



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**CONSIDERACIONES TÉCNICAS DE LAS PLANTAS
MODULARES INDUSTRIALES QUÍMICAS**

T E S I S

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
I N G E N I E R O Q U Í M I C O**

**P R E S E N T A:
LILIA PATRICIA ANGUIANO TLATELPA**

JURADO DE EXAMEN

**DIRECTOR: I.Q. JOSÉ GARCÉS ZEPEDA
ASESOR: M. EN C. VÍCTOR HUGO VILLAR MARÍN
ASESOR: I.Q. KARINA GEORGINA NORIEGA
ESPÍNDOLA**

**SINODAL: I.Q. DOMINGA ORTIZ BAUTISTA
SINODAL: DR. LUIS ALBERTO VERDUZCO MORA**



CDMX, MÉXICO

ABRIL 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Al Ing. José Garcés Zepeda

por siempre estar dispuesto a ayudarme y aconsejarme en cada etapa. Por su voluntad inquebrantable de escuchar, brindarme valiosos consejos y compartirme su experiencia.

Al Ing. Juan M. A. T.

por su tiempo, conocimientos y orientaciones. Fue un honor recibir su guía.

Al Ing. Víctor Hugo Villar Marín

por su valiosa orientación, compromiso con mi educación y apoyo en el desarrollo de esta tesis.

A la Ing. Karina Georgina Noriega Espíndola

por su apoyo sincero, su inquebrantable dedicación, sus palabras certeras y correcciones precisas.

A mamá y Chris

por el amor, el apoyo ilimitado e incondicional, así como tus palabras de aliento.

Al Dr. Verduzco y I.Q Dominga

por aceptar ser parte de este proyecto.

A Mau

por ser mi faro constante.

Dedicatoria

Para Mario

Índice

Agradecimientos	2
Dedicatoria	3
Resumen.....	8
Introducción	9
Planteamiento del Problema y Pregunta de Investigación	10
Objetivos.....	10
Objetivo General.....	10
Objetivos Particulares	10
Hipótesis	11
Capítulo 1. ¿Qué es la modularidad?	12
1.1 Análisis de la Modularidad	12
1.1.1 Evolución Histórica del Concepto de Modularidad en la Industria de Procesos .12	
1.2 Definición de Ingeniería Modular.....	14
1.2.1 Ingeniería Modular.....	14
1.2.2 Configuración de una Planta Modular	15
1.2.3 Estandarización de una Planta Modular.....	17
1.3 Ventajas y Desventajas de la Ingeniería Modular vs. la Ingeniería Tradicional	18
1.3.1 Ventajas.....	19
1.3.2 Desventajas	23

1.3.3 Comparativa de la Ingeniería Modular vs. la Ingeniería Tradicional.	26
1.4 Factores que Permitan que un Proyecto Industrial sea Modular.....	27
1.4.1 Planeación	27
1.4.2 Ingeniería y Diseño	28
1.4.3 Transporte	29
1.4.4 Tiempos.....	29
1.4.5 Costos.....	30
1.4.6 Interrelaciones de los Factores	30
Capítulo 2. Fases y Componentes para el Desarrollo de una Planta Modular	43
2.1 Planeación.....	43
2.1.1 Metodología FEL (Front-End Loading).....	44
2.1.2 Etapas de la Metodología FEL.....	45
2.1.2 Entregables Desarrollados por FEL.....	52
2.1.3 Ingeniería de Detalle	53
2.2 Ejecución.....	54
2.2.1 Procura	55
2.2.2 Fabricación y Ensamblaje	55
2.2.3 Control de Calidad y Prueba del Módulo	56
2.2.4 Transporte, Manipulación y Montaje.....	56
2.2.5 Validación	57

2.3 Operación	57
2.4 Cierre.....	57
Capítulo 3. Normativas y Estándares que las Plantas Modulares Industriales Químicas Competen	58
3.1 Jerarquía de Leyes en México.....	58
3.2 Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017 Sobre el Peso y Dimensiones Máximas con los que Pueden Circular los Vehículos de Autotransporte que Transitan en las Vías Generales de Comunicación de Jurisdicción Federal	60
3.2.1 Clasificación de Vehículos	60
3.2.2 Clasificación de Carreteras en México	62
3.2.3 Especificaciones de Peso	63
3.2.4 Especificaciones de Dimensiones	65
3.3 ISO 668: Contenedores de Carga de la Serie 1: Clasificación, Dimensiones y Capacidades.	67
3.3.1 Tipos de Contenedores.....	67
3.3.2 Dimensiones y Pesos Brutos Máximos de Contenedores	69
3.4 Buenas Prácticas para el Lugar de Trabajo, Equipo y Diseño de Herramientas.....	69
3.4.1 Principales lineamientos, según las buenas prácticas.	70
Capítulo 4. Aplicaciones de la Ingeniería Modular en la Industria Química.....	72
4.1 Planta de Generación de Gas Natural Licuado	72

4.1.1 Planta Final de Generación de Gas Natural Licuado de Novatek.....	75
4.2 Planta de Generación de Bio-Oil Dynamotive Inc	76
4.2.1 Planta Final de Generación de Bio-Oil Guelph	78
4.3 Refinería Modular UOP	80
4.3.1 Refinería Final UOP	86
Discusión.....	88
Conclusión	90
Referencias.....	92

Resumen

El concepto de ingeniería modular se originó en el siglo pasado, y su interés ha experimentado un notable incremento en los últimos años debido principalmente a la búsqueda de eficiencia, la creciente demanda y las consideraciones ambientales. Se investigó y analizó críticamente la literatura sobre plantas industriales modulares para así agrupar las consideraciones técnicas necesarias para que el diseño de una planta industrial química pueda realizarse en módulos, proporcionando una directriz y recomendaciones sólidas que permitan su aplicación exitosa. La ingeniería modular se refiere a la fabricación de elementos y componentes de una planta industrial, en forma de módulos dentro de un taller. Estos son transportados y ensamblados en el sitio final para obtener ventajas estratégicas y así formar una planta modular. La investigación identificó cinco factores que permiten que un proyecto industrial sea modular; Planeación, Ingeniería y diseño, Logística, Tiempo y Costo, los cuales están interrelacionados. Siendo el más representativo la planeación, la cual se desarrolla en esta tesis un enfoque desde la metodología FEL (Front-End Loading). Los módulos están diseñados para ser fácilmente transportados e instalados, y se sujetan a normas y estándares en función de varios aspectos. El éxito de la modularización requiere la participación significativa y oportuna de los interesados (cliente, diseñador, fabricante y constructor). Desde una perspectiva conceptual, la ingeniería modular ofrece flexibilidad en el diseño y construcción de plantas industriales químicas en comparación con plantas de ingeniería tradicional. Por lo tanto, su aplicación de esta técnica requiere una evaluación minuciosa.

Introducción

En los últimos años, el mercado industrial se ha vuelto altamente competitivo y complejo. Por lo tanto, es fundamental poder entregar proyectos que cumplan con los requisitos del cliente de manera efectiva y eficiente. Dada la perspectiva actual, en ciertas circunstancias las metodologías industriales de diseño tradicional no satisfacen las necesidades de los proyectos en tiempo y forma, además de tener altos costos operativos.

Recientemente, se ha prestado mucha atención a un modelo de planta industrial, denominado plantas modulares, debido a las múltiples ventajas que ofrece su aplicación. La construcción modular se ha estudiado desde hace varias décadas (ej. De La Torre, Sause, Slaughter, & Hendricks, 1994) y recientemente por varios autores (ej. Sologna Roy, 2017); los cuales analizaron un conjunto de factores críticos de éxito y habilitadores para una adecuada modularización industrial. Por ende, los expertos de la industria química concuerdan en que el concepto de planta modular industrial tiene visión, ya que optimiza los recursos y el tiempo en comparación a una planta tradicional y en ocasiones mejores costos. Basándose en esta premisa, se han desarrollado plantas industriales modulares en diversas partes del mundo, destacándose especialmente en Europa. Estas iniciativas han logrado satisfacer una variedad de necesidades contribuyendo de manera significativa al avance y desarrollo de este sector.

En este trabajo se estudiarán, examinarán y analizarán los parámetros y las características inherentes que las plantas modulares industriales químicas consideran. De esta forma, podemos conocer las características, beneficios y desafíos del diseño modular industrial, las fases de un proyecto modular, las normativas en México y estándares que una planta modular debe cumplir, y su aplicación a nivel global.

Planteamiento del Problema y Pregunta de Investigación

La industria enfrenta una intensa competencia global, debido a la alta demanda de sus productos y la velocidad a la que se necesitan. Una solución que se le puede dar a dicha problemática, es prefabricar y ensamblar plantas industriales utilizando un diseño tipo modular.

La ingeniería modular no está tan desarrollada en México como en otras partes del mundo. Sin embargo, en diciembre de 2022, el Indicador Mensual de la Actividad Industrial (IMAI) aumentó 0.7 % a tasa mensual (INEGI, 2022), por lo que la ingeniería modular puede beneficiarse de él y utilizarlo más adelante.

Por lo tanto, contar con un concepto adecuado para la modularización de plantas químicas industriales puede ser uno de los factores clave en su diseño y desarrollo.

Por lo que se plantean las siguientes preguntas:

- ¿Por qué se debería implementar el diseño modular en la industria química?
- ¿Cuándo considerar la modularización de una planta industrial química?

Objetivos

Objetivo General

Investigar, identificar, analizar y agrupar las consideraciones técnicas necesarias para que el diseño de una planta industrial química pueda realizarse en módulos, proporcionando una directriz y recomendaciones sólidas que permitan su aplicación exitosa.

Objetivos Particulares

- Identificar los factores que permitan que un proyecto químico industrial sea tipo modular.
 - Describir el efecto de los factores identificados en un proyecto para la creación de una planta industrial tipo modular.
-

- Revisar las regulaciones y normativas, así como el empleo de las mejores prácticas de ingeniería que aplican en una planta industrial química tipo modular.

Hipótesis

La adopción de enfoques de ingeniería modular en la industria química aumenta la flexibilidad en el diseño y construcción de plantas industriales.

Capítulo 1. ¿Qué es la modularidad?

1.1 Análisis de la Modularidad

El concepto de *módulo*, sin duda, es complejo y la variedad de circunstancias en que se utiliza, abarca numerosos aspectos sobre los cuales aún no existe unanimidad en la comunidad científica. Así que hablar de modularidad depende del contexto de por medio. Hablando propiamente de la industria química, las plantas se pueden diseñar mediante ingeniería modular.

1.1.1 Evolución Histórica del Concepto de Modularidad en la Industria de Procesos

La modularización en la industria de procesos, ha evolucionado a través de diferentes generaciones: primera generación (G1), segunda generación (G2) y tercera generación (G3). Esta sección examina principalmente la publicación “Thrid Generation Modularisation” (Kok, 2019), que a su vez se refiere a otro artículo¹.

Los módulos G1 se construyeron desde principios de 1990 y se limitaron a “racks” de tuberías principales. Los módulos G2 se construyeron a principios de los 2000 y estos implicaban que las tuberías y equipos principales estuvieran instalados en módulos (generalmente de acero). Este enfoque redujo el trabajo de campo aproximadamente un 30-40% en comparación a los enfoques tradicionales. A principios del 2009, el equipo de Fluor Corporation² exploró las barreras de la modularidad más allá de la G2 para generar un cambio real. Por lo que los módulos G3 continúan con el concepto de la G2 y describen unidades de proceso modularizadas. Estos bloques de proceso (G3) contienen un 95% de estructura (generalmente de acero), hasta un 85% de instalaciones eléctricas y hasta un 95% de

¹ Al artículo que se refiere es al de Earlier Insight por Steyn & Van Heerden, en el 2015.

² Fluor Corporation es una compañía de ingeniería, adquisición, fabricación, construcción y mantenimiento, que diseña, construye y mantiene instalaciones eficientes en capital a clientes en diversas industrias.

instrumentación. Esto permitió la verificación de los módulos en el taller de fabricación. Con los módulos G3, prácticamente el 90 % del trabajo de campo se traslada al patio de fabricación. Para una mejor comprensión, el siguiente diagrama muestra las diferentes generaciones de modularización (ilustración 1.1.1).

Ilustración 1.1.1

Evolución de la modularización.



Nota: Adaptadas de;

- 1: *1st Generation Modular Execution*, de 3RD Generation Modularization and its Application to LNG Distribution (pág.13), por Flour, 2013.
- 2: *2nd Generation Modular Construction Execution*, de 3RD Generation Modularization and its Application to LNG Distribution (pág.13), por Flour, 2013.
- 3: *Thrid Generation Modularisation*, [Fotografía], de OTC, 2019, (<https://www.ownerteamconsult.com/third-generation-modularisation/>)

1.2 Definición de Ingeniería Modular

1.2.1 Ingeniería Modular

Lonnie R. Morris ofrece una definición general de diseño modular en su libro *Handbook of Research on Instructional Systems and Educational Technology* y lo define como: *“El diseño modular es un enfoque de diseño que subdivide un sistema en partes más pequeñas llamadas módulos, que se crean de forma independiente y luego se utilizan en diferentes sistemas. Un sistema modular se caracteriza por: la división funcional en módulos; el uso de interfaces modulares bien definidas; y el uso de los estándares de la industria para dichas interfaces.”* (R. Morris & Kidd, 2017).

Una definición más específica de modularización industrial es: *“Técnica que permite realizar fuera del sitio de implantación, en un taller especializado, el montaje de equipos, cañerías, instrumentos, etc., en estructuras metálicas, de forma que puedan ser transportadas a la obra como un conjunto, con una entidad física definida. Los módulos resultantes pueden tener distinto grado de complejidad y tamaño.”* (López, Avilés, & Reboredo, 2016).

Con base en lo anterior y la investigación realizada se propone una definición de ingeniería modular industrial, la cual sería: La ingeniería modular es un método de diseño y fabricación de plantas industriales (en este caso químicas) en módulos, que proporciona ventajas. Los módulos están formados por uno o más patines. Los patines o también conocidos como “super skids” son pre-montajes de equipos, materiales y componentes (tuberías, conexiones, instrumentos, etc.), fabricados e instalados en una ubicación externa (taller), dentro de una estructura (generalmente de acero). Un ejemplo de esto, lo podemos ver en la siguiente imagen (ilustración 1.2.1).

Ilustración 1.2.1

Ejemplo de Planta Modular.



Nota: Adaptadas de *Fabricación y montaje de una planta modular de MEROX* [Fotografía], por COPISA, (<https://www.grupocopisa.com/trabajos/fabricacion-y-montaje-de-planta-modular/>).

1.2.2 Configuración de una Planta Modular

Las personas que participan en una planta modular son: cliente, diseñador, fabricante y constructor. El cliente es una empresa u organización para el que se realiza el proyecto, en este caso una planta modular y que aporta la financiación necesaria para su ejecución. El diseñador es el responsable de definir claramente el proyecto y los costos más favorables para un entorno determinado. El rol del fabricante y constructor se irán definiendo a lo largo del apartado.

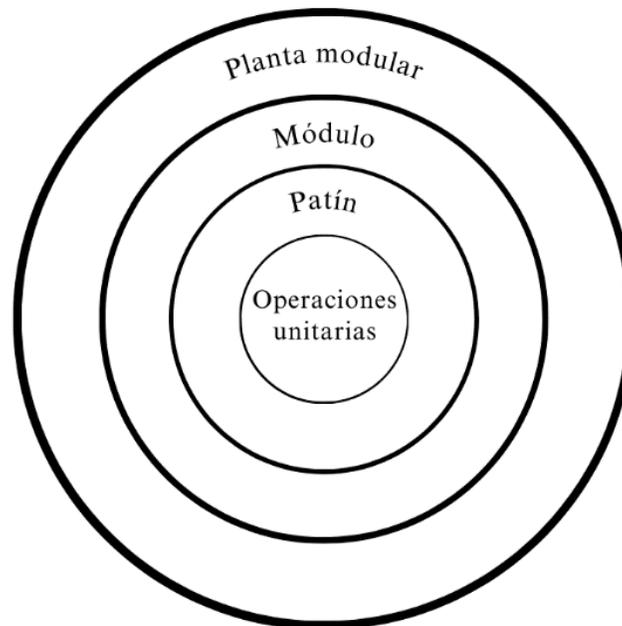
Un proceso puede constar de varias operaciones unitarias³. Estas operaciones están contenidas en uno o más patines, según sea la conveniencia de tamaño. Como se mencionó

³ Las operaciones unitarias son aquellas que implican tratamientos físicos o químicos a la materia prima con el objetivo de obtener los productos deseados a partir de esta. (Facultad de Ingeniería Industrial, 2019)

anteriormente, un conjunto de patines forma un módulo. Al completar el fabricante los patines o módulos, prueban todos los componentes. Estos módulos se ensamblan e integran entre sí por el constructor, en el sitio final para formar un gran sistema de proceso, denominado planta modular. Para comprender mejor esta configuración, se puede ver la siguiente imagen (ilustración 1.2.2).

Ilustración 1.2.2

Ejemplo de configuración de módulos en instalaciones del usuario final.

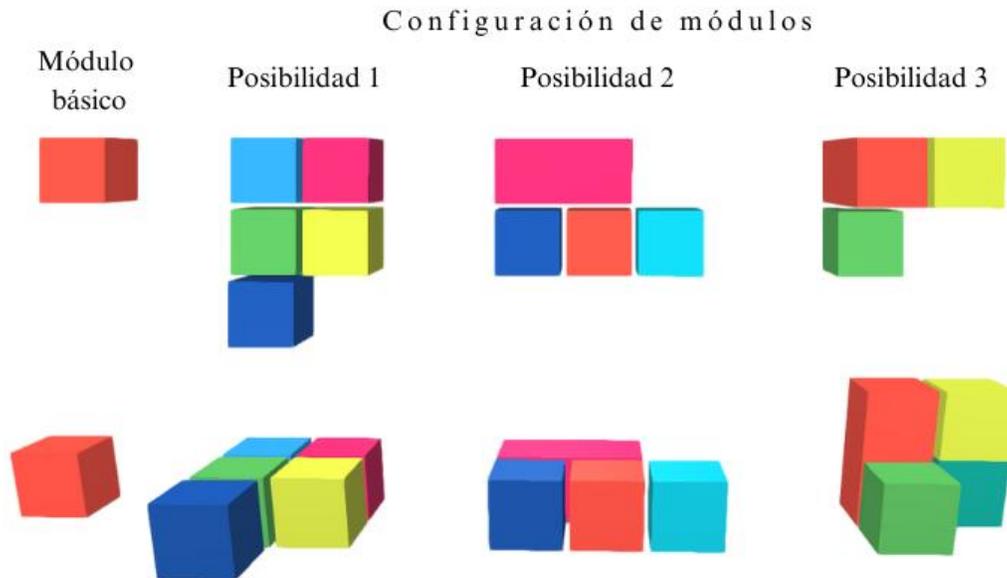


Nota: Elaboración propia.

Los módulos resultantes pueden tener distinto grado de complejidad y tamaño, estos factores se establecen en la planeación del proyecto la cual se tratará más adelante. El empleo de módulos brinda una versatilidad que se puede comprender en el esquema siguiente (ilustración 1.2.2).

Ilustración 1.2.2

Ejemplo de instalación de módulos en instalaciones del usuario final.



