UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Repositorio Digital USM **https://repositorio.usm.cl**

Tesis USM Tesis de Pregrado de Acceso Abierto

2018

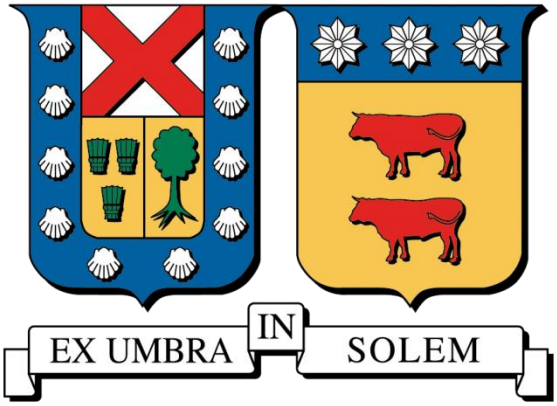
EVALUACIÓN ECONÓMICA DE TECNOLOGÍA MODULAR COMO ESTRATEGIA PARA LA INDUSTRIA DE PROCESOS.

KRAVETZ MANUBENS, FELIPE

http://hdl.handle.net/11673/43415

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS



EVALUACIÓN ECONÓMICA DE TECNOLOGÍA MODULAR COMO ESTRATEGIA PARA LA INDUSTRIA DE PROCESOS.

AUTOR

FELIPE KRAVETZ

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA: RAÚL STEGMAIER

PROFESOR CORREFERENTE: DANIEL RAMIREZ

FECHA

VALPARAÍSO, 11 DE JUNIO, 2018

Resumen Ejecutivo

La industria de procesos está enfrentado un escenario caracterizado por una mayor volatilidad en los mercados, una descomoditizacion, y una creciente necesidad de producir de forma social y ambientalmente responsable. Hasta hoy en día los efectos de las economías de escala han tomado un rol protagónico en el diseño de plantas de producción, pero parece ser que se requieren nuevos actores para lograr superar las condiciones actuales. El desarrollo de tecnología modular de pequeña escala puede ayudar a superar muchos de estos desafíos a partir del aumento en la flexibilidad que podrán otorgar al sistema de producción.

Uno de los objetivos principales de este estudio es determinar una metodología adecuada para valorar los beneficios que otorga la flexibilidad. La metodología seleccionada fue la de Opciones reales, dentro de la cual se trabajó con simulaciones Monte Carlo utilizando un algoritmo de valoración en base a regresiones.

Dentro del estudio se compararon dos sistemas de producción: un sistema convencional de gran escala y un sistema modular de pequeña escala. El caso estudiado no representa la realidad de la industria de procesos Chilena, pero logra demostrar la importancia de utilizar una metodología de evaluación que logre valorar la flexibilidad. En este caso, el sistema modular es económicamente superior, aun cuando la inversión total requerida para este es 2.3 veces mayor a la del sistema convencional. Lo último se debe a su alta velocidad de desarrollo en comparación con la planta de gran escala, y a su capacidad de adaptarse a los distintos escenarios.

Contenido

1. Problema de Investigación 6

2. Objetivos 7

2.1. Objetivo General 7

2.2. Objetivos Específicos 7

3. Marco Teórico 8

3.1 Industria de Procesos 8

3.2 Economías de escala. 9

3.3 Producción distribuida a pequeña escala 12

3.4 Producción Modular 14

3.5 Valor de la Flexibilidad 16

4. Desarrollo 22

4.1. Análisis de rentabilidad económica. 22

4.1.1. Valor presente Neto: 25

4.1.2. Opciones Reales 27

4.1.2.1. Procesos de decisión Markoviano y Programación Dinámica 29

4.1.2.2. Monte Carlo 30

4.1.2.3. Simulación Movimiento Browniano 32

4.2.2.4. Métodos de Regresión para valorar opciones 34

4.3. Supuestos para la Valoración 37

4.4. Adaptación del algoritmo LSM 40

5. Resultados 55

6. Conclusiones 69

Referencias 71

Gráfico 1: Efecto de las economías de escala en la inversión total, (Bramsiepe, y otros, 2012) 10

Gráfico 2: Efecto del tiempo de construcción en el VPN, (Bramsiepe, y otros, 2012).....11

Gráfico 3: Ejemplo de simulación demanda anual. 42

Gráfico 4: VPN obtenidos por Lier y Grünewald, (Lier & Grünewald, 2011) 54

Gráfico 5: EVPN, caso inicial.....55

Gráfico 6: Histograma de Frecuencia EVPN, caso inicial 57

Gráfico 7: Histograma de Frecuencia Acumulada EVPN, caso inicial 58

Gráfico 8: Histograma de Frecuencia de la Diferencia de EVPN entre las dos plantas, caso inicial 58

Gráfico 9: n° de Módulos Instalados, caso inicial 59

Gráfico 10: Frecuencia Acumulada del EVPN, análisis de sensibilidad 60

Gráfico 11: Cantidad de módulos, análisis de sensibilidad 61

Gráfico 12: Simulaciones con demanda esperada 72.000 [ton/año] 62

Gráfico 13: Frecuencia acumulada demanda año 20 63

Gráfico 14: Frecuencia EVPN, demanda esperada 72.000 [ton/año] 64

Gráfico 15: EVPN, demanda esperada 72.000 [ton/año] 65

Gráfico 16 Frecuencia acumulada EVPN, demanda esperada 72.000 [ton/año].....66

Gráfico 17: Frecuencia EVPN, demanda esperada 72.000 [ton/año] 66

Gráfico 18: Frecuencia Acumulada, diferencia EVPN 66

Gráfico 19: Frecuencia acumulada EVPN, demanda inicial 30.000 [ton/año] 67

Gráfico 20: EVPN, demanda inicial 30.000[ton/año] 67

Gráfico 21: Simulación demandad, demanda inicial 30.000[ton/año] 67

Gráfico 22: Cantidad de Módulos, demanda inicial 30.000 [ton/año] 68

Ilustración 1: Flexibilidad Física y Lógica, (ElMaraghy, 2005) 18

Ilustración 2: Estructuras de sistemas de Producción, (Wörsdörfer, Lier, & Grünewald, Potential analysis model for case specific quantification of the degree of eligibility of innovative production concepts in the process industry, 2015).....19

Ilustración 3: Tipos de Flexibilidad en plantas transformables, (Wörsdörfer, Lier, & Crasselt, Real options-based evaluation model for transformable plant designsin the process industry, 2016) ...19

Ilustración 4: Representación de tipos de flexibilidad en plantas modulares, (van Kranenburg, Sofra, Verdoes, & de Graaff, 2015) 21

Ilustración 5: Relevancia de los diferentes tipos de flexibilidad para los drivers económicos, Adaptado de (van Kranenburg, Sofra, Verdoes, & de Graaff, 2015).....21

Tabla 1: Estructura de Costos, (Lier & Grünewald, 2011) 40

Tabla 2: Datos ejemplo construcción de bases. 45

Tabla 3: Bases ejemplo construcción de bases. 46

Tabla 4: Estimación valor esperado condicional 46

1. Problema de Investigación

La competencia a nivel mundial en las industrias de procesos está aumentando continuamente. Esto llama a una reducción de los tiempos de desarrollo de procesos, al igual que a la disminución de los costos de inversión necesarios para la implementación de nuevas tecnologías de producción. Tomando en cuenta la escasez de los recursos, numerosos desafíos se están alzando. (Buchholz, 2010). Los requerimientos para las tecnologías de producción de alimentos y de químicos cambiarán en el futuro, debido tanto a la necesidad de un tiempo más corto entre la concepción de un producto hasta su venta, como de un aumento en la volatilidad de los mercados (Bramsiepe et al., 2011).

Según Bramsiepe et al. (2011), hoy en día la producción de químicos y comidas está basada en plantas de producción centralizadas de gran escala. Estas facilidades son eficientes para la producción especializada de un solo producto. Su eficiencia se da gracias a las economías de escala, pero a la vez son muy inflexibles debido a que su operación debe adaptarse a los requerimientos específicos de su producto estrella. En busca de aprovechar las economías de escala, el capital necesario para la construcción de este tipo de fábricas es muy alto, por lo que estas plantas mono-producto requieren un alto nivel de optimización. Es por esto que se deben realizar procesos de planeación largos y costosos. Esto genera un panorama muy desventajoso, por el cual los productos nuevos solo son lanzados en mercados confiables, y las tecnologías son aplicadas con un retraso significativo, desperdiciando un potencial importante para la innovación. “Una producción de químicos más flexible y eficiente es un requerimiento para el fortalecimiento de la competitividad en la industria química” (Stefan Sievers, Tim Seifert, Gerhard Schembecker y Christian Bramsiepe, 2016)

Según Bramsiepe et al. (2011), aunque en el futuro siempre van a existir plantas de producción de escala mundial, existe una necesidad evidente de tecnologías de producción flexible a pequeña escala que puedan ser desarrollada y aplicadas rápidamente. En consideración a este tipo de plantas, toda la cadena de suministros, incluyendo el transporte, debe ser considerada. La producción a pequeña escala pude permitir un escenario de producción local, el cual podrá disminuir tanto los costos como los efectos ambientales

negativos producto del transporte. Cuando hablamos de producción local, nos referimos a la producción cerca de los clientes. La proximidad geografía entre el cliente y el productor permite la posibilidad de adaptar mejor el producto a las necesidades locales. A su vez, esta producción local a pequeña escala puede permitir la utilización de suministros y mano de obra locales. La utilización de suministros locales, en conjunto con cercanía a los clientes, disminuirá los costos de transporte, al igual que la emisión de gases de efecto invernadero por parte de esta actividad.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

- Valorar un proyecto de inversión de una planta modular en la industria de procesos, para comparar la factibilidad económica de un concepto modular de producción en contra de una planta de gran escala.

2.2. Objetivos Específicos

- Estudiar el comportamiento de la industria de procesos para determinar las condiciones de esta a nivel mundial.
- Realizar un estudio sobre las ventajas y desventajas de un concepto de producción modular, considerando el impacto de estas en la estructura de costos.
- Determinar la metodología de evaluación económica más adecuada para el problema estudiado.
- Generar una propuesta para adaptar el algoritmo de evaluación utilizado.
- Realizar un estudio de sensibilidad para determinar el impacto de la volatilidad de los mercados en la comparación de ambos conceptos de fábrica.
- Identificar el impacto e importancia de los paramentos de la estructura de costos sobre los resultados.

3. Marco Teórico

3.1 Industria de Procesos

La industria de procesos se puede definir como: “producción que agrega valor mezclando, separando, formando, y/o realizando reacciones químicas. Esto se puede hacer tanto en baches como de modo continuo”. La industria de procesos se ha caracterizado por altos volúmenes de producción y procesos inflexibles (Abdulmalek, Rajgopal, & Needy, 2006).

Normalmente se considera que esta industrial participa en un mercado global. Los mercados finales de este tipo de productos son muy amplios, variando desde productos dedicados a automóviles, construcciones, agricultura y alimentos. Es por esto que muchas empresas de procesos operan a nivel mundial, teniendo participación en diferentes regiones.

Según van Kranenurg, Sofra, Verdoes and Graaff (2015), las ventas de químicos a nivel mundial aumentaron un 14% el año 2013. Los mercados emergentes en Asia y América Latina contribuyeron significativamente a este crecimiento global, lo cual los convierte en mercados muy atractivos para la inversión por parte de las compañías químicas.

Las tendencias de los mercados están generando la necesidad de reacciones más rápidas a las condiciones de la demanda. La primera de estas tendencias es un importante aumento en la volatilidad de la demanda. Según van Kranenurg et al. (2015) la volatilidad de los patrones de la demanda está aumentando, especialmente para los segmentos de mayor valor. Esta volatilidad está causada, en parte, por circunstancias económicas frágiles. Si bien la demanda en economías emergentes está creciendo, para responder esta demanda es necesario tener presencia local.

El desarrollo del mercado global de químicos está caracterizado por la diversificación y fragmentación. Este fenómeno es conocido como la descomoditización. Avances tecnológicos y nuevas áreas de aplicación hacen que los clientes demanden productos más especializados. Esto lleva a un aumento en el número de productos, a una disminución en los

volúmenes de producción para productos individuales y una disminución en los ciclos de vida de los productos. (Sievers, Seifert, Schembecker, & Bramsiepe, 2016)

Una segunda tendencia en el mercado mundial de químicos es una alta volatilidad en los precios de los suministros y de energía. La naturaleza globalizada de la economía mundial ha generado una cierta interdependencia entre economías locales, lo que las ha hecho más sensibles a las crisis locales como la "primavera árabe" y la crisis financiera del 2008. Por último, es importante resaltar que se ha observado que la demanda se ha ido personalizando. (Bramsiepe, y otros, 2012)

La flexibilidad es clave para muchos aspectos de la actividad empresarial. Esta abarca una amplia gama de aspectos internos de una organización, al igual que la flexibilidad en la cadena de suministro y la flexibilidad en tecnología (van Kranenurg et al. 2015).

3.2 Economías de escala.

Se dice que existen economías de escala si los costos unitarios caen cuando la organización incrementa su volumen de producción, aumentando la escala de sus operaciones. En muchas industrias las economías de escala se presentan principalmente en el área de la producción, aunque pueden aparecer en otras, como distribución o marketing. En la producción moderna una buena parte de la maquinaria empleada tiene bastante capacidad. Mientras más se trabaje a plena capacidad, los costos unitarios se reducirán más (de Celis, 2016).

Estudiando los costos fijos de distintos equipos, se puede observar que el costo de capital aumenta de manera no lineal con los aumentos de capacidad, generando economías (o en algunos casos particulares des-economías) de escala. De un modo preliminar, se puede utilizar este concepto para estimar el costo de los equipos de una planta a partir del costo ya conocido de equipos simulares, pero de diferente capacidad.

$$Costo_{nuevo} = Costo_{referencia}\left(\frac{Capacidad_{nueva}}{Capacidad_{referencia}}\right)^{factor\ de\ Williams}$$

Cabe a resaltar que la formulación anterior solo se refiere a los efectos de escala en de los distintos equipos. En cuanto a la construcción de una planta, existen otros costos que no dependerán de la escala.

En cuanto al impacto de las economías de escala en relación con la producción distribuida, Bramsiepe et all. (2012) calcularon, a modo demostrativo y asumiendo un factor de Williams de 0.6, como cambia el la inversión de capital total (inversión necesaria para la producción de una cantidad fija en una o más instalaciones), al aumentar la cantidad de fábricas instaladas. Para estos cálculos se comenzó asumiendo instalación de una planta, con capacidad de suplir toda la producción, y con un costo inicial de 50 millones. El factor de Williams utilizado es aceptado como una buena aproximación bajo falta de información más específica sobre el tipo de equipo. Dado que este caso es solo un ejercicio numérico para resaltar los efectos de las economías de escala, se asumió que todos los costos de la planta se comportan según la formulación presentada anteriormente.

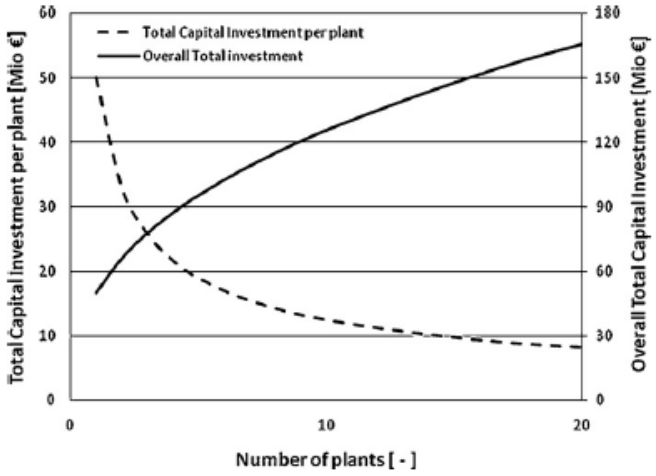


Gráfico 1: Efecto de las economías de escala en la inversión total, (Bramsiepe, y otros, 2012)

En el grafico anterior se puede observar como el costo de inversión total aumenta al aumentar la cantidad de fábricas instaladas para suplir la totalidad de la demanda (curva solida). La curva punteada nos muestra como disminuye el costo de cada una de las instalaciones al

disminuir el tamaño de ellas. En comparación con el escenario en que toda la capacidad es instalada en una facilidad, el costo total de inversión aumenta en un 30% cuando la capacidad total es dividida en dos instalaciones, y en un 150% en caso de que esta sea instalada en 10 plantas.

Estos mismos autores realizaron un segundo ejercicio numérico para demostrar el impacto que tiene el tiempo de construcción de una planta en su rentabilidad económica. En este caso tomaron en cuenta una misma planta que requiere una inversión inicial de 50 millones de euros, y calcularon el valor presente neto de tres casos, en los que asumieron un tiempo de construcción de 1, 2 y 3 años respectivamente, utilizando una tasa de descuento de 12% en todos los casos.

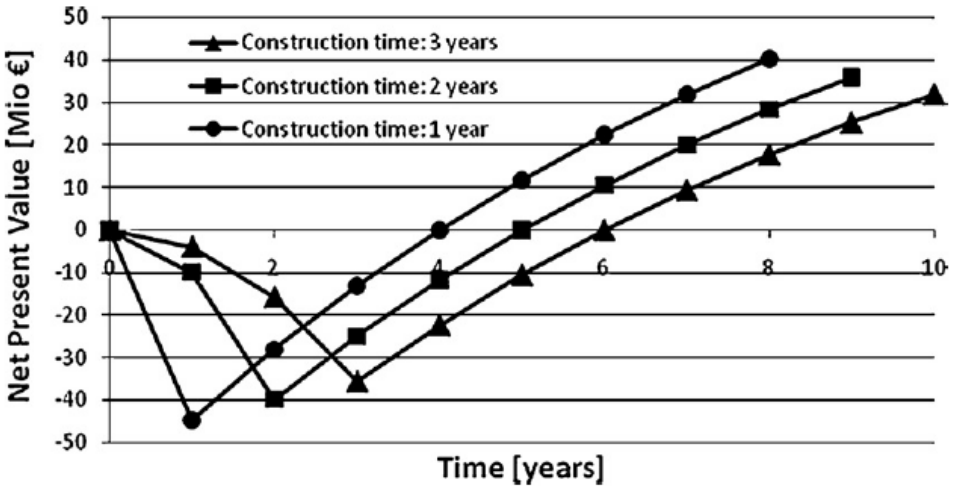


Gráfico 2: Efecto del tiempo de construcción en el VPN, (Bramsiepe, y otros, 2012).

Como se puede observar en el grafio anterior, el valor presente neto de la planta aumenta al disminuir el tiempo de construcción de la planta. Esto significa que, si bien el costo total de la inversión aumentara al construir un mayor número de plantas de pequeña escala, la velocidad de desarrollo de dichas plantas podrá disminuir el efecto de desaprovechar las economías de escala.

3.3 Producción distribuida a pequeña escala

En general, el costo de capital para equipamientos en la industria de procesos aumenta según la ecuación presentada en el capítulo anterior, con un factor de Williams de aproximadamente 0.6. Esta es la principal razón por la cual existe una tendencia a construir plantas de gran escala. Al mismo tiempo, una planta de gran escala generalmente implicara largas distancias de transporte, tanto para los suministros como para los productos finales. La inversión en tecnologías de producción a pequeña escala permitirá generar un escenario de producción distribuida, lo que implicara un menor costo de transporte, al igual que la posibilidad de aprovechar suministros y mano de obra local.

Según Rauch, Dallasega y Matt (2016), la producción distribuida es un tópico muy discutido tanto en investigación como en la práctica. A partir de una futura producción descentralizada local (también llamada "glocal") en facilidades de pequeña escala, los bienes podrán encontrarse con las necesidades locales y ser distribuidos rápidamente y de una forma más sustentable.

En el futuro la satisfacción de los clientes será alcanzada no solo a través de la creación de productos, sino que también a través de conceptos de producción que sean social y ambientalmente responsables, al igual que económicamente eficientes, evitando efectos negativos para la sociedad. Rauch, Dallasega y Matt (2016) mencionan seis razones para la utilización de sistemas de producción distribuidos. La primera de ellas es la creciente importancia que se le otorga a la sustentabilidad, vista como la relación entre la creación de valor y el uso de recursos. El beneficio que se le entrega a un cliente se basa simultáneamente en la satisfacción de su demanda, y en un aumento de su calidad de vida (o al menos en no disminuir esta última). Es por esto que el diseño de los sistemas de producción debe evitar los efectos ambientales negativos, optimizar el beneficio del cliente además de ser económicamente eficientes. La segunda razón es el creciente costo logístico.

