



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

**Trabajo Fin de Grado**  
**CURSO 2017/2018**

---

*METODOLOGÍA BASADA EN LA SIMULACIÓN DE  
EVENTOS DISCRETOS PARA LA GESTIÓN DE  
RIESGOS EN UNA LÍNEA DE FABRICACIÓN  
CONTINUA*

---

**Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales**

**ALUMNO**

Manuel Esparís Silva

**TUTOR**

Adolfo Lamas Rodríguez

**FECHA**

FEBRERO 2018

## TÍTULO Y RESUMEN

### ***Metodología basada en la simulación de eventos discretos para la gestión de riesgos en una línea de fabricación continua***

## Resumen

La simulación de los procesos de fabricación es, en la actualidad, un ámbito muy importante para el desarrollo de nuevos proyectos y de mejora de los antiguos. Es una herramienta que permite visualizar lo que podría suceder en un futuro dadas unas determinadas circunstancias que se pueden actualizar constantemente. Debido a esto, es una herramienta que permite realizar una toma de decisiones lo más real posible tanto a corto, medio y largo plazo en una empresa.

Por otro lado, la gestión de riesgos es una actividad importante que forma parte de la gestión de proyectos. En tanto en cuanto es muy importante analizar los posibles riesgos al comienzo del proyecto, más lo es aún llevar a cabo un seguimiento de los riesgos que aparecen a lo largo de la ejecución del mismo. Aquí se pueden aplicar planes de mitigación sobre los riesgos identificados, e incluso éstos pueden suponer una oportunidad en el proyecto.

## Resumo

A simulación dos procesos de fabricación é, na actualidade, un ámbito moi importante para o desenvolvemento de novos proxectos e de mellora dos antigos. É unha ferramenta que permite visualizar o que podría ocorrer nun futuro dadas unhas determinadas circunstancias que se poden actualizar constantemente. Debido a isto, é unha ferramenta que permite realizar unha toma de decisións o mais real posible tanto a curto, medio e largo prazo nunha empresa.

Por outro lado, a xestión de riscos é unha actividade importante que forma parte da xestión de proxectos. En tanto en canto é moi importante analizar os posibles riscos ao comezo do proxecto, mais o é aínda levar a cabo un seguimento dos riscos que aparecen ao longo da execución do mesmo. Aquí pódense aplicar plans de mitigación sobre os riscos identificados, e incluso estes poden supoñer unha oportunidade no proxecto.

## Abstract

The simulation of manufacturing processes is a very important area for the development of new projects and the improvement of old ones. It is a tool that allows you to visualize what could happen in any certain circumstances and which can be constantly updated. It is a tool that allows making decisions as real as possible, both short, medium and long term.

On the other hand, risk management is an important activity that is part of project management. It is always important to analyze the possible risks at the beginning of the project, as well as to carry out a follow-up of the risks that appear throughout the execution of the same. Here, mitigation plans can be applied on the identified risks, which could be also an opportunity for the project.



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

**TRABAJO FIN DE GRADO  
CURSO 2017/2018**

---

*METODOLOGÍA BASADA EN LA SIMULACIÓN DE  
EVENTOS DISCRETOS PARA LA GESTIÓN DE  
RIESGOS EN UNA LÍNEA DE FABRICACIÓN  
CONTINÚA*

---

**Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales**

**Documento**

**MEMORIA**

**ÍNDICE**

|   |    |
|---|----|
| Título y Resumen.....   | 2  |
| Índice.....   | 4  |
| Índice de Figuras.....  | 6  |
| Índice de Tablas.....   | 8  |
| 1 Introducción.....   | 9  |
| 2 Objetivos.....  | 12 |
| 3 Antecedentes.....   | 13 |
| 3.1 Industria 4.0.....  | 13 |
| 3.2 Energía Eólica.....   | 13 |
| 3.3 Riesgos en los Proyectos.....                                   | 15 |
| 3.4 La simulación en la gestión de riesgos.....                     | 15 |
| 3.5 Navantia.....   | 16 |
| 3.6 Unidad Mixta de Investigación (UMI).....                        | 18 |
| 4 Procedimiento de Gestión de Riesgos.....                          | 20 |
| 4.1 Planificación y Gestión de Riesgos.....                         | 20 |
| 4.1.1 Categorización del proyecto.....                              | 20 |
| 4.1.2 Metodología para la gestión de riesgos.....                   | 21 |
| 4.2 Identificación de Riesgos.....                                  | 22 |
| 4.3 Evaluación Cualitativa de Riesgos.....                          | 22 |
| 4.3.1 Valoración de la probabilidad de ocurrencia de un riesgo..... | 23 |
| 4.3.2 Valoración de la severidad del impacto del riesgo.....        | 24 |
| 4.3.3 Niveles de riesgo.....  | 26 |
| 4.4 Evaluación Cuantitativa de Riesgos.....                         | 26 |
| 4.5 Planes de Acción: Mitigación y Contingencia.....                | 27 |
| 4.6 Seguimiento y Control de Riesgos.....                           | 29 |
| 4.6.1 Indicadores de riesgos.....                                   | 29 |
| 4.6.2 Informes de riesgos.....                                      | 30 |
| 5 Descripción del Proceso de Fabricación.....                       | 32 |
| 5.1 Introducción.....   | 32 |
| 5.2 Fabricación de pilotes.....                                     | 33 |
| 5.2.1 Recepción del material.....                                   | 34 |
| 5.2.2 Corte y Biselado.....   | 34 |
| 5.2.3 Curvado de las chapas.....                                    | 35 |
| 5.2.4 Soldadura longitudinal y ensamblaje.....                      | 36 |

|  |    |
|--|----|
| 5.2.5 Soldadura circular .....                                     | 37 |
| 5.2.6 Test no destructivo y marcado de la sección .....            | 39 |
| 5.2.7 Inspección visual y Load-Out .....                           | 40 |
| 6 Desarrollo de la interfaz de integración entre módulos .....     | 41 |
| 6.1 Módulo de simulación de Montecarlo .....                       | 43 |
| 6.2 Módulo de simulación de eventos discretos .....                | 43 |
| 6.3 Módulo de resultados y gestión de riesgos .....                | 45 |
| 7 Desarrollo de los modelos de simulación .....                    | 48 |
| 7.1 Modelo de simulación de Montecarlo .....                       | 48 |
| 7.2 Modelo de simulación de eventos discretos .....                | 49 |
| 8 Resultados .....   | 57 |
| 8.1 Validación del modelo de simulación de eventos discretos ..... | 57 |
| 8.2 Validación del optimizador de eventos discretos .....          | 59 |
| 8.3 Diseño de un plan de mitigación para un caso real .....        | 63 |
| 9 Conclusiones .....   | 70 |
| 10 Futuras Líneas de Trabajo .....                                 | 71 |
| 11 Bibliografía .....  | 72 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Industria 4.0 (Fuente: (España 2015)).....                                   | 9  |
| Figura 2: Modelo de simulación en 3D y 2D.....   | 10 |
| Figura 3: Diagrama de flujo del uso de la simulación en los procesos.....              | 10 |
| Figura 4: Evolución de la industria (Fuente: (España 2015)).....                       | 13 |
| Figura 5: Evolución de costes en la eólica marina (Fuente: Paper Winds of change)..... | 14 |
| Figura 6: Localización de las instalaciones de Navantia (Fuente: Web Navantia) .....   | 17 |
| Figura 7: Jackets del proyecto Wikinger.....   | 17 |
| Figura 8: Jackets del proyecto East Anglia One.....                                    | 18 |
| Figura 9: Diagrama de flujo del procedimiento de gestión de riesgos.....               | 21 |
| Figura 10: Diagrama de flujo evaluación cualitativa de riesgos .....                   | 23 |
| Figura 11: Mapa ejemplo de distribución de criticidades .....                          | 31 |
| Figura 12: Partes principales de la jacket.....  | 32 |
| Figura 13: Diagrama de flujo de la fabricación de jackets .....                        | 33 |
| Figura 14: Diagrama de flujo de la fabricación de pilas .....                          | 34 |
| Figura 15: Biselado de una chapa lista para soldar .....                               | 34 |
| Figura 16: Curvado de las chapas.....  | 35 |
| Figura 17: Curvado de chapas .....   | 35 |
| Figura 18: Máquina de prensado .....   | 36 |
| Figura 19: Soldadura longitudinal de una parte de un pilote.....                       | 36 |
| Figura 20: Ensamblaje de dos partes de un pilote.....                                  | 37 |
| Figura 21: Máquina para soldadura circular interna .....                               | 38 |
| Figura 22: Máquina fija para soldadura circular externa .....                          | 38 |
| Figura 23: Máquina para las soldaduras circulares externas.....                        | 39 |
| Figura 24: Marcas de los pilotes .....   | 40 |
| Figura 25: Pilotes en la zona de almacenamiento .....                                  | 40 |
| Figura 26: Integración de los dos módulos.....   | 41 |
| Figura 27: Interfaz de usuario de los dos módulos.....                                 | 42 |
| Figura 28: Parámetros de entrada al modelo de simulación.....                          | 44 |
| Figura 29: Estado actual de la fabricación de pilotes .....                            | 45 |
| Figura 30: Resumen de avance de fabricación .....                                      | 45 |
| Figura 31: Resultados obtenidos en la simulación .....                                 | 46 |
| Figura 32: Adelantos o retrasos respecto a la línea base.....                          | 47 |
| Figura 33: Curva S teórica de la fabricación de pilotes.....                           | 47 |
| Figura 34: Resultados de la simulación de Montecarlo con @Risk .....                   | 48 |
| Figura 35: Diagrama de Gantt de la fabricación de pilotes .....                        | 49 |