Nota: Elaboración propia.

1.2.3 Estandarización de una Planta Modular

La estandarización de plantas se puede aplicar en varios aspectos, como en procedimientos de cálculo, diseños de equipos, materiales, procesos, entre otros. Es importante distinguir entre dos conceptos: modularidad y estandarización (visto como un sistema completo, donde todas las variables como presión y temperatura de operación, siguen siendo las mismas). Estos conceptos a menudo se usan juntos, ya que la modularidad optimiza el ensamblaje y la construcción de la planta, mientras que la estandarización reduce el tiempo de diseño y los costos de la ingeniería asociados.

El tener un diseño de una planta modular no garantiza la repetitividad de la planta, dado sus variables específicas (ubicación, capacidad, tipo de suelo, etc.). Por lo que no todas las

plantas pueden estandarizarse, o solo pueden estandarizarse hasta un grado determinado. Así que no todo lo modular es estandarizado.

La modularización puede aplicarse para un proyecto nada más. Claro que, desde una perspectiva económica, es deseable diseñar la planta lo más estándar posible para evitar costos de reingeniería y ajustar solo lo necesario, pero esto no siempre es posible en proyectos de alta capacidad o con muchas especificaciones, ya que depende de la demanda que se tenga.

Al igual que las plantas tradicionales, las plantas modulares deben sujetarse a regulaciones y normativas, en lo que respecta al diseño, transporte, puesta en marcha, etc. Esto se realiza para garantizar que los productos y sistemas desarrollados cumplan con las especificaciones y posean las características deseables en términos de seguridad, calidad, eficacia y confiabilidad requeridos.

1.3 Ventajas y Desventajas de la Ingeniería Modular vs. la Ingeniería Tradicional

De acuerdo con la literatura, la ingeniería modular se utiliza cuando tiene ventajas significativas o cuando el proyecto no se puede construir con ingeniería tradicional⁴. Dicha literatura se encuentra debidamente referenciada.

En comparación con los diseños de plantas industriales tradicionales, la ingeniería modular tiene ventajas y desventajas/desafíos potenciales. A continuación, se presenta una tabla (tabla 1.3.1) donde se muestran estas, las cuales se explicarán más adelante:

⁴ La ingeniería tradicional, también conocida como ingeniería secuencial, es el método de ingeniería más utilizado en la industria. Realizado por etapas secuenciales, sin avanzar a la siguiente hasta que se complete la anterior. Si se detecta algún error durante el proceso, se vuelve a los pasos correspondientes y se corrigen. El principal inconveniente asociado es que el proceso es relativamente lento.

Tabla 1.3.1

Ventajas y desventajas de la ingeniería modular.

Ventajas	Desventajas
Despliegue de múltiples frentes de fabricación.	Mayor planificación.
Reducción de obras civiles en sitio y/o ampliaciones estructurales.	Mayor esfuerzo
Costos reducidos:	Tasa de error baja.
• Costos de financiamiento más bajos.	Rápido financiamiento.
• Reducción del esfuerzo de movilización.	Montaje complejo.
• Mejor gestión de las materias primas y herramientas.	Material adicional.
Productividad incrementada:	Dificultad en la trasportación.
• Mejor comunicación.	
• Mayor productividad.	
• Poca o nula dependencia de los recursos locales.	
• Reducción del impacto ambiental.	
• Seguridad en el lugar de trabajo.	
Facilidad de mantenimiento.	
Mayores opciones de fabricantes.	

Nota: Elaboración propia.

1.3.1 Ventajas

En los últimos años, el enfoque de la ingeniería modular se ha convertido en una solución en diversas partes del mundo, principalmente por su versatilidad y adaptabilidad a diferentes situaciones. Para comprender de manera más clara, se desglosarán las ventajas, enumerando y analizando cada una de ellas:

1. *Despliegue de múltiples frentes de fabricación:* Para minimizar el tiempo del proyecto, las tareas se llevan a cabo de forma paralela y se pueden realizar en uno o más talleres durante la construcción de los módulos, de acuerdo con la capacidad y la logística. Además, es posible iniciar cimentaciones y movimientos de tierra en el sitio

final de la planta para posteriormente realizar la construcción y/o montaje de equipos o tuberías modulares y no modulares (equipos de grandes dimensiones que no sean conveniente colocarlos dentro del módulo ya que, si se encuentran excederían los límites reglamentarios, o solo se podría colocar un equipo dentro del patín o módulo).

2. *Reducción de obras civiles en sitio y/o ampliaciones estructurales:* Los módulos se fabrican en talleres con espacios y ambientes controlados, lo que reduce el trabajo de obra civil en el lugar final de la planta. Así mismo, el módulo o patín llega a su ubicación final pre-ensamblado, probado y cableado eléctricamente, por lo que se requiere menor personal para conectar y solucionar problemas del equipo durante el arranque y la puesta en servicio.

3. *Costos reducidos:* Los costos se reducen cuando los módulos se construyen en talleres especializados. Las plantas de proceso construidas en talleres son hasta un 25 % más baratas en comparación con las de construcción tradicional (Modular Process Solutions, s.f.). Estos se generan a partir de elementos rentables específicos como los siguientes:

- *Costos de financiamiento más bajos:* Los tiempos de construcción se reducen significan menos horas hombre ⁵. Además, el taller de construcción de una planta modular estará conveniente ubicado para el fabricante, por lo que se tendrán opciones de proveedores. El aumento de la competencia nacional/internacional también podría reducir los costos.

⁵ Las horas hombre es la estimación de la cantidad de esfuerzo humano que puede realizar un trabajador promedio en una actividad, proceso o proyecto durante una hora.

- *Reducción del esfuerzo de movilización:* La movilización de trabajadores a las obras de construcción tienen costos. Estos surgen, por ejemplo, de la construcción de talleres y otros edificios para diversos usos, viviendas, movilización, gastos de extranjería y/o reubicación, etc. Los proyectos modulares reducen costos al construir la estructura en el taller, reduciendo la necesidad de que los trabajadores se desplacen hasta el sitio final de la planta, lo que incurre en costos de movilización.

- *Mejor gestión de las materias primas y herramientas:* Los costos del proyecto se reducen significativamente debido a menos almacenamiento en el sitio, menos pérdidas por extravío y menos uso indebido de materias primas y herramientas.

4. *Productividad incrementada:* Los trabajadores que realizan tareas en un taller son significativamente más productivos, principalmente por las siguientes razones:

- *Mejor comunicación:* Los módulos suelen diseñarse y construirse en el mismo sitio, lo que resulta en una mejor interacción entre las especialidades⁶ de diseño, ingeniería y construcción.

- *Mayor productividad:* Como se ha mencionado, los trabajadores que realizan tareas en un taller son significativamente más productivos, debido principalmente a que se minimizan los conflictos de programación de tareas.

⁶ Se le denomina a especialidad al grupo de personas que trabajan en un estudio o servicio particular, dentro de un grupo de una firma de ingeniería.

- *Poca o nula dependencia de los recursos locales:* Dependier únicamente de los proveedores locales conlleva una gran cantidad de riesgos que pueden retrasar el proyecto: como problemas de transporte, escasez de suministros, errores de producción, materiales deficientes, etc. Como se mencionó anteriormente, el taller de construcción de la planta modular estará ubicado conveniente para el fabricante, lo que aumenta el número de proveedores. El tener múltiples proveedores reduce la dependencia de una sola fuente y equilibra los riesgos descritos anteriormente.

- *Reducción del impacto ambiental:* Un entorno adecuado y eficiente conduce a la reducción de residuos materiales, contaminantes del aire (principalmente CO₂), contaminantes del agua y las emisiones de ruido. Igualmente, no hay impacto por las condiciones ambientales exteriores (lluvia, nieve, etc.)

- *Seguridad en el lugar de trabajo:* Los módulos industriales se fabrican en un entorno controlado, lo que hace que el trabajo en ellos sea más seguro en comparación con los sistemas tradicionales construidos en sitio. Ya que una construcción tradicional implica riesgos y peligros asociados con el trabajo en altura, el uso de equipo pesado y el trabajo eléctrico. Estos riesgos y peligros se ven agravados por las condiciones típicas del sitio, a menudo al aire libre, rodeado de trabajadores e infraestructura existente. En dicho entorno, el equipo es susceptible de sufrir daños durante la instalación y el clima.

5. *Facilidad de mantenimiento:* Las plantas modulares industriales posibilitan la extracción de los módulos a tratar para ser trasladados al lugar en el que serán

reparados. En caso que se requiera esta ventaja, se debe considerar en el diseño los espacios necesarios.

6. *Mayores opciones de fabricantes:* Los fabricantes que no pueden competir en proyectos con construcción tradicional debido a su ubicación geográfica remota pueden utilizar ingeniería modular. El fabricante debe de analizar todos los requerimientos que debe de considerar (transporte, normativa, etc.) con el fin de lograrlo. Incluso si es conveniente tener otro taller ubicado estratégicamente para fabricar o simplemente ensamblarlos módulos. Además, el contratante tiene la obligación de evaluar si es o no competitivo.

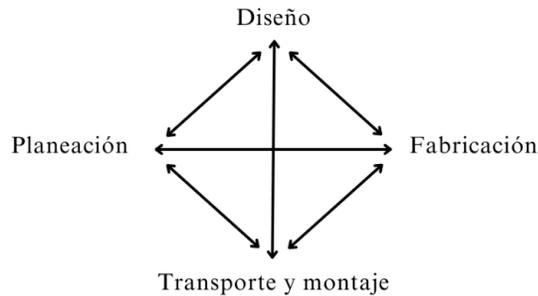
1.3.2 Desventajas

La ingeniería modular también presenta ciertas desventajas en comparación con una ingeniería tradicional, que pueden o no presentarse, pero deben tenerse en cuenta al momento de la planificación del proyecto. Por eso se listan y analizan cada una de ellas:

1. *Mayor planeación:* Se requiere una planeación, así como estimaciones de costos detalladas, desde el principio del proyecto. El diseño, la fabricación, el transporte y el montaje son interdependientes en proyectos modulares (ilustración 1.3.1) por lo que una mayor planeación y programación son necesarias que en proyectos tradicionales. Para las actividades de diseño, fabricación y transporte se requieren cronogramas tempranos y detallados.

Ilustración 1.3.1

Coordinación entre actividades de un proyecto modular



Nota: Adaptado del *Review and Analysis of Modular Construction* (pág. 30), por De La Torre, M.L; Sause, R.; Slaughter, S.; Hendricks, R. H., 1994.

2. *Mayor esfuerzo:* A los fabricantes de módulos se debe proporcionar un paquete diseñado y detallado antes de que el equipo pueda fabricarse. Este requisito también implica mayor trabajo de las siguientes áreas: planeación, diseño e ingeniería, procura, fabricación, inspección, transporte y montaje.

3. *Tasa de error baja:* Un módulo está conectado a varios módulos, por lo que el diseño y la fabricación deben ser precisos para evitar problemas de conexión como la falta de coincidencia (que no embonen). Cada módulo debe encajar de manera exacta con los demás para garantizar un funcionamiento adecuado y eficiente de toda la planta. La precisión en las interconexiones es fundamental para evitar problemas de funcionamiento, fugas o mal funcionamiento de los equipos

4. *Rápido financiamiento:* Debido a que el proceso de diseño y fabricación es rápido, los fabricantes y constructores necesitan inversiones puntuales para llevar a cabo los trabajos de taller. Con respecto a los sistemas tradicionales, no es así.

5. *Montaje complejo:* Debido a la precisión de la conexión, el módulo debe quedar totalmente acomodado, lo que hace complejo el montaje.

6. *Material adicional:* Este se desarrolla conforme a los requisitos estructurales de los módulos. El módulo debe ser diseñado y construido para sostenerse de forma independiente y resistir los rigores de transporte, por lo que, al requerir más miembros estructurales, más grandes, o más refuerzos el material aumenta. En 1990, Shelley indica que se requiere aproximadamente un 30% más de acero estructural, que se usa para montar y transportar el módulo. (De La Torre, Sause, Slaughter, & Hendricks, 1994).

7. *Dificultad en la transportación:* Al llevar a cabo un proyecto modular, el transporte es un factor importante a tener en cuenta, ya que se debe de analizar las dimensiones de los módulos. Es necesario un estudio exhaustivo del medio de transporte (tractocamiones, barcos, etc.) con una ruta muy precisa, ya que muchos de los componentes que se transportan la mayoría de las veces son volumétricamente grandes y no es conveniente escoger el camino más corto al azar.

Cuanto más grande sea el equipo, mayor será la complejidad y el costo de transportar ese equipo. Las carreteras tienen restricciones establecidas en la normativa en cuanto a la altura, el ancho y/o el peso de los tractocamiones lo que pueden impedir el transporte de módulos por carretera o limitar las posibles rutas, las normas aplicables en México se analizarán más adelante. No obstante, otras cuestiones de transporte incluyen el mal clima y las condiciones desfavorables de las carreteras.

1.3.3 Comparativa de la Ingeniería Modular vs. la Ingeniería Tradicional.

En la siguiente tabla se presentan los aspectos más relevantes en forma de comparación entre la ingeniería modular y la ingeniería tradicional:

Tabla 1.3.2

Comparativa de la Ingeniería Tradicional e Ingeniería Modular.

	Ingeniería tradicional	Ingeniería modular
Diseño	Total libertad de diseño y personalización, cumpliendo la normatividad de espaciamiento.	Diseño más estricto, sin cumplir normativa de espaciamiento.
Costos	Presupuesto sujeto a variaciones en caso de producirse o imprevistos durante la fase de construcción	Normalmente se reducen, debido a la optimización de materia y tiempo.
Calidades	Calidades dependientes de la mano de obra.	Mejor calidad de materiales debido al incremento de proveedores. Mayor parte de trabajos elaborados por maquinaria precisa en entornos controlados.
Plazos	En caso de imprevisto, la cadena lineal frena todo.	Normalmente más ágiles debido al despliegue de múltiples frentes de trabajo.
Sostenibilidad	Generación de gran cantidad de residuos y contaminación. Mayor impacto medioambiental.	Optimización de material, genera reducción de residuos y contaminación. Reducción de impacto ambiental
Ejecución	Mayores errores de precisión.	Maquinaria más precisa.
Agentes	Trabajo más individualizado.	Trabajo de forma colaborativa desde una fase temprana.
Financiamiento	Inversión relativamente gradual.	Alta inversión inicial.

Nota: Elaboración propia.

1.4 Factores que Permitan que un Proyecto Industrial sea Modular

Después de analizar la ingeniería modular, se identificaron los factores que la permiten:

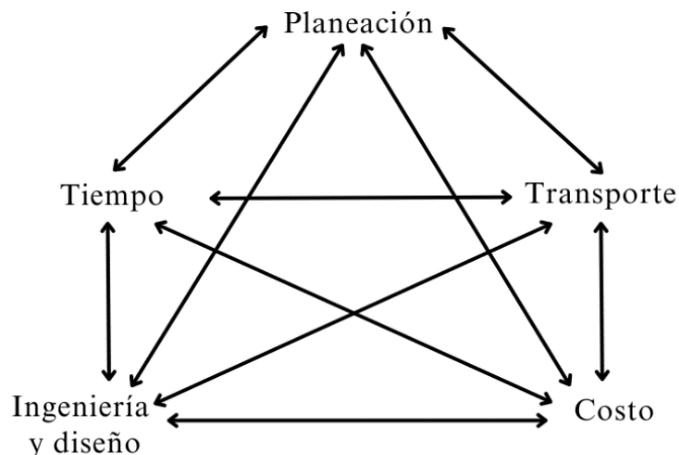
- Planeación.
- Ingeniería y diseño.
- Logística.
- Tiempos.
- Costos.

Estas variables están interrelacionadas, como se presenta en el esquema a continuación (ilustración 1.4.1) y se presenta una descripción de cada una de ellas.

Ilustración 1.4.1

Factores de la ingeniería modular.

FACTORES DE LA INGENIERÍA MODULAR



Nota: Elaboración propia.

1.4.1 Planeación

La planeación de proyectos industriales es una serie de acciones dirigidas para lograr uno o más objetivos específicos. En primer lugar, se deben identificar las actividades necesarias, para

después estructurar de manera metódica y sistemática, aclarando quién, cuándo y cómo deben llevarse a cabo.

De esta forma, la planeación brinda un plan general y permite a las personas u organizaciones interesadas a:

- Satisfacer expectativas.
- Ser más predecible y poder gestionar de mejor manera.
- Aumentar las posibilidades de éxito.
- Entregar productos adecuados en el momento adecuado.
- Resolver inconvenientes de manera oportuna.
- Optimizar el uso de los recursos organizacionales y económicos.

La planeación está estrechamente relacionada con la gestión de proyectos. Debido a que la planeación define las actividades a realizar, dirige el proyecto, y la gestión es la ejecución de este plan. Por lo tanto, una buena gestión refleja una buena planeación. Del mismo modo, los proyectos que carecen de planeación comúnmente fallan o generan; sobrecostos, disminución de beneficios, re trabajos, incumplimiento de plazos e incluso bajo retorno de inversión.

1.4.2 Ingeniería y Diseño

La ingeniería comienza con el concepto y avanza hasta el diseño de equipos, sistemas y planta. Por lo que la ingeniería define y traza la ruta del proceso, planteando preguntas iniciales: cómo se lleva a cabo, qué materias primas e insumos se utilizan y qué condiciones afectan su implementación. Con base en esas respuestas, se plantea y unifica, dando como resultado:

- Una alternativa de proceso económicamente conveniente.
- Una especificación detallada del proceso y sus componentes, que cumplan

los estándares de calidad y optimicen las operaciones tanto como sea posible.

- Un producto final, como un equipo, proceso o sistema, que cumpla con reglamentos y normas correspondientes.

Por lo tanto, la ingeniería y el diseño es un proceso iterativo y sistemático que involucra la caracterización, evaluación y prueba de especificaciones para crear equipos, sistemas, procesos e infraestructura cuya forma y función permitan lograr objetivos. Este es uno de los puntos donde la ingeniería modular se vuelve más diligente que la ingeniería tradicional. Esto se debe al mayor esfuerzo de ingeniería y los factores interrelacionados (logística de transporte, planeación, tiempo y costo), que se deben tener en cuenta para su realización. Siendo la ingeniería y el diseño fundamental para la construcción de los módulos, que juntos forman una planta modular y su correcta interconexión dan como resultado una planta modular eficiente.

1.4.3 Transporte

El transporte es la suma de los medios necesarios para trasladar los módulos desde el taller hasta su ubicación final. Se deberá de realizar estudios para determinar: los mejores medios, las rutas más eficientes en cuanto a distancia y esfuerzo, la optimización de traslado y los mejores costos. Que a su vez se aseguran el cumplimiento de las normativas y regulaciones pertinentes para garantizar una transacción comercial clara y sin contratiempos.

1.4.4 Tiempos

Se refiere a la duración para llevar a cabo el proyecto en unidades de tiempo (horas, días, semanas, meses). Este depende de la duración de cada tarea y de las interdependencias que existan entre ellas.

1.4.5 Costos

Los costos son los gastos incurridos por una organización para llevar a cabo las tareas y asignaciones del proyecto. Estos deben estimarse, presupuestarse y monitorearse a lo largo del ciclo de vida del proyecto.