Otra razón mencionada por estos mismos autores es la de la personalización masiva en la producción. Esta se refiere a una orientación al cliente, generando una producción en masa

individualizada para un mercado grande, cumpliendo con las diferentes necesidades de cada demándate a un costo comparable con los de la producción masiva de productos estándares. También se considera importante el hecho de que en el futuro va a haber un aumento en la dificultad para los productores de mantener el ritmo del desarrollo en el diseño de productos, ya que actualmente los consumidores poseen herramientas de diseño que hace unos cuantos años estaban fuera de sus manos. Actualmente ya existen casos en los cuales el diseño de productos es un proceso colaborativo entre los consumidores y las compañías. Una última razón para la utilización de un sistema de producción distribuido es que la cercanía con los consumidores se ha transformado en un factor importante para el éxito en los mercados. Esto se debe a que los mercados ya están saturados, por lo que se requiere un mayor nivel de diferenciación y adaptación a las necesidades locales.

En la industria de procesos existe un ejemplo claro en el que la producción distribuida a pequeña escala puede tener un impacto importante. Este es la utilización de bio-masa para la producción de bio-gas. Toda la biomasa debe ser producida en algún lugar, ya sea en tierra o en agua. Mientras más grande sea la fábrica que procese esta biomasa, mayor será la distancia de transporte de la materia prima. Esto genera una des-economía de escala en la cadena de suministros (Bramsiepe, y otros, 2012).

La utilización de bio-masa como insumo en un proceso de producción genera varios desafíos logísticos. Algunos de estos son: la gran variabilidad de la calidad de estos insumos producto de diferencias geográficas, ventanas de cosecha o producción limitadas que requieren altos niveles de inventario para asegurar un suministro constante, la deterioración de los productos en inventario, y en algunos casos, la combustibilidad de la materia prima. Estos problemas son tratados por (Carolan, Joshi, & Dale, 2007), en donde estudian la viabilidad técnica y económica de la utilización de centros de pre-procesamiento de pequeña escala distribuidos para el procesamiento de biomasa para la producción de bio-gas.

La etapa de pre-procesamiento está diseñada para mejorar el manejo, el transporte, la capacidad de almacenamiento, y potencialmente agregar valor haciendo que la biomasa sea más adecuada para la conversión final a combustibles, energía o químicos. Esta etapa incluye:

limpieza, separación y clasificación, picado, molido, mezclado, el control de la humedad y potencialmente densificar la materia prima. Gracias a que no todos los procesos poseen las mismas economías de escala, el diseño de una etapa de pre-procesamiento podría aprovechar las etapas que posean retornos de escala relativamente constantes.

El picado y molido puede llegar a duplicar la densidad aparente de la biomasa. Debido a esto un sistema de recolección de materia prima de dos etapas, en donde se realiza una primera recolección para un área pequeña destinada a un centro de pre-procesamiento, para luego transportar la materia pre-tratada desde los centros de pre-procesamiento hasta la bio-refinería, puede generar una disminución en los costos de suministro. Cabe a destacar que para determinar si este tipo de sistema generara una disminución en los costos totales, habrá que tomar en cuenta el aumento en los costos producto de la necesidad de manejar la materia prima dos veces. Por otro lado, la implementación de centros de pre-procesamiento bien diseñados podrá disminuir el deterioro de la materia prima y generar un suministro estable de calidad más estable durante todo el año. Esto es importante para las bio-refinerias, ya que estas requieren de un nivel de utilización alto para ser económicamente viables. (Carolan, Joshi, & Dale, 2007)

3.4 Producción Modular

En general en la literatura técnica, y en particular en ingeniería, existen muchas definiciones de módulos. Cada una de estas definiciones establece requerimientos importantes que pueden ser usados para crear una definición de módulos para la ingeniería de procesos (Hohmann, Kössl, Kockmann, Schembecker, & Bramsiepe, 2016). Un ladrillo LEGO™ es generalmente usado como para ilustrar interfaces estandarizadas, las cuales son esenciales para la combinación de múltiples módulos en una unidad de implementación más grande. Esta analogía no es completa, ya que un módulo posee más características que un ladrillo LEGO™. A demás de una estandarización de interfaces, un módulo debe poseer una función técnica autónoma. La función de un sistema modular combina la función de múltiples módulos en una nueva entidad. Como elemento que posee una función autónoma, un módulo

puede ser probado de antemano. Todos los flujos necesarios de información, comunicación, material y energía deben estar conectados a un módulo a través de interfaces definidas. A su vez, un módulo deberá tener un grado de adaptabilidad de proceso definida.

Una de las principales razones por la cual la producción modular es interesante en la industria de procesos, es la disminución del tiempo para lanzar al mercado un producto nuevo. Esto se consigue gracias a la reusabilidad de los módulos, la cual permite la reducción de los esfuerzos de ingeniería. Los sistemas de producción tradicionales, en la industria de procesos, tienden a resultar en soluciones individuales. La documentación de estas soluciones no permite predecir si diseños existentes pueden ser reusados en proyectos con diferentes requisitos. En contraste con las técnicas de diseño de procesos convencionales, la planeación de un sistema de producción modular requiere la selección de equipos y el ajusto de los parámetros de producción en vez de un diseño individual (DECHEMA, 2016). Hasta el momento, los equipos son diseñados a modo tal que cumplan los requisitos y parámetros del proceso. Estos son, por ejemplo, la capacidad, temperatura, presión, propiedades físicas y/o químicas como la densidad, la capacidad calorífica entre otros. Es por esto que un diseño de equipos robusto y tolerante es clave para la viabilidad técnica de la producción modular. La utilización de equipos que estén diseñados para funcionar dentro de un rango de parámetros aceptables llevara a una disminución importante del tiempo de desarrollo de procesos, pero a su vez generara perdidas en la eficiencia del proceso en comparación de equipos diseñados individualmente, al igual que presentaran un costo de inversión mayor.

Los enfoques de planeación tradicionales siguen diferentes etapas. Se comienza por diseñar el producto, para luego diseñar el proceso. Por último se entra en una etapa de diseño de planta, en donde se realiza la planeación de ingeniería básica y de detalle. Todo el proceso de diseño está acompañado de frecuentes evaluaciones económicas. Este proceso es iterativo, en donde cada decisión de ingeniería básica o de detalle tendrá un impacto en las decisiones anteriores y futuras (Hohmann, Kössl, Kockmann, Schembecker, & Bramsiepe, 2016). La creación y el refinamiento del conocimiento es una meta clave en los métodos convencionales de planeación. Al pasar de un diseño convencional hacia un diseño de planta modular, la

importancia del manejo de la información, al igual que el uso de conocimientos ingenieriles anteriores, aumenta. Nuevos métodos de planeación serán requeridos para maximizar la re-utilización de los esfuerzos en ingeniería de proyectos pasados. Por ejemplo, un concepto basado en una base de datos para almacenar los módulos predefinidos es presentado por (Hady & Wozny, 2010). Esta base de datos permitirá el diseño de plantas modulares reutilizando documentos de planeación. En este caso, en las etapas de planeación de una planta modular, la información sobre los módulos existirá desde el comienzo de esta fase. Por ejemplo, la dimensión de los quipos, los rangos de operación, los límites de las condiciones de operación, el control de proceso y los costos serán conocidos. A partir de esto, en vez de realizar un diseño individual hecho a medida para el proyecto se deberá seleccionar y configurar el equipo principal que mejor cumpla los requisitos del proceso.

3.5 Valor de la Flexibilidad

En la literatura existen diferentes definiciones sobre la flexibilidad. Las definiciones más tempranas relacionadas a la flexibilidad de los sistemas de producción se basan en la noción de la adaptabilidad a la incertidumbre. En este contexto, la flexibilidad se puede ver como la capacidad de un sistema a cambiar y asumir diferentes posiciones o estados en respuesta a los requerimientos cambiantes, con una baja penalidad en tiempo, esfuerzo, costo o rendimiento. (ElMaraghy, 2005)

Los diseños convencionales a gran escala y hechos a medida, tanto de un producto como de múltiples, ya no parecen ser adecuados para hacer frente a desafíos estratégicos como ciclos de vida de producto más cortos, aumento de la diferenciación de productos, y aumentos de las presiones competitivas en mercados altamente volátiles. (Wörsdörfer, Lier, & Crasselt, Real options-based evaluation model for transformable plant designsin the process industry, 2016)

Las necesidades de capacidad se ven afectadas a lo largo del tiempo por altos grados de incertidumbre y cambio, influenciados por fuerzas ambientales, demográficas, de mercado,

regulatorias y tecnológicas. Por un lado, los inversionistas del sistema pueden sufrir desventajas significativas si las necesidades de capacidad son menores a las anticipadas, ya que los sistemas de alta capacidad generalmente requieren de mayores gastos de capital total. Por otro lado, un sistema diseñado con un rendimiento económico óptimo, pero con una capacidad fija, puede no ser fácilmente adaptable para captar una mayor demanda de capacidad, si las necesidades son mayores de lo previsto originalmente.

Una estrategia de expansión de capacidad flexible puede reducir el impacto de las incertidumbres a la baja, ya que se puede requerir menos capital por adelantado (e.g., actuando como una póliza de seguro). Además, puede ayudar a generar más valor al posicionar el sistema para capitalizar las oportunidades alcistas, por ejemplo, actuar como una call option de una acción. (Cardin & Hu, 2016)

Un sistema diseñado con flexibilidad para expandir la capacidad según sea necesario puede proporcionar al operador del sistema la capacidad de diferir las inversiones, a modo de reducir el valor presente neto (VPN) de los costos. El aplazamiento de la capacidad de forma flexible y modular permite reducir los costos de construcción esperados, ya que evita la implementación de capacidad innecesaria hasta que se necesite. (Cardin & Hu, 2016)

La capacidad de producción no es el único elemento a considerar cuando se estudian los sistemas de producción flexibles. Los distintos tipos de flexibilidad se pueden clasificar en dos categorías: la flexibilidad lógica (logical/soft) o física (physical/hard). Estos incluyen la flexibilidad de las maquinas, operaciones, procesos, mescla de productos, control de producción, routing, planeación de producción, al igual que el volumen, y capacidad. (ElMaraghy, 2005)

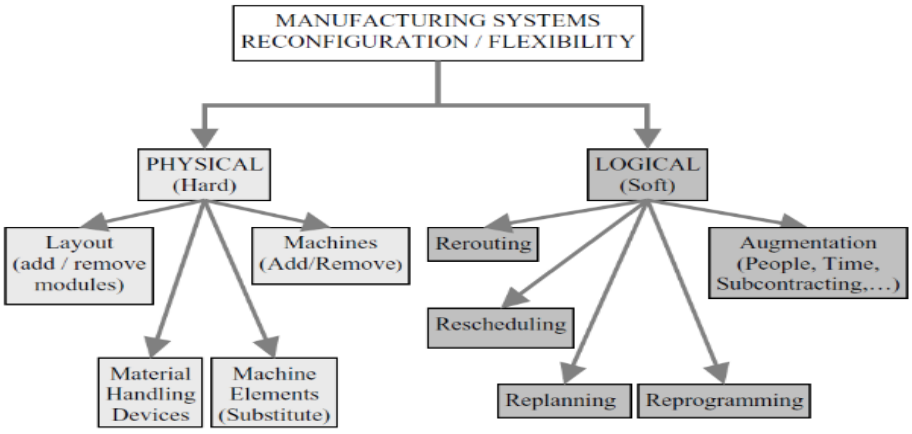


Ilustración 1: Flexibilidad Física y Lógica, (ElMaraghy, 2005)

A modo de enfrentar los ciclos de vida más cortos, los aumentos en la competitividad y los mercados más volátiles, nace el concepto de plantas transformables. Este tipo de plantas posee una estructura modular que genera flexibilidad en distintas dimensiones: escalabilidad de la capacidad, adaptabilidad de los procesos de producción y mayor movilidad. Este tipo de fábricas también podrá facilitar la aplicación de nuevas innovaciones tecnológicas.

La modularización es considerada como el elemento principal para un sistema transformable. La construcción de aparatos estandarizados modulares ofrece movilidad, adaptabilidad a diferentes procesos y escalabilidad, además de un tiempo de desarrollo y construcción menor. Distintos productos pueden ser producidos al cambiar el orden o el tipo de algunos módulos, sin mayor retraso, mientras que la capacidad se puede ajustar al aumentar o disminuir el número de estos. Esta estructura también permite una mejora en la respuesta a las fluctuaciones (temporales y regionales) sobre la cantidad o la variedad de productos demandados, en comparación con los diseños de plantas inmóviles y menos flexibles. Más aun, la posibilidad de posicionarse más cerca de los clientes conlleva a conceptos de redes de distribución descentralizadas que requieren de menores distancias de transporte. (Wörsdörfer, Lier y Grünewald)

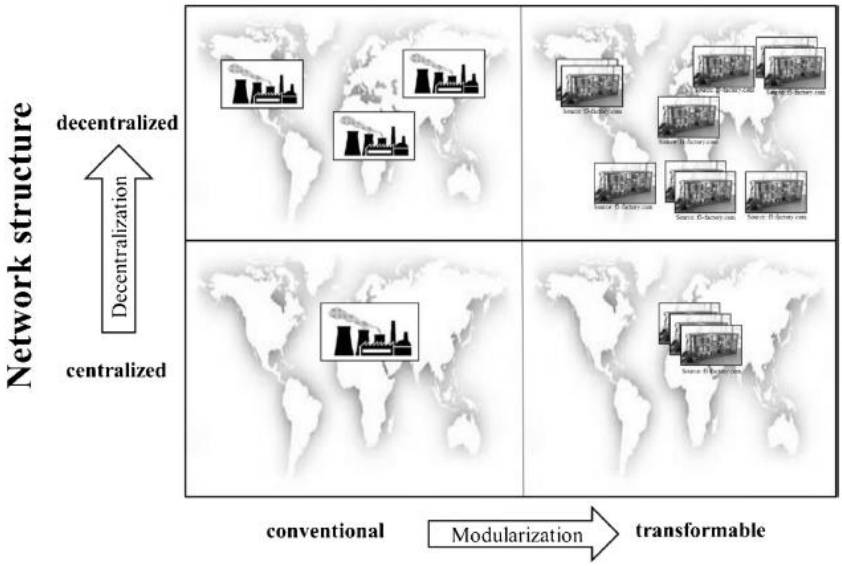


Ilustración 2: Estructuras de sistemas de Producción, (Wörsdörfer, Lier, & Grünewald, Potential analysis model for case specific quantification of the degree of eligibility of innovative production concepts in the process industry, 2015)

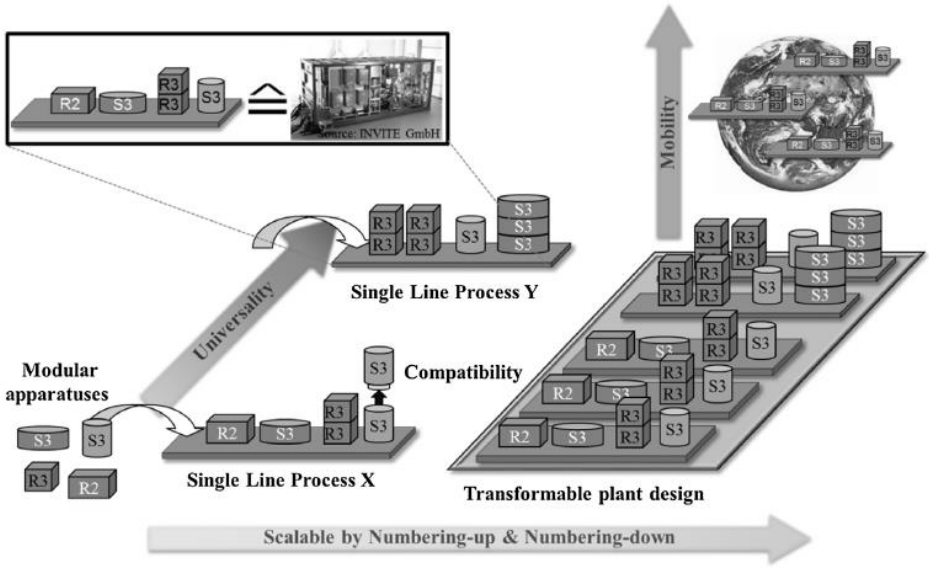


Ilustración 3: Tipos de Flexibilidad en plantas transformables, (Wörsdörfer, Lier, & Crasselt, Real options-based evaluation model for transformable plant designsin the process industry, 2016)

Según van Kranenburg et al. (2015), una planta de producción flexible a pequeña escala, en la industria química, debería poseer cinco tipos de flexibilidad.

i. Flexibilidad de Capacidad: La producción a pequeña escala distribuida permitirá a las compañías a posicionarse más cerca de sus clientes sin enfrentar el riesgo financiero de una gran inversión en una planta de gran escala. Cuando la demanda local aumente, este tipo de plantas podrá escalar su capacidad sin mayor dificultad y en tiempos relativamente cortos.

ii. Flexibilidad de Productos: Esta flexibilidad hace posible la producción de diferentes (o varios) productos con los mismos equipos. Esta cualidad es especialmente relevante en el contexto de ciclos de vida de productos cada vez más cortos. A su vez, la flexibilidad de productos disminuirá el tiempo de desarrollo de nuevos productos.

iii. Flexibilidad de la Innovación: Este tipo de flexibilidad es muy similar a la flexibilidad de producto, pero se enfoca en la innovación y aplica principalmente a las etapas de I&D y a las plantas piloto. Al crear fabricas pilotos altamente adaptables, modificaciones a los productos o nuevos productos pueden ser probados rápidamente. Esto también aplica a la innovación en procesos.

iv. Flexibilidad de Movilización: El diseño de este tipo de plantas crea la posibilidad de diseñar fábricas, o partes de estas, que sean transportables de un lugar a otro. Las plantas transportables pueden ser utilizadas para posicionarse más cerca de los clientes, para producir productos que tengan una demanda estacional (e.g. los pesticidas pueden ser producidos la mitad del año en el hemisferio norte y el resto del año en el hemisferio sur), y por ultimo cuando es preferible no construir una planta en el sitio final de producción.

v. Flexibilidad en la materia prima: Existen situaciones en donde es deseable poder utilizar diferentes tipos de materia prima. Un ejemplo de esto es la posibilidad de usar diferentes tipos de biomasa. Esta flexibilidad se puede usar en conjunto con la flexibilidad de movilización. Debido a que no es deseable el transporte de desechos o bio-masa, la planta

puede ser transportada a la fuente de esta materia prima. Esto es especialmente importante cuando la cantidad de materia prima no transportable (o poco eficiente de transportar) varia estacionalmente, o no es suficiente como para justificar la construcción de una planta tradicional.

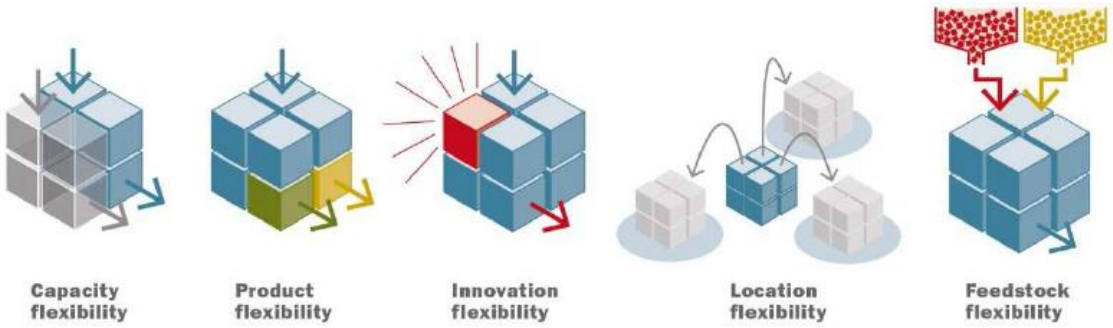


Ilustración 4: Representación de tipos de flexibilidad en plantas modulares, (van Kranenburg, Sofra, Verdoes, & de Graaff, 2015)

Estos tipos de flexibilidad generan distintos drivers económicos que hacen atractiva la implementación de plantas flexibles a pequeña escala. Los principales drivers económicos son: acortar el tiempo al mercado mediante una velocidad de desarrollo de procesos mayor, aumentar la capacidad de respuesta a las demandas del cliente y la reducción del riesgo económico. En la tabla siguiente se presenta la importancia relativa de cada flexibilidad en los drivers económicos que impulsan la implementación de este concepto de producción.