---

|   |    |
|---|----|
| Figura 36: Modelo de simulación de ExtendSim.....                             | 49 |
| Figura 37: Bloques de entrada y salida de datos del modelo de simulación..... | 50 |
| Figura 38: Creación de ítems para la simulación.....                          | 50 |
| Figura 39: Bloque resumen de la línea de fabricación de pilotes.....          | 51 |
| Figura 40: Fabricación de pilotes según la estrategia constructiva.....       | 52 |
| Figura 41: Cálculo de los costes y beneficio del proyecto .....               | 53 |
| Figura 42: Mesas de trabajo disponibles para la fabricación .....             | 56 |
| Figura 43: Sábados y tercer turno disponibles en la fabricación.....          | 56 |
| Figura 44: Escenario línea base.....  | 58 |
| Figura 45: Representación del uso de las mesas en el proyecto.....            | 59 |
| Figura 46: Parámetros del optimizador .....                                   | 60 |
| Figura 47: Escenario con 3 días de retraso .....                              | 61 |
| Figura 48: Resultados validación del algoritmo .....                          | 62 |
| Figura 49: Utilización de las mesas.....                                      | 63 |
| Figura 50: Previsión del uso de las mesas de trabajo .....                    | 63 |
| Figura 51: Comparativa entre el avance real y planificado .....               | 64 |
| Figura 52: Escenario con parada de la fabricación sin mitigación .....        | 65 |
| Figura 53: Diagrama de flujo de los dos módulos de simulación integrados..... | 66 |
| Figura 54: Probabilidades de retraso de los hitos.....                        | 67 |
| Figura 55: Curvas S teórica y real .....                                      | 67 |
| Figura 56: Resultados del plan de mitigación .....                            | 68 |
| Figura 57: Curvas S con el plan de mitigación aplicado .....                  | 69 |
| Figura 58: Modelo de simulación en 3D .....                                   | 71 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1: Líneas de investigación de la UMI .....         | 19 |
| Tabla 2: Normas aplicables a la gestión de riesgos ..... | 20 |
| Tabla 3: Categorización de los proyectos.....            | 21 |
| Tabla 4: Índices de Probabilidad .....                   | 24 |
| Tabla 5: Índices de Impacto .....                        | 24 |
| Tabla 6: Nivel de impacto en coste .....                 | 25 |
| Tabla 7: Nivel de impacto en plazo .....                 | 25 |
| Tabla 8: Nivel de impacto en prestaciones.....           | 25 |
| Tabla 9: Índice de Criticidad (IC) .....                 | 26 |
| Tabla 10: Nivel de Riesgo en función de IC .....         | 26 |
| Tabla 11: Niveles de urgencia en función del IC .....    | 28 |
| Tabla 12: Costes del modelo de simulación .....          | 55 |
| Tabla 13: Datos del escenario de la línea base.....      | 58 |

## 1 INTRODUCCIÓN

La industria está actualmente inmersa en un proceso de transformación motivada por el desarrollo e implantación de nuevas tecnologías: impresión 3D, Realidad Virtual (RV) y Realidad Aumentada (RA), Modelado y Simulación de procesos (M&S), etc. Este cambio es tan importante, que ha dado lugar a una nueva revolución industrial, la 4ª a lo largo de la historia. Conocida como Industria 4.0, esta revolución industrial también afecta al sector naval, siendo este proceso de transición hacia la fábrica inteligente, dando lugar al nuevo término de Astillero 4.0.



Figura 1: Industria 4.0 (Fuente: (España 2015))

En este proceso de adaptación de la Industria 4.0 al Astillero 4.0 se encuentra inmerso Navantia, y para lograr esta adaptación se ha acordado establecer una colaboración con la Universidad de la Coruña (UDC) en el campo del I+D+i, a partir de la cual nace en 2015 la unidad mixta de investigación Navantia Universidad de la Coruña (UMI).

A lo largo de su corto período de existencia, en la UMI se han creado diversas líneas de investigación centradas en la optimización de procesos y el desarrollo de nuevas herramientas para acercar la digitalización, la robotización y las nuevas tecnologías a los productos que se desarrollan en las instalaciones de Navantia, la fabricación de buques y estructuras offshore tipo jacket.

En la actualidad, una de las líneas de investigación de la UMI con mayor interés, es la de "Modelado y simulación de procesos de eólica marina". Es una de las líneas con más interés en la actualidad, debido a que el mercado de la energía eólica offshore se encuentra en una etapa de expansión en Europa, donde ha duplicado su capacidad instalada en los últimos 3 años. Actualmente la capacidad total instalada es de 12.631 MW, y con previsión para el 2020 de 24.6 MW (**EWEA 2017**), siendo la energía eólica offshore la más dinámica en términos de capacidad instalada y desenvolvimiento de la tecnología desde el 2010.

Esta actuación presenta unos objetivos tales como:

- Aumentar la potencia unitaria, acompañado de una disminución del coste de las cimentaciones y el mantenimiento
- Incremento del control del proyecto y reducción de los riesgos

- Optimización de los procesos de fabricación en serie
- Mejora de la logística en todo el proceso de fabricación

Para alcanzar estos objetivos la mencionada línea de investigación desarrolla modelos de simulación de 2D y 3D, dándole uso a los modelos tanto en los primeros compases del proyecto (fase comercial), como en el seguimiento de obra, y el análisis final del proyecto.

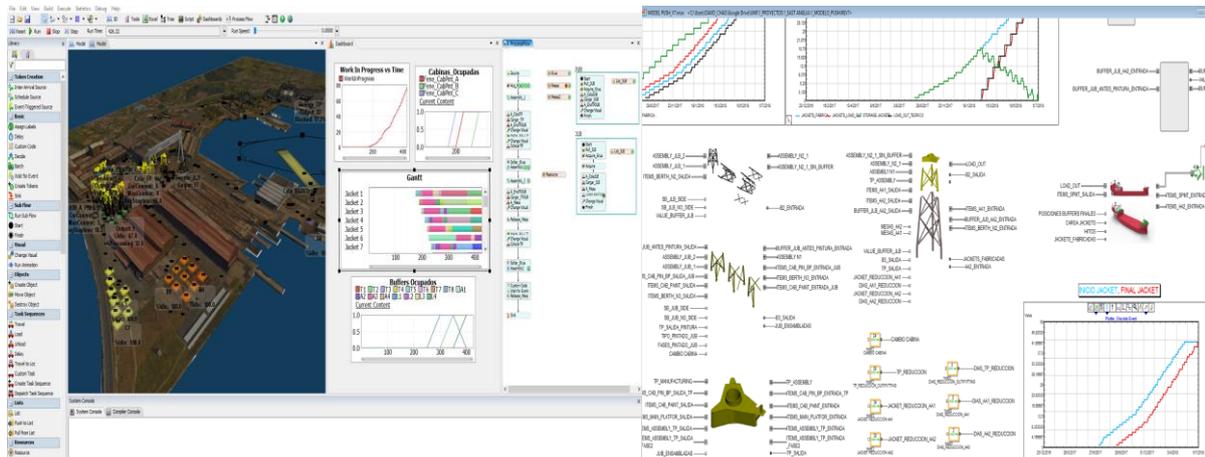


Figura 2: Modelo de simulación en 3D y 2D

Con esta amplitud de escenarios en los que es posible el uso de la simulación, es interesante destacar que a día de hoy la simulación es una herramienta imprescindible para lograr el buen funcionamiento de una empresa. La simulación nos capacita para representar y estudiar procesos reales y complejos, permitiéndonos realizar sobre el modelo transformaciones con la intención de predecir la respuesta futura de nuestro proceso real. Se habla del término Industria 4.0 como una amplia gama de conceptos actuales, siendo uno de los conceptos los Cyber-physical system (CPS), donde el nivel físico y digital se mezclan surgiendo sistemas cuya representación física y digital no pueden diferenciarse de una manera razonable.

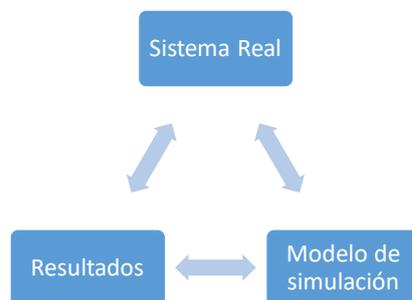


Figura 3: Diagrama de flujo del uso de la simulación en los procesos

Al mismo tiempo, cada vez es más frecuente y necesario, que las empresas dediquen recursos al proceso de gestión de riesgos y oportunidades, siendo en muchos casos incluso obligatorio de cara a la adquisición de contratos.

