desde el punto de vista de la ingeniería (procesos, mecánica, automatización) y también desde la logística: simplificar construcción, minimizar plazos de transporte-montaje, facilitar la puesta en marcha y operación en función de nuestros usos y costumbres. Los módulos que cumplieran esta condición se denominarían Módulos Transportables (MT).

Cada MT tendría asociadas las condiciones de borde/límites de operación de cada MT y las variaciones esperables de eficiencia y/o calidad. Para explicitarlos, se desarrollaron estudios probabilísticos de sensibilidad de



En la construcción de instalaciones para procesamiento de hidrocarburos crece la presión por mejorar los costos y los plazos. Allí, modularizar o estandarizar instalaciones de superficie son las estrategias que se plantean para lograrlo. Este trabajo muestra una estrategia de modularización aplicada a equipos de plantas de tratamiento del *upstream*, que permitió diseñar equipamiento, optimizarlo y validarlo dentro de un marco establecido. Asimismo, plantea los principales desafíos enfrentados en el proceso y las lecciones aprendidas.

los MT frente a distintos factores que afectaran su performance de proceso.

Finalmente, sobre el conjunto de MT definidos, se desarrollaron algoritmos que les permitiesen a los responsables operativos preseleccionar ágilmente un módulo transportable específico entre los diseñados en el proyecto.

En este trabajo se mostrarán estrategias para llegar a la modularización de equipos de diseño *ad hoc*, las estrategias para superar diversos desafíos encontrados en el proceso y las limitaciones y los aprendizajes del proyecto.

Marco conceptual

Es importante distinguir entre estandarización y modularización.

Al principio de la revolución industrial, la estandarización de componentes estuvo asociada a la división eficiente de trabajo y se constituyó en uno de los pilares de la producción masiva. Más tarde se incorporó la idea de intercambiabilidad de piezas, primero en la industria armamentista, y luego se extendió a otras industrias a principios del siglo XX. Desde entonces, se han creado estándares para definir características de materiales, dimensiones e incluso procedimientos de cálculo y métodos de fabricación. Algunos funcionan como recomendaciones, otros tienen carácter mandatorio. Los hay de aplicación nacional o reconocidos y aceptados a nivel internacional. Pretenden ser de aplicación masiva, son de dominio público, carácter voluntario y, por lo general, de implementación libre de costo (Blind, 2013).

Muchas compañías petroleras han desarrollado sus propios estándares para equipamiento diverso, como Shell y de Exxon. Sus estándares resultan de la recopilación de sistemas de cálculo propios, aplicación de normas aceptadas e incorporación de variaciones que pueden ser fruto de su propio desarrollo (I+D) y/o experiencia.

Modularizar: dividir en módulos. Los módulos pueden ser definidos como “partes de un sistema mayor que son estructuralmente independientes, pero trabajan juntas para crear un sistema funcional” (Galvin, 2001). Modularizar es entonces, dividir en módulos.

El fenómeno de modularización especializa el conocimiento. Por un lado, enfocado hacia el módulo; por otro, hacia el sistema (Galvin, 2001). Quien se especializa en desarrollar los módulos debe conocer a fondo sus componentes, las interacciones entre ellos, el resultado funcional del conjunto y las interfaces con los demás módulos. La manera en que interactuarán los módulos para formar el sistema complejo: la planta, y alcanzar el objetivo del conjunto, constituye otra área de conocimientos específicos y necesarios para asegurar mejores resultados de los módulos.

En algunas industrias, como la electrónica, estos fenómenos pueden estar potenciados por un tercero, que llaman customización. El cliente puede adaptar el producto básico incorporando variantes modulares predefinidas, por ejemplo, una placa de video específica a una notebook.

Los primeros intentos de estandarización de equipos en la industria petrolera ocurren en los inicios de la explotación en Pensilvania (EE.UU.) y en Texas (EE.UU.).

A mediados del siglo XX, en los Estados Unidos aparecen los primeros equipos, no solo el estándar sino también modulares: una suerte de plug & play de la época (BS&B, Sivalls, Smith, Peco).

Aquellos módulos respondieron a premisas básicas asociadas a la modularización (Jameson, 2007): reducción de costos (fabricación seriada; ingenierías ya amortizadas), plazos de entrega (fabricación seriada y stocks) y de montaje (ingeniería de bordes en catálogo). Pero no necesariamente cumplían con otros objetivos presentes en el proyecto MUPM: aumentar la seguridad, mejorar las calidades de operación (eficacia) y de procesos (eficiencia).

Desarrollo

Encuadre del proyecto

Se establecieron los objetivos generales para el proyecto MUPM: diseñar unidades paquetizadas móviles y reutilizables, que permitieran el reemplazo temporario de equipos de tratamiento de petróleo y agua existentes en PTCs y PTAs de todos los yacimientos argentinos.

La meta fue obtener la menor cantidad de módulos factibles por tipo, que permitieran cubrir los escenarios esperados y al menor costo posible. Deseable también, era contar con capacidad de fabricación y/o mantenimiento local.

Se perfilaron dos grandes grupos de módulos, que definieron distintos enfoques de trabajo:

1. Los diseñados *ad hoc* (por ejemplo, los equipos de intercambio térmico y los de separación)
2. Los estudiados a partir de las prestaciones que indican sus fabricantes, por existir como módulos en el mercado (por ejemplo, bombas y equipos de tratamiento de agua).

Se elaboraron los objetivos específicos para los diseños. Sobresalen entre ellos: desarrollar equipos de alta confiabilidad operativa, minimizar pérdidas de producción y/o de calidad de salida y asegurar el cumplimiento de buenas prácticas de ingeniería, normativa y cumplimiento de estándares corporativos.

Se estableció un lenguaje común dentro del proyecto para identificar unívocamente los procesos y bosquejar escenarios, identificar potenciales módulos y sus interacciones. Se construyó un diagrama de bloques que acompañó todo el proyecto (Figura 1).

La línea superior representa las etapas principales de proceso en una PTC: Corte Primario, Tratamiento y Transferencia, mientras que la línea inferior, las muestra para una PTA. Cada una de estas etapas de proceso, puede ser cumplida por una o más operaciones unitarias, expresadas en cuadrados de línea llena, por ejemplo, calentamiento. Cada una de esas operaciones unitarias, podrá ser asociada a uno o más MT. En cuanto a las interacciones, se destacan mediante flechas los grandes flujos entre PTC y PTA: el agua procedente de las etapas de separación y tratamiento de crudo alimentan la PTA. Mientras que el crudo separado en la PTA, retorna a la PTC.