Tipo de Flexibilidad	Acortar el tiempo al mercado	Capacidad de respuesta a la demanda del cliente	Reducción del Riesgo
Capacidad	Importante	Importante	Importante
Producto	Importante	Importante	Importante
Innovación	Importante	Importante	Relevante
Localización	Relevante	Relevante	Relevante
Materia prima	No Relevante	No Relevante	Importante

Ilustración 5: Relevancia de los diferentes tipos de flexibilidad para los drivers económicos, Adaptado de (van Kranenburg, Sofra, Verdoes, & de Graaff, 2015)

La mayor desventaja de una planta flexible a pequeña escala es la perdida de las economías de escala, lo que significara que los costos de capital serán mayores en comparación con los costos de construir una planta convencional de gran escala. Los costos de capital no son los únicos que aumentaran, sino que los costos operacionales también podrán ser mayores debido a una pérdida de eficiencia en algunos de los procesos o en la necesidad de más mano de obra.

4. Desarrollo

4.1. Análisis de rentabilidad económica.

La medición de la rentabilidad económica de un proyecto no es fácil por las enormes dificultades que existen para pronosticar el comportamiento de todas las variables que condicionan su resultado. Por ello, lo común es explicar que lo que se evalúa es uno, quizás el más probable, de los escenarios que podría enfrentar un proyecto. Luego de esto, es común realizar un análisis de sensibilidad, el cual apunta a determinar cómo las variaciones de los distintos parámetros del modelo impactaran en el resultado económico. El cálculo de la rentabilidad de cada uno de los escenarios es una de las tareas más simples, fáciles y certeras del trabajo del evaluador.

La rentabilidad de un proyecto se puede medir de muchas formas distintas: en unidades monetarias, en porcentaje o en el tiempo que demora la recuperación de la inversión, entre otras. Todas ellas se basan en el concepto del valor tiempo del dinero, que considera que siempre existe un costo asociado a los recursos que se utilizan en el proyecto, ya sea de oportunidad, si hay otras posibilidades de uso del dinero, ya sea financiero, si se debe recurrir a un préstamo. (Sapag, 2011)

Para determinar que método de evaluación de rentabilidad económica es el más adecuado, es necesario contextualizar el proyecto estudiado en el marco económico en el que se encuentra.

Como ya fue mencionado anteriormente, muchos de los mercados en los que participa la industria de procesos están presentando una volatilidad de demanda alta, una mayor diversificación (junto con requerimientos de productos más especializados), un aumento en el número de productos, y ciclos de vida más cortos. Debido a la diversificación de los productos requeridos, los volúmenes demandados de cada producto en particular han disminuido.

Estas condiciones de mercado pueden ser enfrentadas creando sistemas de producción más flexibles, i.e., sistemas que puedan adaptarse más eficientemente a los cambios de los requisitos del mercado. En este caso, la eficiencia puede ser vista en cuanto al tiempo que toma adaptar el sistema, los costos necesarios para el cambio y/o las variaciones en el rendimiento del sistema.

Un ejemplo de un equipo flexible es un horno hibrido, como puede ser la combinación de un horno DFG (gas) y un horno de inducción. Es clave resaltar que otorgar mayor flexibilidad a un equipo, o planta de producción, implicara un mayor costo. Es por esto que se puede esperar que un horno hibrido presente un mayor costo, o una menor eficiencia que un horno DGC o de inducción. Si se quisiera realizar una comparación económica de estos tres hornos, una práctica común sería la de determinar un precio de insumo fijo (el cual podría ser la esperanza del precio durante el periodo de estudio). Es fácil demostrar que en este caso, el horno hibrido nunca será preferido. En este caso se asume que conocemos la eficiencia del horno hibrido (la cual dependerá del suministro utilizado), al igual que el precio de los distintos insumos. A partir de esto se puede determinar que insumo minimizará los costos operacionales del horno hibrido. Si este fuese el Gas, debido a que el horno hibrido presenta un mayor costo de inversión (o una menor eficiencia) que el horno DGC, este último siempre será económicamente superior. De la misma forma, en caso de que el insumo que minimice los costos operacionales del horno hibrido sea la energía eléctrica, el horno eléctrico será la mejor opción.

En el ejemplo anterior, la flexibilidad se traduce en más posibles decisiones (el horno hibrido tiene la posibilidad de funcionar tanto con Gas como con energía eléctrica), y el tener más posibles decisiones solo tendrá valor si estas son ejercidas durante el periodo estudiado. Por ejemplo, si se asume que el insumo óptimo inicial es el Gas, pero que se espera que en algunos años esto se revierta (i.e. la energía eléctrica sea el insumo que minimice los costos operacionales), el horno hibrido podría ser la mejor opción.

Los ejemplos anteriores reflejan la importancia de tomar en cuenta las decisiones empresariales tomadas durante el periodo de evaluación en nuestra metodología. Si bien en nuestro ejemplo se presenta un escenario determinista en donde la flexibilidad si puede ser evaluada, es en modelos estocásticos en donde esta posee un rol más importante. Si asumimos que los precios de ambos insumos son variables aleatorias, entonces nos veremos enfrentado a una gran cantidad de escenarios en donde tener la posibilidad de cambiar el insumo utilizado puede generar una ventaja económica. A partir de lo anterior se puede concluir que los modelos deterministas están sesgados hacia sub-valorar la flexibilidad.

Dado que la mayor flexibilidad es una de las ventajas de la tecnología modular, se fijaron dos restricciones sobre el método de evaluación económica. Ambas restricciones apuntan a que se valore la flexibilidad del sistema de producción. La primera es que el método debe contemplar las posibles decisiones empresariales durante el periodo de evaluación del proyecto (e.i. debe existir algún nivel de optimización o selección de decisiones). Como se mencionó anteriormente, la velocidad de planeación y desarrollo es económicamente relevante, por lo que es imprescindible que nuestra metodología de evaluación contemple dentro del conjunto de decisiones a tomar una estrategia de inversión. La segunda es que el método debe tratar la incertidumbre directamente. Esto significa que dentro del modelo de evaluación se deben tomar en cuenta los diferentes escenarios que podemos enfrentar, en los que se debe determinar el impacto económico de las posibles decisiones que nuestro sistema nos entrega. Esta restricción proviene del entendimiento de la flexibilidad como un nivel de adaptabilidad a la incertidumbre.

Por otro lado, la concepción de un método de producción modular impactara tanto a los productores de maquinaria en la industria de procesos, como a las plantas de producción que lo utilicen.

En primer lugar, el diseño de tecnología modular debe apuntar a generar maquinaria tolerante a distintos escenarios de producción. Claramente esto significa que las maquinarias resultantes no poseerán el mismo nivel de eficiencia que las diseñadas específicamente para un solo uso.

La modularidad viene acompañada con un nivel de estandarización mayor que la existente en los sistemas tradicionales. Esta es a la vez un requisito técnico del sistema (distintos módulos deben poder conectarse unos con otros mediante interfaces estándar), como una de las claves para la viabilidad económica de este tipo de sistemas. El diseño de equipamientos robustos, al igual que el alto nivel de estandarización, son dos de los tres requerimientos que permitirán una mayor reutilización de tanto los esfuerzos ingenieriles, como de los distintos módulos, en procesos diferentes. El último requisito es el correcto manejo de la información. Esto significa que para aprovechar todas las fortalezas de la producción modular se debe crear un escenario en donde la información de los distintos módulos esté disponible a la hora de comenzar el proceso de planeación. En este escenario, el tiempo requerido para la planeación y desarrollo de un nuevo proceso disminuirá significativamente. Si bien esta fortaleza de los sistemas modulares puede ser englobada bajo el concepto de flexibilidad, su relevancia económica es suficientemente importante como para mencionarla aparte.

4.1.1. Valor presente Neto:

Uno de los indicadores más utilizados para determinar la rentabilidad de un proyecto es el VPN o valor presente neto (o NPV según sus siglas en ingles. El cálculo de este último se basa en el principio del valor temporal del dinero, el cual nos dice que un dólar de hoy es más valioso que un dólar de mañana. La intuición detrás de este principio es que un dólar hoy puede empezar a ganar intereses inmediatamente y por lo tanto tendrá un valor más alto

que un dólar mañana. El valor temporal del dinero demuestra que, manteniendo todo lo demás constante, es mejor tener dinero ahora que después. (Ventus Publishing Aps, 2008)

El valor presente (VP) es el valor de hoy de un flujo de caja futuro. Para encontrar el valor presente de un flujo de caja futuro, C_t, se debe multiplicar este flujo por un factor de descuento.

$$VP = factor\ de\ descuento * C_t$$

El factor de descuento (FD) es el valor presente de un pago futuro de una unidad unitaria y se determina por la tasa de retorno en una inversión equivalente alternativa.

$$FD = \frac{1}{(1+r)^t}$$

Donde r, es la tasa de descuento y t es el número de años. Insertando el factor en la fórmula del valor presente, encontramos:

$$PV = \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

La mayoría de los proyectos requieren una inversión inicial. Es por esto que el valor presente neto (VPN) es la diferencia entre el valor presente de los flujos de caja futuros y la inversión inicial, C_o, requerido para comenzar el proyecto:

$$VPN = C_0 + \sum_{i=1}^{n} \frac{C_i}{(1+r)^i}$$

Cabe resaltar que los flujos de caja pueden ser tanto positivos como negativos. Es más, debido a que C_o es definido como la inversión inicial, este será siempre negativo.

Como ya determinamos en el capítulo anterior, nuestra metodología de evaluación debe contemplar la incertidumbre directamente. Es por esto que un indicador económico más adecuado será la esperanza del valor presente neto (EVPN). Este indicador no es más que el

promedio del VPN de los casos enfrentados, ponderado por su probabilidad. Sea p_i la probabilidad de enfrentar el escenario i, y VPN_i el valor presente en el escenario i, entonces tenemos que:

$$EVPN = \sum_{i=1}^{n} VPN_i$$

En este trabajo se asumirán que los sistemas de producción a estudiar serán excluyentes, y que ambos satisficieran la misma demanda. A demás de lo anterior, se decidió utilizar la misma tasa de descuento para ambos proyectos. Por último se decidió utilizar el valor presente neto como el único indicador económico para la comparación de ambos proyectos. Dos los supuestos presentados (misma tasa de descuento y satisfacción de una misma demanda), la utilización de VAN o TIR entregaran el mismo resultado.

4.1.2. Opciones Reales

Una opción representa la libertad de elección luego de recibir nueva información. Es el acto de elegir, el poder de la elección, o la libertad de las alternativas. Una opción es un derecho, pero no una obligación. Muy raramente una decisión de inversión es una decisión de "ahora o nunca", y raramente una decisión no puede ser abandonada o cambiada durante el avance de un proyecto. En la mayoría de los casos, las decisiones pueden ser retrasadas o aceleradas, y muchas veces estas incluyen una secuencia de varios puntos de decisión. Todas estas decisiones son opciones reales e impactan el valor de la inversión. (Brach, 2003)

La capacidad de retrasar un gasto de inversión irreversible puede afectar profundamente la decisión de invertir. Para obtener reglas óptimas de inversión se pueden usar métodos desarrollados para la valoración de opciones financieras, o se pueden trabajar con un enfoque basado en la teoría matemática de decisiones secuenciales óptimas bajo incertidumbre (programación dinámica estocástica). (Pindyck & Dixit, 1994)

Existen diferentes métodos para valorar una opción real. Entre estos podemos encontrar los métodos binomiales (o piramidales), en los cuales se discretizan las fuentes de variabilidad para generar un árbol de decisión. Para realizar lo anterior, se utilizan los principios de valoración bajo probabilidades libres de riesgos, a modo de encontrar la política óptima de ejercicio junto con su valor. Este método fue desarrollado por Cox-Ross y Rubinstein en 1979 para la valoración de opciones financieras, y se basa en los supuestos clásicos del mercado financiero (e.g. la inexistencia de arbitraje y la completitud del mercado de bienes financieros). Si bien este método es sencillo de utilizar, su resultado se basa en existencia de una combinación, o un portafolio, de bienes financieros que repliquen exactamente el patrón de retornos de la inversión estudiada, en todo periodo y en todo posible escenario. Este método tiene un segundo problema, ya que sufre de la maldición de la dimensionaldad (i.e. un aumento exponencial del volumen del espacio matemático cuando se aumentan las dimensiones del problema). Es por esto que su utilización deja de ser factible cuando estudiamos un problema que posea varias fuentes de volatilidad, o cuando estudiamos un problema que posea muchos periodos de ejercicio.

La evaluación de un proyecto de inversión tiende a contemplar un horizonte temporal largo. Debido a que dos de las ventajas de un sistema de producción modular son su flexibilidad (lo que puede hacer necesario tomar en cuenta más de una fuente de variabilidad) y su alta velocidad de desarrollo de proyecto (lo que puede significar la necesidad de generar muchos periodos de toma de ejercicio durante el horizonte temporal), el método binomial no parece ser el más indicado. Es por esto que se decidió estudiar el problema desde el marco de la programación dinámica. Hasta el momento no hemos definido la cantidad de variables que serán consideradas como variables aleatorias en nuestro modelo. Como la flexibilidad posee diferentes dimesionalidades, es beneficioso que nuestro modelo de evaluación siga siendo computable cuando las fuentes de incertidumbre sean múltiples. Bajo este tipo de condiciones, los métodos de simulación Monte Carlo son atractivos.

4.1.2.1. Procesos de decisión Markoviano y Programación Dinámica

La valoración de una opción real puede ser formulada como un proceso de decisión Markoviano de horizonte finito. Este proceso es una tupla $\langle S, A, T, R \rangle$, en donde S es el conjunto de estados. Un estado es una caracterización única de todo lo que es importante en el problema que está siendo modelado. A es el conjunto de acciones posibles, las cuales pueden depender del estado, $s \in S$, en que se encuentre el sistema. En este caso, las acciones pueden ser denotadas como $A(s)$, en donde $A(s) \subseteq A$. T es la función de transición, la cual define la distribución de probabilidad sobre los posibles siguientes estados, i.e. la probabilidad de llegar al estado $s' \in S$, al aplicar la acción $a \in A(s)$ en el estado $s \in S$. La función de transición se define como $T : S \times A \times S \to [0, 1]$. R es la función de recompensa, la cual especifica la recompensa de estar en cada estado.

Dado un proceso de decisión markoviano, una política $\pi \in \Pi$, con es una función computable que entrega una acción $a \in A$ (o $a \in A(s)$) para cada estado $s \in S$, en donde Π es el conjunto de políticas factibles. Formalmente, una política π determinística es una función definida como $\pi : S \to A$, mientras que una política estocástica se define como $\pi : S \times A \to [0, 1]$. (van Otterlo & Wiering, 2012)

A partir de las definiciones anteriores, se puede definir la función objetivo como:

$$V^{\pi}(s) = E_{\pi}\left\{\sum_{k=0}^{T} \gamma^{k} r_{t+k} | s_t = s\right\}$$

Una propiedad fundamental de esta función es que satisface una propiedad recursiva. Para cualquier política π y cualquier estado s, la ecuación anterior puede ser definida de forma recursiva en términos de la ecuación de Bellman:

$$\begin{aligned} V^{\pi}(s) &= E_{\pi}\{r_t + \gamma r_{t+1} + \gamma^2 r_{t+2} + \ldots | s_t = s\} \\ &= E_{\pi}\{r_t + \gamma V^{\pi}(s_{t+1}) | s_t = s\} \\ &= \sum_{s'} T(s, \pi(s), s') \left(R(s, a, s') + \gamma V^{\pi}(s')\right) \end{aligned}$$

Esta función denota que el valor esperado de cada estado está definido en términos de su recompensa inmediata más los posibles valores descontados de los próximos estados ponderados por la probabilidad de transición dada la política estudiada.

El objetivo de cualquier MDP es el de encontrar la mejor política, i.e. la política que recibe la mayor recompensa. Esto significa maximizar el valor de la función objetivo para todos los estados $s \in S$. Una política óptima, denotada como π^*, es tal que $V^{\pi^*}(s) \geq V^{\pi}(s)$ para todo $s \in S$ y todo $\pi \in \Pi$. Se puede demostrar que la solución óptima $V^* = V^{\pi^*}$ satisface la siguiente ecuación:

$$V^*(s) = \max_{a \in A} \sum_{s'} T(s,a,s') \left(R(s,a,s') + \gamma V^*(s')\right)$$

Esta expresión es llamada la ecuación de optimalidad de Bellman. (van Otterlo & Wiering, 2012)

4.1.2.2. Monte Carlo

Los métodos Monte Carlo se basan en la analogía entre probabilidad y volumen. Las matemáticas de medición formalizan la noción intuitiva de probabilidad, asociando un evento con un conjunto de resultados y definiendo la probabilidad del evento como el volumen o medida relativa a la del universo de posibles resultados. Monte Carlo utiliza esta identidad en reverso, calculando el volumen de un conjunto, interpretando el volumen como probabilidad. En el caso más simple, esto significa hacer un muestreo aleatorio desde un universo de posibles resultados y tomando la fracción de las muestras aleatorias que pertenecen a un conjunto dado como una estimación del volumen del conjunto. La ley de los grandes números asegura que este estimado converge al valor correcto mientras el número de muestras aumenta.

Un pequeño paso nos lleva desde volúmenes a integrales. Considera, por ejemplo, el problema de estimar la integral de una función f sobre el intervalo unitario. Podemos representar la integral:

$$\alpha = \int_0^1 f(x)\, dx$$

como un valor esperado $E[f(U)]$, con U uniformemente distribuida entre 0 y 1. Suponga que tenemos un mecanismo para obtener una muestra de puntos $U_1,\ U_2, \ldots$ independientemente y uniformemente entre $[0, 1]$. Evaluando la función f sobre n de estos puntos aleatorios y calculando el promedio, obtenemos la esperanza estimada por Monte Carlo.

$$\widehat{\alpha_n} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} f(U_i).$$

Si f es realmente integrable sobre $[0, 1]$ entonces, por la ley de grandes números, $\widehat{\alpha_n} \to \alpha$ con probabilidad 1 mientras $n \to \infty$.

Una implicación fundamental de la valoración de derivados, es que el precio de una opción puede ser representada como un valor esperado. Valorar derivadas entonces se reduce a computar valores esperados. En muchos casos, si escribiésemos la esperanza relevante para el problema como una integral, encontraríamos que su dimensión es grande o incluso infinita. Este es precisamente el tipo de problemas en los cuales los métodos Monte Carlo son atractivos.

La valoración de derivados a través de métodos basados en Monte Carlo, típicamente involucran la simulación de caminos del proceso estocástico usado para para describir la evolución de los factores relevantes para la opción. En vez de simular puntos, se busca obtener muestras sobre un espacio de caminos. (Glasserman, 2003)

4.1.2.3. Simulación Movimiento Browniano

La incertidumbre será tomada en cuenta mediante la modelación de la demanda como un movimiento browniano. La utilización de movimientos brownianos es una práctica común en la valoración de opciones. La decisión de tomar en cuenta la demanda como la fuente de incertidumbre del problema es un supuesto que puede cambiarse sin mayor inconveniente. El tipo de método seleccionado en este trabajo es robusto a la selección de una o más fuentes de variabilidad. Por ejemplo, otras posibles fuentes de incertidumbre podrían ser el precio de venta (en caso de que se trate de un commodity) o el precio de los suministros.