Para el desarrollo de este proyecto se ha empleado como caso de estudio la línea de fabricación de pilotes del proyecto de East Anglia One, estructuras que sirven de anclaje a las

Jackets. Se ha elegido este proceso de fabricación puesto que es un proceso que se está llevando a cabo en la actualidad, y del cual se han realizado tareas de gestión de riesgos a la vez que se desarrolló el proyecto que han permitido comprobar el funcionamiento de la herramienta desarrollada.

Por otro lado, destacar el valor e importancia de la realización de las prácticas en un proyecto real como East Anglia One, que ha facilitado la comprensión de la estrategia constructiva y secuenciación de fabricación, tiempos de fabricación y fechas de recepción de materiales. Con esto se pudieron crear escenarios lo más reales posibles y comprobar el funcionamiento del software de simulación. También cabe mencionar la posibilidad de asistir a las reuniones de riesgos del proyecto y ver de primera mano cómo se lleva a cabo la gestión de riesgos de un proyecto en la actualidad.

## 2 OBJETIVOS

El principal objetivo de este trabajo de fin de grado es el desarrollo de una herramienta paramétrica y modular destinada a la gestión de riesgos que integre la simulación de Montecarlo y la simulación de eventos discretos.

La herramienta contará con dos módulos principales, el primer módulo será desarrollado con base en la simulación de Montecarlo, siendo, por lo tanto, un módulo de simulación estática, es decir, no depende del tiempo para ejecutar la simulación. Este módulo deberá ser capaz de evaluar de forma cuantitativa los riesgos derivados de un proyecto de fabricación en un astillero. El segundo módulo será desarrollado con base en la simulación de eventos discretos, simulación dinámica, y deberá ser capaz de elaborar planes de mitigación en base a los datos obtenidos del módulo de simulación de Montecarlo.

Para la obtención de resultados que nos ayuden a alcanzar este fin, se han definido unos objetivos intermedios para el proyecto:

1. Desarrollar un modelo de simulación de Montecarlo y un modelo de simulación de eventos discretos que representen de forma fidedigna la estrategia constructiva de fabricación de pilotes
2. Desarrollar una interfaz de unión entre los módulos desarrollados.
3. Estudiar la metodología de gestión de riesgos e integrarla a los modelos de simulación
4. Realizar diferentes escenarios para la cuantificación de riesgos derivados del proyecto de fabricación y la posterior obtención de planes de mitigación específicos para cada riesgo si fuera necesario
5. Analizar los diferentes planes de mitigación obtenidos para cada riesgo, en cuanto a su aplicabilidad en el proyecto real y su impacto económico, haciendo la comparativa de costes antes y después de aplicar los planes de mitigación

A su vez, con este proyecto se mostrará el potencial de la simulación aplicado a la gestión de riesgos, tanto a la hora de realizar un análisis cuantitativo de los posibles riesgos del proyecto como de analizar en cuanto a plazo y coste los efectos de las modificaciones en la estrategia constructiva del proyecto.

## 3 ANTECEDENTES

### 3.1 Industria 4.0

El concepto de Industria 4.0 referido a la cuarta revolución industrial consiste en la introducción de las tecnologías digitales en la industria, consiguiendo un aumento del grado de automatización de los procesos.



**Figura 4: Evolución de la industria (Fuente: (España 2015))**

Actualmente se pretende ir modernizando las plantas de producción hasta transformarlas en fábricas inteligentes, caracterizadas por un intercambio continuo e instantáneo de información entre los diferentes puestos de trabajo. Propiciando así un uso más eficiente de los recursos, como un incremento en el grado de adaptación a las necesidades y a los procesos productivos.

La recopilación de datos generados por los diferentes elementos de la línea de fabricación, permite producir una réplica virtual de la totalidad o parte de esa cadena, posibilitando generar simulaciones de los procedimientos que se deseen. Facilitando así que el personal a cargo se familiarice con todo lo relacionado con su puesto de trabajo: herramientas, elementos de trabajo, procesos, etc. Toda esta información sería de gran ayuda, tanto para el personal que trabaja en la línea de fabricación como para el personal auxiliar de mantenimiento, para posibles reparaciones o irregularidades que se presenten. Y poder responder con una mayor rapidez y eficacia ante cualquier imprevisto.

### 3.2 Energía Eólica

La Unión Europea tiene unos objetivos ambiciosos en el campo de la política ambiental y energética. El nuevo <<paquete legislativo clima-energía>> establece como objetivo obligatorio, a nivel nacional, alcanzar una cuota del 20% de energías renovables en el consumo total de energía de la Comunidad Europea en 2020, y un objetivo mínimo obligatorio

de alcanzar un 10% para la cuota de energía renovable en el consumo del transporte por todos los estados miembros para el 2020.

Como fuente acreditada de energía limpia y asequible, los recursos eólicos tienen claramente que desempeñar un papel vital a la hora de hacer realidad estos objetivos. Así pues, no es de extrañar que el sector de la energía eólica haya crecido de forma exponencial en los últimos años. Las proyecciones de la Asociación Europea de Energía Eólica (**EWEA**) sugieren que el sector de la energía eólica seguirá creciendo rápidamente.

Las energías marinas y más concretamente la energía eólica marina, van a contribuir de manera muy significativa la creciente demanda de energía eléctrica y con un mínimo impacto sobre el clima. La energía marina (wind offshore, en terminología inglesa) tiene un potencial de desarrollo muy elevado y ha comenzado a desarrollarse a finales de la primera década de este siglo y, está creciendo a un ritmo elevado en Europa. Tan sólo en el Reino Unido las cifras evidencian este desarrollo: “más de 11.000 MW instalados a 2015 y 150.000 MW en 2030, alcanzando un 14% de la cobertura de la demanda total de electricidad, a nivel europeo.”.

Con todo esto, los costos de la energía eólica marina, aunque se redujeron bastante siguen siendo objeto de estudio para reducirlos todo lo posible, como se puede apreciar en la Figura 5. Los costos de los parques eólicos marinos son altos debido a las condiciones a las que están expuestos, por tanto, su mantenimiento es alto, además de los costos de la red de transmisión desde el lugar de producción hasta las subestaciones

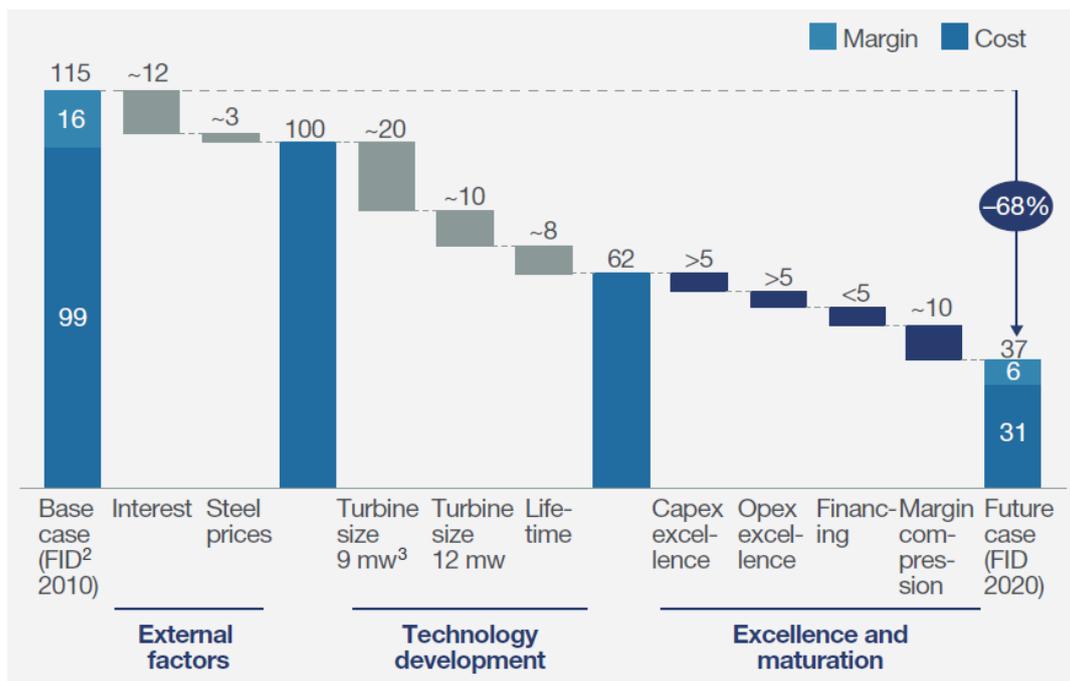


Figura 5: Evolución de costes en la eólica marina (Fuente: Paper Winds of change)

Al inicio, las turbinas instaladas en los parques eólicos eran de 3-4 MGW y a unas distancias sobre la costa menores de 50 metros. Ahora están en el mercado turbinas de 8-10 MGW y para el 2024 se prevén modelos de 13-15 MGW, por lo que los costos por MGW/hora se reducen considerablemente. Aparte de este aumento de potencia de las turbinas, cada vez los parques eólicos se instalan a más distancia sobre la costa, consiguiendo un flujo de viento más estable y mayor capacidad de producción de energía.