1.4.6 Interrelaciones de los Factores

Las interrelaciones que se presentan se derivan de la investigación realizada a partir de diversas fuentes, siendo la más destacada “Review and Analysis of Modular Construction Practices” (De La Torre, Sause, Slaughter, & Hendricks, 1994)

Interrelación entre Planeación y Transporte. Todas las variables están interrelacionadas con la planeación, pero donde sobresale la ingeniería modular es en la planeación del transporte. Los módulos son de mayor dimensión y peso que los equipos de ingeniería tradicional, lo que implica que la planeación del transporte sea más compleja y rigurosa.

Los tipos de transporte, proporcionan espacio para el manejo de carga hasta una determinada capacidad de toneladas o metros cúbicos de espacio. Estos están dictados por regulaciones y en caso de incumplimiento, impedirá o limitará las posibles rutas de transporte de los módulos. Se deben realizar estudios para la planeación del transporte que consideren los siguientes puntos:

- **Rutas de transporte:** La investigación de ruta debe identificar obstáculos potenciales, como servicios públicos elevados (cables eléctricos), árboles y puentes que pueden requerir una preparación adicional para cruzar. Después de identificar e investigar todas las rutas posibles, se debe de determinar la mejor opción considerando otros factores.

- Tipos de transporte: Los posibles métodos de transporte deben investigarse al principio del proyecto para garantizar la compatibilidad con el diseño del módulo. Los métodos de transporte pueden ser: marítimos, aéreos o terrestres. También se utilizan combinaciones de estos tipos cuando es apropiado.

- Terrestre: Hay varios métodos posibles de transporte terrestre, como lo son unidades de tractocamión y sistemas ferroviarios principalmente. Los límites de altura reflejan los conflictos potenciales con los servicios públicos elevados, los puentes y barreras verticales. Además de las restricciones de tamaño impone limitaciones en el peso del eje, las carreteras disponibles y la hora del día en que se pueden utilizar estas carreteras. Las normas federales, nacionales o en algunos casos internacionales de seguridad también limitan las dimensiones, el peso, el tiempo de tránsito y las rutas disponibles del módulo, las cuales se tratan en el capítulo 3.

- Marítimo: El transporte por agua puede ser efectivo si la ubicación del sitio de construcción y los talleres de fabricación están junto al agua o si los módulos no pueden transportarse por camión o ferrocarril debido a su tamaño y peso. Hay varios métodos de transporte marítimo, incluidas barcazas, barcos y embarcaciones para fines especiales.

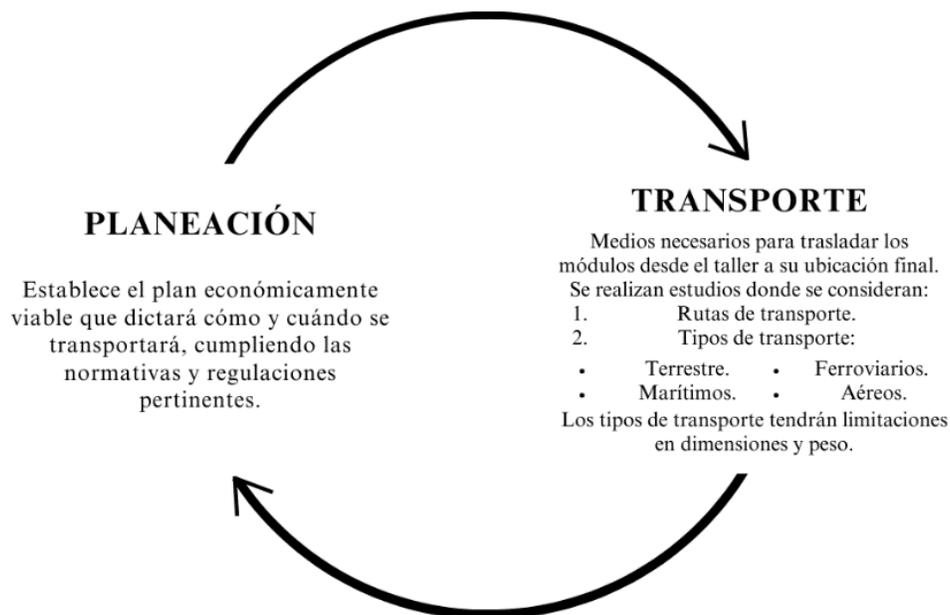
- Aéreo: Los métodos de transporte aéreo no son tan comunes como el transporte terrestre y marítimo. Sin embargo, el transporte aéreo en helicóptero se puede utilizar en la construcción modular. Los helicópteros son capaces de levantar aproximadamente 9 toneladas con restricciones mínimas de tamaño (Armstrong, 1972). Para comparar el transporte en helicóptero con otros métodos,

debemos considerar todas las funciones que pueden realizar los helicópteros. Por ejemplo, los helicópteros pueden transportar módulos no solo al sitio, sino también a su ubicación final, eliminando la necesidad de otros equipos (ejemplo grúas) (Carreiro, 1968). Además, los helicópteros también se pueden utilizar junto con el transporte terrestre y acuático.

La planeación del método de transporte seleccionado afecta todas las demás actividades en un proyecto modular. Por lo tanto, se requiere un análisis minucioso de transporte para establecer una planeación eficaz, como se muestra en el siguiente esquema (ilustración 1.4.2).

Ilustración 1.4.2

Interrelación entre los factores de planeación y transporte de plantas modulares.

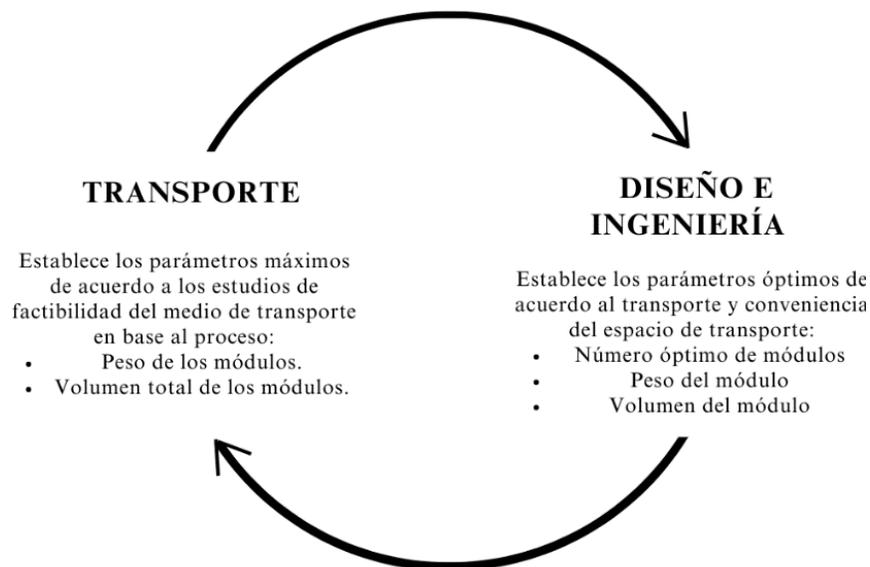


Nota: Elaboración propia.

Interrelación entre Diseño e Ingeniería y Transporte. Los proyectos modulares implementan con mayor fuerza una interrelación entre diseño y logística que los proyectos tradicionales. Debido al aumento de estructural (implementado por el conjunto de equipos y materiales para que el módulo pueda sostenerse de manera independiente y soportar los rigores del transporte) se requiere un transporte más especializado. Los medios de transporte utilizados establecerán parámetros de tamaño, peso y número de módulos para la ingeniería y diseño basados en estudios de transporte (ilustración 1.4.3).

Ilustración 1.4.3

Interrelación entre los factores de transporte e ingeniería y transporte de plantas modulares.



Nota: Elaboración propia.

El módulo tiene una tasa de error muy baja, por lo que una buena ingeniería y diseño son fundamentales. Y los errores pueden conducir al rediseño o cambio de los planes de transporte.

Al determinar si un enfoque modular es apropiado para la planta, se deben considerar las limitaciones y los costos asociados del transporte de módulos al sitio de construcción. En algunas

ocasiones, es posible que montar equipos sobre un módulo no proporcione ningún beneficio adicional.

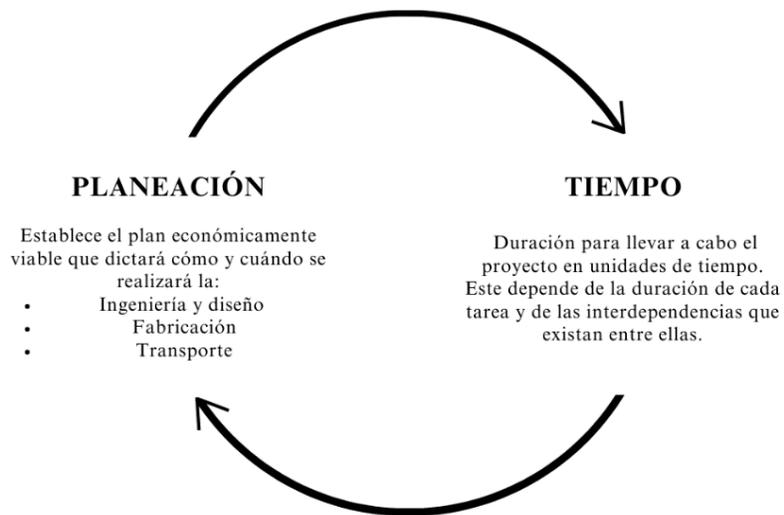
Interrelación entre Planeación y Tiempo. El tiempo de planeación de la ingeniería modular es diferente del tiempo de una ingeniería tradicional. La ingeniería modular requiere mayor esfuerzo en la planeación de:

- Ingeniería y diseño
- Fabricación
- Transporte

Al necesitar una mayor planeación, puede conllevar más tiempo. La interrelación entre estos dos se puede observar en el esquema (ilustración 1.4.4).

Ilustración 1.4.4

Interrelación entre los factores de planeación y tiempo de plantas modulares.



Nota: Elaboración propia.

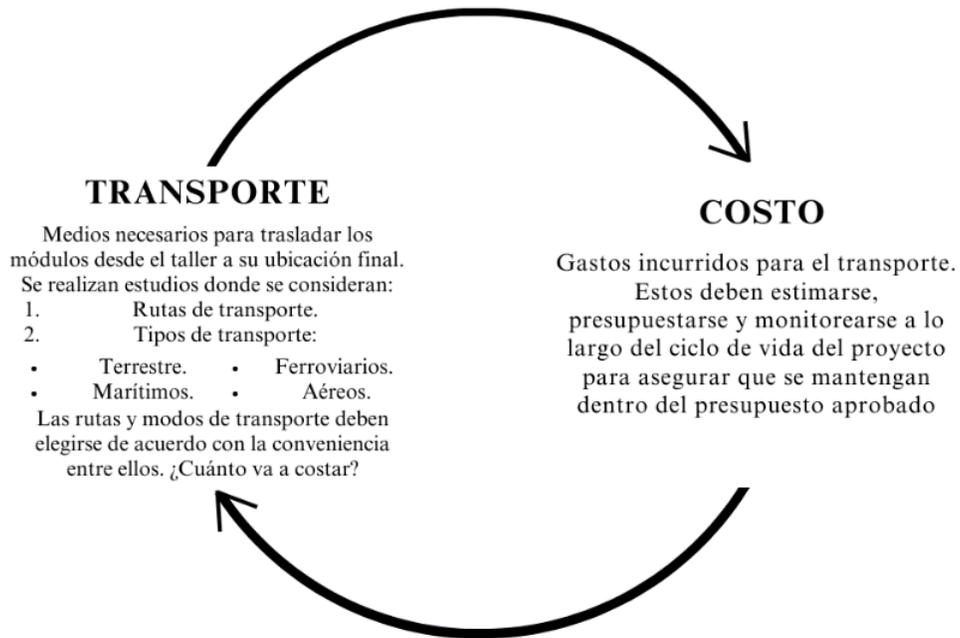
Interrelación entre Transporte y Costo. El transporte de ingeniería modular puede significar costos más altos que la ingeniería tradicional (Sologna Roy, 2017). Los costos se deben considerar en los estudios de transporte en los siguientes términos:

- Rutas de transporte: Una vez que se realiza una planeación preliminar, se revisan las opciones factibles para determinar la opción con más beneficios y el transporte más económico.
- Tipos de transporte: Los módulos son de mayor tamaño y peso que los equipos en la ingeniería tradicional, por lo que requerirá de un medio de transporte con mayor espacio y la capacidad de soportar más de peso, lo que aumenta los costos.
 - Terrestre: El transporte en camiones es común y a menudo económico (De La Torre, Sause, Slaughter, & Hendricks, 1994), pero tiene limitaciones físicas en dimensiones y peso de los módulos según las normativas.
 - Marítimo: El transporte por agua puede eliminar o reducir significativamente los posibles gastos de control de tráfico necesarios para el transporte terrestre. Si los talleres de fabricación están cerca del agua, el transporte por agua es más económico (Falcon Steel, 1993). Esto puede ser significativo para el transporte a través de una ciudad congestionada, evitando el cierre de carreteras principales, intersecciones, etc.
 - Aéreo: Los helicópteros son utilizados con menor medida. Estos no solo entregan el módulo en el sitio, sino que también lo colocan en su posición final, lo que elimina la necesidad de otros equipos (es decir, grúas) (Carreiro, 1968). Por lo tanto, aunque los helicópteros parecen ser más caros, pueden ser factibles en base a un análisis del costo total de transporte, manejo y montaje.

Por lo tanto, la relación entre transporte y costo es importante y es necesario analizarla en detalle. A continuación, se muestra un esquema con lo ya anteriormente mencionado. (ilustración 1.4.5).

Ilustración 1.4.5

Interrelación entre los factores de transporte y costo de plantas modulares.

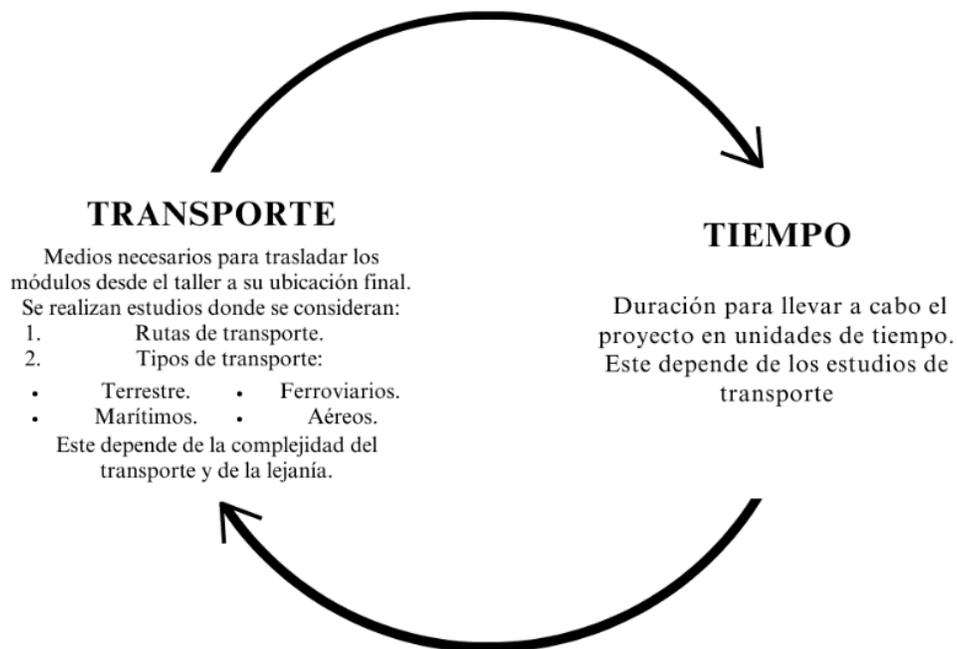


Nota: Elaboración propia.

Interrelación entre Transporte y Tiempo. Los tiempos pueden variar según las especificaciones que se deben de cumplir para el transporte. El transporte de módulos puede tomar más tiempo que los tradicionales, debido al aumento estructural que estará considerado en la logística. En el siguiente esquema se puede ver la interrelación que existen entre estos dos factores (ilustración 1.4.6).

Ilustración 1.4.6

Interrelación entre los factores de transporte y tiempo de plantas modulares.



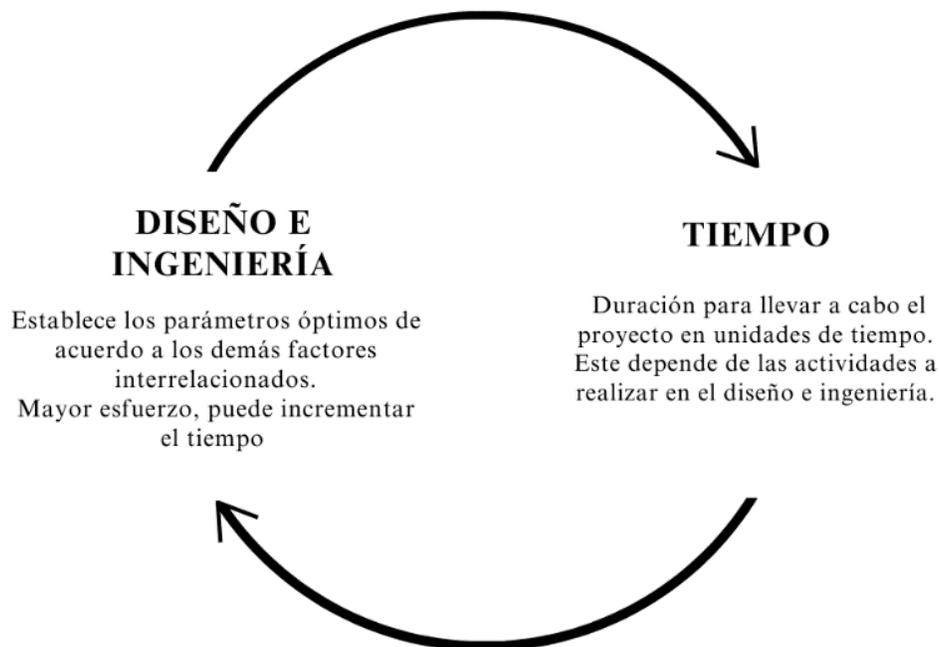
Nota: Elaboración propia.

Un percance durante el transporte de los módulos del taller al sitio puede ocasionar daños en los mismos y poner en peligro el cronograma o calidad del proyecto. En transporte es vital para proyectos modulares, por lo que se tiene que coordinar con proveedores, distribuidores, empleados y, en algunas ocasiones con organismos gubernamentales para evitar cualquier inconveniente, en términos de costo, tiempo, planeación o el mismo diseño del módulo.

Interrelación entre Diseño e Ingeniería y Tiempo. Debido al mayor esfuerzo en comparación a la ingeniería tradicional, el tiempo de diseño e ingeniería puede aumentar (ilustración 1.4.7). En cambio, los tiempos para la fabricación de los módulos, se reduce debido a los distintos frentes de fabricación desplegados. Además, los módulos se construyen en talleres especializados, por lo que las condiciones climáticas no retrasarán ni interrumpirán el cronograma de fabricación.

Ilustración 1.4.7

Interrelación entre los factores de diseño e ingeniería y tiempo de plantas modulares.