Sea $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ un espacio probabilístico. Para cada $\omega \in \Omega$, suponga que existe una función continua $W(t)$ para $t \geq 0$ que satisfaga $W(0) = 0$ y que dependa de ω. Entonces $W(t)$, $t \geq 0$, es un Movimiento Browniano si para todo $0 = t_0 < t_1 < \ldots < t_m$ los incrementos

$$W(t_1) = W(t_1) - W(t_0), W(t_2) - W(t_1), \ldots, W(t_m) - W(t_{m-1})$$

Son independientes, y cada uno de estos incrementos esta normalmente distribuido con

$$\mathbb{E}[W(t_{i+1}) - W(t_i)] = 0,$$
$$Var[W(t_{i+1}) - W(t_i)] = t_{i+1} - t_i$$

En donde ω pude ser pensado como un camino del movimiento Browniano y $W(t)$ como el valor de este camino en t.

El espacio de muestras Ω es el conjunto de todos los posibles resultados de un experimento aleatorio, $\mathcal{F}$ es el σ-álgebra de subconjuntos de Ω cuyas probabilidades son definidas, y $\mathbb{P}$ es una medida de probabilidad. Para cada $A \in \mathcal{F}$, la probabilidad de A es un numero $\mathbb{P}(A)$ entre cero y uno. (Shreve, 2004)

Sea $\mathcal{F}(t)$ una filtración del Movimiento Browniano, se debe cumplir que:

i. Para todo $0 \leq s \leq t$, todo $\mathcal{F}(s)$ debe estar contenido en $\mathcal{F}(t)$. Esto significa que la información se acumula

ii. Para todo $t \geq 0$, $W(t)$ es $\mathcal{F}(t)$-medible. Esto significa que la información disponible en t es suficiente para evaluar $W(t)$.

iii. Para todo $0 \leq t \leq u$, el incremento $W(u) - W(t)$ es independiente de $\mathcal{F}(t)$. En otras palabras, cualquier incremento del Movimiento Browniano después del tiempo t es independiente de la información disponible en t.

iv. Para todo $0 \leq s < t \leq T$, el incremento $W(t) - W(s)$ posee una distribución normal de media cero y varianza $t - s$, esto es: $W(t) - W(s) \sim N(0, t - s)$.

El movimiento browniano más simple puede ser representado mediante la ecuación diferencial estocástica:

$$dS(t) = \mu\, dt + \sigma\, dW(t)$$

La cual tiene por solución:

$$S(t) = \mu t + \sigma W(t)$$

Este tipo de movimiento browniano (μ y σ constantes) puede ser simulado de forma exacta sobre un conjunto de fechas discreto. El método utilizado es exacto en el sentido de que la distribución conjunta de los valores simulados coincide con la distribución conjunta del proceso, continuo en el tiempo, en los periodos simulados.

Para simular $S(t)$, nos enfocaremos principalmente en simular los valores $\big(W(t_1), \dots, W(t_n)\big)$ o $\big(S(t_1), \dots, S(t_n)\big)$ sobre un conjunto fijo de puntos $0 < t_1 < \cdots < t_n$. Debido a que los incrementos de un Movimiento Browniano poseen una distribución normal independiente, se puede simular $W(t_i)$ o $X(t_i)$ desde sus incrementos. (Glasserman, 2003) Sean $Z_1, \dots, Z_n$ variables aleatorias con distribuciones normales estándar, e independientes entre ellas, se pueden generar los valores de un Movimiento Browniano estándar de la siguiente forma:

$$W(t_{i+1}) = W(t_i) + \sqrt{t_{i+1} - t_i}\, Z_{i+1}$$

Para $S \sim BM(\mu, \sigma^2)$, con μ y σ constantes, y un $S(0)$ conocido, se tiene:

$$S(t_{i+1}) = S(t_i) + \mu\,(t_{i+1} - t_i) + \sigma\sqrt{t_{i+1} + t_i}Z_{i+1}$$

Uno de los beneficios de utilizar métodos de simulación es que existe una gran variedad de procesos que cumplen las restricciones de los movimientos brownianos. Estos procesos nos dan la oportunidad de modelar muchos fenómenos sin la necesidad de cambiar drásticamente nuestra metodología.

4.2.2.4. Métodos de Regresión para valorar opciones

Existen muchos diferentes tipos de opciones, entre los cuales podemos encontrar las opciones Europeas y Americanas. La diferencia entre estas opciones son las reglas de ejercicio que presentan. Mientras una opción Europea puede ser ejercida solo en una fecha previamente acordada, las opciones Americanas se pueden ejercer en cualquier momento hasta su expiración. Por ejemplo, una opción Europea sobre una acción financiera, digamos acciones de Google, será un contrato que permitirá la compra (o venta) de un número fijo de acciones, 100, a un precio y en una fecha pactada, 1,133 dólares por acción el día 20 de julio del 2018. Esto significara que esta opción otorga el derecho de comprar (o vender) estas acciones al precio pactado en la fecha pactada. Las opciones son en sí bienes financieros que poseen un precio (se debe pagar para adquirir una opción). En caso de que la opción presentada anteriormente sea Americana, la única diferencia será que esta se podrá ejercer en cualquier momento hasta la fecha estipulada. Esto significa que el derecho que se obtiene al adquirir una opción americana es el de comprar (o vender) un número fijo de acciones, a un precio pactado hasta una fecha pactada. El valor de este tipo de opciones dependerá de la política con la cual se ejerza, por lo que para la valoración se busca encontrar una política óptima. Esto se hace mediante la solución de un problema de "optimal stopping", y luego de encontrada la política, el valor de la opción será el valor esperado de los pagos descontados al seguir dicha política. Los métodos que utilizan simulaciones para determinar la política optima de ejercicio se restringen a valorar opciones que solo se pueden ejercer en un conjunto

fijo de periodos, también llamadas “Bermudan options” ya que se encuentran entre las opciones Europeas y Americanas.

Los métodos de regresión han sido propuestos por muchos autores, dentro de los cuales encontramos a Carrière (Carrier, 1996), Longstaff y Schwartz (Longstaff & Schwartz, 2001), y Tsitsiklis y van Roy (Tsitsiklis & van Roy, Optimal stopping of Markov processes: Hilbert space theory, approximation algorithms, and an application to pricing high-dimensional financial derivatives, 1999) (Tsitsiklis & van Roy, Regression methods for pricing complex American-style options, 2001). Este tipo de métodos propone estimar el valor de continuación de una opción mediante una regresión lineal entre el valor de ejercicio de un periodo y un conjunto de bases construidas con las realizaciones de las variables de estado en el periodo anterior, obteniendo la siguiente expresión

$$E[V_{t+1}(S_{t+1})|S_t = s] = \sum_{r=1}^{M} \beta_{tr}\, \phi_r(s)$$

para algunas funciones de base ϕ_r y constantes β_{tr} con $r = 1, \dots, M$. Los coeficientes $\beta_{t\,r}$ se estimaran mediantes regresiones utilizando mínimos cuadrados ordinarios (OLS por sus siglas en ingles). Asumiendo que la relación anterior se sostiene, el vector β_t está dado por:

$$\beta_t = \left(E[\phi(S_t)\phi(S_t)^T]\right)^{-1} E[\phi(S_t)V_{t+1}(S_{t+1})] \equiv B_\phi^{-1}\, B_{\phi V}$$

Los coeficientes β_{tr} pueden ser estimados a partir de las observaciones de los pares $\left(S_{ij}, V_{t+1}\left(S_{t+1,j}\right)\right)$, con $j = 1, \dots, b$. Cada uno de estos consiste del estado en el tiempo t y el correspondiente valor de la opción en el tiempo $t+1$. Considerando, en particular, caminos los caminos independientes $\left(S_{1j}, \dots, S_{mj}\right), j = 1, \dots, b$, y suponga, por un momento, que los valores $V_{t+1}(S_{t+1})$ son conocidos. El valor estimado de β_t por OLS está dado por:

$$\hat{\beta}_t = \hat{B}_\phi^{-1}\, \hat{B}_{\phi V}$$

En donde $\hat{B}_\phi$ y $\hat{B}_{\phi V}$ son las contrapartes maestrales de B_ϕ y $B_{\phi V}$. Más explícitamente, $\hat{B}_\phi$ es la matriz $(M \times M)$ con entrada qr:

$$\frac{1}{b}\sum_{j=1}^{b} \phi_q(X_{tj})\phi_r(X_{tj})$$

Y en donde $\hat{B}_{\phi V}$ es el vector con entradas r:

$$\frac{1}{b}\sum_{k=1}^{b} \phi_r(X_{tk})V_{t+1}(X_{t+1,k})$$

Debido a que no se conocen todos los valores V_{t+1}, se debe utilizar por su estimado $\hat{V}_{t+1}$ en todos los nodos que no sean terminales. Con el valor estimado de $\hat{\beta}_t$, luego el valor de continuación se puede definir como:

$$\hat{C}_t(s) = \gamma\, \hat{\beta}_t^T \phi(s)$$

A partir de esto, se pude definir el algoritmo para determinar el precio de la opción:

i. Simular b caminos independientes de las variables de estado $\{X_{1j}, \dots, X_{mj}\}$, $j = 1, \dots, b$
ii. En los nodos terminales, calcular el flujo de caja $\hat{V}_{m,j}, j = 1, \dots, b$
iii. Aplicar inducción hacia atrás: para $t = m - 1, \dots, 1,$
    a. Dado el valor estimado $\hat{V}_{t+1,j}$, $j = 1, \dots, b$, utilizar regresiones OLS para calcular $\hat{\beta}_t = \hat{B}_\phi^{-1}\, \hat{B}_{\phi V}$;
    b. Defina $\hat{V}_{tj} = max\{\hat{V}_i(S_{tj}), \hat{C}_i(S_{tj})\}$, $j = 1, \dots, b$
iv. Defina $\hat{V}_0 = \frac{(\hat{V}_{11} + \cdots + \hat{V}_{1b})}{b}$

4.3. Supuestos para la Valoración

En el presente trabajo se analizara el caso presentado por (Lier & Grünewald, 2011). En este ejercicio se utilizaran todos los supuestos planteados por estos autores. Es importante resaltar que los costos presentados por estos autores representan un mercado de alto valor, el cual no es representativo para los mercados típicos chilenos. En trabajos futuros, algunos de los supuestos asumidos por estos autores podrían ser adaptados para reflejar de mejor forma las condiciones de la industria química de nuestro país. Debido a que los objetivos de este trabajo apuntan más a la determinación de una metodología de evaluación económica para tecnología modular, más que a la evaluación de un proyecto en particular, la estructura de costos utilizada será la presentada por estos autores. A continuación se presentaran los supuestos y la estructura de costos utilizada por estos autores:

1. Crecimiento lineal de la demanda de un producto existente durante diez años. Este crecimiento adicional del mercado no puede ser suplido por las plantas existentes y por lo tanto se debe construir una nueva planta de producción.

2. Los costos de inversión de la planta tradicional de gran escala se dividen entre la construcción de la planta, la construcción de las bodegas de almacenamiento, la construcción de oficinas y la construcción salas de monitoreo. Se asume que la planta se construye en un parque industrial químico, en donde todas las líneas necesarias de suministros y desechos ya existen y están disponibles. Este último supuesto utilizado por Lier y Grünewald aleja el caso de la realidad de muchos proyectos en nuestro país. En futuros análisis, este supuesto podría ser relajado para observar como este afecta los resultados finales del estudio.

3. Se asume que la planta debe comenzar con un 50% de utilización para producir. Esta utilización mínima es necesaria para ambos conceptos de planta.

4. Luego de la valoración de la planta de gran escala, se supuso que esta será dividida en una planta modular con x módulos de $(1/x)\%$ de la capacidad inicial. Debido a la pérdida de economías de escala, el costo por cada módulo de la planta se calcula

según un método de escalamiento estándar, i.e. $I = I_0 \, (K/K_0)^{0.6}$, siendo I_0 la inversión para la planta de gran escala, I es la inversión para un módulo, K_0 es la capacidad de la planta de gran escala y K es la capacidad de cada módulo. Estos costos no incluyen el costo de las bodegas de depósito, de las oficinas y de las salas de monitoreo. Debido a que la planta modular pueda necesitar más espacio que la de gran escala, un segundo edificio podrá ser necesario. Si bien estos costos no se verán presentes hasta la instalación de la mitad de la capacidad máxima (5 módulos), por simplicidad se asumirá que todos estos costos de desembolsaran en el momento de la construcción del primer módulo.

5. Costos adicionales por servicios ingeniería serán considerados una vez para la planta tradicional, y en la misma cantidad para el primer módulo de la planta modular. Luego de esto, costos adicionales de servicios de ingeniería serán todavía necesarios por cada módulo adicional.

6. Otros costos adicionales son necesarios por cada módulo extra instalado ya que se requieren más partes de repuesto, más partes para el sistema de control, software adicional, pruebas del sistema de producción recién instalado, seguros adicionales y costos de startup.

7. El tiempo de construcción de la planta de gran escala dura 30 meses, mientras que el tiempo de construcción de un módulo solo tarda 6. Esto toma en cuenta la menor escala del módulo, al igual que la potencial estandarización de estos. Durante el tiempo de construcción, los gastos se dividen trimestralmente, con un aumento de 10% en cada trimestre. Esto se debe a que una mayor parte del costo de inversión se gasta cerca del comienzo de la producción.

8. Los costos de producción son tomados en base a los costos de la materia prima ($€14545\,[t^{-1}]$), costos ambientales, costos de mano de obra, y otros costos operacionales como energía, vapor y misceláneos. Energía y misceláneos aumentan linealmente con el aumento de capacidad. El costo por vapor tiene una parte fija hasta

el 70% de la utilización de capacidad debido a restricciones tecnológicas. Entre el 70% y el 100% de utilización, este costo se comporta de manera lineal.

9. En cuanto al costo de mano de obras, la planta tradicional de gran escala requiere de 21 trabajadores, 6 inspectores y 1 gerente de planta. Los costos de cada uno de ellos son de €65000, €80000 y €120000 respectivamente. Para la planta modular, se requieren 0.5 trabajadores extra por cada módulo. Debido a la potencial necesidad de un segundo edificio, un trabajador y un inspector serán necesarios cada 5 módulos instalados. Cada 25 módulos extra instalados se necesitara un inspector extra.

10. Por último, el precio de venta es de €20 000 $[t^{-1}]$.

Un resumen la estructura de costos se presenta en las tablas a continuación:

	Gran escala	Modular (10 módulos)	Modular (Primer módulo)	Extra por cada modulo
General				
Crecimiento del Mercado [t/año]	80,000	8,000	8,000	
Capacidad	800,000	80,000	8,000	
Costos de Inversión				
Costos de Inversión	150,000,000	366,000,000		
1.- Construcción de la planta, incluyendo materiales	129,000,000	324,000,000	32,400,000	32,400,000
2.- Bodegas y depósitos	13,500,000	27,000,000	27,000,000	
3.- Oficinas	7,500,000	15,000,000	15,000,000	
Servicios ingenieriles adicionales	27,000,000	51,300,000	27,000,000	2,700,000
Otros costos adicionales	12,000,000	17,400,000	12,000,000	600,000
Costo total de Inversión	**189,000,000**	**434,700,000**	**113,400,000**	

Distribución de gastos en el tiempo				
utilización mínima para producir	50%	50%	50%	
Tiempo de Inversión [meses]	30	6	6	
Tasa de interés	7.5%	7.5%	7.5%	
Factor de crecimiento	1.1	1.1	1.1	
Operación Costos				
Mano de Obra [por año]	1,965,000.00	2,565,000.00	1,965,000.00	60,000.00
Suplementos	10%	10%	10%	
1.- Vapor	75%	75%	75%	
2.- Energía	20%	20%	20%	
3.- Misceláneos	50%	50%	50%	
Ambiental [por año]	1,548,000.000	3,888,000.000	388,800.000	
Mantención [por año]	3,096,000.000	7,776,000.000	777,600.000	

Tabla 1: Estructura de Costos, (Lier & Grünewald, 2011)

4.4. Adaptación del algoritmo LSM

Este modelo cuenta con dos variables de estado: la demanda observada y la cantidad de módulos instalados hasta la fecha. La instalación de cada módulo será tomada en cuenta como una opción separada. Cada opción posee dos posibles acciones (decisiones o controles): la de ejercer, o la de no ejercer, e.i. el instalar un módulo ($a_{tk} = 1$) o no ($a_{tk} = 0$). El objetivo final es el de encontrar una política de inversión que determine, en cada periodo de decisión y para cada número de módulos instalados hasta la fecha, si se debe instalar un nuevo módulo. Para lograr esto, en primer lugar se debe estimar la cantidad de módulos máximos a instalar. En caso de que no exista una restricción de capital (ya sea un numero de módulos máximos a instalar o una cantidad de dinero máxima a invertir), se deberá utilizar una cota superior. Es importante recalcar que el rol de la cota será el de determinar la cantidad de iteraciones del algoritmo, lo cual significa que este no será necesariamente el número de módulos a instalar. En este problema la cota superior utilizada fue la división entre la demanda máxima observada en las simulaciones y la capacidad mínima exigida por un módulo. Esta cota fue aproximada hacia el entero superior. La selección de esta cota se debe a que en ninguno de los caminos simulados puede existir un número mayor de módulos operando. Si es que la cota superior es mucho mayor al número de módulos óptimos a instalar, el algoritmo demorará más en terminar, pero el resultado de este no cambiara.

Luego de determinar la cantidad máxima de módulos posibles a instalar, el siguiente paso de es la simulación de las variables estocásticas que explican la volatilidad del problema.

En este caso se estudia el impacto de la variabilidad en la cantidad demandada, a modo de incluir el valor de la flexibilidad de capacidad presente en el concepto de producción modular. La demanda estudiada tiene un comportamiento esperado lineal, con un aumento de 8.000 toneladas al año durante los primeros diez años de estudio. La variación estándar asumida para el primer cálculo será de 1000. El proyecto será evaluado a 20 años, teniendo la posibilidad de tomar una decisión sobre la expansión de capacidad cada 3 meses. Tanto el comportamiento de la demanda como el plazo de evaluación fueron tomados desde el modelo base a comparar. En cuanto al periodo de toma de decisiones (cada 3 meses), este fue definido para demostrar cómo tratar la diferencia temporal entre la toma de decisión y el primer flujo de caja producto de la nueva inversión. A demás, esto también sirve para demostrar como este tipo de algoritmo supera la maldición de la dimensionalidad. Si es que se hubiese utilizado el algoritmo binomial (basado en un árbol de decisiones del cual se desprenden dos caminos de cada etapa de toma de decisiones), se hubiese tenido que encontrar el periodo de inversión óptimo, para cada uno de los módulos a instalar, enfrentando un árbol de decisiones con 2^{80} hojas en el último periodo.

En el gráfico presentado a continuación, se pueden observar 15 caminos simulados para la demanda.

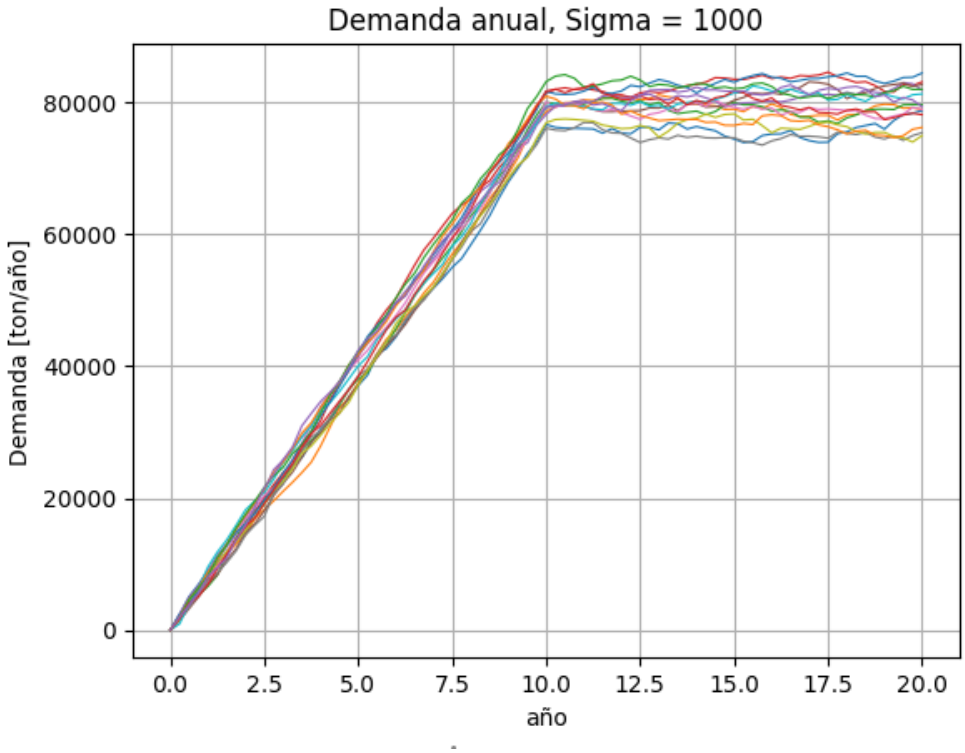


Gráfico 3: Ejemplo de simulación demanda anual.