Completada la etapa de encuadre del proyecto, se inició el proceso de modularización, empezando por el esta-

blecimiento de las bases de diseño, relacionado al entorno y los escenarios operativos asociados a lo específico.

Establecimiento de bases de diseño

El establecimiento de las bases planteó un gran desafío asociado al encuadre del proyecto: organizar la información generada desde un territorio vasto para jerarquizar los detalles con impacto específico y establecer un marco general para asegurar la intercambiabilidad.

Para resolverlo, se diferenciaron tres grandes grupos dentro de las bases de diseño:

- Aspectos propios del proyecto generalizables para todos los módulos.
- Particularidades regionales.
- Cuestiones típicamente presentes en instalaciones de la operadora, generalizables para todas las plantas.

Entre los aspectos propios del proyecto MUPM aplicables al diseño o la selección de todos los MT se destacan la variable temporal y la transportabilidad.

En MUPM, la variable temporal es muy diferente a la de las instalaciones permanentes: los MT se emplearán durante un plazo acotado, con la menor complicación de transporte, facilidad y rapidez de montaje, puesta en servicio y desmontaje. Estas condiciones permiten analizar tecnologías que se descartarían de otro modo, o buscar innovaciones desde el punto de vista de montaje.

La transportabilidad se estudió en base a la normativa nacional. Se descartaron transportes especiales, de mayor porte por atentar contra la agilidad requerida en este proyecto.

Al analizar las particularidades regionales, se observó la conveniencia de estudiarlas en dos grupos: las que serían generalizables a todo el proyecto (por ejemplo, cargas CIRSOC) y las que alimentarían escenarios específicos (por ejemplo, propiedades de fluidos).

Se aplicaron generalizaciones en puntos tales como las cargas externas, criterios de automatización; y detalles constructivos, como la selección de revestimientos externos e internos, aislación térmica, etc., justificable en base a experiencias recopiladas, tanto económicas como operativas. Los factores mencionados muestran impactos inferiores al 20% del costo. Asimismo, la operación tiende a estandarizarse también dentro de las operadoras y la movilización de equipos resulta cada vez más frecuente.

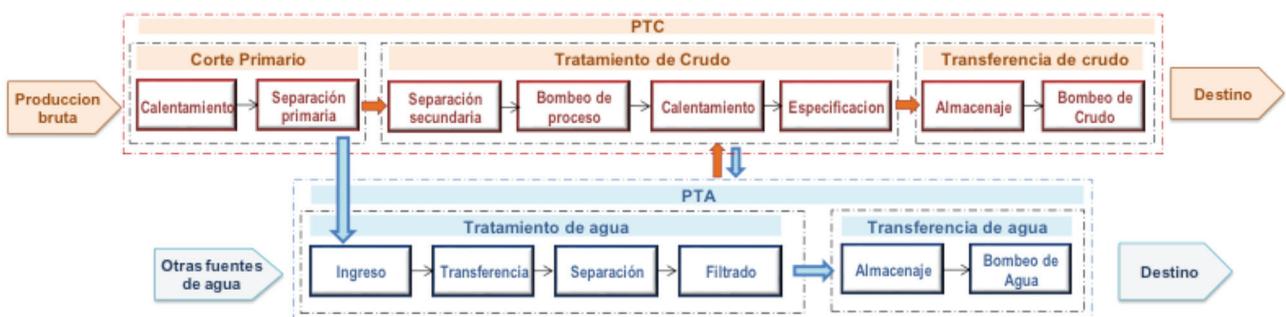


Figura 1. Diagrama de procesos.

CUALIDAD	MÓDULO ¹	ESTÁNDAR
Seriación	Cantidad unitaria o baja. Puede ser un producto único.	Apunta a ocupar o reemplazar un universo importante. Serie mediana o grande.
Optimización del producto	Baja, ajustes menores de componentes. Puede servir para optimizar diseños de otros productos.	Curva de crecimiento hasta llegar a ciertos objetivos mínimos. Desde prototipos monitoreados hasta serie. Luego se mantiene por un período largo.
OPEX/ CAPEX	Se privilegia la minimización de riesgos y costos operativos (OPEX) por encima de la inversión (CAPEX).	Se privilegia la disponibilidad y el bajo costo (CAPEX) por sobre la performance (OPEX).
Eficiencia	Se prioriza la seguridad y la facilidad operativa. Tiende a ser más eficiente, el universo que busca resolver es más acotado.	Es más flexible, pues busca minimizar CAPEX.
Costos de diseño y ensayo	Requiere costos de inversión en diseño acotados, debido al bajo impacto (poco tiempo en cada locación) y la poca necesidad de optimización de costo de producto	Elevada inversión en diseño, desde lo conceptual hasta el detalle. Se recomienda seguir protocolos que apliquen métodos rigurosos de validación de calidad esperable de procesos, elevada seguridad y confiabilidad y minimización de costos.

Tabla 1. **Modularización versus estandarización.** Nota: ¹ Dentro de las premisas del proyecto MUPM.

Estrategia de trabajo

Una vez enmarcado el proyecto y establecidas las bases de diseño fue necesario delinear la estrategia de trabajo. Esta daría forma al enfoque para el diseño y para su validación o rechazo. La búsqueda, ¿sería de módulos o de estándares? Ambos se definieron de la siguiente manera en el marco del proyecto MUPM en función de distintas cualidades (Tabla 1).

Se adoptó una estrategia para diseño modular, concentrado esfuerzos para ofrecer el mejor producto.

Construcción de escenarios operativos

Se plantean dos grandes incógnitas para orientar el proceso de construcción de escenarios: cuáles son los mayores factores condicionantes del diseño y cómo asegurar que la mayoría de los casos esté representada.

Propiedades de los fluidos

Los fluidos por procesar provienen de distintas formaciones y tienen, en consecuencia, propiedades muy diferentes. La tarea más compleja fue encontrar la menor cantidad de petróleos representativos dentro del universo total, con el fin de evitar la multiplicación excesiva de escenarios y posibles diseños.

Se analizaron propiedades de petróleo recopilados de distintos yacimientos/cuencas: Ramos (Salta), Mendoza Norte y Sur, Neuquén, Chubut, Santa Cruz y Tierra del Fuego. Son datos acumulados para proyectos desarrollados a lo largo de más de 25 años.