En este tema se sigue trabajando, dado que al instalar los parques eólicos a mayores distancias implica también una mayor profundidad y, por tanto, las bases para soportar las

turbinas tienen que estar dotadas de una mayor altura. A consecuencia de esto se requiere una mayor cantidad de acero, incrementando su peso. Por eso es muy importante el estudio de estas estructuras para conseguir instalarlas a mayores distancias, pero sin aumentar demasiado su coste aun teniendo en cuenta que la capacidad de producción será mayor que a menores distancias.

### **3.3 Riesgos en los Proyectos**

Los riesgos son inherentes a los proyectos. Por eso, será necesario realizar una gestión de riesgos eficiente para minimizar su probabilidad e impacto.

La gestión de riesgos es una parte integral de la dirección de proyectos, siendo un elemento clave en el proceso de toma de decisiones. Cualquier empresa que vaya a comenzar un nuevo proyecto se enfrenta al reto de invertir dinero en personal, equipamiento e instalaciones, formación, suministros y gastos financieros. El mejor modo de evitar el fracaso del proyecto, que en ocasiones puede llegar a originar la ruina de la organización, es la utilización de ciertas herramientas que permiten gestionar los riesgos.

Como parte de la gestión del riesgo de un proyecto, es preciso definir una política de riesgos del proyecto con objeto de mantener los riesgos inherentes dentro de límites definidos y aceptados. Esta política debe de estar de acuerdo con la política de riesgos de la organización, de manera que la identificación y el tratamiento de los riesgos sean consistentes y homogéneos en todos los proyectos.

Se entiende por riesgo de un proyecto, un evento o condición que, si ocurre, tiene un efecto sobre los objetivos del proyecto. Los riesgos pueden ser positivos o negativos. Los riesgos negativos influyen negativamente sobre alguno o varios objetivos del proyecto, por ejemplo:

- Aumento de los costes del proyecto
- Retrasos de proyecto
- Disminución de calidad
- Impacto en el medio ambiente
- Perdida o daños a personas o propiedades

Es necesario gestionar estos riesgos de manera que su efecto sobre el proyecto sea nulo o mínimo. También existe una concepción de riesgos como oportunidad, en cuyo caso se habla de riesgos positivos. En este caso lo que se pretende mediante la gestión de riesgos es incidir sobre los factores que puedan provocar la aparición de riesgos.

La gestión de riesgos consta de cuatro procesos (identificación, análisis, planificación de la respuesta y supervisión, y control de riesgos) que se describirán en el Procedimiento de Gestión de Riesgos.

### **3.4 La simulación en la gestión de riesgos**

El proceso de gestión de riesgos es una acción compleja y sistemática, en la que debe participar todo el equipo de proyecto. A pesar de que hoy en día es posible acceder a gran cantidad de información, también es cierto que el riesgo aumenta, y la influencia que estos tienen en el sistema es cada vez mayor. Por esto, una adecuada gestión de riesgos es vital para mantener nuestra inversión.

Es habitual en los últimos años encontrar numerosas publicaciones aplicadas a la gestión de riesgos mediante simulación de Montecarlo y simulación de eventos discretos, pero casi todas ellas están dedicadas a la cadena de suministro, sin abordar el proceso de fabricación,

por ese motivo se ha decidido importar los conocimientos de diversos autores en materia de simulación aplicada a gestión de riesgos a un proceso de fabricación.

Para abordar estos conocimientos se ha hecho una revisión bibliográfica sobre el tema mencionado, y del cual hemos destacado las siguientes citas.

(**Singh and Schmitt 2009**) estudió el impacto en el servicio al cliente de las interrupciones en un servicio de productos para clientes utilizando Montecarlo y la simulación de eventos discretos. Usaron su herramienta para evaluar el nivel de riesgo de la interrupción de la cadena de suministro, probando diferentes planes de mitigación, pueden usar la herramienta en caso de una interrupción para validar los pasos de recuperación antes de ponerlo en acción e identificar la redundancia en el sistema.

(**Kim and Kim 2017**) diseñó una herramienta basada en la simulación de eventos discretos para cuantificar monetariamente los riesgos independientemente de la profundidad de la información y así permitir el ajuste del modelo en función del caso de uso.

(**Hojjati, 2015**) utiliza la simulación de Montecarlo para evaluar los riesgos en distintas etapas de un proyecto de IT usando el software Primavera Risk Analysis, concluyendo que las propuestas iniciales del plazo de entrega y coste pueden ser insuficientes para llegar a los objetivos debido a los riesgos y la variabilidad en el proyecto que no se tuviera en cuenta.

Resulta muy interesante el artículo (**Rezaie, 2007**), pues en él se habla de la importancia de la dependencia entre los distintos riesgos evaluados. Los autores destacan que en una simulación normal de Montecarlo estas dependencias entre variables no son evaluadas (por ejemplo, la reducción del plazo de entrega y el aumento de coste por ese sobre esfuerzo) llevando a resultados confusos. Por este motivo, proponen un método alternativo, consistente, en la declaración en cada iteración de una variable libre y la definición de otras como variables dependientes de la primera y de las otras declaradas.

Mientras tanto, también es posible encontrar diferentes autores que usan las técnicas de simulación de eventos discretos para analizar los riesgos, su impacto sobre el modelo y el estudio de los posibles planes de mitigación.

En (**Cube et al. 2016**), se combina el uso de técnicas de Montecarlo con las de simulación de eventos discretos para el análisis económico en la cuantificación de riesgos, generando datos con Montecarlo y representando la evolución de los modelos y los costes con los eventos discretos.

### 3.5 Navantia

Navantia es una empresa pública que se dedica a la construcción naval, tanto civil como militar, con más de 300 años de experiencia. Pertenece a la Sociedad Estatal de Participaciones Industriales (SEPI) que depende del Ministerio de Hacienda y Función Pública, la cual controla todo el capital. Dispone de instalaciones en Fene, Ferrol, Madrid, Cádiz, Puerto Real, San Fernando y Cartagena, como se muestran en la Figura 6.



**Figura 6: Localización de las instalaciones de Navantia (Fuente: Web Navantia)**

Concretamente en el astillero de Fene, es donde se desarrollan los proyectos de eólica marina a los cuales se hace referencia en este proyecto. Navantia se ha consolidado como referente en el campo de la construcción naval militar en el mundo, siendo uno de los principales activos de la industria española. Al mismo tiempo, Navantia, cuenta con otras líneas de actividad, entre las que destaca la eólica marina, con proyectos recientes como las 29 jackets fabricadas para el proyecto Wikinger de Iberdrola que aportó al astillero de Fene unas 800.000 horas de trabajo, siendo éste su primer proyecto de eólica marina. En la Figura 7 se pueden apreciar algunas de las jackets de ese proyecto.



**Figura 7: Jackets del proyecto Wikinger**

Actualmente se está desarrollando el proyecto de East Anglia One que consta de 42 jackets y, en este caso, a diferencia del proyecto anterior, las jackets constan de 3 patas en lugar de 4 y cuya altura también es mayor debido a que se instalarán a mayor profundidad. Esta diferencia se puede apreciar en la Figura 8.



**Figura 8: Jackets del proyecto East Anglia One**

El principal reto de Navantia de cara a los próximos años es “ser sostenible y competitiva” a nivel mundial, un escenario en el que la innovación tecnológica juega un papel determinante. Para ello se ha tomado como referencia el modelo alemán de Industria 4.0, además, se intensificó la relación de la empresa con la universidad, surgiendo la Unidad Mixta de Investigación (UMI) de la Universidad de A Coruña, dada la importancia que tiene la educación en este ámbito.

Con este contexto de fondo, la línea de actuación de la UMI se centrará en dos aspectos fundamentales: Por un lado, el desarrollo de herramientas que permitan aumentar el grado de automatización en las técnicas de preparación, corte, unión, ensamblaje y tratamiento. Por otro, la optimización productiva de un “astillero virtual” que permita simular diferentes diseños y estrategias constructivas, sin necesidad de actuar sobre un sistema real.

El modelo de Astillero 4.0 de Navantia prevé incorporar tecnologías como el internet de las cosas, robótica colaborativa, big data, simulación de procesos y ciberseguridad. Viéndose reflejado todo esto en la simulación virtual del proceso. Para ello es importante la realización de mejoras en el Astillero, las cuales algunas de ellas se están llevando a cabo en el Astillero de Ferrol.

### **3.6 Unidad Mixta de Investigación (UMI)**

El día 16 de noviembre del 2015 se formalizó en el Campus de Ferrol el acuerdo entre la Universidad de A Coruña, Navantia (SEPI) y la Xunta de Galicia para su colaboración en el desarrollo del Astillero 4.0 a través de una Unidad Mixta de Investigación (UMI) de la Universidad de A Coruña, ubicada en el Centro de Investigaciones Tecnológicas (CIT) en el Campus Industrial de Ferrol.