Luego de simulados los caminos, se procede a calcular el beneficio en el periodo final de cada una de las simulaciones. La idea de este algoritmo es la de evaluar los flujos de caja en cada uno de los periodos, comenzando desde el ultimo hasta el primero, y estimar la esperanza condicional en los periodos anteriores mediante una regresión. Para la evaluación de los flujos en el último periodo (al igual que en los periodos anteriores) se deben tomar en cuenta todas las restricciones del problema. En caso de ser necesario, se podrá realizar un proceso de optimización en el periodo (i.e. determinar las medidas operacionales coherentes al problema). A continuación se presentaran las definiciones necesarias para poder determinar el valor del flujo de caja para el problema base.

Para estimar la cantidad producida entre dos periodos se decidió utilizar la demanda media. Para todo camino $k \epsilon K$, y para todo periodo $t \epsilon$ T, la demanda media y la cantidad producida serán denotadas como Dm_{tk} y Q_{tk} respectivamente. La demanda media se calculara como:

$$Dm_{tk} = \frac{dt * (D_{tk} + D_{(t-1)k})}{2}$$

En donde dt es la relación de años por paso. A partir de esto, la cantidad producida se define como:

$$Q_{tk} = \begin{cases} Dm_{tk}, & Dm_{tk} < Cu_{tk} \\ Cu_{tk}, & D_{tk} \geq Cu_{tk} \end{cases}$$

En donde Cu_{tk} es la capacidad utilizada durante el periodo t, en el camino k. Esta capacidad deberá ser menor o igual a la capacidad instalada (Ci_{tk}), la cual se calcula como la cantidad de módulos instalados por la capacidad de cada uno de ellos ($Nm_{tk} * Capmod$). La capacidad utilizada está restringida a la utilización mínima de cada módulo, los cuales deben tener una utilización de al menos 50%.

Sea P el precio del producto, el beneficio, R_{tk} será:

$$R_{tk} = Q_{tk} * \ P - Cop_{tk} - Cinv_{tk}$$

El costo operacional (Cop_{tk}) es una función no lineal de la cantidad producida y de la cantidad de módulos instalados.

$$Cop_{tk} = Cmp * \ Q_{tk} + Cmo_{tk} + Camb_{tk} + Cman_{tk} + Csup_{tk}$$
$$Camb_{tk} = 0.012 * \ Nm_{tk} * Cconst$$
$$Cman_{tk} = 0.024 * \ Nm_{tk} * Cconst$$

En donde Cmp es el costo dela materia prima, Cmo_{tk} es el costo de mano de obra, $Camb_{tk}$ es el costo ambiental y $Cman_{tk}$ es el costo de mantención. $Cconst$ es el costo de construcción de un módulo.

El costo de mano de obra se calculara dependiendo del número de módulos utilizados en el periodo t. El costo de los suplementos $Csup_{tk}$ está dividido en el costo de energía, costo de vapor y otros costos misceláneos. El costo de suplementos posee una componente fija para cuando la utilización de un módulo sea menor a 70%. Este costo es la principal razón por la cual los costos operacionales no se comportan de manera lineal con la cantidad producida.

El costo de inversión será:

$$Cinv_{tk} = \begin{cases} Cim, & si\ se\ instala\ el\ primer\ modulo \\ Cime, & si\ se\ instala\ un\ modulo\ extra \\ 0, & si\ no\ se\ instala\ un\ modulo\ en\ t \end{cases}$$

Con Cim es el costo de instalar el primer módulo y $Cime$ es el costo de instalar un módulo extra.

Tal como fue planteado en el algoritmo original, los valores esperados para cada caso serán estimando mediantes regresiones OLS utilizando como variables explicativas las bases construidas con los estados del periodo inmediatamente anterior. Es importante recalcar que los valores esperados son condicionales a la información presente en el periodo de toma de decisión. Debido a esto, como regla general las bases deberán ser construidas utilizando las variables que explican la incertidumbre del problema. Hasta el momento, no existe ninguna forma de determinar a priori cuáles serán las mejores bases para un problema dado. A modo demostrativo se mostrara un ejemplo sencillo sobre la utilización de este método, asumiendo bases construidas en base a los primeros 4 polinomios simples de la demanda. Cabe a resaltar que este ejemplo toma datos aleatorios, por lo que solo debe tomarse en cuenta el procedimiento para la creación y de las bases y la estimación de la esperanza condicional.

Los primeros cuatro polinomios serán:

$$P_0(x) = 1$$
$$P_1(x) = x$$
$$P_2(x) = x + x^2$$
$$P_3(x) = x + x^2 + x^3$$

En donde x será la demanda del periodo estudiado. Sea V_k el flujo de caja futuro en el camino k.

x_k	**Demanda Normalizada**	V_k
111	1.41421	162
110	1.06066	151
106	-0.353553	164
104	-1.06066	160
108	0.353553	152
108	0.353553	164
110	1.06066	159
107	0	156
104	-1.06066	167
102	-1.76777	154

Tabla 2: Datos ejemplo construcción de bases.

Como se puede observar en la tabla anterior, el primer paso para construir las bases será normalizar la demanda. La razón para esto será evitar problemas numéricos (overflow o underflow). Para esto a la demanda se le puede restar su valor promedio y luego dividir según su desviación estándar. Utilizando la demanda normalizada se procederá a calcular los distintos polinomios que conformaran la base de la regresión.

$P_0(x)$	$P_1(x)$	$P_2(x)$	$P_3(x)$
1	1.41421	3.41421	6.24264
1	1.06066	2.18566	3.3789
1	-0.353553	-0.228553	-0.272748
1	-1.06066	0.0643398	-1.1289
1	0.353553	0.478553	0.522748
1	0.353553	0.478553	0.522748
1	1.06066	2.18566	3.3789
1	0	0	0
1	-1.06066	0.0643398	-1.1289
1	-1.76777	1.35723	-4.16704

Tabla 3: Bases ejemplo construcción de bases.

Teniendo las bases construidas, solo falta realizar la regresión lineal y utilizar los coeficientes resultantes para estimar la esperanza condicional. En este caso la regresión tiene la siguiente forma:

$$V_k = \sum_{j=0}^{4} \beta_j P_j(x_k) + \varepsilon_k$$

En donde y_k es el flujo de caja futuro evaluado en el camino $k \in K$. Por último, la el valor esperado condicional del flujo de caja futuro, dada la información presente en cada simulación $k \in K$ sera:

$$\hat{V}_k = \sum_{j=0}^{4} \beta_j P_j(x_k)$$

x_k	$\widehat{V_k} = E\{V_k \mid x_k\}$
111	160.841
110	156.216
106	161.989
104	164.011
108	156.452
108	156.452
110	156.216
107	159.109
104	164.011
102	153.703

Tabla 4: Estimación valor esperado condicional

Si bien no existe una regla para seleccionar las bases a utilizar, este tipo de algoritmo tiene a ser robusto a la utilización de distintas bases (Longstaff & Schwartz, 2001). En este caso se utilizaran los primeros términos de los polinomios de Legrendre. Esta decisión se debe a que los polinomios de Legendre han demostrado buenos resultados en distintos estudios numéricos sobre la convergencia de este tipo de métodos. Un ejemplo de esto es el estudio realizado por Stentoft (Stentoft, 2004). Estos polinomios siguen la siguiente formula:

$$P_0(x) = 1$$
$$P_1(x) = 2x - 1$$
$$P_2(x) = 6x^2 - 6x + 1$$
$$P_{k+1}(x) = \frac{2k+1}{k+1} x P_k(x) - \frac{k}{k+1} P_{k-1}(x)$$

En caso de no poseer alguna intuición sobre qué bases utilizar, comenzar utilizando los polinomios de Legendre parece ser una buena idea.

Una diferencia fundamental entre una opción financiera y una opción real es que, debido a que la instalación no es instantánea, no existe un aumento de beneficios en el periodo en que se toma la decisión. Esto significa que la información existente en el momento de decidir si se ejerce o no la opción, no es suficiente como para determinar el flujo de caja final recibido por la acción. Dado que esto es cierto para todo proyecto de inversión, será necesario adaptar el algoritmo.

Esta desviación del modelo inicial será tratada en nuestro modelo cambiando la formulación del valor de ejercer la opción, al igual que el valor de continuación. Como ya se mencionó anteriormente, a modo de ejemplo se tomó un periodo entre la toma de dos decisiones consecutivas de 3 meses. Este periodo es la mitad del tiempo necesario para la instalación de un nuevo módulo. A partir de esto es fácil demostrar que los controles óptimos para los últimos dos periodos son el no ejercer la opción. Para observar lo anterior, hay que preguntarse qué beneficio se puede observar si se decide instalar un modula durante el último periodo. Debido a que el modulo instalado en este periodo comenzara a funcionar fuera del

periodo de evaluación económica, no existe un aumento en los flujos de caja percibidos, pero si existe un aumento en los costos debido a la instalación de este nuevo módulo. Este resultado puede ser fácilmente expandido para cualquier caso en que el tiempo de construcción sea mayor que el tiempo entre al menos dos decisiones consecutivas (i.e. dt). Sea $t = T$ el periodo final, y sea V_{Tk} el valor obtenido en el periodo T en el camino k y C_{Tk} el valor de continuación (no instalar) en el periodo T en el camino k, entonces se tiene que para nuestro caso:

$$V_{Tk}(D_{Tk}, Nm_{tk} | a_{Tk} = 0) = C_{Tk}(D_{Tk}, Nm_{tk}), \qquad \forall\, k \in K$$

$$V_{Tk}(D_{Tk}, Nm_{tk} | a_{Tk} = 1) < C_{Tk}(D_{Tk}, Nm_{tk}), \qquad \forall\, k \in K$$

$$V_{T-1,k}\left(D_{T-1,k}, Nm_{t-1,k} \middle| a_{T-1,k} = 1\right) < C_{T-1,k}(D_{Tk}, Nm_{tk}), \qquad \forall\, k \in K$$

A partir de esto, y utilizando el principio de recursividad, se puede calcular el ejercicio de la opción en el primer periodo en el cual esta generara un aumento en al menos un flujo de caja futuro durante el horizonte de planeación. En este caso, este periodo será $T - 2$. Sea t_{inst} el tiempo de instalación de un módulo nuevo, el periodo a estudiar puede ser expresado como $T - (t_{inst}/dt)$. En caso de que (t_{inst}/dt) no sea un número natural, se deberá utilizar el entero superior. Sea $r\left(D_{t,k}, Nm_{t,k}, a_{t,k}\right)$ el flujo de caja en el periodo actual (i.e. t) en el camino k, el valor de ejercer durante el periodo $T - 2$ es:

$$\begin{aligned} V_{T-2,k}\left(D_{T-2,k}, Nm_{T-2,k} \middle| a_{T-2,k} = 1\right) & \\ = r\left(D_{T-2,k}, Nm_{T-2,k}, 1\right) & \\ + \gamma\, E\left\{V_{T-1} | D_{T-2}, Nm_{T-2,k}, a_{t,k} = 0 \;\; \forall t > T-2\right\} & \end{aligned}$$

$$V_{T-2,k}\left(D_{T-2,k}, Nm_{T-2,k} \middle| a_{T-2,k} = 1\right)$$
$$= r\left(D_{T-2,k}, Nm_{T-2,k}, 1\right)$$
$$+ \gamma E\{r\left(D_{T-1,}, Nm_{T-1,k}, 0\right)$$
$$+ \gamma E\{V_{Tk}\left(D_T, Nm_{Tk} + 1 \middle| a_{t,k} = 0 \ \forall t\right.$$
$$\left.> T-1\ \right) \middle| D_{T-1,}, Nm_{T-1,k}\} \middle| D_{T-2,k}, Nm_{T-2,k}\}$$

Las ecuaciones anteriores vienen de la base que el ejercer una opción ahora (en este caso en el periodo $T-2$), elimina la posibilidad de ejercer esta opción en el futuro. Por ejemplo, si decidí instalar el primer módulo en el periodo 4, no puedo volver a instalar ese mismo modulo en el periodo 6, ya que este ya está instalado, A partir de esto, se puede formular el valor de continuación, el cual tendrá una forma similar a la formulación anterior. El valor de continuación podrá ser definido como:

$$C_{T-2,k}\left(D_{T-2,k}, Nm_{T-2,k}\right)$$
$$= r\left(D_{T-2,k}, Nm_{T-2,k}, 0\right) + \gamma E\{ V^*_{T-1}\left(D_{T-1}, Nm_{T-1,k}\right) \middle| D_{T-2,k}, Nm_{T-2,k}\}$$

El valor de continuación refleja que, si no se ejerce la opción en este periodo, esta puede ser ejercida en el futuro. Esto significa que en el periodo actual t, para el camino k, se toma la decisión $a_{tk} = 0$, pero que el valor a comparar para los siguientes periodos es el valor óptimo de ejercicio para todo $t' > t$.

A partir de esto se debe comenzar a evaluar el valor de continuación y el valor de ejercer de la opción, comenzando desde $t = T$ hasta $t = 0$. La decisión óptima en cada periodo se tomará comparando el valor de continuación con el valor de ejercer la opción, según la siguiente regla: si el valor de continuación es menor que el valor de ejercer, la acción optima de ese periodo, y en ese camino, será $a_{tk} = 1$. En caso contrario la acción óptima en este periodo, y ese camino, será $a_{tk} = 0$.

Luego de obtenido el control óptimo, el valor de esta acción se utilizara para la construcción del valor de continuación del periodo anterior. Gracias a la forma recursiva del problema, se pueden ir construyendo los valores de ejercer y de continuación hasta el primer periodo.

Para realizar los cálculos de los valores de ejercer y de continuación se deben ir guardando los valores $V_{tk}(D_{tk}, Nm_{tk}+1|a_{t'k}=0\ \forall\ t' \geq t)$ para cada t y k. Este valor es el de tener un módulo extra funcionando desde el periodo t, en el camino k, y siempre formara parte del valor de ejercer una opción en el los periodos anteriores. Para ejemplificar, supongamos que estamos en el periodo 50, y que en el camino 1 ya existen 5 módulos instalados. El valor de continuación será entonces:

$$V_{50,1}\left(D_{50,1}, 5\middle|a_{50,1}=1\right) = r\left(D_{50,1}, 5, 1\right) + \gamma\, E\{r(D_{51}, 5, 0) + \gamma\, E\{V_{52}\left(D_{52}, 6|\ a_{t,1}=0\ \ \forall t>51\ \right)|D_{51}, 5\}|D_{50,1}, 5\}$$

El segundo valor a guardar es el de $V^*_{t,k}\left(D_{t,k}, Nm_{t,k}\right)$. Este es el valor de óptimo de ejercicio en el periodo t. Este valor es usado para la construcción del valor de continuación. Siguiendo con el ejemplo anterior, el valor de continuación seria:

$$C_{50,1}\left(D_{50,1}, 5\right) = r\left(D_{50,1}, 5, 0\right) + \gamma\, E\{\, V^*_{51}\left(D_{51}, 5\right)|D_{50,1}, 5\}$$

Como ya se mencionó anteriormente, si el valor de ejercer es mayor al valor de continuación, la acción óptima será $a_{50,1}=1$, y el valor óptimo de este periodo será $V_{50,1}\left(D_{50,1}, 5\middle|a_{50,1}=1\right) = V^*_{50,1}\left(D_{50,1}, 5\right)$. En caso contrario el valor óptimo del periodo será $V^*_{50,1}\left(D_{50,1}, 5\right) = C_{50,1}\left(D_{50,1}, 5\right)$. Es importante resaltar que en el caso del valor de continuación, la expresión tiene dos valores esperados. Ambos deberán ser estimados en cada periodo. Tambien cabe resaltar que en este escenario los valores de $V_{52,1}\left(D_{52,1}, 6\middle|\ a_{t,1}=0\ \ \forall t>51\ \right)$ y de $V^*_{51,1}\left(D_{51,1}, 5\right)$ son conocidos, y por ende las esperanzas pueden ser estimadas sin mayor inconveniente.

Una vez se llegue al periodo inicial, la inversión en cada camino se hará en el primer periodo (desde $t = 1$ hasta $t = T$) en el cual el valor de ejercer sea mayor al valor de continuación. Luego de determinado este periodo de inversión para cada uno de los caminos simulados, se deberá sumar un módulo a la variable de módulos instalados para dicho camino. En otras palabras, sea t el periodo de inversión óptimo para el camino el camino k'; se debe sumar 1 a todo $Nm_{t'k'}$ en donde $t' = t + t_{inst}$. Luego de determinar la instalación del primer módulo para todo $k \in K$, se deberán repetir los pasos ya mencionados desde $t = T$ hasta $t = 0$, pero ahora con la nueva variable Nm_{tk}. Cada vez que se llegue a $t = 0$, se contara una iteración. Esto se hará hasta que se itere un número de veces equivalente a la cota superior o hasta que en alguna iteración a_{tk} sea igual a cero para todo $t \in T, k \in K$. Es importante mencionar que en todas las iteraciones los valores de a_{tk} deben ser guardados para todo $t \in T, k \in K$. Es por esto que la tabla guardad será a_{tkn}, en donde n sera el numero de la iteración presente, con $0 \leq n \leq Maximo\ numero\ de\ modulos\ a\ instalar$.

Si bien la convergencia de estos métodos está demostrada para ciertos problemas, para calcular valoración final del proyecto solo utilizaremos las acciones en cada periodo y para cada número inicial de módulos instalados (a_{tkn}). Para esto se generaran un nuevo conjunto de demandas simuladas $l \in L$, y para cada uno de estos caminos se utilizaran los valores de a_{tkn} para determinar la estrategia de inversión. Se comenzara en el periodo $t = 0$ con cero módulos instalados ($n = 0$). Para cada camino l se buscará que camino k posee una demanda más parecida a la observada en l, en el periodo $t = 0$, y se procederá a observar el valor de a_{0k0}. Si este es 1, entonces en ese periodo $t = 0$, en el camino l se instalara un nuevo módulo. Luego se observara el valor de a_{0k1}, y de igual modo que en el paso anterior, si este es 1 entonces se instalara otro nuevo módulo en el periodo $t = 0$, en el camino l. Este paso se repetirá hasta que el valor de a_{0kn} sea igual a 0. Los pasos anteriores deberán ser repetidos hasta que se encuentren todos los módulos a instalar en el periodo $t = 0$ para todos los caminos l. Luego de determinar lo anterior, se debe proseguir al periodo $t = 1$, y repetir todos los anteriores, tomando en cuenta que el valor de n para cada camino será el número de módulos que ya se ha decidido instalar en dicho camino l hasta la fecha. Esto se debe hacer

hasta que se llegue al periodo final del horizonte de planeación. Finalmente se podrá realizar la evaluación de los flujos de caja para cada camino.

Si bien ya se han explicado de forma detallada los distintos pasos de la metodología propuesta para la evaluación económica de un proyecto de producción modular, hasta ahora nos hemos basado en el caso a estudiar para dar las explicaciones. Es por esto que es interesante presentar la metodología en términos más genéricos. El primer paso a realizar para poder realizar una evaluación económica es el de la estimación de los costos totales del proyecto. La estimación de los costos de un proyecto modular fue estudiado por (Sievers, Seifer, Franzen, Schembecker, & Bramsiepe, 2017). Este trabajo presenta el estado del arte de la estimación de costos de capital, para luego generar una metodología específica para la estimación de los costos de un proyecto de producción modular en la industria de procesos.