¿Cómo procesar una base de datos con más de docenas muestras de petróleo provenientes de los diversos yacimientos argentinos? Las muestras se agruparon por instalación, región y los grupos se compararon internamente y en forma cruzada. Muestras correspondientes a una misma instalación de proceso (batería, planta de corte o planta de tratamiento) pueden presentar propiedades muy diferentes. Muestras procedentes de pozos de distintas regiones, características similares.

Tanto los números adimensionales dominantes (Re, Un, Pr), en cuanto las ecuaciones de Navier Stokes y la ley de Stokes, que aportan la base teórica primara para

dimensionamiento de instalaciones, dependen principalmente de dos propiedades de los fluidos: densidad y viscosidad.

Luego intervienen una serie de fenómenos difíciles de predecir sin ensayos o muestras:

- Dispersiones de gotas.
- Presencia y potencial de segregación de parafinas y asfaltenos.

En base a la experiencia, las muestras se clasificaron a partir de dos variables básicas cuantificables y preponderantes en el cálculo: densidad y viscosidad. Los resultados se segregaron en tres grandes grupos: petróleos fáciles, intermedios y difíciles de procesar. Esta clasificación inicial contribuyó a validar o descartar resultados. Cerca de una decena de muestras se testeó contra diseños de performance conocida para su validación.

Finalmente, como resultado del proceso, se adoptaron cuatro “tipos de petróleo” para representar los fluidos de proyecto. Como límites para el universo en estudio, se descartaron petróleos de características extremas, por ejemplo, el extrapesado de Yancanello. También se descartó explícitamente la formación de emulsiones y sus propiedades, por no contar con información adecuada para incorporarlas (Tabla 2).

Petróleo	SG @ 15 °C	Visc.@45 °C
Tipo 1	0,94	1400 cP
Tipo 2	0,91	300 cP
Tipo 3	0,84	6 cP
Tipo 4	0,90	95 cP

Tabla 2. **Tipos de crudo adoptados.**

A cada tipo de crudo resultante, se asociaron a su vez diez condiciones de mezcla con agua, desde el 1% al 99%. Para testear los diseños de equipos en distintas condiciones de mezcla, se requerían sus propiedades. Básicamente densidad y viscosidad para separación y adicionalmente calor específico y conductividad térmica para procesos de calentamiento.

Se estudiaron métodos de aproximación de propiedades de mezclas de agua y petróleo y sus rangos de aplicación, la mayoría basados en correlación de propie-

dades. Se analizaron al menos dos para cada propiedad. Algunos de ellos resultan bastante inexactos, es el caso de los que permiten calcular viscosidad; no resulta ajena la conductividad térmica. Otros difíciles de aplicar, dados los datos disponibles y la extensión del proyecto.

Una vez seleccionados los métodos de aproximación, se calcularon densidad, viscosidad, calor específico y conductividad térmica para las diez condiciones de mezcla con agua de los cuatro tipos de crudo.

Condiciones operativas o escenarios

Las condiciones operativas (por ejemplo, caudales de los fluidos componentes, presiones, temperaturas), las propiedades de los diferentes fluidos y las calidades requeridas o deseables de salida son condicionantes fuertes de los diseños de equipos de proceso.

Para asegurar que la mayoría de los escenarios de producción en la Argentina estuviera representada, se estudió un gran volumen de datos, principalmente bases de datos propias: información de distinto nivel de complejidad y completitud de plantas nacionales, desde fluidos, P&IDs hasta planos generales y/o planos constructivos de equipos, de más de 40 plantas de tratamiento de agua y cerca de 80 plantas de procesamiento de crudo. De estas últimas, menos de la mitad debe especificar para venta, con contenido de agua entre un 1% y un 3%, las llamadas PTC. El producto de las restantes recibe tratamiento posterior.

Específicamente, las plantas dentro del proyecto MUPM procesan caudal de ingreso bruto (petróleo y agua) entre 200 y 65.000 m³/d con presión de operación máxima de 5 kg/cm²(g) y temperatura de ingreso a planta de 20 °C.

A continuación, se detallan los parámetros surgidos de la clasificación y compactación de datos: los escenarios operativos.

En primer lugar, los cortes de agua (WC) o concentraciones de hidrocarburos en las entradas y en las salidas.

Corte primario (WC%)		Tratamiento de crudo (WC%)		Tratamiento de agua (ppm HC en agua)	
In	Out	In	Out	In	Out
30-98%	10-30%	10-30%	1-3%	1000	<5

Tabla 3. Calidad de fluidos para las distintas etapas de proceso.

Para las operaciones de separación se definieron los siguientes escenarios:

- Separación de corte primario: $T_{op1} = 40\text{ °C}$, $T_{op2} = 50\text{ °C}$,
- Separación de pulido/segunda etapa: $T_{op1} = 40\text{ °C}$, $T_{op2} = 50\text{ °C}$,

Para las operaciones de calentamiento se definieron los siguientes escenarios:

- Calentamiento de corte primario: $WC\%_{in}: 30\text{ a }98\%$, $\Delta T_{op1} = 20\text{ °C}$, $\Delta T_{op2} = 30\text{ °C}$
- Calentamiento segunda etapa: $WC\%_{in}: 10\%$ a 30% , $\Delta T_{op1} = 20\text{ °C}$, $\Delta T_{op2} = 30\text{ °C}$
- Calentamiento de despacho: $WC\%_{in}: 1\%$ a 3% , $\Delta T_{op1} = 20\text{ °C}$, $\Delta T_{op2} = 30\text{ °C}$
- Pérdida de carga admisible: $\Delta P_{allow} = 1,5\text{ a }2\text{ kg/cm}^2$

Así obtenido, el conjunto de bases de diseño, propiedades de fluidos y escenarios describen las operaciones

de tratamiento promedio dentro de la Argentina en la actualidad. Y definen el universo dentro del cual son aplicables los módulos diseñados.

Modularización

El proceso de modularización no es lineal. Los cálculos de proceso son iterativos. Factores como la factibilidad constructiva, la seguridad de los procesos o las restricciones impuestas por las bases de diseño del proyecto MUPM obligan a replantear líneas de trabajo con distinto grado de madurez filtrando las más sólidas.

Una vez que se consigue establecer un primer abanico de modelos, inicia el delicado proceso de reducción. Los distintos factores se retroalimentan en la medida que se avanza.