Esta UMI nace de la inquietud de Navantia por iniciar un profundo proceso de transformación orientado a la sostenibilidad de la empresa en el mercado del siglo XXI, siendo la innovación tecnológica un vector esencial en ese proceso.

El objetivo de la UMI es el desarrollo de nuevas técnicas y tecnologías que permitan incrementar la competitividad del astillero, mediante la mejora de los procesos productivos

existentes y el desarrollo de otros nuevos, de tal forma que se incremente la productividad y se reduzcan tiempos y costes.

El astillero será un espacio ciberfísico en el que convivirán el mundo ciber y el mundo real, interactuando en ambas direcciones, porque el concepto de Astillero 4.0 es, para Navantia, el único camino para conseguir la sostenibilidad competitiva y aún más, creemos que también lo es para todo el sector naval español (Carlos Merino Rego, director de la UMI).

En la UMI se establecen 4 líneas principales de investigación, con 16 actuaciones.

|  |   |
|--|---|
| <b>Process Optimization</b>                              | Modelling and simulation of shipbuilding processes                |
|  | <b><u>Modelling and simulation of offshore wind processes</u></b> |
|  | Process optimization  |
|  | Robotic and automation  |
|  | Project “Closed pipes”  |
|  | Statistical control   |
| <b>Information and Communications Technology (TIC´s)</b> | Workplace information and augmented reality                       |
|  | Industrial internet of things                                     |
|  | Auto ID pipes   |
| <b>Disruptive Technologies</b>                           | Project “Wireless”. Electrical system optimization                |
|  | Project “Wireless”. Transmission data system optimization         |
|  | Auto-reconfigurable systems                                       |
|  | Study about the use of additives                                  |
| <b>Other Technologies</b>                                | UAV´s use: outside and inside                                     |
|  | Cybersecurity   |

**Tabla 1: Líneas de investigación de la UMI**

En las cuales están trabajando 50 ingenieros de Navantia, 30 profesores e investigadores de la UDC y 17 ingenieros contratados por la UMI. Además, se ha incorporado a personal del Centro Tecnológico de Automoción de Galicia de la Universidad de Vigo, de la firma Siemens, de SCIO, haciendo que el equipo supera ya las 100 personas.

En lo referido al diseño en 3D y el mundo virtual, todas las acciones en las que trabajan los quince equipos de esta unidad tienen una aplicación práctica y casi inmediata a los procesos desarrollados en el astillero. Los investigadores comentan que la comunicación entre los productos y las máquinas inteligentes que conviven en el Astillero 4.0, dan lugar a un sistema complejo, en el que todo lo material tiene su equivalencia en el mundo virtual. De forma que primero se trabaja en el mundo virtual, donde los errores se corrigen fácilmente, para después ejecutarlos en el mundo real.

## 4 PROCEDIMIENTO DE GESTIÓN DE RIESGOS

La gestión de riesgos es una parte esencial de la gestión de un proyecto, que consiste en identificar y evaluar los riesgos con suficiente antelación para formular propuestas y facilitar la toma de decisiones y para aprobar y ejecutar las acciones o planes más adecuados para:

- Eliminar o reducir la criticidad de las amenazas
- Explotar o mejorar la criticidad de las oportunidades.

Los riesgos en los proyectos pueden ser debidos a diferentes factores: incumplimientos de plazos en la entrega de productos y/o servicios, incumplimiento con los estándares de calidad, incumplimiento de los procedimientos de fabricación, averías, retrasos, huelgas de personal, fenómenos meteorológicos...

Los procedimientos de gestión de riesgos están basados en normas: PECAL, ISO, AEC. A continuación, en la Tabla 2, se muestran las normas que se han tenido en cuenta para llevar a cabo los procedimientos de gestión de riesgos:

| NORMAS           |   |
|------------------|---|
| PECAL 2110       | Requisitos OTAN de aseguramiento de la calidad para el diseño, desarrollo y producción.                       |
| UNE-EN ISO 9001  | Sistemas de Gestión de la Calidad. Requisitos.  |
| AEC-R            | Recomendaciones para la Elaboración de Planes de Gestión de Riesgos de la AEC.                                |
| ISO 31000        | Risk Management – Principles and guidelines & Risk assessment techniques.                                     |
| UNE-EN ISO 31010 | Gestión de<br>I riesgo. Técnicas de apreciación del riesgo.   |
| IT 4201.01 B     | Instrucción técnica. Proceso de gestión de riesgos. Elaboración y evaluación de planes de gestión de riesgos. |

Tabla 2: Normas aplicables a la gestión de riesgos

### 4.1 Planificación y Gestión de Riesgos

#### 4.1.1 Categorización del proyecto

La categorización del proyecto se desarrolla de acuerdo con los criterios y niveles descritos en el procedimiento de gestión de riesgos de Navantia que hacen referencia a la norma P-C-CAL-008.

La metodología de gestión de riesgos aplicada al proyecto se realiza de acuerdo al nivel general del proyecto. El nivel general del proyecto se calcula teniendo en cuenta el nivel de complejidad del proyecto bajo los siguientes criterios: duración del proyecto, valor contractual del proyecto, subcontratistas, limitaciones, complejidad de la producción, etc.

Teniendo en cuenta todos estos criterios, se obtiene un score total del proyecto que se englobará dentro de un nivel según la Tabla 3. A raíz de este nivel de proyecto se aplicará una u otra metodología para la gestión de riesgos.

| Categoría | Puntuación |
|-----------|------------|
| 1         | 0 - 30     |
| 2         | 31 - 60    |
| 3         | 61 - 80    |

Tabla 3: Categorización de los proyectos

#### 4.1.2 Metodología para la gestión de riesgos

Los procedimientos aplicables a la gestión de riesgos están basados en un proceso iterativo coordinado por el gerente de riesgos y/o el director del proyecto. Estos diferentes procedimientos se enumeran a continuación:

- Procedimientos para identificar los riesgos
- Procedimientos de análisis de riesgos
- Procedimientos de evaluación y valoración de riesgos
- Procedimientos para el tratamiento de riesgos
- Procedimientos para reportar riesgos
- Procedimientos para monitorizar y revisar riesgos
- Los procesos de integración de las actividades de gestión de riesgos en la planificación y control del trabajo

Todos los procedimientos enumerados anteriormente se resumen en el diagrama de flujo de la Figura 9:

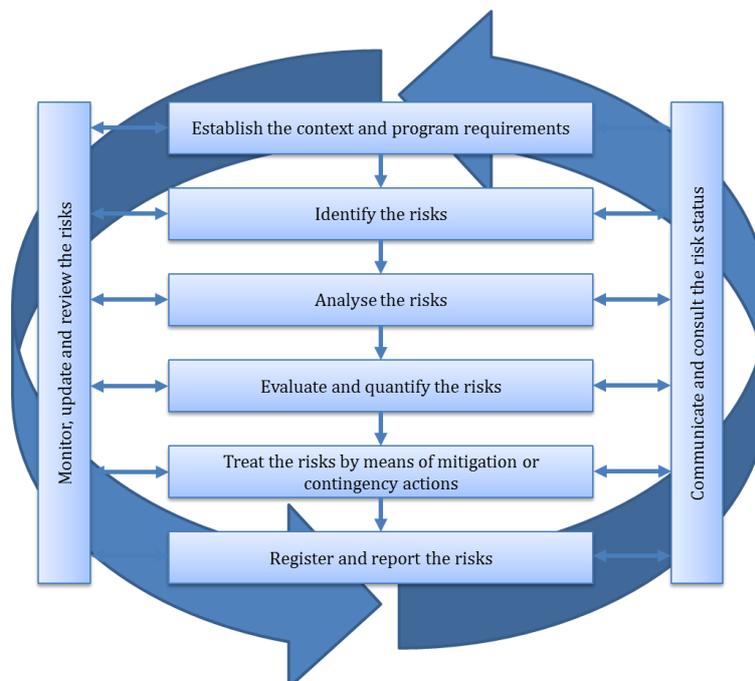


Figura 9: Diagrama de flujo del procedimiento de gestión de riesgos

## 4.2 Identificación de Riesgos

La identificación de los riesgos comienza lo antes posibles, en las etapas iniciales del proyecto y se repite durante todo el ciclo de vida del proyecto.

El objetivo es capturar todas las amenazas y oportunidades que puedan suponer un impacto: seguridad y salud, calidad, técnico, costes, partes interesadas... La identificación de los riesgos es administrada dentro del panel de riesgos y, agrupa las propuestas de toda la organización. Cualquier persona del programa puede identificar riesgos.

Las herramientas y técnicas que pueden usarse para la identificación de riesgos son:

- Revisiones a la documentación
- Técnicas de recopilación de información
- Análisis con lista de verificación
- Análisis de supuestos
- Análisis DAFO
- Juicio de expertos

La salida de este proceso de identificación de riesgos es la preparación de un registro de riesgos por el gestor de riesgos, es por esto que la correcta formulación del riesgo identificado es fundamental de cara a la definición y efectividad de los planes de acción. En ese sentido, causa, riesgo o evento y consecuencia tienen que estar muy claros. Se recomienda la formulación del riesgo como sigue: A causa de <...incluir la causa...> puede suceder que <...incluir el riesgo o efecto...> con la consecuencia de <...incluir la consecuencia...>.