Nota: Elaboración propia.

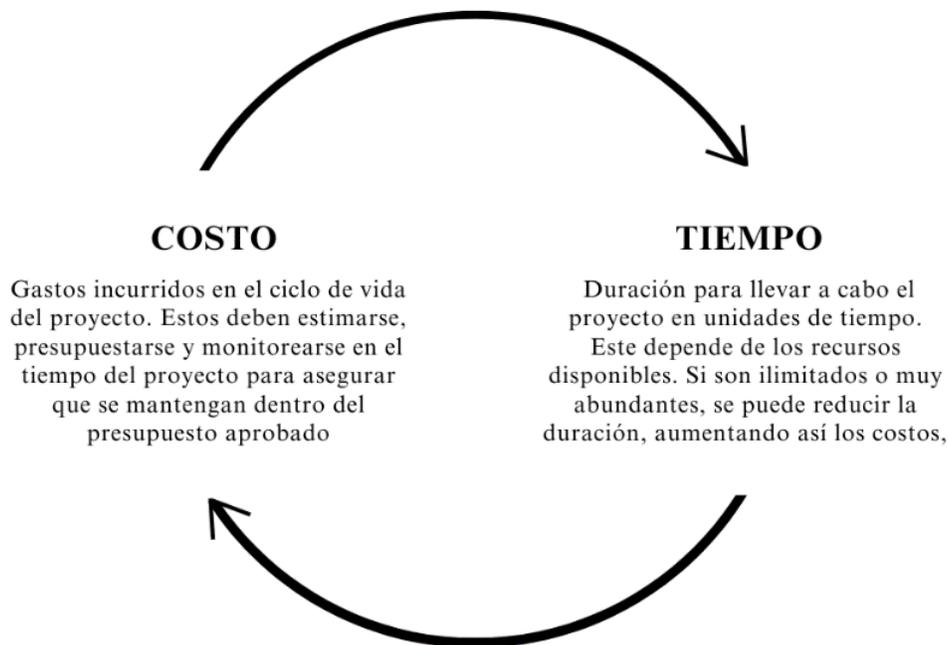
Interrelación entre Costo y Tiempo. El desarrollo de proyectos en el momento óptimo permite lograr costos mínimos aceptables debido a que se tiene:

- Una estructura específica del proyecto.
- Una determinada forma de ejecutarlo.
- Tiempos específicos para las distintas actividades.

Si el tiempo es objetivo prioritario y los recursos disponibles son ilimitados o muy abundantes, se puede reducir la duración, aumentando así los costos, mediante la asignación de más recursos a determinadas actividades. Del mismo modo, si los recursos son limitados, se puede extender el tiempo del proyecto.

Ilustración 1.4.8

Interrelación entre los factores de costo y tiempo de plantas modulares.

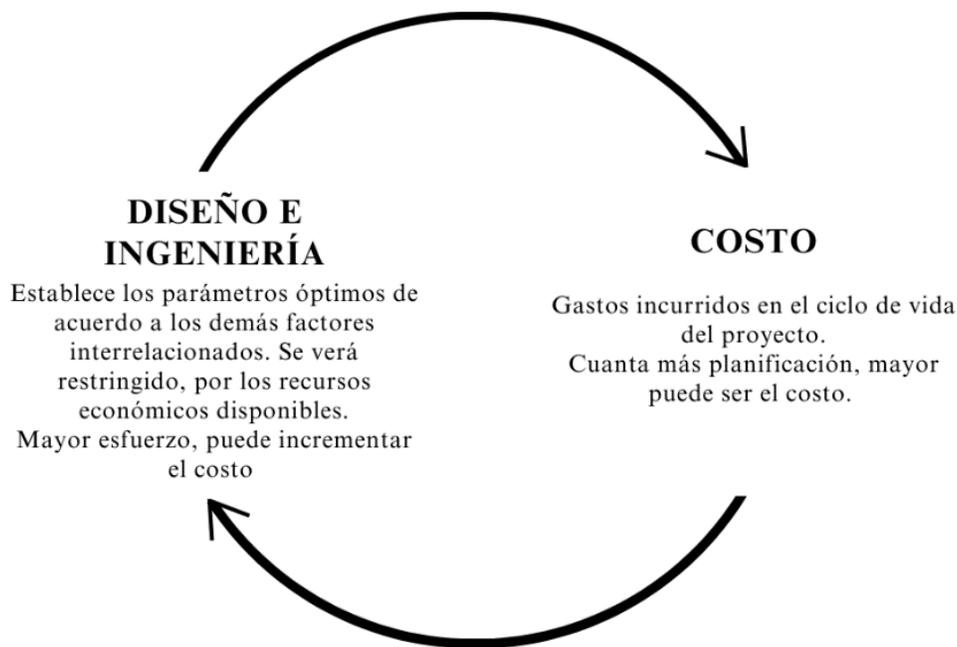


Nota: Elaboración propia.

Interrelación entre Diseño e Ingeniería y Costo. Debido al mayor esfuerzo en comparación a la ingeniería tradicional, el costo de diseño e ingeniería puede aumentar. Se verá restringido, por los recursos económicos disponibles. En cuanto menos recursos económicos, menos tecnología innovadora se añade (siempre cuidando que se cumplan los objetivos deseados) por lo que el diseño y la ingeniería se vuelven menos complejos.

Ilustración 1.4.9

Interrelación entre los factores de costo y tiempo de plantas modulares.

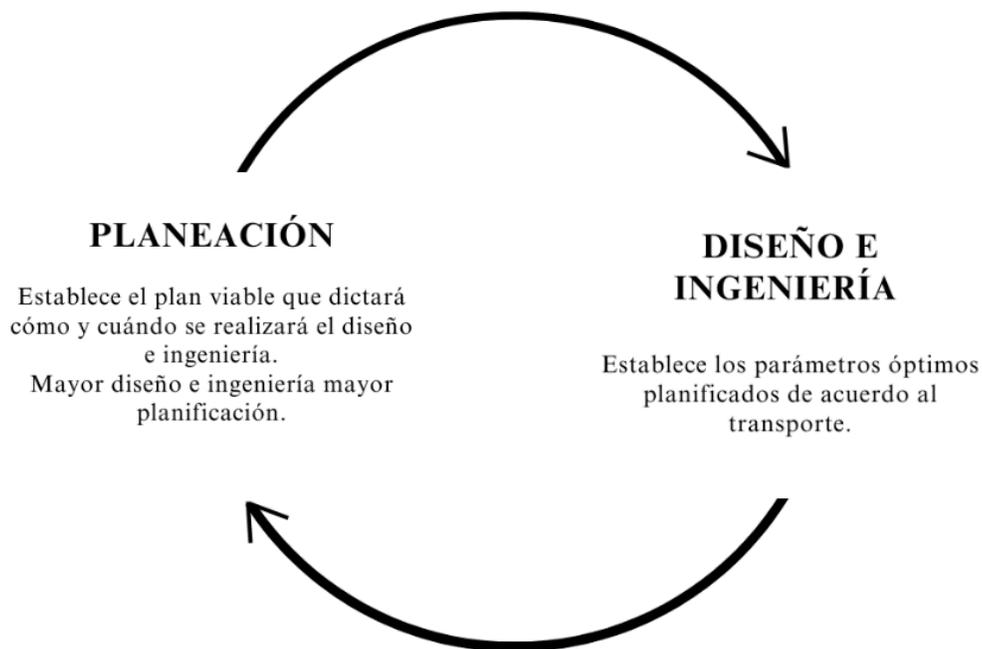


Nota: Elaboración propia.

Interrelación entre Planeación y Diseño e Ingeniería. El diseño e ingeniería de una planta modular requiere mayores esfuerzos que la ingeniería tradicional, debido a todos los factores interrelacionados que se ocupan para esto. Por lo tanto, la planeación del diseño e ingeniería será compleja.

Ilustración 1.4.10

Interrelación entre los factores de planeación y diseño e ingeniería.



Nota: Elaboración propia.

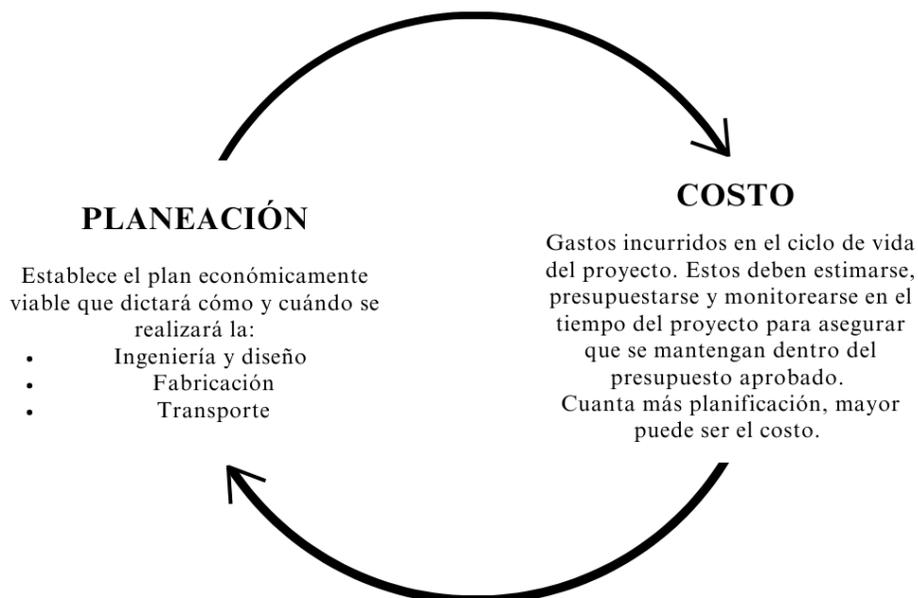
Interrelación entre Planeación y Costo. La ingeniería modular requiere mayor esfuerzo en la planeación de:

- Ingeniería y diseño
- Fabricación
- Transporte

Al necesitar una mayor planeación, puede llevar más costos que la ingeniería tradicional (ilustración 1.4.11).

Ilustración 1.4.11

Interrelación entre los factores de planeación y costos.



Nota: Elaboración propia.

Por lo tanto hablar de una planta modular es multidisciplinario y se requiere el correcto desarrollo del proyecto a realizar de cada fase y componentes que esta implica.

Capítulo 2. Fases y Componentes para el Desarrollo de una Planta Modular

El PMBOK define el proyecto como un esfuerzo temporal realizado para llevar a cabo un producto, un servicio o un resultado único, con el fin de resolver una necesidad (Project Management Institute, 2017). Un proyecto tiene un principio y un final definido, por lo que tiene un ciclo de vida. El ciclo de vida consta de varias fases, las cuales son:

- Planeación
- Ejecución
- Operación
- Cierre

Dichas etapas se pueden ver en el siguiente esquema (ilustración 2.1.1). Estas etapas normalmente se aplican a proyectos tradicionales, sin embargo, también se reflejan en los proyectos modulares. Este capítulo se explican las fases de un proyecto de una planta modular.

Ilustración 2.2.1

Fases de un proyecto.



Nota: Elaboración propia.

2.1 Planeación

La importancia de la planeación se mencionó en el capítulo anterior. La planeación debe ser ordenada, eficiente y fundamentada, utilizando metodologías que den forma y estructura a las actividades para lograr los objetivos deseados.

A finales de la década de 1970, se formó un grupo de empresas con el fin de investigar y analizar las causas de la disminución de la productividad en la industria de construcción en Estados Unidos y proponer soluciones para abordar esta deficiencia. Se demostró que la disminución de la productividad se debía a la falta de planeación, lo que conducía a sobre costos.

La empresa DuPoint, empresa química multinacional, propone el concepto Front-End Loading en 1987 y desde entonces se ha extendido a las industrias. Después de la evaluación comparativa realizada entre 1993 y 2003, la organización de ingeniería y consultoría de proyectos Independent Project Analysis (IPA) identificó la fase metodológica “FEL”. Desde ese momento, la industria ha desarrollado variantes de la metodología, según sus necesidades y cultura empresarial. En esta tesis se propone la planeación conceptual de una planta modular industrial química apoyada en la metodología FEL (Front-End Loading).

2.1.1 Metodología FEL (Front-End Loading)

La metodología FEL centra las acciones del proyecto y a los colaboradores en el desarrollo del proceso para su correcta ejecución. Aunque este proceso fue propuesto originalmente para la ingeniería tradicional, se puede aplicar a proyectos modulares implementando e interrelacionando los factores correspondientes (transporte, diseño, etc.).

A continuación, se exponen diversas definiciones de FEL proporcionadas por diferentes instituciones:

- “FEL es el proceso mediante el cual una empresa traduce su tecnología y oportunidades de mercado en proyectos de capital. El propósito de FEL es alinear las metas del proyecto con las necesidades del negocio y desarrollar el plan de ejecución más eficiente para alcanzar los objetivos del proyecto” (Paul Barshop, 2014).

- “Es un proceso por medio del cual se desarrolla suficiente información estratégica para que los propietarios del negocio identifiquen los riesgos, definan una estrategia para mitigarlos y con esto puedan comprometer recursos maximizando la probabilidad de que el proyecto sea exitoso” (Construction Industry Institute, 1995).

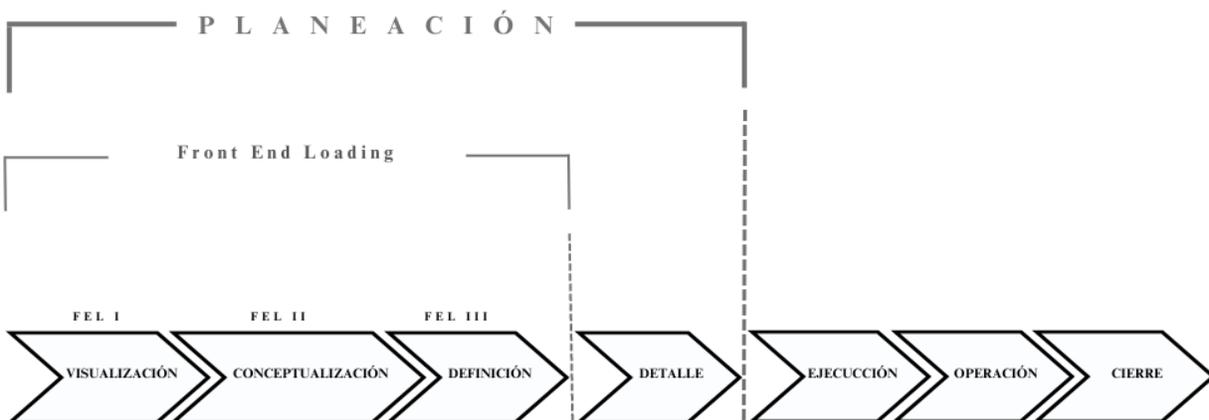
Por lo que FEL es el proceso que permite a una organización establecer el alcance de un proyecto, en este caso modular, de manera estructurada para conseguir los objetivos, minimizando las variaciones (producción, tiempo y costo), reduciendo así los riesgos asociados. Esta metodología se lleva a cabo por etapas y “compuertas” de aprobación, las cuales describen más adelante.

2.1.2 Etapas de la Metodología FEL

La metodología FEL establece 3 fases de planificación, llamadas FEL I, II y III, para una mayor comprensión se puede ver el siguiente esquema (ilustración 2.1.1).

Ilustración 2.1.1.

Etapas de un proyecto FEL



Nota: Elaboración propia.

Cada fase debe añadir información y generar entregables específicos que permitan definir mejor el alcance de dicho proyecto modular, reduciendo de esta forma los riesgos y obteniendo una mayor precisión de estimaciones de costos⁷ y plazos del proyecto. Cada fase debe estar debidamente planificada, aprobada y evaluada antes de que comience la siguiente; a este proceso de evaluación se le denomina “puertas de aprobación”. Dichas fases se explicarán a continuación:

⁷ El estimado de costos es el cálculo del estimado de inversión en un proyecto con base en la cantidad y calidad de la información disponible. Las clases de estimaciones, nivel de definición y rangos de precisión se presentan en la siguiente tabla (tabla 2.1.1)

Tabla 2.1.1

Clasificación de estimados de costos.

Clase de Estimado	Nivel de Definición de Proyecto (Expresado Como % De Definición Completa)	Rango de Precisión Esperado (Intervalos Típicos en Rangos Mínimos y Máximos)
Clase I	0 % a 2%	Mín: -20% a -50% Máx: +30% a +100%
Clase II	1% a 15%	Mín: -15% a -30% Máx: +20% a +50%
Clase III	10% a 40%	Mín: -10% a -20% Máx: +10% a +30%
Clase IV	30% a 70%	Mín: -5% a -15% Máx: +5% a +20%
Clase V	50% a 100%	Mín: -3% a -10% Máx: +3% a +15%

Nota: Adaptación de *Desarrollo de estimados de costos de un proyecto* (pág. 59) [Tabla], de Biggeri M. y Soledad A., Petrotecnia, 2018.

2.1.2.1 FEL I- Diseño Conceptual/ Visualización. El propósito de esta fase es determinar la viabilidad económica básica, en este caso del proyecto modular industrial, antes de emprender los gastos relacionados con la ingeniería y estudios, por lo que se analiza que las ideas y oportunidades del proyecto sean económicamente factibles. De manera que se debe de analizar los siguientes aspectos:

- *Objetivos:* Se establecen los objetivos deseados por el cliente, tales como la capacidad y el rendimiento de los productos.
- *Tiempos:* Se establece la duración en la que se quiere desarrollar el proyecto.
- *Localización:* Se analizan todos los aspectos relevantes, como el tipo de suelo, las condiciones climatológicas, la accesibilidad, la facilidad de servicios y la facilidad con que pueden embarcarse o recibirse los módulos o patines.
- *Especificaciones de alimentación:* Se especificarán los componentes de alimentación, la cual es un requisito importante para que se diseñe el proceso.
- *Proceso de operación:* Se proponen diferentes opciones de proceso, analizando las ventajas y desventajas de cada uno para escoger el más adecuado.
- *Servicios Auxiliares:* Se hará una estimación, así como las condiciones preliminares de los requerimientos de servicios auxiliares según el proceso.

En base a los puntos anteriores, se determina si es conveniente o no la modularización de la planta. Una vez decidido el tipo de proyecto (tradicional o modular), se elabora un plan de negocios inicial (o plan de beneficio social en caso de ser público) con una estrategia clara, robusta y defendible que aborde los siguientes aspectos para complementar los analizados anteriormente:

- *Lista de equipo:* Una vez que se determina la tecnología a utilizar, se enlistan los equipos preliminares.
- *Instalación:* Se realiza un análisis preliminar para la instalación y los elementos que requiere.
- *Normativa y regulación:* Se establecerá la normativa y regulación que regirán los diseños, los requisitos de espacio y las especificaciones técnicas.
- *Flexibilidad de la planta:* Se determina qué tan adaptable es la planta en caso de fallas de sistemas y procesos necesarios para continuar con la producción.
- *Estudios de transporte preliminares:* Se realizan estudios de transporte preliminar, donde se deben de analizar rutas, métodos, equipos y métodos de transporte, manejo y montaje.
- *Estimación de costos:* Se realiza una estimación de costos clase V.