Los diversos módulos propuestos para un tipo de proceso deben solaparse parcialmente para permitir una selección suave. Un ejemplo claro proviene del mundo de las bombas. Un fabricante ofrece submodelos que se superponen parcialmente para una condición de proceso. Pero no todas las soluciones son igualmente eficientes, económicas ni cubren las diferentes condiciones operativas. Lo mismo ocurre con los módulos principales de tratamiento de gas, petróleo y agua.

Perseguir el encaje de un único diseño con un vasto abanico de escenarios lleva a situaciones de sobrediseño que pueden condicionar la aceptación de anteproyectos al evaluarse CAPEX, OPEX y/o eficiencia de proceso.

Además de las tecnologías tradicionalmente aplicadas en los campos petroleros nacionales, en la tabla 4 se observan aquellas que se analizaron como innovadoras, al menos en uso masivo.

	Uso frecuente ¹	Innovación ²
Deshidratación de petróleo	Tanques	Centrifugación
	FWKO presurizados	Hidrociclones
	Tratadores electrostáticos	Filtros a cartuchos Coalescentes patentados
Tratamiento de agua	Tanques	Filtros a cartuchos
	Piletas API	Coalescentes CPS ³
	Unidades de flotación con paletas mecánicas	Unidades de flotación por inducción directa ³
	Filtros de antracita	Ósmosis inversa
	Filtros de cáscara de nuez	
Calentamiento	Calentadores indirectos	Calentadores eléctricos de Potencia (>150 kw) ³
	Hornos	
	Intercambiadores de casco y tubos	Intercambiadores placas de diseño propietario
Almacenamiento	Tanques rectangulares	Tanques flexibles
	Tanques cilíndricos horizontales	
Bombeo	A pistón (dúplex a quintuplex)	A tornillo triple multifásica ³
	A tornillo (simple a triple) solo líquido	
	Centrifugas (simple etapa a múltiples)	

Tabla 4. Tecnologías analizadas.

Notas: 1 Se refiere a lo más habitual en la Argentina/Región.

2 No aplicado aún en la Argentina/Región o con escasa experiencia.

3 Experimentados en forma aislada y pasibles de ser analizados.

En el proyecto MUPM:

- Equipos de calentamiento y separación: fueron diseñados *ad hoc*.
- Equipos de almacenamiento: se buscaron opciones que permitieran superar la capacidad máxima dada por la geometría transportable.
- Equipos de bombeo y equipos de tratamiento de agua: existen en forma modular y se analizaron en función de sus curvas operativas.
- Módulos de servicios auxiliares se excluyeron, a la vista de la oferta estandarizada y modular disponible en el mercado.

Las tecnologías más innovadoras fueron descartadas, con excepción de CPS coalescentes y unidades de flotación por inducción directa, ambas para tratamiento de agua. Desarrollar los motivos sería objeto de otra publicación. Las causas principales: costos del equipo puesto en campo, requisitos especiales de mantenimiento y falta de experiencia o dificultades para el personal que debería recibir y operar equipos nuevos.

Modularización de equipos de calentamiento

Definición de parámetros de diseño y análisis de potencias

Inicialmente se definió la demanda térmica potencial para cada etapa de proceso: primaria, secundaria, despacho. Luego de analizar las instalaciones conocidas, se definieron tres saltos de temperatura necesarios: $\Delta T_{op1} = 10^\circ\text{C}$, $\Delta T_{op3} = 20^\circ\text{C}$, $\Delta T_{op2} = 30^\circ\text{C}$.

Como ejemplo, en la tabla 5 se muestra un mapa parcial de demanda de potencias para calentamiento de ingreso de fluido (CALOR ENTRADA) y de despacho de crudo (CALOR DESPACHO).

Planta	CALOR ENTRADA (Mkcal/h)			CALOR Despacho (Mkcal/h)		
	Bruta (Ingreso)			Petróleo + 3% agua		
	Delta T1	Delta T2	Delta T3	Delta T1	Delta T2	Delta T3
	10	20	30	10	20	30
P1				291	582	874
P2				348	696	1.045
P3				197	395	592
P4				158	315	473
P5	8.306			689	1.378	2.067
P6	7.742			294	588	882
P7	5.951			1.117	2.234	3.351
P8	6.313			226	453	679
P9	5.603			187	375	562
P10	5.361			160	320	479
P11	4.809	9.619		500	999	1.499
P12	4.586	9.172		295	589	884
P13	4.557	9.114		194	388	582
P14	4.036	8.073		192	383	575
P15	3.882	7.763		89	179	268
P16	3.675	7.350		140	281	421
P32	468	935	1.403		126	189
P33	410	820	1.229		96	144
P34	366	732	1.098			87
P35	163	326	489		80	120
P36	222	444	666			
P37	82	165	247		121	181
P38	82	165	247		91	137
P39	88	176	264			
P40		96	144			

Tabla 5. Potencia térmica, Entrada y Despacho.

Al analizar ambos grupos (ENTRADA *versus* DESPACHO), se observa una gran dispersión de demanda de potencia. DESPACHO requiere potencias relativamente bajas, el 60% de los casos se ubican entre 100 Mkcal/h y 800 Mkcal/h y el 25% es menor a 100 Mkcal/h. ENTRADA, en cambio, por los altos caudales de agua que pueden estar presentes, requieren potencias mucho más elevadas, el 55% de los casos es mayor a 800 Mkcal/h absorbidas.

Se descartaron escenarios extremos, que se observan en blanco en la tabla. Potencias mayores a 10.000 Mkcal/h, corresponden a escenarios de alto caudal de agua, no pueden ser entregadas por menos de dos o tres unidades operando en simultáneo. Reemplazar demandas de potencias menores a 75 Mkcal/h con equipos en stock es una maniobra frecuente, que carece de sentido analizarlos como módulos especiales.

Selección de tecnologías

En paralelo de la construcción de la demanda potencial se estudiaron las tecnologías aplicables y sus alcances. Se buscó cubrir el rango de 75 a 5000 Mkcal/h. Las tecnologías que se analizaron fueron:

• Calentador indirecto en baño de vapor

Equipo tradicional compacto. El tubo de fuego (puede ser uno o más) alojado en la parte inferior del cuerpo calienta el agua en la que está sumergido. El vapor generado se acumula en la parte superior del cuerpo, en el que está sumergida la serpentina a través de la que circula el líquido. Limitado tecnológicamente a potencias del orden de 1500 Mkcal/h absorbidas, la sección térmica se diseña con cierta modularización impuesta por quemadores de tiro natural disponibles en el mercado. Su eficiencia térmica es del orden del 65/70%. Son equipos seguros; el hidrocarburo no está en contacto con la zona de fuego. Ante la disminución de caudal, se reduce el suministro de gas combustible al quemador.