Para realizar la evaluación económica, uno de los puntos fundamentales es el de determinar que variables explicaran la incertidumbre del proyecto. Gracias a que nuestro algoritmo trabaja con simulaciones Monte Carlo, este es robusto a la modelación de varias fuentes de variabilidad. Dentro de los métodos de opciones reales es normal trabajar con distintos tipos de movimientos brownianos. Este tipo de procesos entrega una gran flexibilidad para adaptarse a las variables estudiadas. Por ejemplo se puede modelar una demanda (o un precio) que posea efectos estacionales, procesos que tiendan a una media fija (mean-reverting process), una demanda con crecimiento exponencial, etc.

Una vez definidas las fuentes de incertidumbre, al igual que la estructura de costos del proyecto, se deben determinar todas las restricciones en conjunto con las variables de decisión coherentes al proyecto estudiado. En nuestro ejemplo la principal decisión a tomar en el proyecto es la expansión de capacidad. Debido a que un proyecto de producción modular entrega más tipos de flexibilidad, se debe determinar si es interesante incluir alguna de ellas dentro de la evaluación.

Teniendo todo lo anterior se puede proceder a la valoración económica del proyecto. Para esta primero se deben generar las simulaciones pertinentes y con ellas se deben crear las

bases necesarias para la estimación de los valores esperados condicionales. La meta de esta etapa es determinar una política de inversión que luego pueda ser evaluada. El proceso para determinar esta política es recursivo, en donde se comienza evaluando los flujos de caja en el último periodo para todos los escenarios. Este proceso de evaluación puede requerir algún nivel de optimización, y debe cumplir con todas las restricciones del problema. Una vez se determinan los flujos de caja en el último periodo, se procede a estudiar el periodo anterior. En este periodo se deben evaluar las posibles decisiones tomando en cuenta el flujo de caja del periodo junto con la esperanza condicional de los flujos de caja futuros, dadas las decisiones en el periodo actual. La esperanza condicional será estimada mediante una regresión de las bases ya definidas frente a los flujos evaluados en cada simulación. Esto se realizara hasta que se posea una política de acciones que dependan de cada estado en el que nos podamos encontrar. Esta política deberá ser utilizada para evaluar la rentabilidad económica del proyecto frente a un nuevo conjunto de simulaciones.

Antes de comenzar con los resultados del algoritmo utilizado, se presentaran brevemente los resultados obtenidos por Lier y Grünwald. Estos autores utilizaron un análisis convencional de flujos de caja descontados.

Para comenzar con su estudio, estos autores calcularon el valor presente neto de ambos conceptos de planta, y luego prosiguieron con un análisis de sensibilidad con respecto a algunos parámetros del modelo. El cálculo del VPN (o NPV según sus siglas en inglés) asume la construcción de 10 módulos. Dentro de su análisis ellos no presentan cuál es su estrategia de inversión.

La construcción de la planta a gran escala se planifica para que esta esté funcionando al año 5. Esto se basa en que la demanda pronosticada para el año 5 equivale a la utilización mínima para la planta. Antes del año 5 existen flujos negativos debido a la inversión necesaria para construir la fábrica. El periodo de recuperación de capital de esta planta es de aproximadamente 6 años.

Para el caso de la planta modular, el primer módulo puede ser construido al inicio del periodo de evaluación, ya que luego de los 6 meses de construcción, la demanda será equivalente a la utilización mínima de este módulo. Este tipo de planta posee un periodo de recuperación de capital de aproximadamente 3.5 años.

Debido a los efectos de las economías de escala, la planta de gran escala supera económicamente presentando un VPN mayor luego de aproximadamente 10 años. Es importante resaltar que la inversión total de 10 módulos es 2.3 veces más grande que la inversión necesaria para producir la misma cantidad en un sistema de gran escala. Mas aun, los cosos operacionales de un concepto de producción modular son mayores a los costos de producción de una planta de gran escala.

A continuación se presentara el grafico de VPN acumulado versus tiempo para los dos conceptos de planta obtenido por Lier y Grünewald

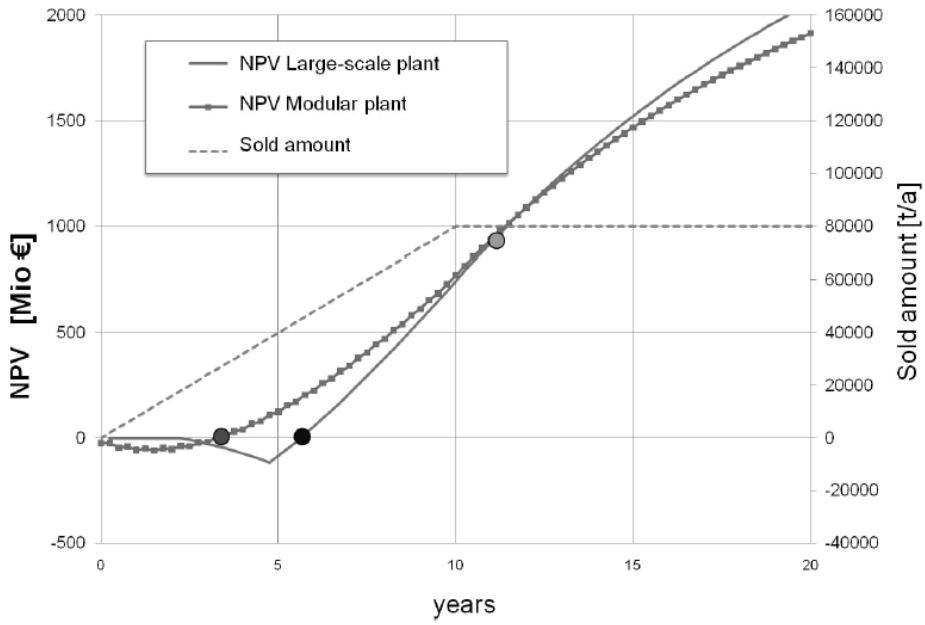


Gráfico 4: VPN obtenidos por Lier y Grünewald, (Lier & Grünewald, 2011)

5. Resultados

En nuestra evaluación, la valoración económica de la planta de gran escala se hizo asumiendo la política de inversión planteada por Lier y Grünewald. Esta contempla construir la planta para que esta pueda funcionar desde el año 5 en adelante. Como ya fue mencionado, esta estrategia viene de la necesidad de una capacidad mínima de producción equivalente a la demanda esperada del año 5.

Para la comparación entre el modelo determinista y nuestro modelo, se decidió primero comparar el comportamiento del VPN en contra del comportamiento del EVPN. Lo anterior se realiza para poder observar si existe alguna diferencia entre incluir la variabilidad directamente en el modelo mediante la consideración de una demanda como un proceso estocástico. Para el cálculo del EVPN se hicieron 25000 simulaciones, y para la estimación de la esperanza condicional se utilizaron los primeros 10 términos de los polinomios de Legendre. La esperanza del valor presente neto para la planta de gran escala se comporta de forma similar al valor presente neto del caso determinístico, presentando flujos de caja negativos hasta el año 5, en donde la planta comienza a funcionar. El periodo de recuperación esperado del capital es de entre 6 y 6.5 años.

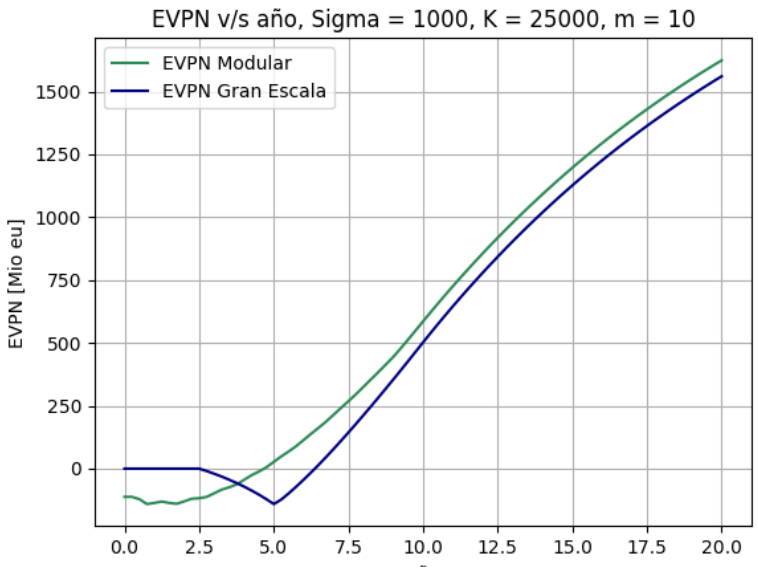


Gráfico 5: EVPN, caso inicial

En cuanto a la planta de tipo modular, se puede observar que los flujos de caja iniciales son mayores a los calculados por Lier y Gründwald. Al observar el comportamiento de la esperanza del valor presente neto de la planta modular, se puede ver como en este caso el periodo de recuperación de capital es de entre 4.5 y 5 años. Este aumento en el periodo de recuperación de capital, comparado con el resultado de Lier y Gründwald, apunta a que en nuestro modelo se invierte en un mayor número de módulos durante los primeros años del proceso de evaluación. En esta comparación se puede ver que cuando se toman en cuenta las incertidumbres de forma directa (que en este caso se realiza al asumir la demanda como un proceso estocástico), y determinando cual será la política más conveniente en los distintos escenarios enfrentados, un sistema de producción más flexible puede generar un mejor resultado económico.

Como se puede observar en el grafico anterior, la planta modular es, en promedio, económicamente superior a la planta de gran escala en todo periodo. Esto se debe, en primer lugar, a que presenta ingresos más tempranos gracias a que su construcción toma menos tiempo, al igual que su utilización mínima eficiente ocurre antes. La segunda razón por la cual este tipo de planta presenta un resultado económico superior es que, en las plantas modulares, la capacidad puede ser expandida cuando se está enfrentando un escenario de demanda superior a la esperada, generando mayores retornos. En caso de que la demanda en algún periodo sea menor que la esperada, la expansión de capacidad puede ser deferida a un periodo posterior. Esto también impacta positivamente al valor esperado del valor presente neto.

En el primer histograma se puede ver un claro aumento en concentración de la frecuencia los resultados de entre 1550 [$Mio\ eu$] y 1600 [$Mio\ eu$] para la planta de gran escala. Esto se debe a que la capacidad de esta planta está diseñada para suplir la demanda promedio, por lo que todos los casos en donde la demanda sea superior a la esperada, los retornos serán muy similares al caso esperado.

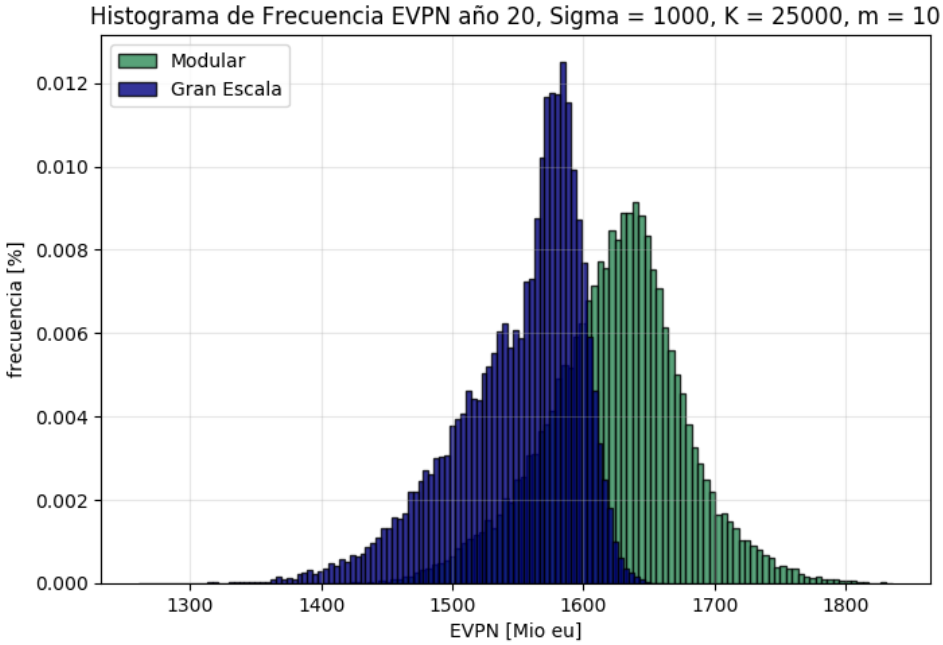


Gráfico 6: Histograma de Frecuencia EVPN, caso inicial

Al observar el histograma de frecuencia acumulada se puede ver como la fábrica de gran escala nunca generara retornos de sobre 1680 $[Mio\ eu]$, y tiene una probabilidad acumulada mayor para cualquier resultado menor a este. En cuanto a la planta modular, el beneficio máximo obtenido es de sobre 1800 $[Mio\ eu]$, y en aproximadamente 20% de los escenarios, obtiene un retorno superior al máximo obtenible por la planta de gran escala. Esto se debe a que esta planta puede adaptar su capacidad en los escenarios en que la demanda supera la esperada.

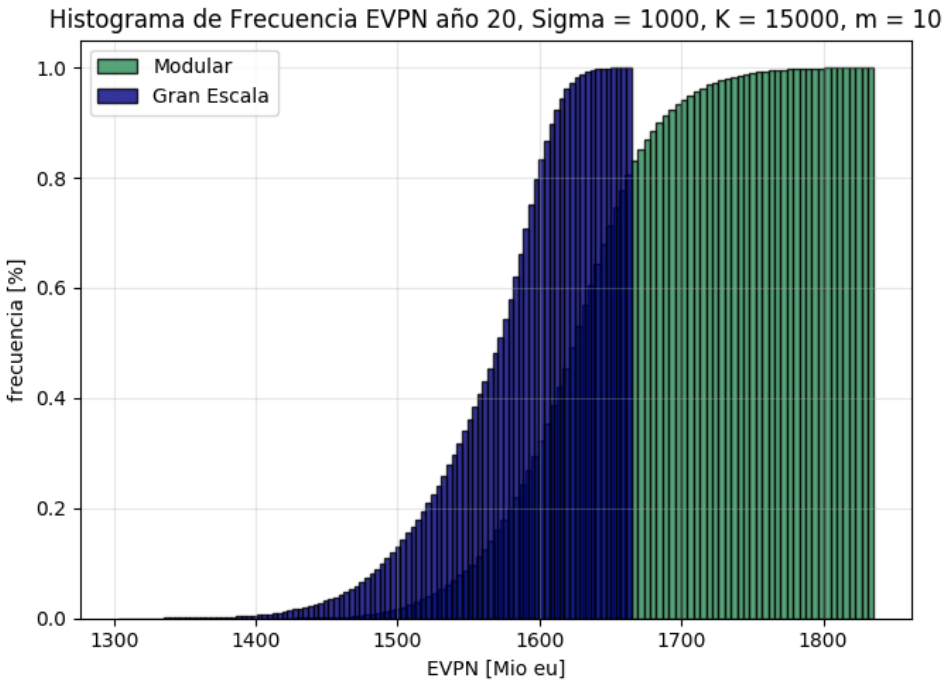


Gráfico 7: Histograma de Frecuencia Acumulada EVPN, caso inicial

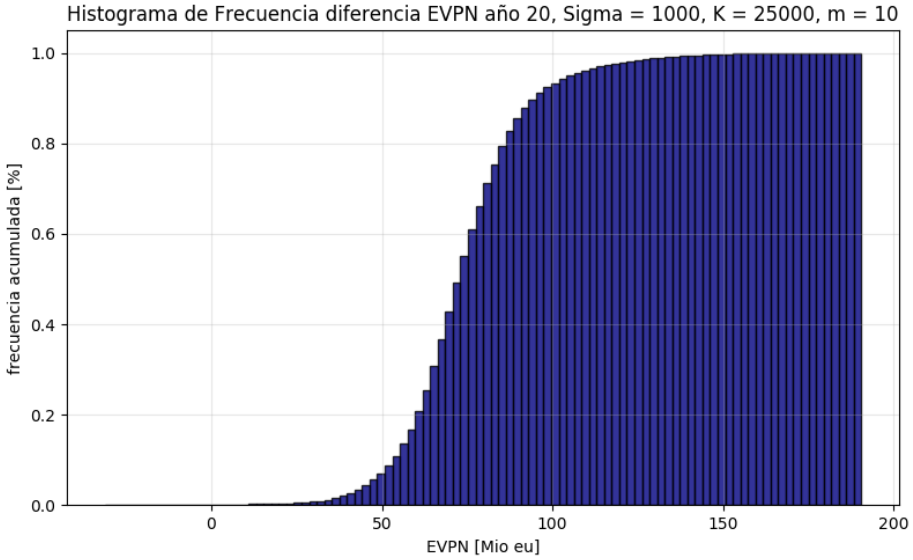


Gráfico 8: Histograma de Frecuencia de la Diferencia de EVPN entre las dos plantas, caso inicial

Al estudiar la diferencia del EVPN en el año 20 entre ambos conceptos de planta, podemos ver que, en la gran mayoría de los casos, la planta modular presenta un EVPN superior por entre 50 y 100 $[Mio\ eu]$. La diferencia máxima observada en las simulaciones es de

aproximadamente 180 [$Mio\ eu$], aunque la probabilidad estimada de obtener sobre 100 [$Mio\ eu$] es un poco menor al 10%.

La valoración económica se basa en la utilización de la política encontrada. Para encontrar esta política se busca, en cada camino y cada periodo, el camino entre los simulados para determinar la política que posea la demanda más perecida en el periodo estudiado. Una vez encontrado el camino, se instala el modulo si, y solo si, la acción el camino encontrado y para la cantidad de módulos instalados (o en construcción) es la de instalar. La cantidad promedio de módulos instalados se grafica a continuación.

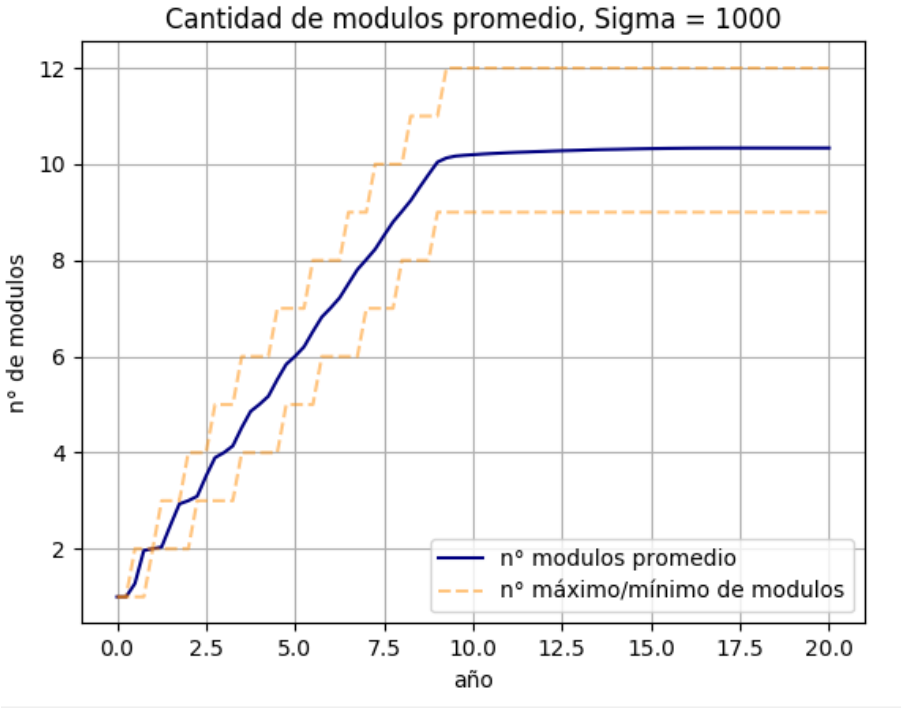


Gráfico 9: n° de Módulos Instalados, caso inicial

Como se puede observar en el grafico anterior, en todo caso la acción del primer periodo es la de instalar un módulo. Luego de este periodo, la instalación promedio de módulos se asemeja a una recta con pendiente 0.9, i.e. en promedio se instalan 0.9 módulos por año hasta el año 10. La cantidad de módulos máximos y mínimos tienen un comportamiento escalado

más marcado. Para todos los casos, la cantidad mínima de módulos instalados al año 10 es de 9 módulos, mientras que la cantidad máxima es de 12.