2.1.2.2 FEL II- Diseño Básico/Conceptualización. Esta etapa consiste en la elaboración del diseño general de acuerdo a los conceptos propuestos previamente en el FEL I. Se tiene que diseñar el trabajo para transferir la mayor cantidad de mano de obra del sitio final al taller de fabricación. Aquí se determinan las características del módulo que utilizarán los métodos de construcción de la mejor manera y permitirán que estos se desempeñen de manera efectiva en la operación.

Durante esta etapa se realiza una evaluación estratégica actualizada del negocio y se genera la documentación básica del proyecto que define completamente el proceso (diagramas de flujo, balances de materia y energía, entre otros, los cuales se nombrarán más adelante). Además de un plan general que incluya la fase de desarrollo y la fase de ejecución.

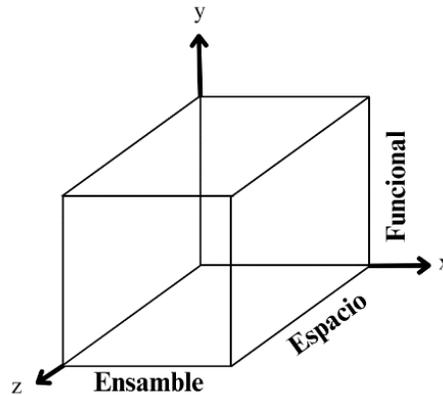
Para establecer las características del proceso que será utilizado en el diseño preliminar de las instalaciones, se deberá de considerar los siguientes aspectos:

- *Estudios de transporte:* Se realizan estudios de transporte, más detallados.
- *Proceso:* Las materias primas, los productos, catalizadores, servicios auxiliares y cargas eléctricas se definen cuantitativamente para el funcionamiento de las instalaciones. Proporcionando información sobre los flujos y las condiciones de operación de las corrientes involucradas y de los equipos que integran.
 - *Equipos de proceso:* Se diseñan en base al proceso y los estudios de transporte, los equipos de proceso, especificando sus características funcionales, geométricas, dimensiones, capacidad y materiales de construcción.
 - *Relación de espacio en los módulos:* Se establece la relación espacio entre los sistemas. Esto se debe en gran medida al diseño de los equipos, el espacio disponible y los estudios de transporte, que debe de estar entro de estos parámetros.

El módulo debe cuidar la función (para que el producto mantenga el propósito para el que fue desarrollado), ensamblaje (que los componentes puedan montarse entre sí) y el espacio (que se encuentre dentro del espacio permitido, según los estudios de transporte). La representación de estas 3 variables o relaciones del módulo se presenta gráficamente de forma tridimensional como en la siguiente figura (ilustración 2.1.2).

Ilustración 2.1.2

Variables del módulo.



Nota: Adaptado de *Metodología de diseño Conceptual Modular para la selección de variables modulares* (pág. 114) por Echevarria M., 1989.

- *Hidráulica:* Se seleccionan y dimensionan las líneas de interconexión, tuberías y accesorios requeridos para la operación.
- *Filosofía de operación:* Se establece el comportamiento operacional, de arranque y paro de las instalaciones de la planta.
- *Áreas:* Se determina el área requerida y la ubicación preliminar de los equipos en base al proceso y los estudios de transporte.
- *Estimación de costos:* Se realiza una estimación de costos clase IV.

2.1.2.3 FEL III- Diseño de Detalle/Definición. En esta fase se realiza la ingeniería básica extendida (FEED). El propósito del FEED es llevar el diseño a un nivel de definición suficiente del proyecto modular, por lo cual se realizan diversos procesos de agregación de valor en base a lo definido en el FEL II. Dicha fase garantiza que el proyecto tenga una estructura

correcta y se pueda realizar una estimación de costos con una mayor exactitud, clase III para el proceso de aprobación de financiamiento del propietario.

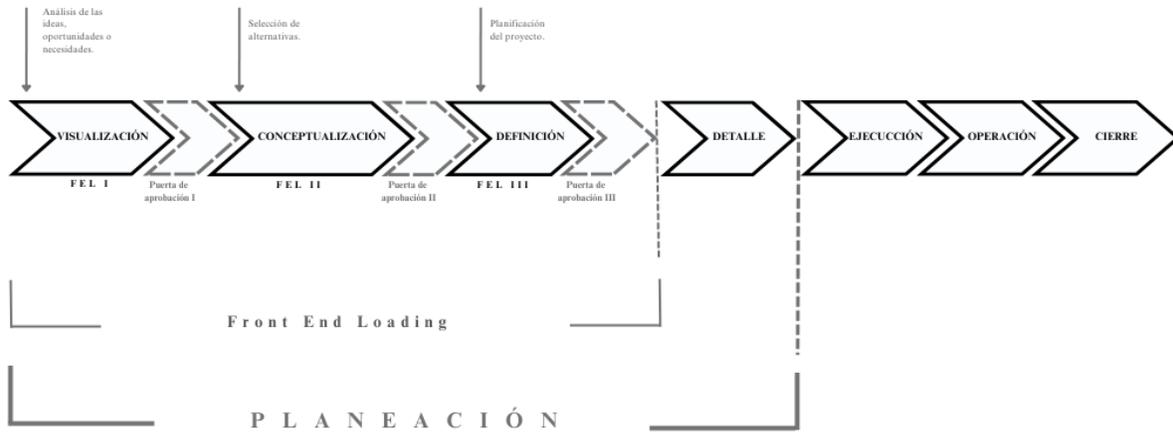
Por lo tanto, el diseño básico realizado en FEL II se actualiza, perfecciona y completa en la etapa actual. Sin embargo, sus alcances y entregables depende de cada firma de ingeniería. Los documentos más abordados son:

- *Diseño mecánico del equipo.*
- *Elementos de seguridad industrial.*
- *Sistemas de instrumentación y control.*
- *Trayectorias para señales de instrumentos.*
- *Sistemas de telecomunicación.*
- *Instalaciones eléctricas.*
- *Arreglos, trayectorias y especificaciones de tuberías.*
- *Sistemas de control de la corrosión.*
- *Planos civiles y arquitectónicos con la incorporación de información de fabricantes.*

A continuación, se presenta un esquema que representa la planeación desglosada por las etapas utilizando la metodología FEL (Ilustración 2.1.2).

Ilustración 2.1.2

Proceso de definición del alcance del proyecto de capital que cumple con los objetivos del negocio.



Nota: Elaboración propia.

2.1.2 Entregables Desarrollados por FEL

A continuación, una tabla que muestra los entregables por las fases FEL (tabla 2.1.2)

Tabla 2.1.2

Documentos elaborados por cada etapa FEL

Entregable	FEL I	FEL II	FEL III
Informe técnico de visualización	Si	No	No
Estimado de costos	Si	Si	Si
Bases de diseño de proceso	Si	Si	Si
Descripción del proceso	No	Si	Actualiza
Diagramas de flujo de proceso (DFP)	No	Si	Actualiza
Balance de materia y energía	No	Si	Si
Diagramas de tubería e instrumentación de proceso	No	Si	Si
Diagramas de tubería e instrumentación de servicios auxiliares	No	No	Si
Diagramas de tubería e instrumentación de desfogues	No	No	Si
Análisis de riesgo y operatividad del proceso (HazOp)	No	No	Si

Entregable	FEL I	FEL II	FEL III
Plano de localización general de equipo de proceso	No	Si	Si
Hoja de datos de equipo de proceso	No	Si	Si
Requerimientos de agentes químicos	No	Si	Actualiza
Requerimientos y especificaciones de catalizadores	No	Si	Actualiza
Lista de equipo de proceso y de servicios auxiliares	No	Si	Si
Perfil hidráulico de ductos	No	Si	Actualiza
Filosofía de operación	No	Si	No
Manual de operación	No	No	Si

Nota: Adaptación de *Alcances de Ingeniería* [Tabla], de CAI, Alcances de Ingeniería, Buenos Aires.

2.1.3 Ingeniería de Detalle

La ingeniería de detalle involucra la ejecución de tareas esenciales para completar un paquete de información técnica con todos los aspectos del proyecto de ingeniería, en este caso modular, con el fin de proporcionar un nivel de detalle suficiente para posibilitar su construcción. Las estimaciones económicas relacionadas con esta etapa sirven para verificar y precisar las consideraciones previamente efectuadas en el FEED. Los entregables de la ingeniería de detalle, adaptados a una planta modular, deben ser suficientes para:

- Definir los materiales, conjuntos prefabricados, y equipos.
- Definir los métodos constructivos, criterios de aceptabilidad, pruebas, ensayos, etc. de la planta modular.
- Definir todos los aspectos geométricos y dimensionales necesarios para la fabricación y montaje de equipos y módulos.
- Definir todos los requerimientos de ensayos y pruebas de los equipos, sistemas y módulos que componen la planta modular.

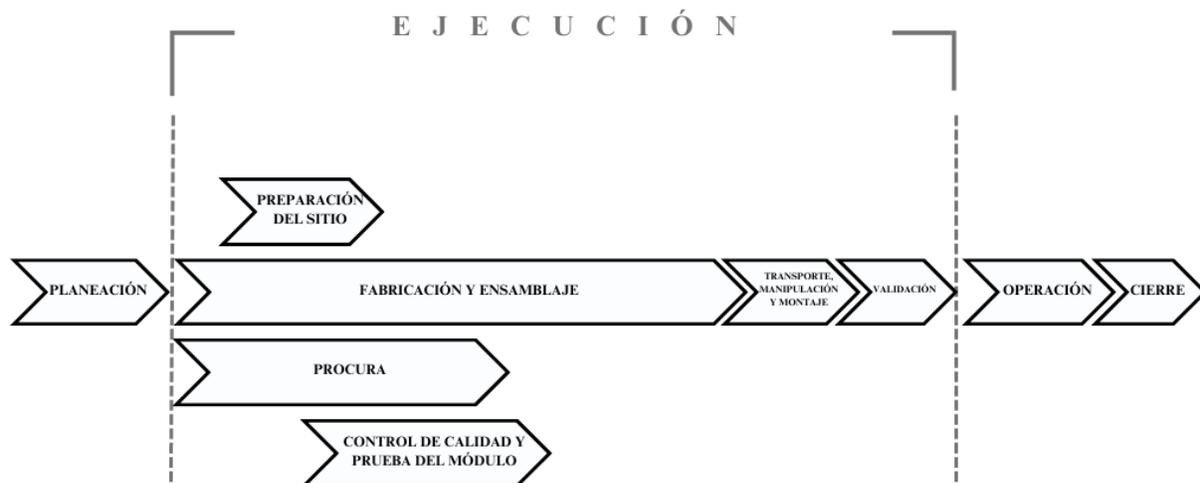
2.2 Ejecución

La fase de ejecución se enfoca en lograr objetivos establecidos y utiliza la información de la planeación. La ejecución consta de varias actividades:

- Procura.
- Fabricación y ensamblaje.
- Control de calidad y prueba de modulo.
- Transportación, manipulación y montaje.
- Validación.

Ilustración 2.1.3

Proceso de ejecución.



Nota: Elaboración propia.

2.2.1 Procura

La procura se realizará por el fabricante y el proveedor principalmente. Son todos aquellos procesos necesarios para adquirir bienes y servicios que cumplan con los objetivos del proyecto, así como entregarlos en la cantidad, tiempo y calidad requeridos.

Las prácticas de procura requieren procesos interactivos de planificación, toma de decisiones y control para garantizar la entrega de materiales y servicios para hacer avanzar el trabajo. Estos procesos se detallan en el PMBook, los cuales están diseñados para proyectos tradicionales, sin embargo, se pueden adaptar a un proyecto modular con las respectivas modificaciones.

2.2.2 Fabricación y Ensamblaje

Las actividades de fabricación en las plantas modulares son más complejas que una planta tradicional, debido a las mayores especificaciones que deben cumplir. Bass (1982) identifica específicamente los pasos en la fabricación de un módulo industrial (es decir, módulos de planta industrial química/de proceso) (De La Torre, Sause, Slaughter, & Hendricks, 1994):

1. Instalación de equipos principales en la base del patín.
2. Fabricación de la súper estructura del módulo.
3. Instalación del equipo restante.
4. Instalación de la carcasa del módulo (en caso de ser necesario).
5. Instalación de la instrumentación del módulo.
6. Prueba y puesta en marcha del módulo.

2.2.3 Control de Calidad y Prueba del Módulo

Un ambiente controlado dentro del taller asegura que las actividades de fabricación y ensamblaje entreguen módulos que cumplan con altos estándares de calidad. El control de calidad se hace a medida que se ensamblan los patines y los módulos en el taller.

Las pruebas en el taller son beneficiosas porque los errores de fabricación y ensamblaje se pueden identificar y corregir antes de que el módulo salga del taller. Una vez que los módulos defectuosos salen del taller, las correcciones en el sitio pueden tener un impacto significativo en el cronograma y costos del proyecto, especialmente si el sitio de construcción es remoto (Stubbs et al, 1990). Las conexiones de estructuras de módulos múltiples, así como las conexiones para tuberías, equipo y elementos estructurales, también se prueban en el taller de fabricación para garantizar una alineación adecuada en el sitio.

2.2.4 Transporte, Manipulación y Montaje

Las actividades de transporte, manipulación y montaje juegan un papel importante en los proyectos modulares. Sin embargo, la mayor parte de este ya se planeó al principio del proyecto (como se describe en la sección 1.4.6) solo es corroborar que las circunstancias sean iguales y poner en práctica dicho plan.

El sitio debe estar listo para aceptar el módulo en el momento de la entrega. Al igual que el equipo de manipulación debe estar preparado para descargar el módulo y colocarlo en su posición final.

Además del movimiento real de los módulos, las actividades de transporte, manipulación y ensamblaje implican generalmente la conexión de módulos y equipos.

Se requieren pruebas adicionales si el módulo se somete a altas perturbaciones durante el transporte. Y estas pueden ocurrir debido a:

- Las olas de barcazas, barcos o embarcaciones, si se transportan por agua.
- El terreno accidentado, si se transporta por tierra.
- Uso de equipo de transporte y manejo inadecuado.

Una vez erigido en su posición final, los módulos se quedan conectados. La conexión de los módulos y el equipo suele ser un proceso eficiente, debido al control de calidad y pruebas del módulo (De La Torre, Sause, Slaughter, & Hendricks, 1994).

2.2.5 Validación

Los módulos ensamblados deben pasar por un proceso de identificación o marcado para garantizar una conectividad eficiente de módulo a módulo en el campo. El trabajo exitoso realizado anteriormente, da como resultado una validación exitosa.

2.3 Operación

Esta es la penúltima fase del proyecto industrial y sigue los pasos ya establecidos en la planeación (manual de operación). En esta etapa se realiza el arranque de la planta. Algunas firmas de ingeniería realizan esta etapa o simplemente pasan a la siguiente etapa “cierre”.

2.4 Cierre

Una vez finalizadas las primeras cuatro fases, se entregará y finalizará el proyecto. Después de la entrega, se realizan inspecciones, controles de seguimiento y se brinda soporte técnico hasta que se cumplan todas las condiciones especificadas originalmente.

Capítulo 3. Normativas y Estándares que las Plantas Modulares Industriales Químicas

Competen

Los proyectos deben sujetarse a normas y adherirse a estándares como parte del proceso. Aunque aún no se han establecido regulaciones y pautas específicas para el diseño y la construcción de las plantas modulares, existen normativas que se aplican tanto para instalaciones convencionales como a las modulares. En el contexto de las plantas modulares, es de suma importancia asegurar que las condiciones de seguridad, mantenimiento y accesibilidad en la operación normal sean iguales o incluso mejores a las de las plantas construidas de manera tradicional. Dado que generalmente, en la mayoría de las plantas modulares, el espacio suele ser limitado, como se ha analizado previamente.

Las normas difieren de un país a otro. La presente sección se centra en la implementación de normas y estándares, específicamente en México, que deben de aplicarse de manera obligatoria en el contexto de las plantas tipo modulares.

3.1 Jerarquía de Leyes en México

El artículo 133 de la Constitución define la jerarquía de leyes y establece que la Ley Suprema de la Nación es la Constitución, las leyes que de ella emanan se denominan leyes reglamentarias y los tratados internacionales. Estas leyes deben de ser consideradas para todo tipo de proyectos. Se llevó a cabo una revisión de carácter general con el fin de identificar qué normativa cobra mayor relevancia en el contexto de una planta tipo modular.

En pocas palabras, la Suprema Corte en su interpretación ha adoptado tres niveles en la jerarquía normativa:

1. La Constitución
2. Los tratados
3. Las leyes federales y locales.

Desarrollando esta jerarquía, obtenemos el siguiente diagrama (ilustración 3.1.1) y una breve descripción.

Ilustración 3.1.1

Jerarquía convencional de los tratados internacionales en México.



Nota: Adaptado de *Jerarquía de las Leyes en México*, por EBC Academia, (<https://n9.cl/zw689>)

En consecuencia, resulta de vital importancia identificar las normas que deben ser aplicadas en un proyecto de tipo modular. Este proceso determinará el nivel de priorización que se asignará, como se ha discutido previamente. Además, es esencial garantizar que no se violen las normas de mayor prioridad en el proceso.

3.2 Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017 Sobre el Peso y Dimensiones Máximas con los que Pueden Circular los Vehículos de Autotransporte que Transitan en las Vías Generales de Comunicación de Jurisdicción Federal

La Norma Oficial Mexicana “NOM-012-SCT-2-2017 Sobre el Peso y Dimensiones Máximas con los que Pueden Circular los Vehículos de Autotransporte que Transitan en las Vías Generales de Comunicación de Jurisdicción Federal” fue establecida por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), publicada en el Diario Oficial de la Federación el 26 de diciembre del 2017 y entró en vigor 60 días después de su publicación.

Como ya se ha mencionado, en los estudios de transporte se consideran los pesos, dimensiones máximas y las restricciones que un módulo/patín puede tener, en función del tipo de transporte, en este caso vehículos de autotransporte. Estos lineamientos se encuentran contenidos en la NOM-012-SCT-2-2017, cuyo objetivo es garantizar la seguridad del tránsito al permitir que vehículos que, por su peso y dimensiones, no representan un riesgo para los demás usuarios de las carreteras, ni para las propias vías y puentes de jurisdicción federal.

3.2.1 Clasificación de Vehículos

En el apartado 5 se definen las clases de vehículos homologados según esta norma, cada uno de los cuales recibe una nomenclatura según la siguiente tabla (tabla 3.2.1). Esta tesis solo se enfocará en vehículos de autotransporte capaces de transportar módulos o patines, siendo estos: camión unitario, tractocamión, convertidor, camión remolque, tractocamión articulado y tractocamión doblemente articulado.

Tabla 3.2.1

Nomenclatura de los vehículos según la NOM-012-SCT-2-2017

Clase: Vehículo	Nomenclatura
Autobús	B
Camión Unitario	C
Tractocamión	T
Convertidor	D
Camión Remolque	C-R
Tractocamión articulado	T-S
Tractocamión doblemente articulado	T-S-R Y T-S-S

Nota: Adaptada de *Clase: Vehículo O Configuración. Nomenclatura*. [Tabla], por NORMA Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017, (https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=668546&fecha=04/06/2004#gsc.tab=0)

El mismo apartado menciona las diferentes constituciones de los vehículos de autotransporte. Cada vehículo tiene un número determinado de ejes y llantas, que dependen de las necesidades y condiciones de uso, las cuales no son discutidas en este trabajo. A continuación, se presenta una tabla, la cual indica el número de ejes y llantas de acuerdo a la nomenclatura del vehículo (tabla 3.2.2).