• Caldera de vapor o de hot oil con intercambiadores de calor

La fuente de calor y el circuito de intercambio, también están separados. Las calderas se encuentran estandarizadas y, para este proyecto, el límite de aplicación está dado por la transportabilidad: 3000 Mkcal/h para Hot-oil y 5000 kcal/para vapor. No suelen utilizarse en el *upstream*, pero presentan una solución segura para sustituir altas potencias. Tienen eficiencia térmica en el orden del 85%. Ante disminución de caudal, se reduce el suministro de vapor/*hot oil* a los intercambiadores. Conjuntos versátiles al poder asociarse a distintas configuraciones de intercambiadores.

• Calentador directo/Tratador térmico

Adolece de riesgos de seguridad intrínsecos: el tubo de fuego está sumergido en agua salada y petróleo, con alto riesgo de corrosión y coquificación de petróleo y consecuente rotura del tubo e incendio. Al disminuir el caudal de alimentación, se sobrecalienta el fluido. Se lo considera en el proyecto MUPM exclusivamente por la escala de tiempo de uso. Es difícil de estabilizar, debido a que se generan corrientes de cortocircuito. Es el equipo de reacción más lenta. Está limitado por su transportabilidad en 2400 M kcal/h y compete en este proyecto con los conjuntos con calderas.

Los hornos se excluyeron debido a su poca flexibilidad operativa: se diseñan dentro de rangos de caudal acotados y son evitados en operaciones con contenidos de agua mayores al 20-25%. A su vez son pesados, difíciles de transportar y montar. Por otro lado, es escaso el número de escenarios que coinciden con su rango de aplicación.

En los diseños térmicos se presentan dos grandes desafíos: la rangeabilidad de potencia entregada por cada tipo de tecnología y el diseño de serpentinas/intercambiadores capaces de absorberla para el mayor rango posible de escenarios. Este último, de tipo iterativo.

Los quemadores de gas de tiro natural imponen cierta modularización en relación con la potencia entregada. Vale decir que constituyen familias de quemadores muy similares entre diferentes fabricantes norteamericanos y argentinos. Consecuentemente, restringen la variedad de tamaños de tubos de fuego.

Sobre esa base, se analizaron distintas configuraciones de mazos de serpentinas de entre 1" y 4".

Optimización de diseños

Se partió de una base de datos de equipos en campo diseñados por Tecnología ARMK (unos 300), de los cuales contábamos con relevamientos operativos del 20%. Esos equipos existentes eran el universo empírico de validación de resultados. A partir de preseleccionar algunos diseños y someterlos a las propiedades de los fluidos.

En paralelo, se prediseñaron equipos totalmente nuevos con un grupo de profesionales que desconocía los diseños usados en otros proyectos. Algunas debieron ser descartadas por razones dimensionales o poca predictibilidad o estabilidad hidráulica (por ejemplo, configuración de mazos poco "confiables" a la hora de definir división de flujo).

Así se llegó a un grupo acotado de diseños, que fueron simulados.

Cada prediseño involucró alrededor 80 simulaciones para poder incluir todas las combinaciones de escenarios y propiedades de fluidos. Solamente para calentadores indirectos, se realizaron, analizaron y compararon resultados de más de 1000 simulaciones, incluyendo las que correspondieron a modelos descartados. Se seleccionaron tres prediseños con el fin de cubrir el rango entre 75 Mkal/h y 1200 Mkal/h absorbidas inicialmente.

Estos prediseños fueron sometidos a análisis de sensibilidad frente al cambio de variables: viscosidad, densidad, calor específico, conductividad. Los prediseños también se confrontaron con la demanda potencial. El resultado de este proceso permitió acotar la variedad a dos diseños. Se aplicaron estrategias que permitieron diseñar equipos con mayor relación de rango (*rangeability*), que equipos para instalaciones fijas. Se privilegió la disminución de variedad de equipos, una de las premisas particulares del proyecto MUPM, en contrapunto con un aumento del CAPEX.

A continuación, se muestra un ejemplo de gráfica de U (coeficiente global de transferencia) y caudal en relación al WC% para uno de esos modelos. También se graficaron ΔP , Re y otras variables de interés (Figura 2).

En la zona de salida de planta, el petróleo está deshidratado. El calor absorbido genera el salto térmico de 20 °C sobre caudales altos, con la transferencia limitada por la alta viscosidad. Se puede observar que los petró-

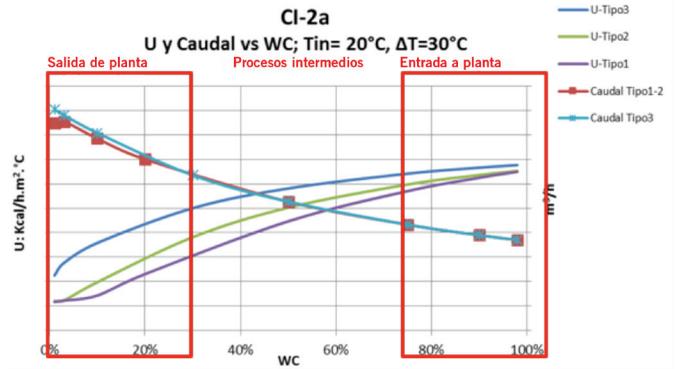


Figura 2. Calentador indirecto-Prediseño 2a- U y Q_v versus WC%.

leos Tipo 1 y Tipo 2, más viscosos, presentan U mucho menores que Tipo 3. En la condición de entrada a planta, con altos porcentajes de agua, el coeficiente global U se aproxima en todos los casos, pero el salto térmico puede ser logrado para caudales mucho menores, coherente con el hecho de que el calor específico del agua, prácticamente duplica al de los hidrocarburos.

Un estudio similar se desarrolló con intercambiadores de calor. En este caso, las fuentes térmicas previstas serían calderas de *hot-oil* para potencia máxima de 3000 Mkal/h y de vapor para alcanzar 5000 Mkal/h.