## 4.3 Evaluación Cualitativa de Riesgos

Es el proceso de priorizar los riesgos para realizar otros análisis o acciones posteriores, evaluando y combinando la probabilidad de ocurrencia y el impacto de dichos riesgos. Esta fase se realiza de una forma subjetiva, en reuniones, en las que están presentes tanto el director del proyecto como los responsables de cada departamento.

Una vez identificado un riesgo se procede al proceso de su evaluación cualitativa, cuyo esquema simplificado es el de la Figura 10:

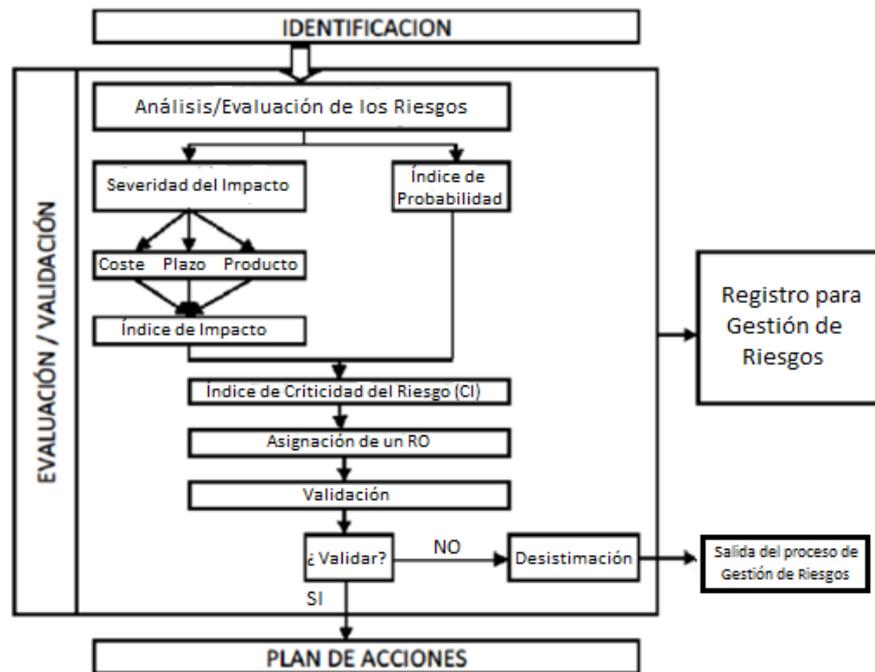


Figura 10: Diagrama de flujo evaluación cualitativa de riesgos

Para realizar la evaluación se estimarán:

- La probabilidad de ocurrencia del riesgo, dentro de un rango predeterminado (IP)
- El Impacto en Plazo, Coste y Prestaciones en caso de ocurrencia del riesgo, dentro de un rango predeterminado (II).

Una vez estimados los Índices de Probabilidad e Impactos, el riesgo se evalúa cualitativamente a través del valor del denominado Índice de Criticidad, siendo éste el producto de ambos valores:

$$IC = \text{Índice de Criticidad} = IP \times II \quad \text{(Ecuación 1)}$$

La valoración del impacto a cada riesgo (II) a incluir en el cálculo del IC se corresponderá con el mayor valor de los impactos estimados para los tres criterios (Plazo / Coste / Prestaciones).

Con el fin de facilitar la estimación de la probabilidad y los impactos se fijan a continuación unos criterios genéricos para ello.

#### 4.3.1 Valoración de la probabilidad de ocurrencia de un riesgo

Se define el Índice de Probabilidad de ocurrencia del riesgo de acuerdo con la Tabla 4.

| Índice de Probabilidad (IP) | Denominación (Español) | Probabilidad   |
|-----------------------------|------------------------|----------------|
| 1                           | Muy Baja               | 0% < P ≤ 10%   |
| 2                           | Baja                   | 10% < P ≤ 30%  |
| 3                           | Media                  | 30% < P ≤ 60%  |
| 4                           | Alta                   | 60% < P ≤ 90%  |
| 5                           | Muy Alta               | 90% < P ≤ 100% |

**Tabla 4: Índices de Probabilidad**

En caso de que resulte difícil la estimación subjetiva de la probabilidad, se puede usar el método de valoración “ponderada” de la probabilidad de ocurrencia de un riesgo. El método consiste en estimar una valoración de la probabilidad basada en “factores” de ponderación, contributivos o condicionantes / predominancia de la misma. Para ello se establecen una serie de factores cuya contribución a la probabilidad de ocurrencia de un Riesgo puede ser valorada. La lista de factores que afectan a la probabilidad puede variar para cada programa. Abajo están seleccionados los más genéricos que pueden ser de aplicación a cualquier programa. Cuando se utilice esta herramienta se recomienda aplicar como criterio de contribución o ponderación el siguiente:

- Para cada riesgo el valor de la probabilidad de materialización del riesgo se calcularía a partir de la contribución de cada factor a dicho valor de probabilidad de los incluidos en la tabla.
- Para cada riesgo se seleccionan los factores que afectarán más a la probabilidad y se les asigna un valor de probabilidad; el resto de factores no considerados como “influyentes” o relevantes para valorar la probabilidad tendrían contribución cero o nula.
- El criterio a aplicar para obtener la probabilidad de ocurrencia de un riesgo es el de “el peor de los casos”, es decir, tomar como válido el valor máximo asociado a uno de los factores anteriores.

#### 4.3.2 Valoración de la severidad del impacto del riesgo

La evaluación del impacto de un riesgo se realizará de acuerdo con los efectos sobre el plazo, coste y prestaciones. Se definen cinco índices de impacto del efecto de un riesgo, representados en la Tabla 5.

| Índice de Impacto (II) | Denominación (Español) |
|------------------------|------------------------|
| 1                      | Muy Bajo               |
| 2                      | Bajo                   |
| 3                      | Medio                  |
| 4                      | Alto                   |
| 5                      | Muy Alto               |

**Tabla 5: Índices de Impacto**

Para obtener el Índice de Impacto de un riesgo se recomienda tener en cuenta las 3 tablas que aparecen a continuación: la Tabla 6 para el impacto en coste, la Tabla 7 que hace referencia al impacto en plazo y por último la Tabla 8 en la cual se referencian la severidad de las prestaciones.

| Impacto en Coste (€) |          |           |           |           |           |
|----------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Valor Contrato (€)   | Muy Bajo | Bajo      | Medio     | Alto      | Muy Alto  |
| < 100.000            | < 1.000  | < 2.000   | < 3.000   | < 4.000   | ≥ 4.000   |
| < 500.000            | < 2.000  | < 4.000   | < 6.000   | < 8.000   | ≥ 8.000   |
| < 1.000.000          | < 3.000  | < 8.000   | < 12.000  | < 15.000  | ≥ 15.000  |
| < 5.000.000          | < 5.000  | < 10.000  | < 25.000  | < 50.000  | ≥ 50.000  |
| < 10.000.000         | < 10.000 | < 25.000  | < 50.000  | < 75.000  | ≥ 75.000  |
| < 50.000.000         | < 25.000 | < 50.000  | < 75.000  | < 150.000 | ≥ 150.000 |
| < 150.000.000        | < 50.000 | < 75.000  | < 150.000 | < 300.000 | ≥ 300.000 |
| ≥ 150.000.000        | < 75.000 | < 150.000 | < 300.000 | < 500.000 | ≥ 500.000 |

Tabla 6: Nivel de impacto en coste

| Impacto en Plazo (días) |          |      |       |       |          |
|-------------------------|----------|------|-------|-------|----------|
| Duración del Contrato   | Muy Bajo | Bajo | Medio | Alto  | Muy Alto |
| < 30 días               | < 1      | < 2  | < 3   | < 5   | ≥ 5      |
| < 90 días               | < 1      | < 3  | < 5   | < 10  | ≥ 10     |
| < 1 año                 | < 5      | < 10 | < 20  | < 30  | ≥ 30     |
| < 2 años                | < 5      | < 15 | < 30  | < 50  | ≥ 50     |
| < 3 años                | < 10     | < 20 | < 40  | < 60  | ≥ 60     |
| < 6 años                | < 15     | < 30 | < 50  | < 80  | ≥ 80     |
| ≥ 6 años                | < 30     | < 50 | < 80  | < 110 | ≥ 110    |

Tabla 7: Nivel de impacto en plazo

| Severidad en prestaciones | Muy bajo | Cumple con todos los requisitos  |
|---------------------------|----------|--|
|                           | Bajo     | Pequeñas deficiencias en parámetros secundarios que no suponen un descenso en la calidad de las prestaciones del producto / servicio.  |
|                           |          | Reducción leve de alguna prestación no crítica   |
|                           | Medio    | Algunas deficiencias en parámetros secundarios que no suponen un descenso significativo en calidad de las prestaciones del producto / servicio.  |
|                           |          | Reducción de alguna prestación no crítica  |
|                           | Alto     | Deficiencia o fallo en alguna de las características / parámetros del producto / servicio, que supongan un descenso significativo en la calidad de las prestaciones requeridas y para el cual no se han encontrado alternativas aceptables o cambios que subsanen dichas deficiencias. |
|                           |          | Reducción importante de márgenes de actuación. Funcionamiento degradado, pero seguro.  |
|                           | Muy Alto | Deficiencias en la mayoría de parámetros clave.  |
|                           |          | Fallo o imposibilidad en la entrega o realización del producto / servicio en el estándar contratado.   |