Tabla 3.2.2

Nomenclatura de los vehículos según la NOM-012-SCT-2-2017.

Camión Unitario (C)			
Nomenclatura	No. de Ejes	No. de Llantas	Vehículo
C2	2	6	
C3	3	8-10	

Camión-Remolque (C-R)			
C2-R2	4	14	
C3-C2	5	18	
C2-R3	5	18	
C3-R3	6	22	

Tractocamión Articulado (T-S)			
T2-S1	3	10	
T2-S2	4	14	
T2-S3	5	18	
T3-S1	4	14	
T3-S2	5	18	
T2-S3	6	22	

Nota: Adaptada de *Atendiendo a su clase, nomenclatura, número de ejes y llantas*. [Tabla], por NORMA Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017, (https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=668546&fecha=04/06/2004#gsc.tab=0)

3.2.2 Clasificación de Carreteras en México

Con el fin de aclarar el entendimiento de esta norma, también se hace referencia a la “Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-034-SCT2-2003, Señalamiento horizontal y vertical de carreteras y vialidades urbanas”, la cual da una clasificación de los tipos de carreteras para México, asociándolos a una nomenclatura (tabla 3.2.3). Esta clasificación se establece de acuerdo a las características de construcción de las carreteras lo cual posibilitará o impedirá la circulación de ciertos tipos de vehículos.

Tabla 3.2.3

Clasificación de carreteras por sus secciones transversales.

Nomenclatura	Tipo de Carretera
ET4	Carretera de 4 carriles, Eje de Transporte ⁸ .
ET2	Carretera de 2 carriles, Eje de Transporte.
A4	Carretera de 4 carriles.
A2	Carretera de 2 carriles.
B4	Carretera de 4 carriles, Red primaria ⁹ .
B2	Carretera de 2 carriles, Red primaria.
C	Carretera de 2 carriles, Red secundaria.
D	Carretera de 2 carriles, Red alimentadora ¹⁰ .

Nota: Adaptada de *Clasificación de carreteras por sus secciones transversales*. [Tabla], de NORMA Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017, (https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=668546&fecha=04/06/2004#gsc.tab=0)

3.2.3 Especificaciones de Peso

El apartado 6.1 de dicha norma, se aborda a la especificación de peso de los vehículos de auto transporte, lo cual debe interpretarse como el peso bruto vehicular máximo autorizado por tipo de eje y camino. En otras palabras, la suma del peso del vehículo y del módulo/patín se ve como un total denominado peso bruto vehicular, que no deberá exceder ciertos pesos, ya que no todas las carreteras se pueden transitar con carga pesada. Para una comprensión más amplia, esto se puede apreciar en la siguiente tabla (tabla 3.2.4).

⁸ El eje de transporte es la conexión de diferentes lugares o ciudades, cuyas actividades aportan al país.

⁹ La red primaria es una vía troncal y transversal que conecta las principales zonas de producción y consumo, conecta las fronteras con los puertos de comercio internacional para ayudar al desarrollo económico del país.

¹⁰ La red alimentadora es la vía por la que se transitan un promedio de hasta 500 vehículos al día para conectar ciudades medianas y acceder a corredores de carreteras.

Tabla 3.2.4

Clasificación de Vehículos por Número de Ejes, Número de Llantas y Peso Bruto.

Vehículo o Configuración Vehicular	Número de Ejes	Número de Llantas	Peso Bruto Vehicular (T)			
			Según la Clasificación de Carreteras			
			ET y A	B	C	D
C2	2	6	19.0	16.5	14.5	13.0
C3	3	8	24.0	19.0	17.0	16.0
C3	3	10	27.5	23.0	20.0	18.5
C2-R2	4	14	37.5	35.5	NA	NA
C3-R2	5	18	44.5	42.0	NA	NA
C3-R3	6	22	51.5	47.5	NA	NA
C2-R3	5	18	44.5	41.0	NA	NA
T2-S1	3	10	30.0	26.0	22.5	NA
T2-S2	4	14	38.0	31.5	28.0	NA
T3-S2	5	18	46.5	38.0	33.5	NA
T3-S3	6	22	54.0	45.5	40.0	NA
T2-S3	5	18	45.5	39.0	34.5	NA
T3-S1	4	14	38.5	32.5	28.0	NA
T2-S1-R2	5	18	47.5	NA	NA	NA
T2-S1-R3	6	22	54.5	NA	NA	NA
T2-S2-R2	6	22	54.5	NA	NA	NA
T3-S1-R2	6	22	54.5	NA	NA	NA
T3-S1-R3	7	26	60.5	NA	NA	NA
T3-S2-R2	7	26	60.5	NA	NA	NA
T3-S2-R4	9	34	66.5	NA	NA	NA
T3-S2-R3	8	30	63.0	NA	NA	NA
T3-S3-S2	8	30	60.0	NA	NA	NA
T2-S2-S2	6	22	51.5	NA	NA	NA
T3-S2-S2	7	26	58.5	NA	NA	NA

Nota: NA=No Aplica

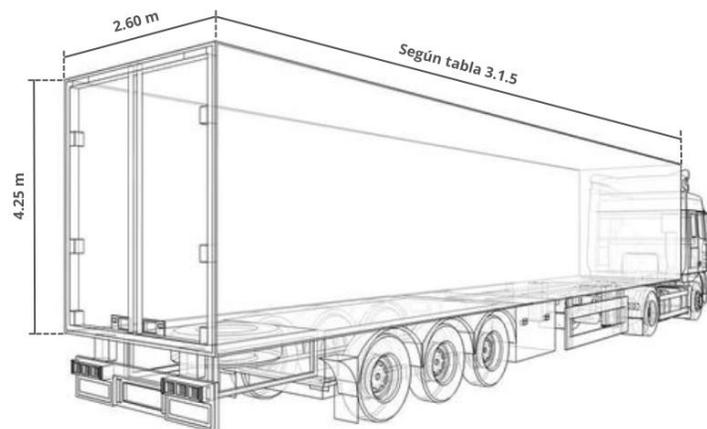
Tabla adaptada de *Clasificación de carreteras por sus secciones transversales*. [Tabla], de NORMA Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017, (https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5508944&fecha=26/12/2017#gsc.tab=0)

3.2.4 Especificaciones de Dimensiones

El apartado 6.2 establecerá los tamaños máximos que puede tener en el módulo/patín. El ancho máximo permitido para todas las clases de vehículos que transitan en los diferentes tipos de caminos, es de 2.60 m, excluyendo espejos retrovisores, que podrán sobresalir hasta 20 cm a cada lado, y los elementos para la protección de la carga lateral (lonas, cortinas, cinchos y cadenas), pueden sobresalir hasta 8 cm de cada lado. La altura máxima autorizada para todas las clases de vehículos que transitan en los diferentes tipos de caminos, será de 4.25 m. Para tener una ayuda visual de dichos parámetros, se puede ver en la siguiente imagen (ilustración 3.2.4).

Ilustración 3.2.4

Dimensiones máximas para toda clase de vehículo.



Nota: Adaptada *Fotos De Camión Grande Con Semirremolque. Plantilla Para Colocar Gráficos. Renderizado 3d.*

[Representación], de de, Depositphotos, (<https://mx.depositphotos.com/stock-photos/caja-trailer.html>)

El largo total máximo autorizado para camión unitario (C), las configuraciones camión remolque (CR), la configuración tractocamión articulado (TS), según el tipo de camino por el que transitan, se indica en la tabla a continuación (tabla 3.2.5).

Tabla 3.2.5

Largo Máximo Autorizado por Clase de Vehículo y Camino.

Vehículo o Configuración Vehicular	Número de Ejes	Número de Llantas	Largo Total (M)			
			Según la Clasificación de Carreteras			
			ET y A	B	C	D
C2	2	6	14.0	14.0	14.0	12.5
C3	3	8	14.0	14.0	14.0	12.5
C3	3	10	14.0	14.0	14.0	12.5
C2-R2	4	14	31.0	28.5	NA	NA
C3-R2	5	18	31.0	28.5	NA	NA
C3-R3	6	22	31.0	28.5	NA	NA
C2-R3	5	18	31.0	28.5	NA	NA
T2-S1	3	10	23.0	20.8	18.5	NA
T2-S2	4	14	23.0	20.8	18.5	NA
T2-S3	5	18	23.0	20.0	18.0	NA
T3-S1	4	14	23.0	20.0	18.0	NA
T3-S2	5	18	23.0	20.8	18.5	NA
T3-S3	6	22	23.0	20.8	18.5	NA
T2-S1-R2	5	18	31.0	NA	NA	NA
T2-S1-R3	6	22	31.0	NA	NA	NA
T2-S2-R2	6	22	31.0	NA	NA	NA
T3-S1-R2	6	22	31.0	NA	NA	NA
T3-S1-R3	7	22	31.0	NA	NA	NA
T3-S2-R2	7	26	31.0	NA	NA	NA
T3-S2-R4	9	34	31.0	NA	NA	NA
T3-S2-R3	8	30	31.0	NA	NA	NA
T3-S3-S2	8	30	25.0	NA	NA	NA
T2-S2-S2	6	22	31.0	NA	NA	NA
T3-S2-S2	7	26	31.0	NA	NA	NA

Nota: NA-No Autorizado

Tabla adaptada de *Largo Máximo Autorizado por Clase de Vehículo y Camino*. [Tabla], de NORMA Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017, (https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5508944&fecha=26/12/2017#gsc.tab=0)

Cuando la longitud del semirremolque sea mayor que 14.63 m (48 ft) en las configuraciones vehiculares a que se refiere la tabla, se deberán cumplir con disposiciones adicionales de seguridad las cuales están indicadas en el documento original.

3.3 ISO 668: Contenedores de Carga de la Serie 1: Clasificación, Dimensiones y Capacidades.

El estándar “ISO 668. Contenedores de Carga de la Serie 1: Clasificación, Dimensiones y Capacidades” fue establecido por la Organización Internacional de Normalización (ISO), publicado en su misma página, el 17 de junio del 2016.

Como ya se ha mencionado, en los estudios de transporte se consideran los pesos, dimensiones máximas y las restricciones que un módulo/patín puede tener, en función del tipo de transporte, en este caso vehículos marítimos (denominados buques de carga según el acuerdo SOLAS¹¹). Estos medios de transporte normalmente usan contenedores como apoyo. Un contenedor es una caja de dimensiones definidas que se puede colocar en varios medios de transporte, ya sea lleno o vacío. Según el tamaño, un barco puede colocar varios contenedores. Los parámetros de dicha estandarización se encuentran en la presente ISO y su propósito es establecer sus dimensiones para que puedan cargarse, transportarse, almacenarse y descargarse fácilmente. Estos contenedores están destinados al tráfico intercontinental.

3.3.1 Tipos de Contenedores

Los contenedores generalmente están hechos de acero, pero también existen contenedores de aluminio y de contrachapado con fibra de vidrio. Este estándar clasifica los contenedores en

¹¹ El acuerdo SOLAS norma al más alto nivel las condiciones que deben reunir los buques para garantizar la seguridad de la vida humana en el mar y aumentar su seguridad, eficiencia y competitividad a nivel internacional.

base a las características externas y dimensiones, como se muestra en la siguiente tabla (tabla 3.3.1).

Tabla 3.3.1

Clasificación de contenedores según la ISO 668.

Contenedor	Descripción	Ilustración
Dry Van	Contenedor estándar ampliamente utilizado en el mundo. Se encuentra cerrado herméticamente y no cuenta con sistemas de refrigeración o ventilación.	
High Cube	Contenedores estándar, pero con un mayor tamaño. Se caracterizan por su gran altura (casi 3 metros).	
Reefer	Contenedores refrigerados, están diseñados para productos sensibles a la temperatura y pueden mantener una temperatura constante durante el viaje gracias a su termostato. Debido a su función, requieren una conexión continua (camión, barco, terminales...).	
Open Top	Estos contenedores no tienen techo. Son especialmente adecuados para cargas que exceden la altura del High Cube.	
Flat Rack	Similar al Open Top, estos se emplean para cargas que exceden las dimensiones estándar. En muchos casos, estos contenedores no tienen paredes laterales e incluso de las paredes frontal y posterior, quedando solo la base.	
Collapsible Flat Rack	Estos contenedores son idénticos a los Flat Rack, pero se diferencian por su capacidad para plegar los lados sobre la base.	

Nota: Elaboración propia.

Fotografías adaptadas de;

1: *Dry Van o Contenedor Seco*. [Representación], de VOLCA, (<https://volca.com/cuales-son-los-tipos-de-contenedores-y-para-que-sirve-cada-uno/>)

2: *Contenedor 40 Pies (HC) High Cube*. [Fotografía], de Master Container Mx, (<http://mastercontainermx.blogspot.com/2017/02/contenedor-40-pies-hc-high-cube.html>)

3: *¿Qué es un contenedor reefer?* [Fotografía], de Control de Inventarios, (<https://controlinventarios.wordpress.com/2020/11/09/que-es-un-contenedor-reefer/>)

4 *Medidas de un contenedor open top*. [Fotografía], de Maritima del Estrecho, (<https://maritima.com/open-top/>)

5: *Flat rack*. [Representación], de VOLCA, (<https://volca.com/cuales-son-los-tipos-de-contenedores-y-para-que-sirve-cada-uno/>)

6 *40' Flat Rack Container*. [Fotografía], de ICON, (<https://www.icon-container.de/en/container-finder/open-top-flat-rack-container-40-flat-rack>)

3.3.2 Dimensiones y Pesos Brutos Máximos de Contenedores

Las dimensiones que caracterizan a un contenedor son altura, anchura, longitud. El peso bruto máximo es el peso total autorizado del contenedor vacío (tara) más la carga (en este caso módulo o patín). El peso de tara varía según el material de fabricación del contenedor.

Los contenedores que se han enumerado son grandes según dicho documento. Existen otros contenedores estandarizados de menores dimensiones que no han sido considerados en esta tesis.

Tabla 3.3.2

Contenedores según su capacidad, ara, peso bruto, largo, ancho y alto.

Contenedor	20'	40'	20'	40'	20'	40'	20'	40'	20'	40'	20'	40'
	Capacidad (m ³)		Tara (kgs)		Peso bruto (kgs)		Largo (m)		Ancho (m)		Alto (m)	
Dry Van	32.60	67.70	28 180	28 750	2 300	3 750	5.90	12.03	2.35	2.35	2.39	2.39
High Cube	X	76.40	X	28 560	X	3 940	X	10.05	X	2.35	X	2.70
Reefer	24.30	48.50	22 000	25 980	3 400	4 500	5.03	10.05	2.23	2.23	2.17	2.17
Open Top	32.30	65.90	28 120	23 660	2 360	4 150	5.90	12.03	5.90	2.23	2.33	2.33
Flat Rack	21 Lts	X	27 610	X	2 845	X	5.91	X	2.10	X	2.10	X
Collapsible Flat Rack	21 Lts	X	27 610	X	2 845	X	5.91	X	2.10	X	2.10	X

Nota: Adaptada de *Dimensiones de los contenedores ISO*. [Tabla], Encaja Embalajes & Trading,

(<https://blog.cajaeco.com/contenedores-maritimos-iso/>)

3.4 Buenas Prácticas para el Lugar de Trabajo, Equipo y Diseño de Herramientas

Además de las dimensiones máximas del módulo establecidas por las normas o estándares de los transportes, también se debe de considerar el espaciamiento/distancia que

tendrán los equipos y accesorios dentro del módulo. Las plantas modulares tienen un espacio limitado, ya que módulos más grandes, se necesitan requerimientos más específicos (por ejemplo, logística) y son más costosos. Por tanto, no cumplen regularmente las distancias de los estándares convencionales.

En una planta química modular se debe analizar el espacio dentro del módulo ya que depende de la industria química los espaciamientos entre equipos, tuberías, válvulas, etc. La integridad del proceso y del operador debe estar garantizada en cualquier planta industrial.

Estas prácticas se revisaron con el fin de comprender la ubicación y espaciamientos que se tienen entre los equipos dentro de un módulo/patín. Este apartado está basado principalmente en el libro de “Ingeniería Industrial. Métodos, estándares y diseño de trabajo” por Benjamin W. Niebel y Andris Freivalds.

3.4.1 Principales lineamientos, según las buenas prácticas.

El lineamiento principal para el espaciamiento de equipos/accesorios en un módulo/patín es proporcionar operatividad, para esto se necesita:

- Accesibilidad
- Mantenimiento

Y en algunas ocasiones

- Ergonomía al operador

Se debe asegurar que cada módulo sea operable, por lo que debe contar con accesibilidad de espacio para que el operador ingrese, realice maniobras como parte de su trabajo y para el mantenimiento correspondiente. Además, en algunas ocasiones debe de contar con la ergonomía del operador (adecuados a él). Por lo tanto, al diseñar el lugar de trabajo es necesario

proporcionar el espacio necesario a los operadores de acuerdo al tamaño y estructura del cuerpo humano (antropometría), que varía de un país a otro.

A continuación, se presentan algunas fotografías con el fin de poder ver el espaciamiento de una planta modular (ilustración 3.4.1 y 3.4.2).

Ilustración 3.4.1

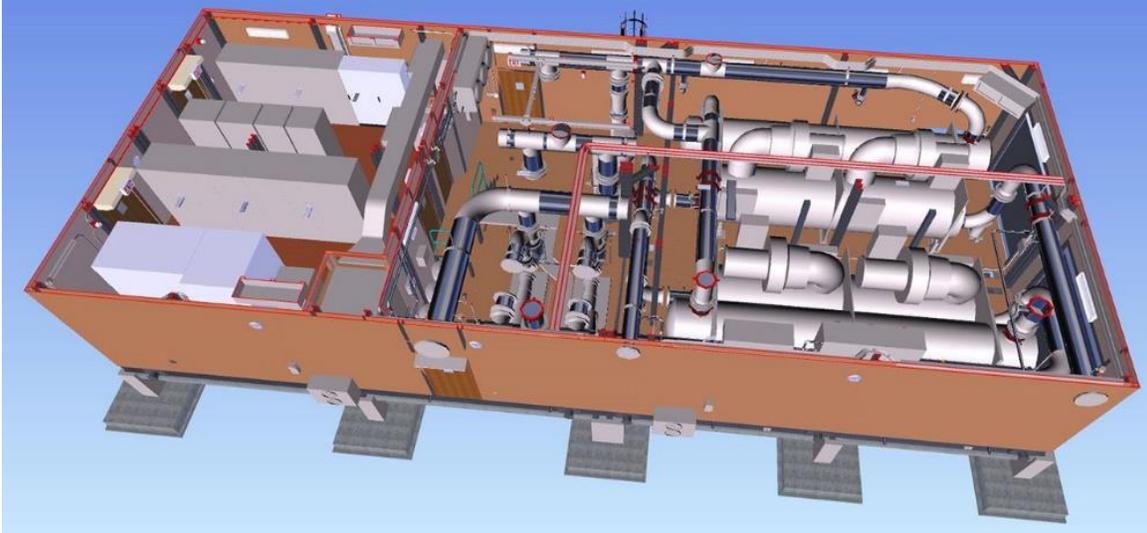
Planta final de tratamiento de aguas residuales KERN S&D.