Se analizaron distintos tipos dados en la norma TEMA NEN, por resultar equipos más económicos, y AEU o AES con mazos desmontables por solicitud de la operadora. Se analizaron distintos diámetros de tubos y configuraciones serie-paralelo, imponiendo como límite el empleo de tres cuerpos para cubrir el servicio propuesto.

La cantidad de simulaciones realizadas para obtener los primeros prediseños fue aún mayor que para calentadores, superando las 2000 simulaciones. Un ejemplo particular de análisis de un modelo tipo TEMA NEN se muestra en la figura 3.

En estos equipos, los fluidos exhiben un comportamiento similar al desarrollado en calentadores indirectos. En esta gráfica se agregó Re , que contribuye a explicar el comportamiento de estos equipos: el coeficiente de intercambio cae rápidamente en condición de flujo laminar.

El universo de intercambiadores diseñados pudo reducirse a dos modelos asociables a calderas de *hot-oil*, y dos modelos asociables a calderas de vapor. A su vez, cada modelo de intercambiador permitía agrupar hasta de a tres equipos en paralelo.

En los equipos de calentamiento, se analiza sensibilidad frente a cambios en las propiedades iniciales de los fluidos.

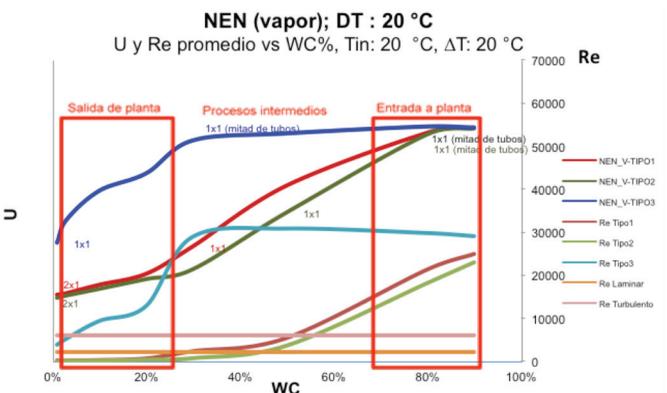


Figura 3. Intercambiador de calor-prediseño NEN2c- U y Re versus WC%.

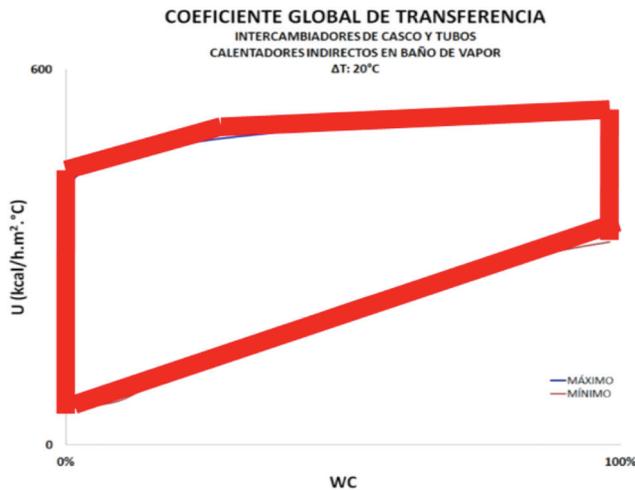


Figura 4. Coeficiente U de equipos diseñados $\Delta T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La viscosidad es la variable de mayor impacto en este proceso, dado que condiciona el transporte de masa y de energía. Para crudos viscosos (Tipo 1/Tipo 2) en el entorno de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, un aumento del 20% equivale a, por ejemplo, que el crudo ingrese $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ más frío. Una diferencia que está cerca del error de medición y puede ocurrir con facilidad por factores climáticos en cualquiera de las regiones en estudio.

Para los diseños finales se comparó el impacto de variar la conductividad térmica k , el calor específico C_p inicial sobre distintos parámetros como U y P . Para ambos parámetros, la principal fuente de error sería el valor de referencia y la verdadera propiedad de la mezcla agua-petróleo.

La variación de la conductividad térmica k afecta el coeficiente global de intercambio U en mayor medida que la variación del calor específico. Una variación $\Delta k = 10\%$ genera ΔU entre un 3% y un 6% según el tipo de crudo, mientras que el efecto de la variación del calor específico es algo menor. El efecto disminuye en la medida que se incrementa la proporción de agua de la mezcla.

Esta información permitió confirmar la validez y la sensibilidad de los diseños obtenidos, reducidos finalmente a dos calentadores indirectos, dos modelos de intercambiadores asociados a calderas de vapor y a dos a calderas de *hot oil* como propuesta preferente para cubrir el rango entre 75 M kcal/h y 5000 M kcal/h de potencia, con escenarios analizados de un 1% y un 99% de corte de agua en la corriente a calentar y cuatro tipos de crudo (Figura 4).

Se alcanzó el objetivo de modularizar minimizando la cantidad de diseños y cubrir el universo de escenarios planteados. Sin embargo, hay un aspecto que debe ser resaltado, y se confirma al graficar el coeficiente global de transferencia U para este conjunto de equipos y sus escenarios. Cada equipo tiene su espacio de trabajo definido dentro de ese universo, dado por las características del fluido además de la potencia entregada. El conocimiento de la aplicación real, será indispensable para asignar apropiadamente un MT de calentamiento a su servicio.

Modularización de equipos de separación

Definición de parámetros de diseño

Se afrontan dos situaciones básicas

- Separación primaria: corrientes de hasta el 90% de

corte de agua, con el fin de obtener un hidrocarburo entre un 10% y un 30% de agua

- Separación secundaria: corrientes con menos del 30% de agua, y obtener hidrocarburo entre un 1% y un 3% de agua a partir de la corriente recibida de la etapa primaria.

Se estudiaron dos condiciones de temperatura $T_{op1} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{op2} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Selección de tecnologías

Se estudiaron distintas tecnologías:

• Separadores centrífugos

Equipos utilizados en *off-shore* y, en la Argentina, en etapa experimental para separación final previa al tratamiento de barros. Descartados por su CAPEX y la necesidad de personal altamente capacitado para operarlos.

• Tanques cortadores

Descartados tanto por la impredecibilidad intrínseca de sus resultados como por la restricción de transporte.

• FWKO

Separador de agua libre, tipo de equipo ampliamente difundido en los campos petroleros.