A modo de estudiar el impacto de la incertidumbre en los resultados obtenidos, se realizara un análisis de sensibilidad tomando en cuenta seis valores diferentes para la desviación estándar de la demanda.

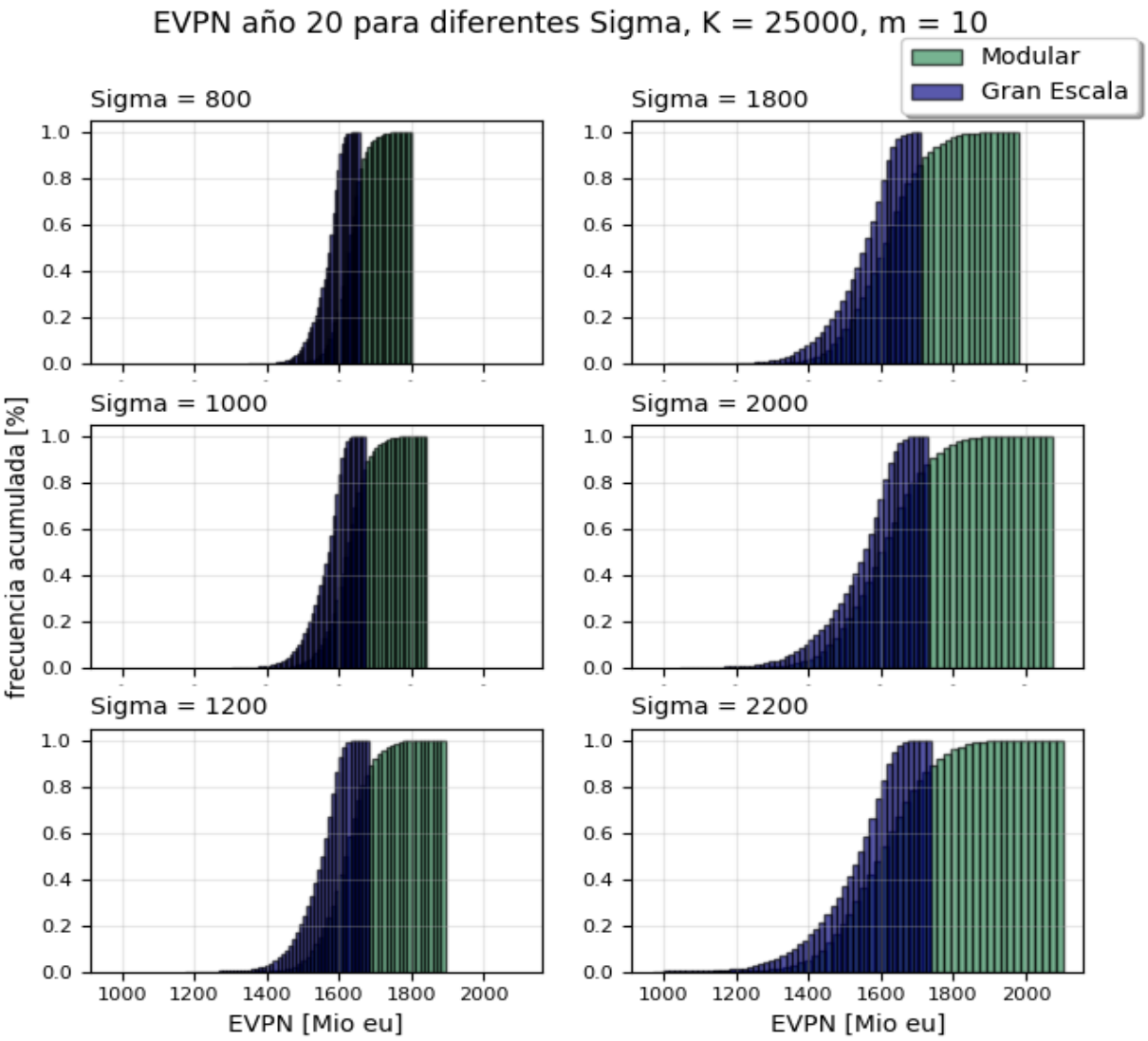


Gráfico 10: Frecuencia Acumulada del EVPN, análisis de sensibilidad

Al comparar los gráficos de frecuencia acumulada para el EVPN del año 20 para las distintas desviaciones estándar se puede ver cómo, para la planta de gran escala, a medida que la volatilidad de la demanda aumenta, la probabilidad acumulada de tener un EVPN menor aumenta. Esto se debe a que este tipo de planta no puede aprovechar los escenarios en donde la demanda es mayor a la esperada. Una volatilidad más alta implica a su vez la posibilidad de enfrentar escenarios de demanda más bajos, por lo que la probabilidad de tener un EVPN menor al esperado también aumenta. Es más, debido a que el beneficio no es una función lineal de la demanda, el beneficio esperado disminuye en ambos casos a medida que la volatilidad de la demanda aumenta.

Al comparar las politicas de inversion en los diferentes escenarios podemos ver que al aumentar la volatilidad de la demanda, la cantidad promedio de modulos insltalados luego del año 10 no aumenta de manera significativa.

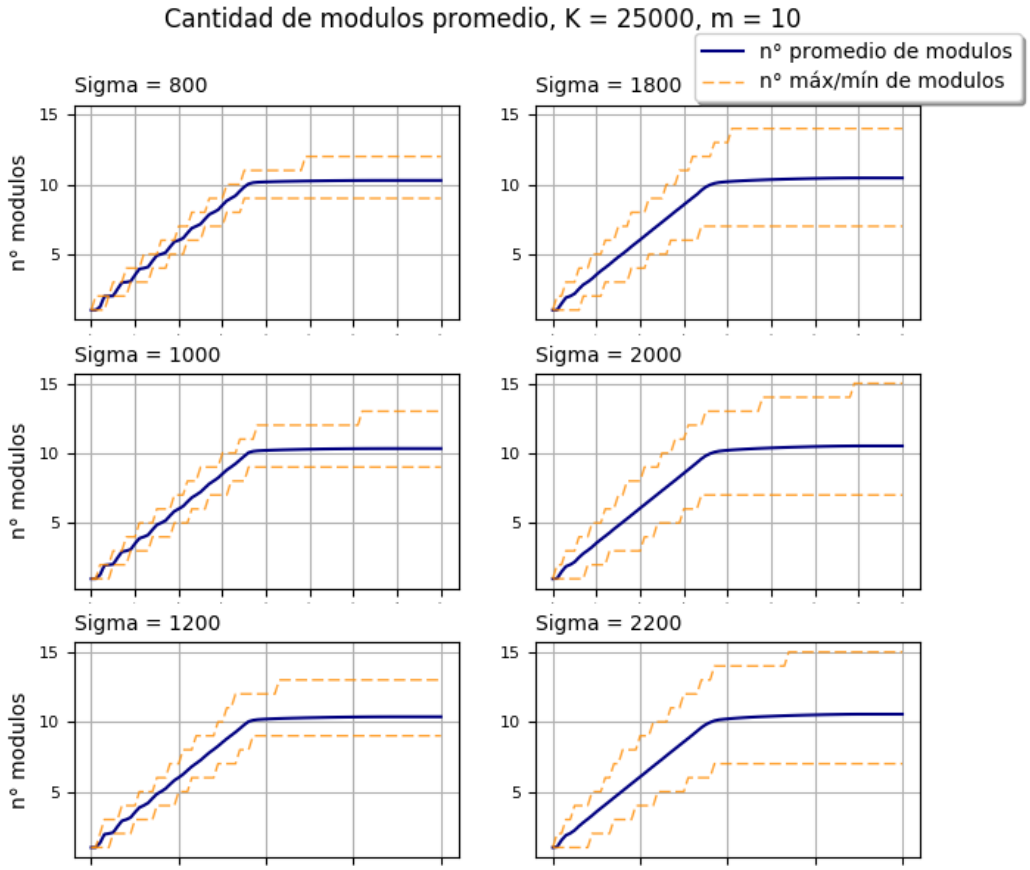


Gráfico 11: Cantidad de módulos, análisis de sensibilidad

En cuanto a la instalacion promedio durante los primeros 10 años, entre mayor sea la volatilidad, mayor esta se asemeja a una recta uniforme. Por otro lado, la diferencia entre la cantidad maxima/minima de modulos instalados y la cantidad promedio de modulos instalados, aumenta significativamente al aumentar la volatilidad.

Debido a que diseñara una planta de gran escala para satisfacer la demanda esperada no es la única opción, se decidió estudiar el caso en que la planta de gran escala este diseñada con una capacidad máxima mayor a la demanda esperada. Para hacer eso se asumió que la demanda creciera de forma lineal solamente hasta noveno año, a modo que la estructura de costos para ambos casos no cambie. La idea de este análisis es la de generar un sistema de producción a gran escala que pueda suplir toda la demanda, en la gran mayoría de los casos. Este diseño elimina la ventaja que el sistema modular tenia para adaptarse a los escenarios positivos.

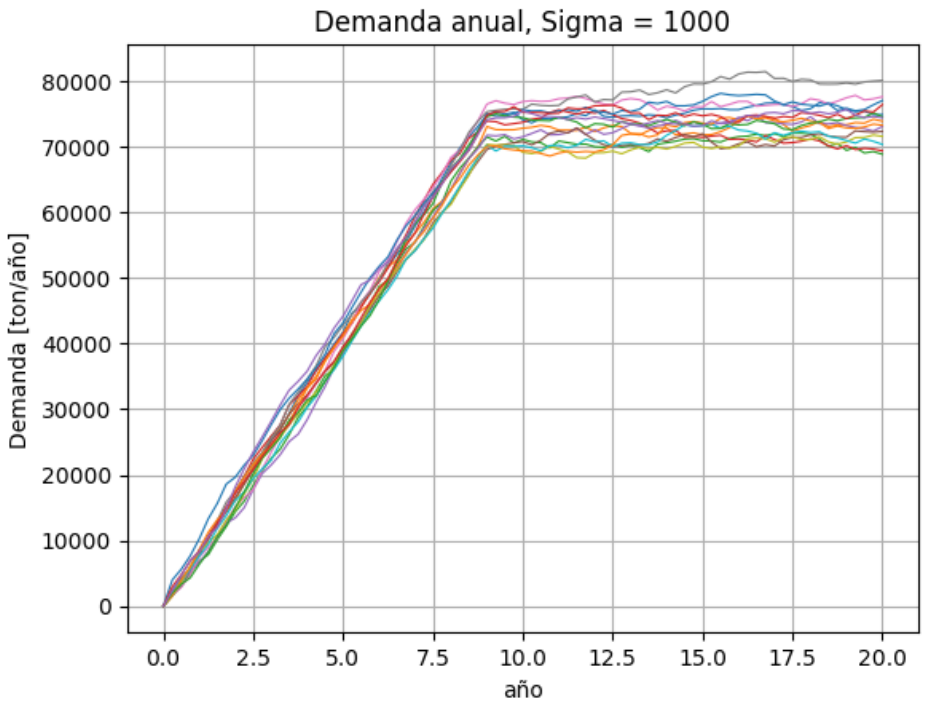


Gráfico 12: Simulaciones con demanda esperada 72.000 [ton/año]

La demanda esperada para el año 10 en adelante será de $72.000\ [ton/año]$, lo que significa que el diseño de la planta a gran escala está hecho para tener, en promedio, un 10% de capacidad ociosa.

Gracias a las propiedades de los movimientos brownianos, la variabilidad de la demanda aumenta con el tiempo a una razón de $\sqrt{dt} * \sigma$. Esto significa que, si bien la demanda esperada es la misma para los últimos diez años, esta es más volátil en el último periodo. Como se puede observar en el histograma a continuación, la probabilidad de que la demanda este por sobre la capacidad de la planta de gran escala es de aproximadamente un 5%.

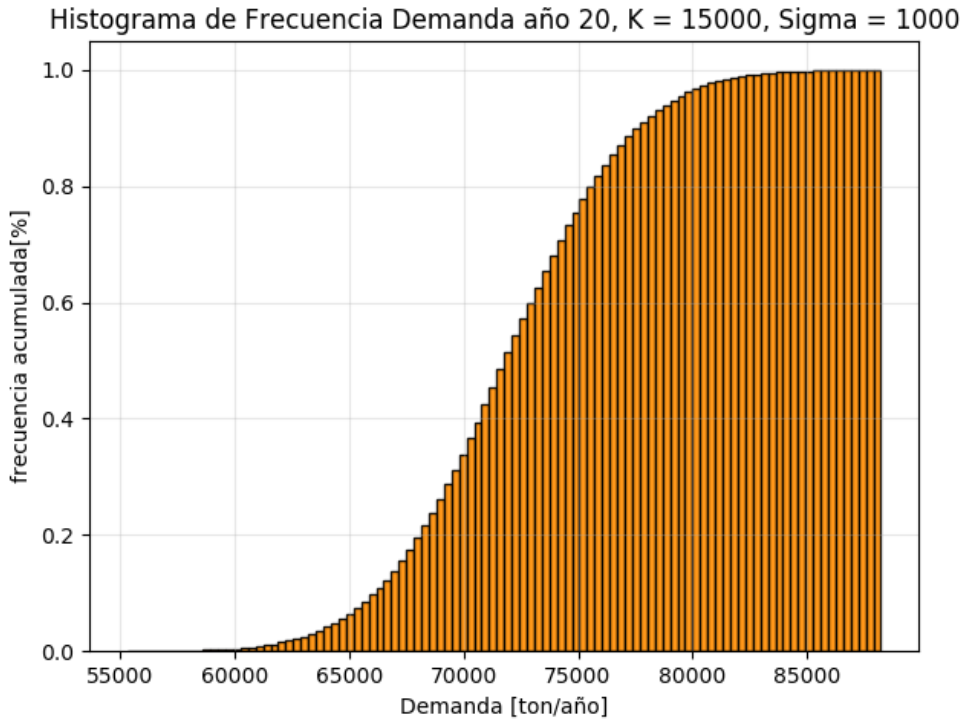


Gráfico 13: Frecuencia acumulada demanda año 20

Al observar el EVPN para este escenario, podemos ver que la planta tipo modular sigue siendo económicamente superior. El impacto de este cambio se puede ver en el histograma de frecuencia del EVPN en el año 20, en donde la distribución de este último para la planta de gran escala se asemeja más a una distribución normal. Esto se debe a que en la gran mayoría de los casos, esta planta está supliendo toda la demanda.

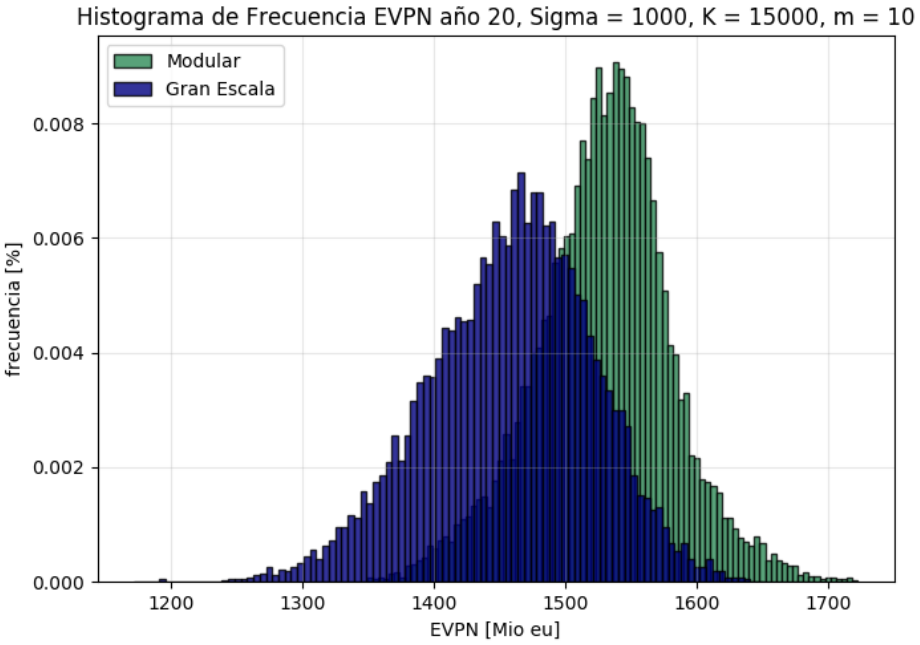


Gráfico 14: Frecuencia EVPN, demanda esperada 72.000 [ton/año]

A partir de esto podemos concluir que, si bien la flexibilidad para adaptarse a los escenarios positivos impacta en el retorno del proyecto, esta no es la razón principal por la cual la planta tipo modular posee un EVPN mayor en los casos estudiados hasta el momento.

Para estudiar una segunda fortaleza de un concepto de producción modular, i.e. menor tiempo de desarrollo y construcción, se asumirá que la utilización mínima requerida para operar sea de un 25%, y no de un 50%. En este caso la construcción de la planta de gran escala puede comenzar en el periodo 0, ya que la demanda esperada a los dos años y medio (tiempo de construcción) es equivalente al 25% de la capacidad total. Observando el EVPN para este caso, podemos concluir que la planta de gran escala es más eficiente económicamente que la planta tipo modular, ya que al séptimo año de operación, está ya posee un EVPN mayor.

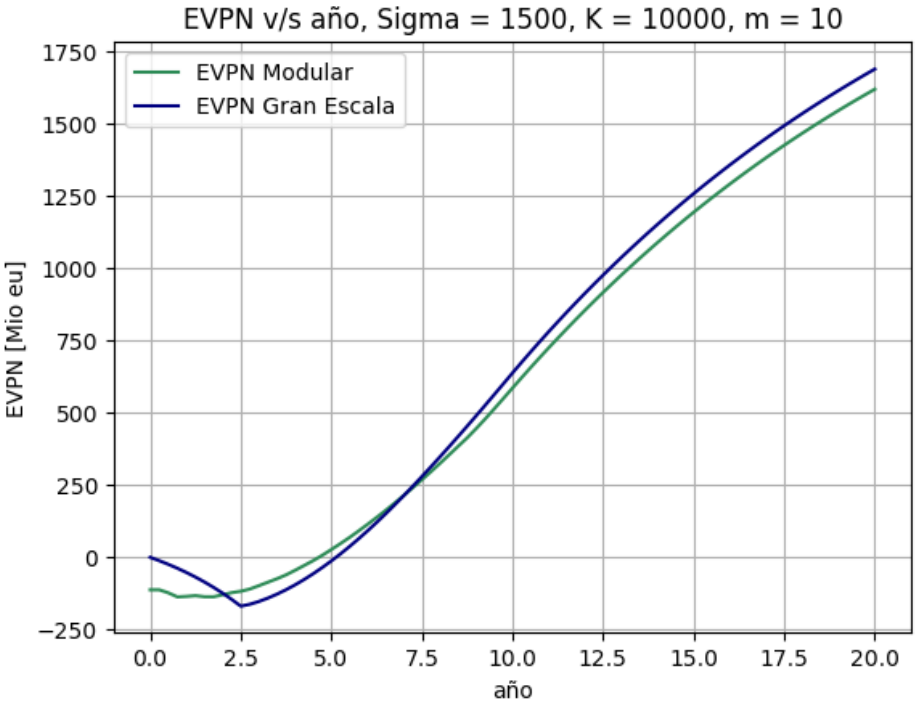


Gráfico 15: EVPN, demanda esperada 72.000 [ton/año]

La disminución de la utilización mínima implica un desplazamiento en la distribución del EVPN al año 20. Observando los histogramas para este caso, podemos ver claramente como en la gran mayoría de los casos la planta de gran escala genera un beneficio mayor al de la planta tipo modular. Esto significa que si bien la flexibilidad para adaptarse a los escenarios positivos sigue teniendo un rol en los resultados, como se puede ver en los pocos casos en que la planta modular obtiene un beneficio superior, no es suficiente como para sopesar la perdida de eficiencia producto de las economías de escala.