Tabla 8: Nivel de impacto en prestaciones

### 4.3.3 Niveles de riesgo

Se consideran cuatro Niveles de Riesgo (NR) dependiendo del valor del Índice de Criticidad (IC) resultante. Los valores posibles de este IC se representan gráficamente en la Tabla 9.

| ÍNDICES DE CRITICIDAD (IC) |          | IMPACTO  |      |       |      |          |
|----------------------------|----------|----------|------|-------|------|----------|
|                            |          | Muy Bajo | Bajo | Medio | Alto | Muy Alto |
| PROBABILIDAD               | Muy Alta | 5        | 10   | 15    | 20   | 25       |
|                            | Alta     | 4        | 8    | 12    | 16   | 20       |
|                            | Media    | 3        | 6    | 9     | 12   | 15       |
|                            | Baja     | 2        | 4    | 6     | 8    | 10       |
|                            | Muy Baja | 1        | 2    | 3     | 4    | 5        |

Tabla 9: Índice de Criticidad (IC)

Cada nivel de riesgo está asociado a unos valores de índices de criticidad como se muestran en la Tabla 10.

| Nivel de Riesgo (NR) | Índice de Criticidad (IC) |
|----------------------|---------------------------|
| Bajo (NRB)           | 1, 2, 3, 4, 5, 6          |
| Medio (NRM)          | 8, 9, 10, 12              |
| Alto (NRA)           | 15, 16, 20                |
| Muy Alto (NRMA)      | 25                        |

Tabla 10: Nivel de Riesgo en función de IC

## 4.4 Evaluación Cuantitativa de Riesgos

Proceso que consiste en analizar numéricamente el efecto de los riesgos identificados sobre los objetivos generales del proyecto.

Por lo general, el análisis cuantitativo de riesgos se realizará, después del proceso de análisis cualitativo de riesgos, sobre aquellos riesgos que han sido identificados como prioritarios desde el punto de vista del plazo o del coste. En general, el análisis cuantitativo es una metodología que puede ayudar al director del proyecto a evaluar el efecto agregado de todos los riesgos prioritarios sobre el proyecto. Esta metodología puede facilitar la toma de decisiones en lo que se refiere a la priorización de riesgos. Se suele basar en métodos estadísticos y en caso de que se decida utilizar, deben asignarse valores discretos, tanto a la probabilidad como al impacto de cada riesgo; de modo que puedan utilizarse estimaciones por tres valores que han de adaptarse al modelo que se pueda preparar.

La aplicación o no de esta metodología en momentos concretos del proyecto es facultativo del director del proyecto.

Los análisis cuantitativos que puedan requerirse serán liderados por el coordinador de riesgos y precisan de la colaboración de todos los componentes que acuden a las reuniones de riesgos.

## 4.5 Planes de Acción: Mitigación y Contingencia

Proceso por el cual se desarrollan opciones y acciones para incrementar las oportunidades y reducir las amenazas sobre los objetivos del proyecto.

El objetivo de esta fase es la identificación y evaluación de todas las posibles estrategias para tratar los riesgos (amenazas / oportunidades). Éstas pueden ser:

- Evitar la amenaza / explotar la oportunidad
- Transferir la amenaza / compartir la oportunidad
- Mitigar la amenaza / mejorar la oportunidad
- Aceptar la amenaza / oportunidad

Se detallan a continuación conceptos generales sobre las estrategias descritas:

- Evitar una amenaza (riesgo). Eliminar el riesgo mediante la eliminación de la causa del mismo.
- Transferir una amenaza (riesgo). Pasarle el riesgo a un tercero (por ejemplo, subcontratando la actividad).
- Mitigar una amenaza (riesgo). Reducir el impacto o la probabilidad de ocurrencia de un riesgo.
- Aceptar una amenaza. Pueden darse dos casos, a saber:
  - Aceptar que el riesgo puede suceder y no prever nada especial para el caso de que se materialice (“Si sucede, sucede...”).
  - Crear un plan de contingencia para el caso de que suceda.
- Explotar una oportunidad. Incrementar la materialización potencial de la oportunidad haciendo más probable la causa de la misma.
- Compartir una oportunidad. Retener parte de la oportunidad en lugar de transferirla globalmente a terceras partes.
- Mejorar una oportunidad. Aumentar el impacto o la probabilidad de ocurrencia de una oportunidad.
- Aceptar una oportunidad. Es aplicable en este caso lo indicado para las amenazas, es decir, aceptarla o crear un plan de contingencia para el caso de que suceda.

La clasificación de los riesgos de acuerdo con su evaluación cualitativa definirá el tipo de actuación y seguimiento necesario en cada caso. En la Tabla 11 se determina la estrategia a seguir en función del IC de cada riesgo.

| Nivel de Riesgo                 | Respuesta Requerida   | Nivel de Urgencia  |
|---------------------------------|---|--|
| Nivel de Riesgo Muy Alto (NRMA) | Estos riesgos no son, en general, aceptables (podrían serlo en fases iniciales del proyecto). Requieren establecer como único plan de respuesta el evitarlo   | Una vez evaluado cualitativamente en el registro de riesgos se recomienda la definición de planes de respuesta en el intervalo de 1 semana |
| Nivel de Riesgo Alto (NRA)      | Estos riesgos no son, en general, aceptables (podrían serlo en fases iniciales del proyecto) Requieren establecer planes de acción perfectamente documentados y encaminados a disminuir el Índice de Criticidad (IC) hasta el nivel objetivo (ICO) y realizar el control y supervisión de los mismos. | Una vez evaluado cualitativamente en el registro de riesgos se recomienda la definición de planes de respuesta en el intervalo de 2 semana |
| Nivel de Riesgo Medio (NRM)     | Desarrollo de estrategias a seguir y acciones específicas   | Una vez evaluado cualitativamente en el registro de riesgos se recomienda la definición de planes de respuesta en el intervalo de 1 mes    |
| Nivel de Riesgo Bajo (NRB)      | Normalmente no se requerirán acciones específicas; sin embargo deberán estar identificados y habrá de verificarse ocasionalmente si los supuestos que han dado lugar a la consideración de riesgo bajo se mantienen.  | Revisión en las Reuniones del Panel de Riesgo.   |

**Tabla 11: Niveles de urgencia en función del IC**

Una vez aprobado el plan de respuesta por el panel de riesgos, éste asignará al responsable del mismo.

Como estrategia general de la gestión de riesgos se recomienda el establecimiento de ICs Objetivo, de modo que una vez evaluado el IC se fije un nivel de riesgo susceptible de ser asumido sin la realización de alguna acción adicional posterior. Una vez alcanzado el ICO, en las reuniones del panel se revisarán estos riesgos de modo sistemático hasta que desaparezca el desencadenante que los condicionara.

En caso de contratos en base a las normas PECAL, los planes de respuesta a los riesgos contendrán como mínimo: acciones que han de adoptarse para ejecutar la estrategia de

respuesta a los riesgos, recursos necesarios, plazo para la ejecución, costes asociados, otros planes y documentación del proyecto que se vean afectados, resultado previsto, propietarios de los riesgos, plazos para el seguimiento y responsables para cada una de las acciones antes indicadas. Toda esta información podrá estar contenida en el registro de riesgos.

## 4.6 Seguimiento y Control de Riesgos

Proceso por el cual se implementan los planes de respuesta a los riesgos, se rastrean los riesgos identificados, se monitorizan los riesgos residuales, se identifican nuevos riesgos y se evalúa la efectividad de las respuestas a los riesgos.

El seguimiento y control de la gestión de riesgos se realizará a través de las reuniones del panel de riesgos. En las mismas:

- Se realizará el seguimiento de las acciones de los riesgos identificados, pudiendo, en función de los efectos obtenidos a través de las acciones, revisarse la valoración cualitativa y por tanto su IC.
- Se revisará de forma sistemática el proceso de gestión de forma sistemática el proceso de gestión de riesgos (identificación, análisis cualitativo, planes de respuesta y estado de las acciones y seguimiento y control), ya que a lo largo de la ejecución del proyecto pueden aparecer nuevas circunstancias de riesgo. Los riesgos se cerrarán solamente cuando se hayan materializado, o en el caso de que el desencadenante o hito al que estuvieran asociados haya tenido lugar.

La frecuencia de las reuniones del panel de riesgos se establecerá en el plan de gestión de riesgos. Con independencia de lo anterior el panel de riesgos podrá reunirse de manera extraordinaria si alguno de sus miembros identifica alguna circunstancia que requiere evaluación / acciones urgentes por parte del panel. De cada reunión del panel se redactará un acta en la que se hará mención a todos aquellos aspectos relevantes que afecten al registro de riesgos. Como parte del seguimiento de riesgos es recomendable la implantación de indicadores que permitan medir de modo objetivo la gestión de riesgos, así como de informes que faciliten la toma de decisiones sobre los aspectos más relevantes del registro de riesgos en su conjunto. Estos aspectos se tratan a continuación de modo diferenciado.