Se eligió la tecnología más versátil: separadores pre-saturizados con vertedero en los que es posible controlar el nivel de interfase agua-petróleo de modo de ajustar las calidades de salida de ambas corrientes.

Después del proceso de cálculo, esos módulos quedaron definidos de la siguiente manera:

	Caudal nominal	
	1 ^{ra} Etapa	2 ^{da} ETAPA
In (WC%)	30 a 98% WC%	10 a 30% agua
Out (WC%)	10 a 30% agua	1% a 3% agua
MT_S1 (FWKO)	4400	2750
MT_S2 (FWKO)	8000	5000

Tabla 5. Módulos de separación.

Los FWKO son cilindros horizontales en los que se distingue una zona de ingreso, internos mejoradores de separación, una zona de separación gravitatoria y la sección de salida donde se ubica el vertedero, la zona de control y las salidas de fluido.

La sección de ingreso y los mejoradores de separación se realizaron en base a diseños propios o bibliografía probada. La sección gravitatoria se analiza en base a cálculos teóricos, ajustados con parámetros propios y orientados a obtener el tamaño de gota libre (no emulsionada) posible de ser separada.

La dimensión para transporte, carretón y semirremolque, impuso un primer límite alrededor de los cuales se buscaron optimizar dos módulos. La proporción largodímetro está restringida por las dimensiones de transporte, y los diseños obtenidos no guardan la proporción que optimizaría equipos permanentes, situación de compromiso posible de sostener en el proyecto MUPM.

Optimización de diseños

Se siguió un método similar al de diseño de equipos para calentamiento:

- Búsqueda en la propia base de datos de equipos diseñados y con datos de resultados operativos. Sobre un universo de más de 50 equipos (FWKO, tanques y separadores trifásicos), se contaba con datos de operación de más de 20 de ellos.
- Validación de modelos de cálculo con nuevos fluidos.
- En paralelo al proceso anterior: diseño de equipos “desde cero”.

Al igual que para calentamiento, se construyeron curvas de demanda para separación.

El diámetro de gota separada se evaluó para cada diseño para los distintos escenarios de WC% y caudales de ingreso entre 1400 y 4800 m³/d. Se presenta, como ejemplo, el cálculo de diámetro de gotas de hidrocarburo separado en agua (Figura 5).

Los valores en columnados en la figura 5 muestran que es posible separar gotas de menor tamaño (mejor separación) con petróleos menos viscosos, como los tipos 3 y 4 y con caudales menores. La mejor separación se obtiene para petróleo tipo 4 con 1400 m³/d de caudal.

La influencia de la temperatura se puede apreciar comparando las gráficas de la izquierda y la derecha. A mayor temperatura de los fluidos, disminuye marcadamente el diámetro de la gota separada.

Ambas tendencias se repiten al evaluar la separación de gotas de agua de la fase hidrocarburo.

La relación entre la gota separada y el caudal volumétrico se realizó a partir de la aplicación de curvas estadísticas. Se probaron distintas formas de curvas estadísticas para expresar la dispersión de gotas. Para el ajuste de los resultados, se tomaron como referencia casos base con diseño de equipo, caudales y propiedades conocidas. El detalle de este desarrollo se resguarda por razones de confidencialidad. El “caudal nominal” del equipo en cada etapa, se definió considerando el petróleo más viscoso que diera como resultado el WC% requerido.

A diferencia de los calentadores, en estos equipos, el diámetro de gota separada asociado al caudal es una medida de indirecta de su “potencia”. También está ligada fuertemente a la naturaleza de los fluidos y las condiciones de proceso. Se reafirma la necesidad de definir adecuadamente el proceso a reemplazar temporalmente para la correcta asignación de un MT.

Del diseño de equipo al módulo

El resultado del proceso de modularización es una serie de equipos diseñados *ad-hoc*, como los descritos en este trabajo y otros, y una selección de equipos de catálogo para cubrir algunos procesos como bombeo y variantes de tratamiento de agua.

Una vez que los MT estuvieron definidos desde el punto de vista de procesos y mecánico, se especificaron sus sistemas de instrumentación, control y seguridad. Se consideraron demandas asociadas a este proyecto y la filosofía de control planteada por el cliente, de modo de facilitar el enlace de estos equipos temporales con los sistemas de control de las plantas de proceso.

También se propusieron estrategias innovadoras para el montaje, que serían motivo para otra publicación. Considerando que estos módulos serían utilizados durante tiempos relativamente cortos, se estudiaron y encontraron soluciones factibles, tanto desde el punto de vista técnico como económico, para operar los equipos sobre los mismos carretones de transporte en forma segura y para facilitar la conectividad de proceso y servicios auxiliares a una planta existente.

Este proceso de customización se realizó tanto para módulos de equipos diseñados *ad-hoc*, como para módulos compuestos por equipos seleccionados de terceros, como bombas o unidades de flotación para tratamiento de agua.

En particular, la lista de equipos diseñados para separación de crudo, en sus distintas etapas y para calentamiento se observan en la tabla 6.

Módulos diseñados	
Separación de Crudo	MT-S1
MT-S2	
MT-S3	
MT-S4	
Calentamiento	MT-CI1
MT-CI2	
MT-CVIQ	
MT-HOIQ	

Tabla 6. Lista de módulos diseñados.

Tabla/mapa de aplicación

Con el conjunto de MT diseñados, se elaboraron mapas de aplicación generales para ayudar a la operación a

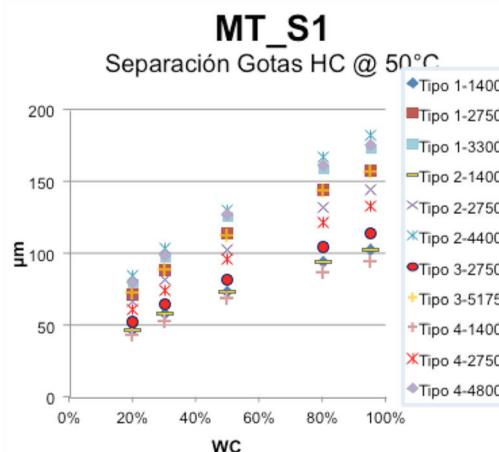
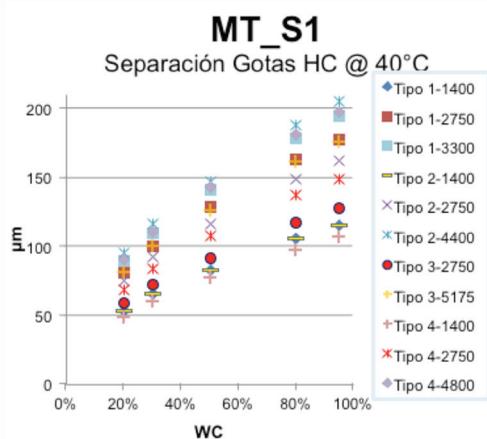


Figura 5. Diámetro de gota separada de hidrocarburo en agua.

preseleccionar módulos.