Nota: Adaptada de *Plantas de producción de hipoclorito sódico in situ para desinfección contra el COVID-19*. [Fotografía], de Kerns&d. (https://kernsd.com/wp-content/uploads/2020/03/Covid-19-Desinfecci%C3%B3n-con-lej%C3%ADa_noticia-Web.pdf)

Ilustración 3.4.2

Planta final de tratamiento de aguas residuales KERN S&D.



Nota: Adaptado de *Improved Efficiency*. [Representación], de Daikin, (https://www.daikinlebanon.com/en_us/product-group/dmea-modular-central-plant.html)

Capítulo 4. Aplicaciones de la Ingeniería Modular en la Industria Química

4.1 Planta de Generación de Gas Natural Licuado

El proyecto YAMAL LNG ha sido nombrado por Technip Energies¹² como el mayor proyecto de modularización de la historia. Este proyecto fue realizado por Novatek y diversas

¹² Technip Energies es una empresa de ingeniería que ejecuta proyectos complejos y de gran escala en todo el mundo para apoyar la transición energética global.

compañías¹³. Consistió en la construcción de una planta de gas natural licuado (liquefied natural gas, LNG), utilizando el campo South Tambey como base de recursos en un área donde el duro ambiente del Ártico ha dejado grandes reservas de gas sin explotar (Technip Energies, 2021).

Capacidad de producción: Alrededor de 16.5 millones de toneladas por año.

Ubicación: Norte de Siberia, Rusia.

Talleres de fabricación de módulos: China e Indonesia.

Transporte: Se transportaron más del 60% de los módulos a través del Estrecho de Bering (ilustración 4.1.1 y 4.1.2).

Ilustración 4.4.1

Transporte de módulo de planta de generación de gas natural licuado Novatek.

¹³ Proyecto también llevado a cabo por TotalEnergies, CNPC y SRF: Empresas dedicadas al sector petroquímico.



Nota: Adaptada de *AUDAX leaves Zeebrugge for its next shipment to the Yamal LNG site in Sabetta*. [Fotografía]. de LNG Industry, (<https://www.lngindustry.com/liquid-natural-gas/01032017/audax-leaves-zeebrugge-for-its-next-shipment-to-the-yamal-lng-site-in-sabetta/>)

Ilustración 4.1.2

Transporte de módulo de planta de generación de gas natural licuado por Novatek en conjunto con otras empresas.



Nota: Adaptada de *Tehnologies*. [Fotografía], de Technip Energies, (<https://www.technipenergies.com/sites/energies/files/2021-04/Yamal%20LNG%20project.pdf>)

Inaugurada: 2017.

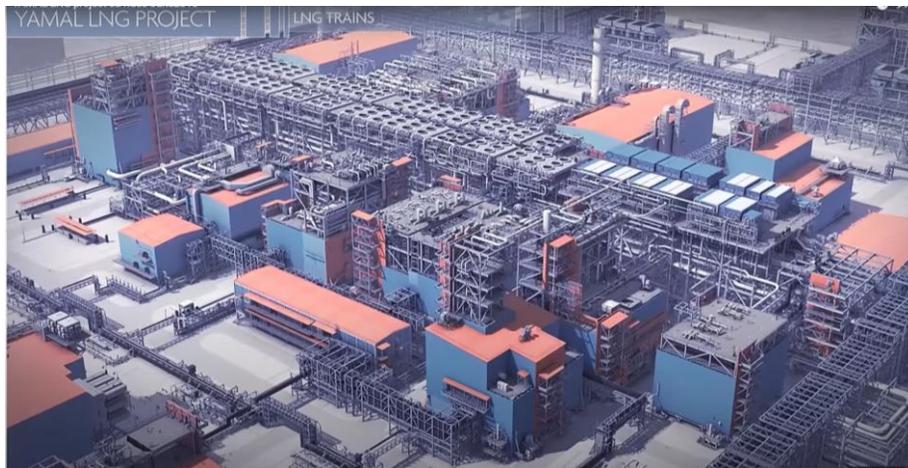
Cronograma: Primeros módulos entregados 18 meses después de firmado el contrato.

Figuras claves:

- 142 módulos, algunos con un peso de más de 6500 toneladas. La imagen muestra parte de los módulos. (ilustración 4.1.3).
- 360 racks de tuberías preensablados en el sitio. La imagen muestra parte de los racks de tuberías. (ilustración 4.1.3).
- 75000 personas involucradas.
- 10 patíos de fabricación en China e Indonesia.
- 20 embarcaciones de transporte pesado.
- 1600 supervisores en patios en su punto máximo.

Ilustración 4.1.3

Planta modular de generación de gas natural licuado por Novatek.



Nota: Adaptada de *YAMAL LNG Project 3Dvide June2016*. [Video], de ONBTAMER.

(<https://www.youtube.com/watch?v=hnmt3Pjh2MA>)

4.1.1 Planta Final de Generación de Gas Natural Licuado de Novatek

A continuación, se muestra la planta de generación de gas natural licuado de Novatek.

Ilustración 4.1.4

Planta modular final de generación de gas natural licuado por Novatek en conjunto con otras empresas.



Nota: Adaptada de *Technologies*. [Fotografía], de TECHNIP ENERGIES

(<https://www.technipenergies.com/en/case-studies/yamal-lng>)

4.2 Planta de Generación de Bio-Oil Dynamotive Inc

La compañía Dynamotive Inc.¹⁴ abordó un proyecto para el desarrollo de una planta para producir bioaceite comercializado como "BioOil Plus", que es una alternativa competitiva al combustible para calefacción, el fuel oil, el gas natural y el propano.

Capacidad de producción: 4380 toneladas por año.

Ubicación: Canadá.

Montaje: Grúas con sobredimensionamiento, como se puede ver en las imágenes (ilustración 4.2.1).

¹⁴ Dynamotive Inc. es una empresa de sistemas de energía enfocada en el desarrollo de soluciones energéticas basadas en su sistema patentado de pirólisis rápida, un proceso que crea un producto llamado bioaceite.

Ilustración 4.2.1 Montaje de módulos de planta de generación de bio-oil por Dynamotie Inc.



Nota: Adaptada de *Guelph Ontario Plant*. [Fotografía], de Pirólisis Rápida de Biomasa para la Generación de Bio Oil, (pág. 4), por TECNA.

Ilustración 4.2.2

Montaje de módulos de planta de generación de bio-oil por Dynamotie Inc.



Nota: Adaptada de *Guelph Ontario Plant*. [Fotografía], de Pirólisis Rápida de Biomasa para la Generación de Bio Oil, (pág. 4), por TECNA.

Ilustración 3.2.3

Montaje de módulos de planta de generación de bio-oil por Dynamotie Inc.



Nota: Adaptada de *Guelph Ontario Plant*. [Fotografía], de Pirólisis Rápida de Biomasa para la Generación de Bio Oil, (pág. 4), por TECNA.

Inaugurada: 2006.

Figuras claves:

- 20 módulos.

4.2.1 Planta Final de Generación de Bio-Oil Guelph

A continuación, se muestra la planta de generación de bio-oil en Guelph por Dynamotive Inc.

Ilustración 4.2.4

Planta modular final de generación de bio-oil.



Nota: Adaptada de *Guelph Ontario Plant*. [Fotografía], de Pirólisis Rápida de Biomasa para la Generación de Bio Oil, (pág. 3), por TECNA.

Ilustración 4.2.5

Planta modular final de generación de bio-oil.



Nota: Adaptada de *Guelph Ontario Plant*. [Fotografía], de Pirólisis Rápida de Biomasa para la Generación de Bio Oil, (pág. 5), por TECNA.

4.3 Refinería Modular UOP

La compañía Honeywell UOP¹⁵ desarrolla y comercializa refinerías modulares. La refinería cuenta con diferentes plantas de igual manera modulares:

- Unidades De Destilación De Crudo (CDU): Destilación fraccionada del crudo para su posterior procesamiento.
- Plantas De Gas Saturado: Separación de componentes del gas de refinería.
- Hidrotratadores De Nafta (NHT): Eliminación de azufre aguas arriba¹⁶ de las unidades de proceso de nafta.
- Unidades De Isomerización: Reformado catalítico de nafta a componentes de mezcla de gasolina de alto octanaje y regeneración continua de catalizadores.
- Unidades De Procesamiento CCR Y Plataformas De Lecho Fijo: Reformado catalítico de nafta a componentes de mezcla de gasolina de alto octanaje y regeneración continua del catalizador.
- Unidades De Proceso Merox: Proceso catalítico para mejorar la calidad de las materias primas destiladas en el rango de ebullición para cumplir con las estrictas regulaciones de combustible.
- Hidrotratadores Destilados (DHT): Proceso catalítico para mejorar la calidad de las materias primas destiladas con rango de ebullición para cumplir con las estrictas regulaciones de combustible.

¹⁵ Honeywell UOP es una empresa multinacional estadounidense que desarrolla y suministra tecnología a las principales industrias de refinación de petróleo, procesamiento de gas, producción petroquímica y fabricación.

¹⁶ Aguas arriba, también conocido como “upstream” comprende las actividades de exploración, perforación y minería.

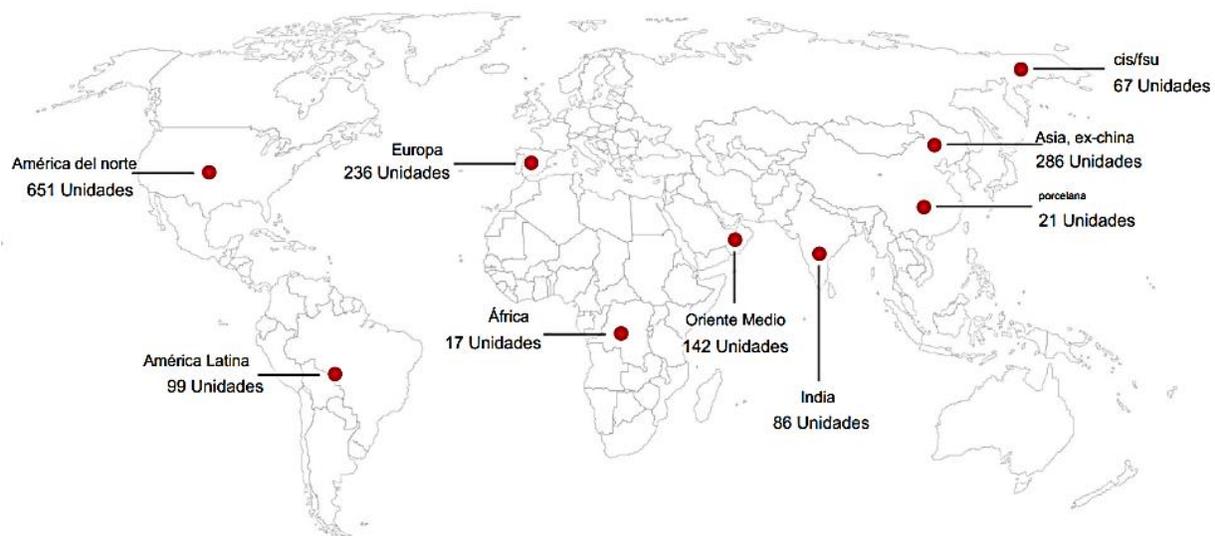
- Fuera De Los Límites De La Batería (OSBL): Sistemas auxiliares, fuera de los sitios y servicios públicos necesarios para respaldar el funcionamiento de las unidades de proceso principales.

Capacidad: La refinería en general procesa hasta 30 000 BPSD de crudo.

Ubicación: UOP se ha desarrollado alrededor del mundo, como se muestra en la siguiente imagen (ilustración 4.3.1)

Ilustración 4.3.1

Experiencia de UOP alrededor del mundo.



Nota: *UOP Global Modular Equipment Experience*. [Formato], de Honeywell UOP, (https://arda.africa/wp-content/uploads/2022/11/honeywell_uop_arda_week_2020.pdf)

Talleres de fabricación: En las siguientes imágenes se muestran como ejemplo la fabricación de un módulo de una planta endulzadora de combustible en el taller.

Ilustración 4.3.2

Módulo de planta de endulzamiento de combustible en taller de fabricación.



Nota: Adaptada de *Modular Solutions for Refiners*. [Fotografía], Honeywell UOP, (https://www.iapg.org.ar/congresos/2018/refinacion/presentaciones/2.%20Martes%2028/Sala%201/15.00/Amy%20Gavin-%20Honeywell%20Presentation_.pdf)

Ilustración 3.3.3

Módulo de planta de endulzamiento de combustible en taller de fabricación.



Nota: Adaptada de *Full check of a fuel sweetening plant*. [Fotografía], de Honeywell UOP, (https://www.iapg.org.ar/congresos/2018/refinacion/presentaciones/2.%20Martes%2028/Sala%201/15.00/Amy%20Gavin-%20Honeywell%20Presentation_.pdf)

Ilustración 4.3.4

Módulo de planta de endulzamiento de combustible en taller de fabricación.



Nota: Adaptada de *Module manufacturing process February 2017*. [Fotografía], de Honeywell UOP, (https://www.iapg.org.ar/congresos/2018/refinacion/presentaciones/2.%20Martes%2028/Sala%201/15.00/Amy%20Gavin-%20Honeywell%20Presentation_.pdf)

Transporte y montaje: Depende de la ubicación final de los proyectos, pero a continuación se presentan algunos de los medios de transporte utilizados en diferentes proyectos de refinería modular.

Ilustración 4.3.5

Transporte de módulos de una refinería UOP.



Nota: Adaptada de *Modular Refinery*. [Fotografía], de Honeywell UOP, (<https://uop.honeywell.com/en/equipment-and-aftermarket-services/modular-solutions/refining/modular-refinery>)

Ilustración 4.3.6

Montaje de módulos de una refinería UOP.



Nota: Adaptada de *CCR Regenerator Section*. [Fotografía], de Honeywell UOP, (<https://honeywell.scene7.com/is/image/honeywell/honeywell-uop-modular-solutions-refining-ccr-regenerator-section-hero-desktop>)

Ilustración 4.3.7

Montaje de módulos de refinería UOP.



Nota: Adaptada de *CCR Regenerator Section*. [Fotografía], de Honeywell UOP, (<https://uop.honeywell.com/en/equipment-and-aftermarket-services/modular-solutions/refining/ccr-regenerator>)

Ilustración 4.3.8

Transporte de módulos de refinería UOP.



Nota: Adaptada de *UOP Global Modular Equipment Experience*. [Formato], de Honeywell UOP, (https://arda.africa/wp-content/uploads/2022/11/honeywell_uop_arda_week_2020.pdf)

Ilustración 4.3.9

Transporte de módulos de refinería UOP.



Nota: Adaptada de *UOP Global Modular Equipment Experience*. [Fotografía], de Honeywell UOP, (https://arda.africa/wp-content/uploads/2022/11/honeywell_uop_arda_week_2020.pdf)

4.3.1 Refinería Final UOP

A continuación, se muestra la plantas o secciones finales de la refinería de Honeywell UOP.

Ilustración 4.3.10

Planta modular final de isomerización de nafta.



Nota: Adaptada de *Modular Naphtha Isomerization*. [Fotografía], de Honeywell UOP, (<https://uop.honeywell.com/en/equipment-and-aftermarket-services/modular-solutions/refining/isomerization>)

Ilustración 4.3.10

Planta de refinería de UOP.



Nota: Adaptada de *Modules Delivery and Installation at Site March-April 2017*. [Fotografía], de Honeywell UOP, (<https://uop.honeywell.com/en/equipment-and-aftermarket-services/modular-solutions/refining/isomerization>)

Ilustración 4.3.11

Planta de refinería de UOP.



Nota: Adaptada de *Case Study III*. [Fotografía], Honeywell UOP, (<https://uop.honeywell.com/en/equipment-and-aftermarket-services/modular-solutions/refining/isomerization>)

Discusión

El ámbito de la investigación se limitó al sector de la industria química. No obstante, en ciertos casos, los hallazgos de la investigación pueden tener aplicabilidad en otros ámbitos de los proyectos de infraestructura e ingeniería.

Se debe entender que la ingeniería modular es un método de diseño y fabricación de plantas industriales en módulos que proporcionan ventajas. Los módulos son pre-montajes de equipos, materiales y componentes que se fabrican e instalan en una ubicación externa, dentro de una estructura. No obstante, las plantas modulares también pueden presentar desventajas, por lo que se deberá de buscar la manera de enfrentarlas, viendo a estas como desafíos. Entre estas desventajas, se encuentra la posibilidad de experimentar una tasa de error baja, debido a la necesidad de precisión en las interconexiones. Para superar este desafío, es esencial llevar a cabo una planeación, diseño, fabricación y montaje de alta precisión. Otra desventaja es la complejidad del montaje, que se puede contrarrestar fabricando la menor cantidad de módulos posible para así ensamblar la menor cantidad ó ensamblar lo mayor posible en el taller.

Las dificultades de transporte complican la ejecución de un proyecto de una planta modular química. Hallar una solución resulta desafiante, ya que está depende de la ubicación final de la planta. Una posible solución es crear módulos más pequeños para facilitar el traslado, si bien esto conlleva un incremento en los costos de materiales y en el número de acoplamientos de módulos, se deberá de determinar un punto óptimo.

Se requiere un esfuerzo multidisciplinario para reconocer las ventajas de la ingeniería modular y eliminar o abordar las desventajas de manera eficaz. Existen factores que posibilitan la modularización de la planta, lo cuales están interconectados y son; planeación, transporte,

tiempo, costo e ingeniería y diseño. Se tiene cuidado para garantizar que estos factores estén equilibrados de acuerdo con los requisitos del proyecto.

A pesar de que este trabajo describe la planeación desde la metodología FEL, existen otras metodologías (por ejemplo, BIM) que se pueden emplearse en la ejecución de proyectos. No obstante, es crucial considerar las nuevas posibilidades tecnológicas que surgen y que los sistemas modulares en la industria química deben de adaptarse a ellas.

Una planta química totalmente modular debe plantearse desde el FEL I. Esto es diferente si la modularidad solo se aplica a algunas partes de la planta que se pueden definir en el FEL II. Por lo tanto, tener una visión clara desde el principio es clave en este tipo de proyectos. Sin embargo, esto es difícil de establecer ya que es una planta modular y se tiene poca información de manera pública, la cual se pueda tomar de referencia.

Se evidenció que los módulos no pueden transgredir ciertos parámetros previamente establecidos en las regulaciones y normativas. Como resultado, es necesario incorporar dichos parámetros, los cuales definen los valores máximos permitidos para los módulos; cualquier desviación de estos parámetros obstaculiza la ejecución de un proyecto modular.

En cada proyecto donde se aplicó la ingeniería modular, se desarrolló con un propósito determinado previamente, a pesar de sus condiciones fueran adversas. Un ejemplo de esto es la planta de producción de Novatek, la cual se construyó tipo modular debido a las condiciones climáticas, con el objetivo de aprovechar los recursos disponibles.

Conclusión

Tras completar esta tesis, se ha realizado una investigación exhaustiva y un análisis detallado, que ha permitido agrupar las consideraciones técnicas indispensables para posibilitar el diseño de una planta industrial química en módulos. Estos esfuerzos han resultado en la formulación de directrices y recomendaciones sólidas, fundamentales para la implementación exitosa en proyectos futuros. Es crucial destacar que un proyecto modular implica múltiples disciplinas, lo que conlleva tanto ventajas como desventajas.