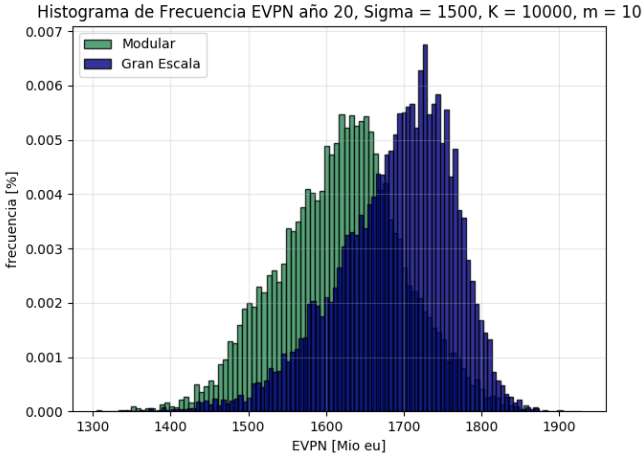


Gráfico 17: Frecuencia EVPN, demanda esperada 72.000 [ton/año]

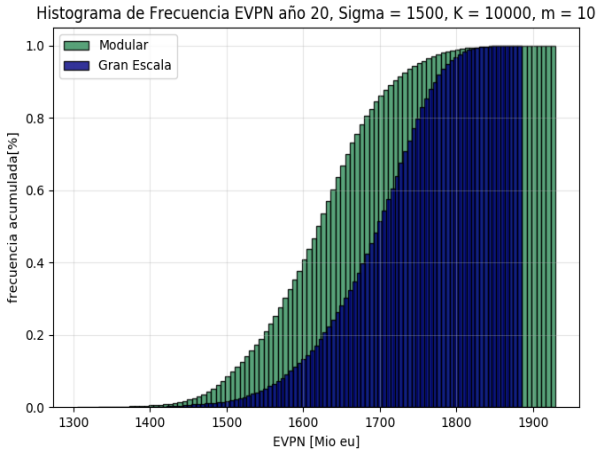


Gráfico 16 Frecuencia acumulada EVPN, demanda esperada 72.000 [ton/año]

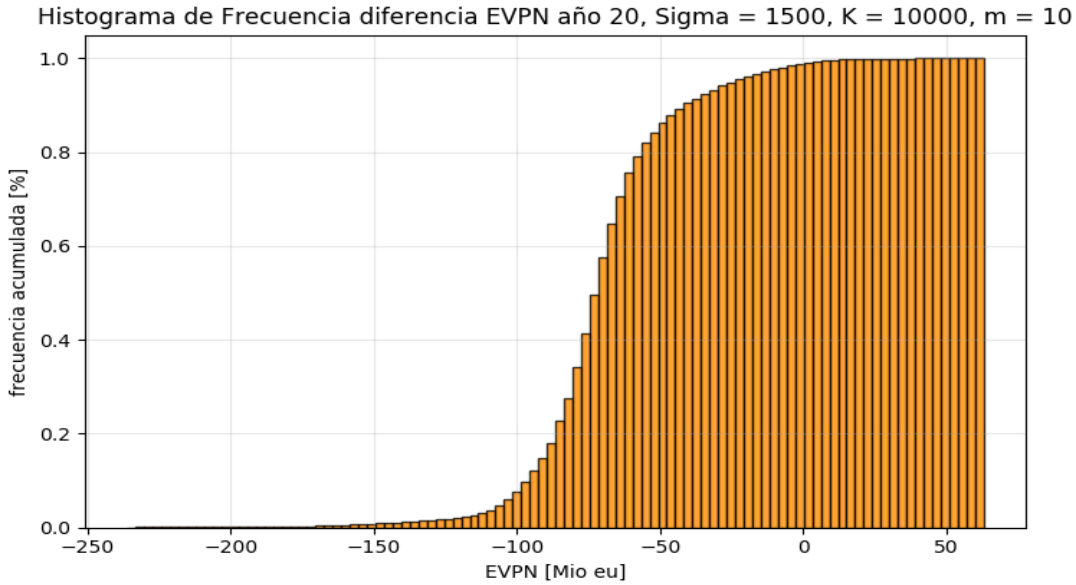


Gráfico 18: Frecuencia Acumulada, diferencia EVPN

Al cambiar este supuesto no solo se está disminuyendo el tiempo de la inversión, si no que a su vez se está disminuyendo la necesidad de poder adaptarse a peores escenarios. Para el ultimo escenario estudiado, se asumirá que la demanda inicial en el primer periodo es de 30.000 $[ton/año]$, y que la demanda crecerá linealmente a una tasa esperada de 5.000.

Debido a que la demanda esperada del año 2.5 es mayor a la utilización mínima de la planta de gran escala, esta planta puede ser construida en el periodo 0.

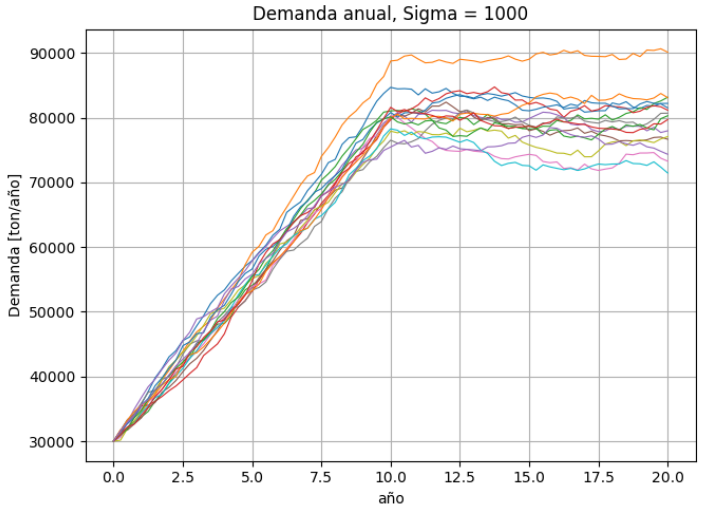


Gráfico 21: Simulación demandad, demanda inicial 30.000[ton/año]

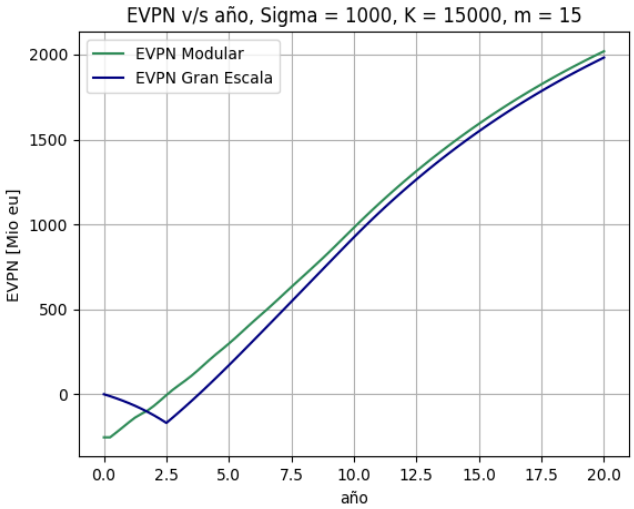


Gráfico 20: EVPN, demanda inicial 30.000[ton/año]

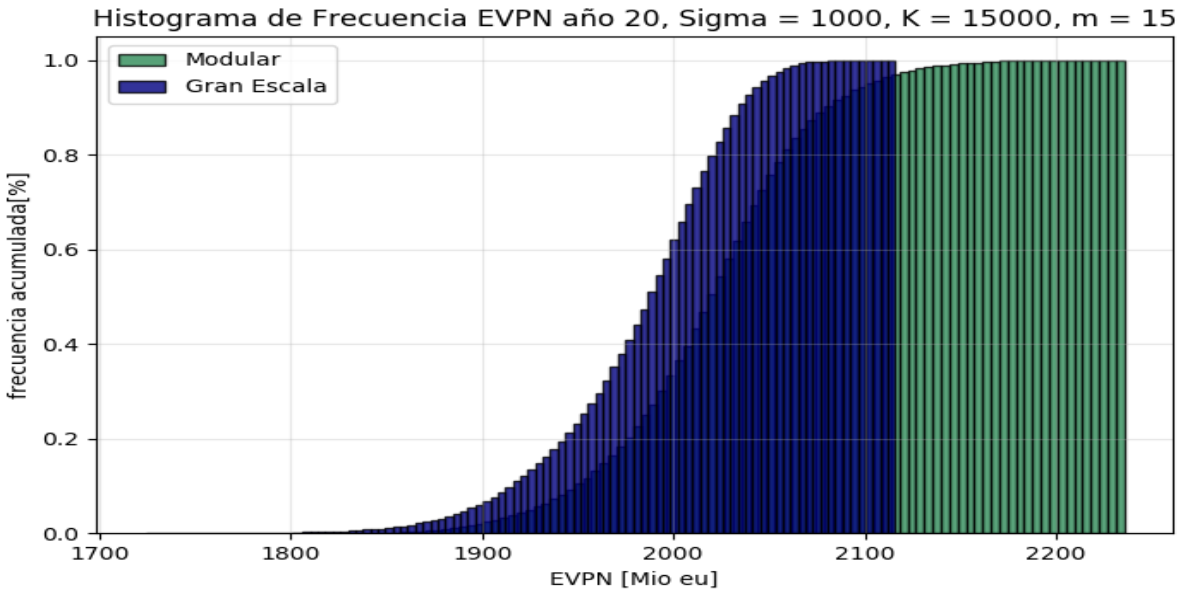


Gráfico 19: Frecuencia acumulada EVPN, demanda inicial 30.000 [ton/año]

Nuevamente podemos observar que en este caso la planta modular es económicamente superior. Esto se debe, en primer lugar, a que la planta modular tiene un tiempo de desarrollo y construcción menor, lo que le permite obtener mayores ingresos durante los primeros dos

años y medio. Al comparar este escenario con el anterior, se puede ver que la cantidad de módulos instalados en el primer periodo es mayor. Esto se debe a que la demanda inicial no puede ser suplida por solo un módulo. Esta mayor demanda permite que este tipo de planta obtenga suficientes ingreso durante los primeros años como para que, en conjunto con la flexibilidad de adaptarse a mejores escenarios, genere un resultado económicamente superior.

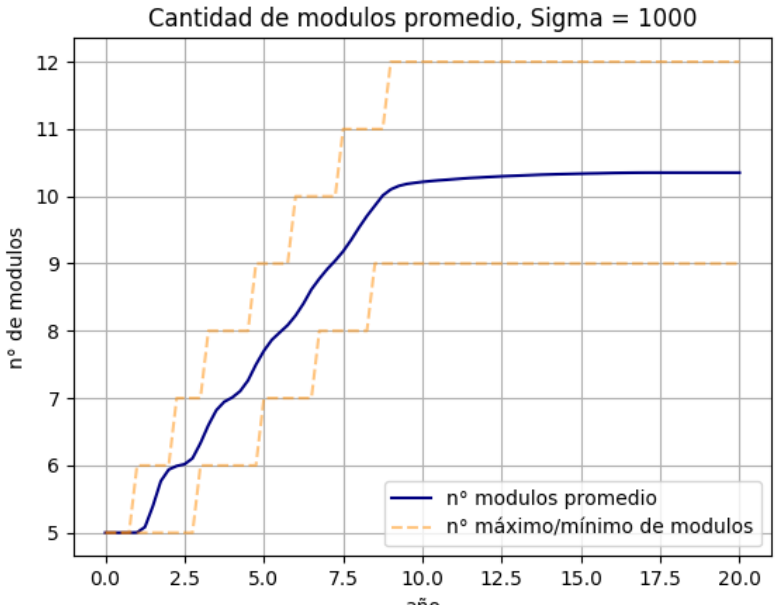


Gráfico 22: Cantidad de Módulos, demanda inicial 30.000 [ton/año]

6. Conclusiones

Como se observó en los resultados, la flexibilidad en el sistema de producción, aclarando que solamente se estudió un tipo de flexibilidad, genera un valor extra al sistema de producción.

Entre mayor sea la volatilidad, mayor será este beneficio, ya que la diferencia entre los casos posibles será mayor, y la adaptabilidad a estos más importante.

Al estudiar la estructura de costos de ambos tipos de fábrica, principalmente enfocándonos en los costos de inversión y de mano de obra, se puede ver que la construcción de 10 módulos es 2.3 veces más costosa que la construcción de la fábrica de gran escala. Debido a que la inversión se realiza durante un tiempo prolongado, si la inversión de ambas plantas comenzara en el mismo periodo, los costos de inversión de la planta de gran escala tendrán un menor impacto en el valor presente. Además de lo anterior, debido a que la inversión en módulos comienza antes que la inversión para la planta de gran escala, los flujos negativos producto de la instalación de los primeros módulos tendrán un peso mayor en el valor presente neto, mientras que los módulos instalados después del tercer año tendrán un impacto menor, en comparación con la inversión de la planta de gran escala. En cuanto a los costos de mano de obra, la necesidad de un mayor número de operarios para la planta tipo modular genera un costo operacional mayor, y por ende un beneficio operacional menor en este tipo de plantas.

Con nuestro primer cálculo pudimos determinar que, bajo los supuestos utilizados, el concepto de producción modular es superior económicamente a la planta de producción de gran escala. Esto se debe principalmente a dos efectos. El primero de ellos es la flexibilidad de capacidad que este tipo de planta posee, como ya fue comentado. El segundo efecto es la posibilidad de operar antes, debido tanto al menor tiempo de planeación y construcción, como a la necesidad de operar bajo una utilización mínima eficiente. En este caso el tiempo de construcción no impacta en los resultados, ya que el tiempo requerido para que la demanda esperada sea igual a la capacidad mínima eficiente es mayor al tiempo de construcción.

Para determinar cuál de estos efectos es más relevante, se relajó el supuesto de la utilización mínima, exigiendo solo una utilización del 25% para poder operar. Los resultados de este caso nos demuestran que la principal razón por la cual la planta tipo modular es económicamente superior es gracias a su velocidad de construcción. Si bien esto es cierto, la relajación de este supuesto hace innecesaria la flexibilidad del sistema de producción modular para ajustarse a escenarios más adversos.

Nuestro último escenario contempla una demanda inicial de 30.000 $[ton/año]$ con un aumento esperado de la demanda de 5.000. Bajo este supuesto, la demanda esperada será de 80.000 $[ton/año]$, y a su vez la demanda al año 2.5 será superior a la utilización mínima, por lo que la construcción de la planta de gran escala puede comenzar al inicio del periodo de estudio. En este escenario, el concepto modular es nuevamente el más conveniente. Esto se debe a que durante los primeros tres años, en los cuales la planta de producción a gran escala solo puede producir por seis meses, la planta modular logra obtener ingresos suficientes para hacerla económicamente superior.

Como ya fue mencionado anteriormente, el caso estudiado no refleja la realidad de la industria química Chilena. Observando la estructura de costos, especialmente el precio de venta y el margen bruto, se puede determinar que se trata de un mercado de alto valor. Este caso se utilizó más para la demostración de la metodología de opciones reales estudiada, y en un futuro la evaluación de un caso que presente una estructura de costos más representativa sería muy interesante.

Por último, un elemento no considerando dentro del estudio fue el impacto de no satisfacer la totalidad de la demanda durante los primeros años del proyecto. Desde un punto de vista estratégico, la demanda insatisfecha durante los primeros años podrá ser aprovechada por un competidor para entrar y posicionarse en el mercado. El efecto estratégico de poder adaptarse de mejor forma a la demanda (tanto en cantidad como en requisitos específicos) existente en un sistema de producción flexible no es evaluado.

Referencias

Abdulmalek, F. A., Rajgopal, J., & Needy, K. L. (2006). A Classification Scheme for the Process Industry to Guide the Implementation of Lean. *Engineering Management Journal*, 15-25.

Brach, M. (2003). *Real Options in practice.* New Jersey: Wiley & Sons, Inc.

Bramsiepe, C., Sievers, S., Seifert, T., Stefanidis, G. D., Vlachos, D. G., Schnitzer, H., . . . Schembecker, G. (2012). Low-cost small scale processing technologies for production applications in. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 32-52.

Buchholz, S. (2010). Future manufacturing approaches in the chemical and pharmaceutical industry. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 993-995.

Cardin, M.-A., & Hu, J. (2016). Journal of Mechanical Design. *Journal of Mechanical Design*, 011401.

Carolan, J. E., Joshi, S. V., & Dale, B. E. (2007). Technical and Financial Feasibility Analysis of Distributed Bioprocessing Using Regional Biomass Pre-Processing Centers. *Journal of Agricultural & Food Industrial Organization*.

Carrier, J. (1996). Valuation of the early-exercise price for options using simulations and nonparametric regression. *Insurance: Mathematics and Economics*, 19-30.

de Celis, J. R. (2016). *Gestión Estratégica, Apuntes de Clases Universidad Ténica Federio Santa Maria.*

DECHEMA. (2016). *Modular Plants: Flexible chemical production by modularization and standarization - status quo and future trends.* Frankfurt: DECHEMA e.V.

ElMaraghy, H. A. (2005). Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 261-276.

Glasserman, P. (2003). *Monte Carlo Methods in Financial Engineering.* New York: Springer- Verlag New York, Inc.

Hady, Ł., & Wozny, G. (2010). Computer-aided web-based application to modular plant design. *Computer Aided Chemical Engineering*, 685-690.

Hohmann, L., Kössl, K., Kockmann, N., Schembecker, G., & Bramsiepe, C. (2016). Modules in Process Industry - A life cycle definition. *Chemical Engineering and Processing*.

Longstaff, F., & Schwartz, E. (2001). Valuing American Options by Simulation: A Simple Least-Squares Approach . *The Review of Financial Studies*, 113-147.

Maurovich-Horvat, L., De Reyck, B., Rocha, P., & Siddiqui, A. (2016). Optimal Selection of Distributed Energy Resources Under Uncertainty and Risk Aversion. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 462-474.

Page, P. (2015, June 23). *www.wsj.com*. Retrieved from https://www.wsj.com/articles/after-reaching-historic-lows-logistics-costs-are-primed-to-rise-1435010935

Pindyck, R. S., & Dixit, A. K. (1994). *Investment under Uncertainty.* New Jersey: Princeton University Press.

Rauch, E., Dallasega, P., & Matt, D. (2016). Sustainable production in emerging markets through Distributed Manufacturing Systems (DMS). *Journal of Cleaner Production 135*, 127-138.

Sapag, N. (2011). *Proyectos de Inversión: Formulación y Evaluación.* Santiago: Pearson Educación de Chile S.A.

Shreve, S. E. (2004). *Stochastic Calculus for Finance II.* New York: Springer-Verlag New York.

Siddiqui, A. S., Marnay, C., Firestone, R. M., & Zhou, N. (2007). Distributed Generation with Heat Recovery and Storage. *Journal of Energy Engineering*.

Sievers, S., Seifer, T., Franzen, M., Schembecker, G., & Bramsiepe, C. (2017). Fixed capital investment estimation for modular production plants. *Chemical Engineering Science, Volume 158*, 395-410.

Sievers, S., Seifert, T., Schembecker, G., & Bramsiepe, C. (2016). Methodology for evaluating modular production concepts. *Chemical Engineering Science*, 153-166.

Stentoft, L. (2004). Assessing the Least Squares Monte-Carlo Approach to American Option Valuation. *Review of Derivatives Research*, 129-168.

Tsitsiklis, J., & van Roy, B. (1999). Optimal stopping of Markov processes: Hilbert space theory, approximation algorithms, and an application to pricing high-dimensional financial derivatives. *IEEE Transactions on Automatic Control* , 1840-1851.

Tsitsiklis, J., & van Roy, B. (2001). Regression methods for pricing complex American-style options. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 694-703.

van Kranenburg, K., Sofra, S., Verdoes, D., & de Graaff, M. (2015). *Small-scale flexible plants - Towards a more agile and competitive EU chemical industry.* TNO report.

van Otterlo, M., & Wiering, M. (2012). Reinforcement Learning and Markov Decision. In M. Wiering, & M. van Otterlo, *Reinforcement Learning: State-of-the-Art* (pp. 3-42). New York: Springer Heidelberg.

Ventus Publishing Aps. (2008). *Corporate Finance.* Ventus Publishing Aps.

Wörsdörfer, D., Lier, S., & Crasselt, N. (2016). Real options-based evaluation model for transformable plant designsin the process industry. *Journal of Manufacturing Systems 42*, 29-43.

Wörsdörfer, D., Lier, S., & Grünewald, M. (2015). Potential analysis model for case specific quantification of the degree of eligibility of innovative production concepts in the process industry. *Chemical Engineering and Processing:*, 123 - 136.