Se elaboraron mapas por módulo y mapas compuestos de asociación de módulos. Se muestra como ejemplo un mapa (parcial) para el escenario ENTRADA A PLANTA, que asocia módulos de calentamiento con $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ con un módulo de separación tipo FWKO (Tabla 7).

ENTRADA A PLANTA			
	Calentamiento		Separación
P16		2 MT-CVIQ	MT_S2
P25		2 MT-CVIQ	MT_S2
P23		2 MT-CVIQ	MT_S2
P13		2 MT-CVIQ	MT_S2
P26		2 MT-CVIQ	MT_S2
P14		2 MT-CVIQ	MT_S2
P9		2 MT-CVIQ	MT_S2
P17		2 MT-CVIQ	MT_S2
P32		MT-HOIQ	MT-CVIQ
P24		MT-HOIQ	MT-CVIQ
P36		MT-HOIQ	MT-CVIQ
P37		MT-HOIQ	MT-CVIQ
P29	2x MT-CI2	MT-HOIQ	MT_S1
P30	2x MT-CI2	MT-HOIQ	MT_S1
P34	MT-CI2		MT_S1
P33	MT-CI2		MT_S1
P38	MT-CI2		MT_S1
P31	MT-CI2		MT_S1
P40	MT-CI2		MT_S1
P39	MT-CI2		MT_S1

Tabla 7. Mapa de aplicación de módulos.

Estos mapas se elaboraron como guía general, entendiendo que personal capacitado realizaría la selección final para cada caso incluyendo la variable de disponibilidad. Razón por la que en algunos mapas se presentaron alternativas de combinaciones de módulos.

Conclusiones

El método de trabajo desarrollado permitió sistematizar y organizar la tarea, de modo que fue posible encontrar soluciones aceptables en el proceso de búsqueda de equipos modulares, dentro de un marco determinado y minimizando la variedad de soluciones.

La herramienta podría ser aplicable a otras necesidades. Por ejemplo, buscar el diseño serial de equipos fijos para nuevos desarrollos, apuntando a optimizar resultados de calidad de procesos y de costos.

Contrario a lo que indica el prejuicio, este tipo de estrategias generan espacio para innovación. Un ejemplo, en el marco del proyecto MUPM, fue el diseño de estrategias de montaje y vinculación temporales.

Se respetaron criterios de la propia experiencia y se incorporaron otros surgidos de la lectura:

- Invertir en tiempo y en calidad de cálculo con criterio de ingeniería de proyecto: recursos limitados, tiempo acotado y tensar la optimización.
- Contar con datos de diseño y experimentales de buena calidad.
- Elaborar los escenarios e hipótesis adecuadamente con el fin de conformar diseños que posean la universalidad posible. Para ello deben representar a la mayoría de los casos conocidos.

- Evitar las simplificaciones excesivas, pues darán lugar a soluciones inadecuadas y/o ineficientes (la famosa parábola invertida). Existen casos probados con sobrediseño de materiales y malos resultados.

La estrategia de diseño modular implica esfuerzo concentrado para ofrecer el mejor producto que tendrá pocas, sino nulas, oportunidades de testeado antes de ser puesto en servicio. A diferencia del enfoque en la estandarización, que conlleva pruebas, revisiones y mejoras sucesivas que pueden ser de gran escala.

La mirada general hacia la planta y la comprensión de los equipos fueron claves. Para evitar diseños muy imaginativos, pero potencialmente ineficaces o imposibles de fabricar, se depende de conocimiento técnico específico: concepto y experiencia.

Las simulaciones repetidas y validadas, incluyendo los análisis de sensibilidad, confirman la tensión entre la universalización y el diseño específico. Tensión que no se da solamente por la intención de abarcar todo con una sola solución, despreciando ineficiencias que pueden terminar en fracaso, tanto como por despreciar las singularidades extremas (las colas de una gaussiana). El mejor ejemplo es el de la píldora #9 de la RAMC.

Con la mirada puesta en el futuro, es pensable que las estrategias de modularización como la desarrollada, o también las de estandarización, se puedan potenciar con la utilización de técnicas de *data analytics*, apuntaladas por la mejora en la adquisición de datos de proceso, tanto en la definición de variables como en la confiabilidad de la instrumentación.

Referencias

- Galvin, P., Perth, 2001, *Product Modularity and the contextual factors that determine its use as a strategic tool*, Graduate School of business, Curtin University of Technology, 10/2001.
- Blind, K., Rotterdam, 2009, *Standardisation: a catalyst for innovation*, Rotterdam School of Management, Erasmus Research Institute of Management, 2009.
- Jameson, P. H., 2007, *Is modularization right for your project?*, Hydrocarbon Processing, 2007, december.
- Whitfield, S., SPE 2016, *A deeper look at modularization in facilities construction*, SPE OGF, 2016, Volume 5 Issue 2.
- Blind, K., Mangesldorf A, Elsvier, 2016, *Motives to standardize: Empirical evidence from Germany*, 2016.
- López, H. et al., 2016, *Aplicación de modularización en proyectos de refinería*, *Petrotecnia*, febrero 2016.
- Zongjie X. et al. y Chongking, 2015, *Standardization efforts: The relationship between knowledge dimensions, search processes and innovation outcomes*, School of Construction Management and Real Estate, International Research Centre for Sustainable Built Environment, Chongqing University, diciembre 2015.
- Krstic et al., Belgrade, 2015, *Unique concept of standardization, modularization and customization of products as a strategy of e-business*, Faculty of Business Economics and Entrepreneurship, International Review 2015 N° 1-2, abril 2015.
- La Nación, *La píldora número 9, la pastilla "curalotodo" que recibían los soldados en la Guerra Mundial*, 25 de agosto 2019. <https://www.lanacion.com.ar/el-mundo/pildora-numero-9-pastilla-curalotodo-soldados-aliados-nid2281324>