En respuesta a la cuestión de “¿Por qué se debería implementar el diseño modular en la industria química?”, es importante reconocer que cada proyecto es único y requiere un análisis minucioso de sus condiciones específicas. Este análisis permite determinar si la modularización de la planta conlleva ventajas o presenta desventajas que deben abordarse para garantizar su viabilidad. A pesar de las desventajas o desafíos que la modularización puede imponer, es fundamental abordarlos de manera efectiva mediante una estructura sólida. Por lo que basado en la investigación es posible afirmar que el diseño modular en plantas industriales químicas ofrece ventajas significativas. La principal ventaja radica en la transferencia de trabajo del sitio al taller, trayendo con ello otros beneficios, tales como la reducción del tiempo del proyecto, la eficiencia, el trabajo colaborativo y el aumento de la productividad.

En cuanto a “¿Cuándo considerar la modularización de una planta industrial química?”, la implementación de la modularización en una planta industrial química debe considerarse cuando; los tiempos de entrega son reducidos, las condiciones climáticas son difíciles, los sitios son de difícil acceso, el personal del sitio es escaso, los costos de mano de obra son elevados o no se pueda competir en un proyecto con ingeniería tradicional. Aunque el análisis se basó desde el

punto de vista que toda la planta sea modular, es común aplicar la modularización solo en determinadas partes o secciones de la planta.

Las normativas y estándares serán exclusivas para cada proyecto, ya que en la actualidad el cliente proporciona las normas que se deben seguir. No obstante, las normas suministradas por el cliente deben ser evaluadas para determinar su posición en la jerarquía de normas, asegurando que no entren en conflicto con regulaciones de mayor relevancia. Asimismo, teniendo en cuenta que el transporte por carreteras es predominante en México, se deberá de cumplir obligatoriamente con la NOM-012-SCT-2-2017. En el caso de emplear transporte marítimo y contenedores, la ISO 608 también deberá de cumplir.

Desde una perspectiva conceptual, se han examinado las consideraciones técnicas de la ingeniería modular. Se sostiene que la modularidad en plantas industriales químicas es una solución que aumenta, la flexibilidad en el diseño y construcción de estas instalaciones. La implementación de una planta modular conlleva la posibilidad de aportar una serie de beneficios que abarcan tanto aspectos económicos como ambientales, y de manera indirecta, repercuten positivamente en la sociedad. En México, la ingeniería modular promete un potencial significativo en diversas áreas de la industria química, incluyendo sectores como farmacéutica, alimentaria y de energías renovables.

Referencias

- Altenergymag.com. (s.f.). *Alternative energy company directory*. Recuperado el Marzo de 2023, de Altenergymag.com: https://www.altenergymag.com/company_directory/dynamotive-energy-systems-corporation/111
- Alvarez, J. (18 de Abril de 2022). *Contenedores ISO-Actualización* . Obtenido de En caja embalajes & trading: <https://blog.cajaeco.com/contenedores-maritimos-iso/>
- Amorva. (Noviembre de 2020). *¿Qué es un contenedor reefer?* Recuperado el Mayo de 2023, de Control de inventarios: <https://controlinventarios.wordpress.com/2020/11/09/que-es-un-contenedor-reefer/>
- Armstrong, R. (17 de Abril de 1972). Better Ways to Build Process Plants. En *Chemical Engineering* (Vol. 79, págs. 86-94). Obtenido de Chemical Engineering.
- Asión Suñer, L. (2017). *Estudio de los métodos de diseño modular y sus aplicaciones*. Obtenido de https://zagan.unizar.es/record/63678/files/TAZ-TFM-2017-771_ANE.pdf
- Bieringer, T., Bramsiepe, C., Brand, S., B. A., Dreiser, C. D., Fleischer-Trebes, C., . . . Stenger, F. (2016). *Modular Plants. Flexible chemical production by modularization and standardization- status quo and future trends*. ProcessNet.
- Biggeri, Maitena;Dusek, Ana. (2018). Desarrollo de estimado de costos de un proyecto. *Petrotecnia*, 58-63.
- Carreiro, J. (1968). *The New Building Block: A Report on the Factory-Produced Dwelling Module*. New York: Cornell University, New York.
- Centro Argentino de Ingenieros Comisión de Empresas Proveedoras de Servicios de Ingeniería. (s.f.). *Alcances de ingeniería*. Recuperado el Marzo de 2023, de Centro Argentino de Ingenieros Comisión de Empresas Proveedoras de Servicios de Ingeniería:
-

https://www.cai.org.ar/wp-content/uploads/CEPSI/SC01-01-0-Alcances_de_Ingenieria.pdf

Construction Industry Institute. (1995). *Pre-Project Planning Handbook*. Publicación Especial 39-2.

Container, M. (2017 de 02). *Contenedor 40 Pies (HC) High Cube*. Recuperado el Mayo de 2023, de Master Container Mx: <http://mastercontainermx.blogspot.com/2017/02/contenedor-40-pies-hc-high-cube.html>

De la Peña, B., Aguayo, F., Lama, J., & Del Pozo, N. (2009). Design Of Modular Platforms; Application to a Product Family. *Selected Proceedings from the 13th International Congress on Project Engineering*.

De La Torre, M. L., Sause, R., Slaughter, S., & Hendricks, R. H. (1994). A Review and Analysis of Modular Construction Practices. . En *Theses and Dissertations*. Lehigh Preserve.

Depositphotos. (s.f.). *Caja Trailer*. Recuperado el Junio de 2023, de Depositphotos: <https://mx.depositphotos.com/stock-photos/caja-trailer.html>

EIA 21 Ingeniería de Soluciones. (13 de Abril de 2022). *Ingeniería básica*. Recuperado el Marzo de 2023, de EIA 21 Ingeniería de Soluciones: <https://www.eia21.com/lineas-de-negocio/ingenieria/basica/#:~:text=La%20Ingenier%C3%ADa%20B%C3%A1sica%20es%20el,las%20%C3%ADneas%20b%C3%A1sicas%20del%20proyecto.>

Engineering, Chermical. (1 de Enero de 2016). *Is a modular right for your proyect?* Recuperado el 12 de 2022, de Chermical Engineering: <https://www.chemengonline.com/modular-right-project/>

Facultad de Ingeniería Industrial. (3 de Octubre de 2019). *Definición, Campo de Aplicación y Clasificación de las Operaciones Unitarias*. Recuperado el 2023, de Operaciones

unitarias: <https://operaciones8octavo.wordpress.com/definicion-campo-de-aplicacion-y-clasificacion-de-las-operaciones-unitarias/>

Garcés Zepeda, J. (2017). Diseño modular de plantas de Hidrotratamiento de Naftas. *Foro tecnológico 2017* (págs. 2-10). Ciudad de México: Instituto Mexicano del Petróleo.

Garcés Zepeda, J., Anzaldo Trejo, J. M., & Guitiérrez Ramírez, Y. G. (2016). *Diseño Modular en refinerías de baja capacidad*. Ciudad de México: IMP.

García, O. (29 de Julio de 2015). *Gestión de los Costos del Proyecto*. Recuperado el Enero de 2023, de Proyectum: <https://www.proyectum.com/sistema/blog/gestion-de-los-costos-del-proyecto/>

Gavin, A. (2018). Modular Solutions for Refiners. *5° Congreso Latinoamericano y del Caribe de Refinación*, (págs. 5,9,13,15). Argentina. Recuperado el Febrero de 2023

Gonzaga, A. (10 de 04 de 2018). *Fluor Corporation*. Recuperado el Mayo de 2023, de Laboratorio de Estudios sobre Empresas Transnacionales UNAM: <http://let.iiec.unam.mx/Ahmed%20Gonzaga#:~:text=Fluor%20Corp.,y%20privado%20en%20diversas%20industrias.>

Guerrero Castorena, X. (17 de 07 de 2022). *La metodología FEL aplicada a la Gerencia de Proyectos*. Recuperado el Marzo de 2023, de El Universal: <https://www.eluniversal.com.mx/opinion/colegio-de-ingenieros-civiles-de-mexico/la-metodologia-fel-aplicada-la-gerencia-de-proyectos/>

Honeywell UOP. (11 de 2022). *Honey uop arda week*. Recuperado el Abril de 2023, de Honeywell UOP: https://arda.africa/wp-content/uploads/2022/11/honeywell_uop_arda_week_2020.pdf

Honeywell UOP. (2023). *CCR Regenerator Section*. Recuperado el Abril de 2023, de Honeywell

UOP: <https://uop.honeywell.com/en/equipment-and-aftermarket-services/modular-solutions/refining/ccr-regenerator>

Honeywell UOP. (s.f.). *Modular Naphtha Isomerization*. Recuperado el Abril de 2023, de

Honeywell UOP: <https://uop.honeywell.com/en/equipment-and-aftermarket-services/modular-solutions/refining/isomerization#>

Honeywell UOP. (s.f.). *Modular Refinery*. Obtenido de Honeywell UOP:

<https://uop.honeywell.com/en/equipment-and-aftermarket-services/modular-solutions/refining/modular-refinery>

ICON Container Container-Finder. (s.f.). *Container-Finder 40 flat rack container*. Recuperado

el Mayo de 2023, de ICON Container Container-Finder: <https://www.icon-container.de/en/container-finder/open-top-flat-rack-container-40-flat-rack>

INEGI. (Diciembre de 2022). *Indicador Mensual de la Actividad Industrial*. Recuperado el

Diciembre de 2022, de INEGI:

<https://www.inegi.org.mx/temas/imai/#:~:text=En%20diciembre%20de%202022%20y,au ment%C3%B3%200.7%20%25%20a%20tasa%20mensual>.

Instituto Mexicano del Petróleo. (2008). Front-End Loading (FEL). *Front-End Loading (FEL)*,

(pág. 60). México. Recuperado el 2023

ISO. (2020). *Series 1 freight containers — Classification, dimensions and ratings* (Septima ed.).

Obtenido de ISO.

IUSC. (s.f.). *Conceptos y definiciones- Duración*. Recuperado el Marzo de 2023, de IUSC:

<https://www.iusc.es/recursos/gesproy/textos/03.02.01.htm#:~:text=La%20duraci%C3%B3n%20del%20proyecto%20es,dependencia%20que%20existan%20entre%20ellas>.

-
- Jiménez Sánchez, J. E., & Jiménez Castillo, J. (2016). *Logística del Autotransporte de Carga: Estrategias de gestión*. Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Qro.: Publicación Técnica No. 483.
- Kok, A. (1 de Abril de 2019). *Thirrd Generation Modularisation*. Recuperado el Febrero de 2023, de OTC: <https://www.ownerteamconsult.com/third-generation-modularisation/>
- López, H., Avilés, J., & Reboredo, L. (Febrero de 2016). Aplicación de modularización en proyectos de refinería. *Petrotecnia*, 68-73.
- Maritima del Estrecho. (s.f.). *Open Top*. Recuperado el Mayo de 2022, de Maritima del Estrecho: <https://maritima.com/open-top/>
- Martín Ramón, A. (2021). *Los procesos de industrialización de la construcción tradicional*. [Tesis de licenciatura, Universidad Politécnica de Madrid], Madrid.
- Melero, J. (10 de Febrero de 2021). *La relación entre la logística y el transporte de mercancías*. Recuperado el Junio de 2023, de TRANSGESA: <https://www.transgesa.com/blog/logistica-transporte-mercancias/>
- Melissa, A. D. (2017). *Propuesta de un Modelo de Oficina de Gestión de Proyectos (PMO) Bajo Metodología de Front-end Loading para la Optimización del Desempeño en los Proyectos de Inversión*. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia: Tesis en Dirección y Gestión de Proyectos.
- Modular Process Solutions. (s.f.). *Modular Process Plants*. Recuperado el Enero de 2023, de Modular Process Solutions: <https://www.m-ps.ch/product-and-services/modular-process-plants>
- Montoro, C. A. (2019). *La Bauhaus (1919-1933). A 100 años de inicio de la escuela de diseño*, no. 16. Recuperado el Marzo de 2023, de Revista Polis:
-

<https://www.fadu.unl.edu.ar/polis/la-bauhaus-19191933-a-100-anos-del-inicio-de-la-escuela-de-diseno/>

ONBTAMER. (13 de Enero de 2017). *YAMAL LNG project 3Dvideo June2016*. Obtenido de

ONBTAMER: <https://www.youtube.com/watch?v=hnmt3Pjh2MA>

Paul Barshop. (16 de Diciembre de 2014). *Defending The Front-End Loading (FEL) 1 Gate*.

Recuperado el Marzo de 2023, de Independent Project Analysis:

<https://www.ipaglobal.com/news/article/defending-the-front-end-loading-fel-1-gate-2/>

Pérez, A. (20 de Julio de 2015). *Elementos clave en la ingeniería de proyectos*. Recuperado el

Marzo de 2023, de OBS Business School:

[https://www.obsbusiness.school/blog/elementos-clave-en-la-ingenieria-de-](https://www.obsbusiness.school/blog/elementos-clave-en-la-ingenieria-de-proyectos#:~:text=La%20ingenier%C3%ADa%20de%20proyectos%20es,de%20protecci%C3%B3n%20ambiental%2C%20entre%20otros.)

[proyectos#:~:text=La%20ingenier%C3%ADa%20de%20proyectos%20es,de%20protecci](https://www.obsbusiness.school/blog/elementos-clave-en-la-ingenieria-de-proyectos#:~:text=La%20ingenier%C3%ADa%20de%20proyectos%20es,de%20protecci%C3%B3n%20ambiental%2C%20entre%20otros.)

[%C3%B3n%20ambiental%2C%20entre%20otros.](https://www.obsbusiness.school/blog/elementos-clave-en-la-ingenieria-de-proyectos#:~:text=La%20ingenier%C3%ADa%20de%20proyectos%20es,de%20protecci%C3%B3n%20ambiental%2C%20entre%20otros.)

PPLYMOVENT. (23 de Mayo de 2017). *Humos de soldadura ¿qué son y qué daños pueden*

causar? Recuperado el Febrero de 2023, de

[https://www.plymovent.com/es/blogs/aspiracion-humo-soldadura-y-corte/que-son-los-](https://www.plymovent.com/es/blogs/aspiracion-humo-soldadura-y-corte/que-son-los-humos-de-soldadura#:~:text=Los%20gases%20que%20se%20pueden,mon%C3%B3xido%20de%20carbono%20(CO))

[humos-de-](https://www.plymovent.com/es/blogs/aspiracion-humo-soldadura-y-corte/que-son-los-humos-de-soldadura#:~:text=Los%20gases%20que%20se%20pueden,mon%C3%B3xido%20de%20carbono%20(CO))

[soldadura#:~:text=Los%20gases%20que%20se%20pueden,mon%C3%B3xido%20de%2](https://www.plymovent.com/es/blogs/aspiracion-humo-soldadura-y-corte/que-son-los-humos-de-soldadura#:~:text=Los%20gases%20que%20se%20pueden,mon%C3%B3xido%20de%20carbono%20(CO))

[0carbono%20\(CO\)](https://www.plymovent.com/es/blogs/aspiracion-humo-soldadura-y-corte/que-son-los-humos-de-soldadura#:~:text=Los%20gases%20que%20se%20pueden,mon%C3%B3xido%20de%20carbono%20(CO))

Project Management Institute. (2017). *A guide to the project management body of knowledge*

(PMBOK guide) (Sexta ed.). Newton Square, PA: PMI.

R. Morris, L., & Kidd, T. (2017). *Handbook of Research on Instructional Systems and*

Educational Technology. USA: IGI GLOBAL.

Rodríguez, J. J. (08 de Marzo de 2015). *Globalización de países, industria y empresas*.

Recuperado el Enero de 2023, de JUROGA Proyectos Digitales:

<https://www.juroga.com/blog/globalizacion-de-los-paises-industria-y-mercados/>

Secretaría de Gobernación. (04 de Junio de 2004). *PROYECTO de Norma Oficial Mexicana*

PROY-NOM-034-SCT2-2003, Señalamiento Horizontal y Vertical de Carreteras y

Vialidades Urbanas. Recuperado el Mayo de 2023, de Diario Oficial de la Federación:

https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=668546&fecha=04/06/2004#gsc.tab=0

Secretaría de Gobernación. (17 de Junio de 2016). *ACUERDO que establece los Lineamientos*

aplicables para verificar la masa bruta de los contenedores con carga, antes de su

embarque para transporte marítimo. Recuperado el Abril de 2023, de Diario Oficial de la

Federación:

[https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5441688&fecha=17/06/2016#gsc.tab=](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5441688&fecha=17/06/2016#gsc.tab=0)

0

Secretaría de Gobernación. (26 de Diciembre de 2017). *NORMA Oficial Mexicana NOM-012-*

SCT-2-2017, Sobre el Peso y Dimensiones Máximas con los que Pueden Circular los

Vehículos de Autotransporte que Transitan en las Vías Generales de Comunicación de

Jurisdicción Federal. Recuperado el Mayo de 2023, de Diario Oficial de la Federación:

[https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5508944&fecha=26/12/2017#gsc.tab=](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5508944&fecha=26/12/2017#gsc.tab=0)

0

Sicma 21. (7 de Marzo de 2023). *Cómo realizar el traslado de maquinaria industrial*.

Recuperado el Mayo de 2023, de SICMA21: [https://www.sicma21.com/como-hacer-el-](https://www.sicma21.com/como-hacer-el-traslado-de-maquinaria-industrial/)

[traslado-de-maquinaria-industrial/](https://www.sicma21.com/como-hacer-el-traslado-de-maquinaria-industrial/)

-
- SIEMENS. (2021). A modern toolset for modular plant design. *American Institute of Chemical Engineers*, 28-31.
- Sologna Roy, P. (Mayo de 2017). Consider Modular Plant Design. *American Institute of Chemical Engineers*, 28-31.
- Stout, A. (2016). *Application of the principles of mass customization: standarisation and modularization, for an infrastructural object: a viaduct*. [Tesis de maestría, University of Twente].
- Technip Energies. (2021). *Modularization. Managing construction risk through reduction of site manhours*.
- WISE. (2022). *¿Cómo se clasifican las carreteras en México?* Recuperado el Mayo de 2023, de WISE: <https://blog.wise.com.mx/como-se-clasifican-las-carreteras-en-mexico>
- VOLCA. (23 de Junio de 2020). *¿Cuales son los tipos de contenedores marítimos para qué sirven?* Recuperado el Mayo de 2023, de VOLCA: <https://volca.com/cuales-son-los-tipos-de-contenedores-y-para-que-sirve-cada-uno/>
- VOLCA. (s.f.). *Flat rack*. Recuperado el Mayo de 2023, de VOLCA: <https://volca.com/cuales-son-los-tipos-de-contenedores-y-para-que-sirve-cada-uno/>
- YAMAL LNG. (2015). *About the Project*. Recuperado el Abril de 2023, de YAMAL LNG: <http://yamallng.ru/en/>
- Zeman, N. (s.f.). *Dynamotive starts production in Guelph*. Recuperado el Mayo de 2023, de Biomass Magazine: <https://biomassmagazine.com/articles/1224/dynamotive-starts-production-in-guelph>