### 4.6.1 Indicadores de riesgos

En función del alcance, necesidades del proyecto y/o de los requisitos que se puedan establecer en el contrato respecto a este aspecto, se deben establecer los indicadores más adecuados para la gestión de riesgos de cada proyecto. En ese sentido pueden definirse indicadores globales del proceso y adicionalmente se pueden establecer indicadores sobre cada una de las actividades del mismo. En cualquier caso, los indicadores que se decida aplicar deben de ser incorporados al plan de gestión de riesgos de cada proyecto.

A continuación, se listan posibles indicadores susceptibles de ser incorporados en cada proyecto:

- Como indicadores globales del proceso de gestión de riesgos se identifican los siguientes:
- Factor de Riesgo definido como sigue:

$$FDR(t) = 1 - \left( \frac{\sum IC \text{ de riesgos cerrados o caducados } (t)}{\sum IC \text{ (riesgos identificados(abiertos, cerrados o caducados))(t)}} \right)$$

- Nivel de Riesgo RSP, definido como sigue:

$$RSP(t) = \frac{\sum IC \text{ de riesgos y oportunidades (restando las oportunidades)}(t)}{N^{\circ} \text{ de riesgos y oportunidades}(t)}$$

- Evolución de riesgos (representándose número de riesgos activos y número total de riesgos identificados (activos + cerrados)).
- Evolución de riesgos en zona crítica (representándose número de riesgos activos con  $IC \geq 15$  y número total de riesgos identificados, abiertos y cerrados cuyo IC estuvo en algún momento dentro de la zona crítica).

Posibles indicadores asociados a la identificación de riesgos:

- Evolución del número de riesgos activos asociados a hitos de la planificación a corto plazo (marco de referencia 90 días), representándose el número total de riesgos activos genéricos, entendiéndose por éstos aquellos que no están asociados a hitos concretos de la planificación.

Posibles indicadores asociados a la planificación de respuesta a los riesgos:

- Evolución del número de acciones activas de planes de respuesta asociados a riesgos en zona crítica. Se representarán también el número total de acciones (activas y cerradas) sobre riesgos en zona crítica.
- Tiempo medio empleado en la realización de acciones de respuesta a los riesgos respecto de un objetivo que se debe fijar (referencia 30 días).
- Tiempo medio empleado en la realización de acciones relacionadas con planes de respuesta de riesgos en zona crítica (referencia 10 días).
- Número de acciones que no tienen fecha de cierre.
- Numero de riesgos de nivel medio y alto sin acciones.
- Numero de riesgos identificados que se materializan en problemas.
- Numero de respuestas no planificadas a riesgos no identificados que ocurren.

#### 4.6.2 Informes de riesgos

En función del alcance, necesidades del proyecto y / o de los requisitos que se puedan establecer en el contrato respecto a este aspecto, se deben definir los informes más adecuados para reportar los aspectos más relevantes de la gestión de riesgos de cada proyecto.

Los informes a utilizar serán decididos por el director del proyecto e incluidos en el programa de gestión de riesgos de cada proyecto. En general se establecerán tres niveles de reporte, dependiendo de si se trata de:

- Información a nivel del proyecto, en donde la información será más detallada.
- Información a nivel de la dirección de proyectos y direcciones funcionales implicadas en el proyecto, para las que la información será agregada de modo que resalten sólo los aspectos más relevantes.
- Información al cliente. Para ésta se tendrá en cuenta los requisitos que al respecto puedan requerirse en el contrato.

El coordinador de riesgos será el responsable de preparar los informes periódicos de riesgos, los cuales serán distribuidos a los destinatarios que se definan en el plan de gestión de riesgos y aquellos otros que se acuerden en el panel de riesgos.

Uno de los informes más usuales es el mapa de riesgos y oportunidades. Se identifican los riesgos y oportunidades abiertos y se sitúan sobre una matriz de criticidad (probabilidad vs severidad global del impacto). En la Figura 11 se recoge a modo de ejemplo el mapa de distribución de criticidades.

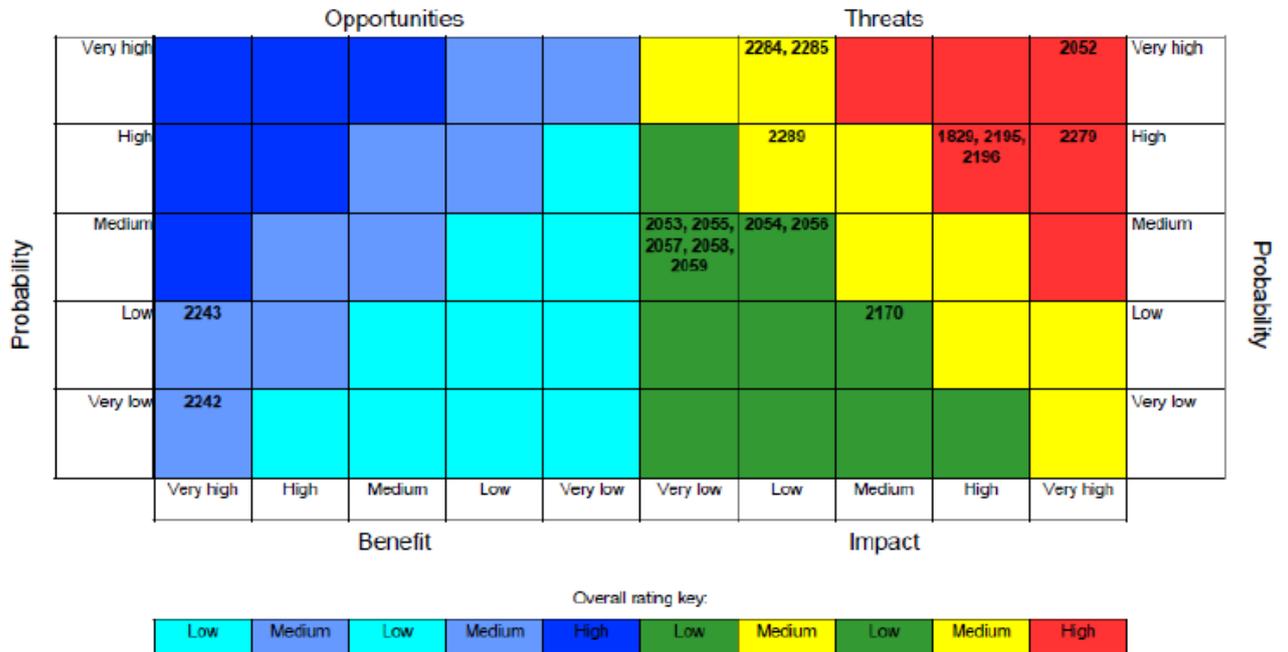


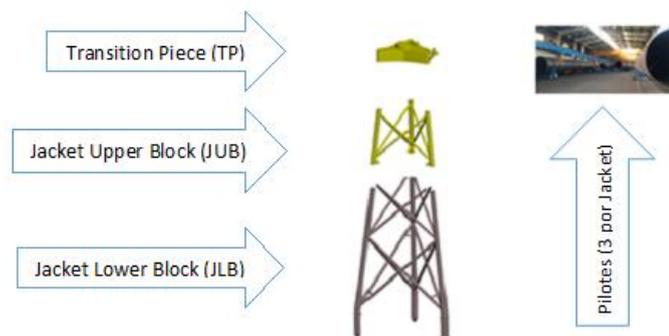
Figura 11: Mapa ejemplo de distribución de criticidades

## 5 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN

### 5.1 Introducción

Para la realización de este trabajo se ha utilizado el proceso de fabricación de jackets del proyecto East Anglia One, más concretamente la fabricación de pilotes.

Las jackets son estructuras offshore que se utilizan para el anclaje de las turbinas eólicas en el mar. En este proyecto, las jackets son estructuras provistas de 3 patas, y en la que se diferencia cuatro partes principales (Transition Piece, Jacket Upper Block, Jacket Lower Block y Pilotes), las cuales se pueden apreciar en la Figura 12.



**Figura 12: Partes principales de la jacket**

Para explicar el proceso de fabricación de las jackets se han utilizado como entrada al proceso de fabricación las cuatro partes principales anteriormente mencionadas. Para realizar el montaje se lleva a cabo un primer ensamblaje (Assembly 1) en el que se une la Transition Piece (TP) con la Jacket Upper Block (JUB), y después se realiza un segundo ensamblaje (Assembly 2) en el que se une el Assembly 1 con la Jacket Lower Block (JLB). Cuando se tiene finalizado el Assembly 2, se trasladan en barco al lugar de instalación, al igual que los pilotes que se fabrican en un proceso paralelo a éste. La Figura 13 representa el diagrama de flujo del proceso de fabricación de jackets.

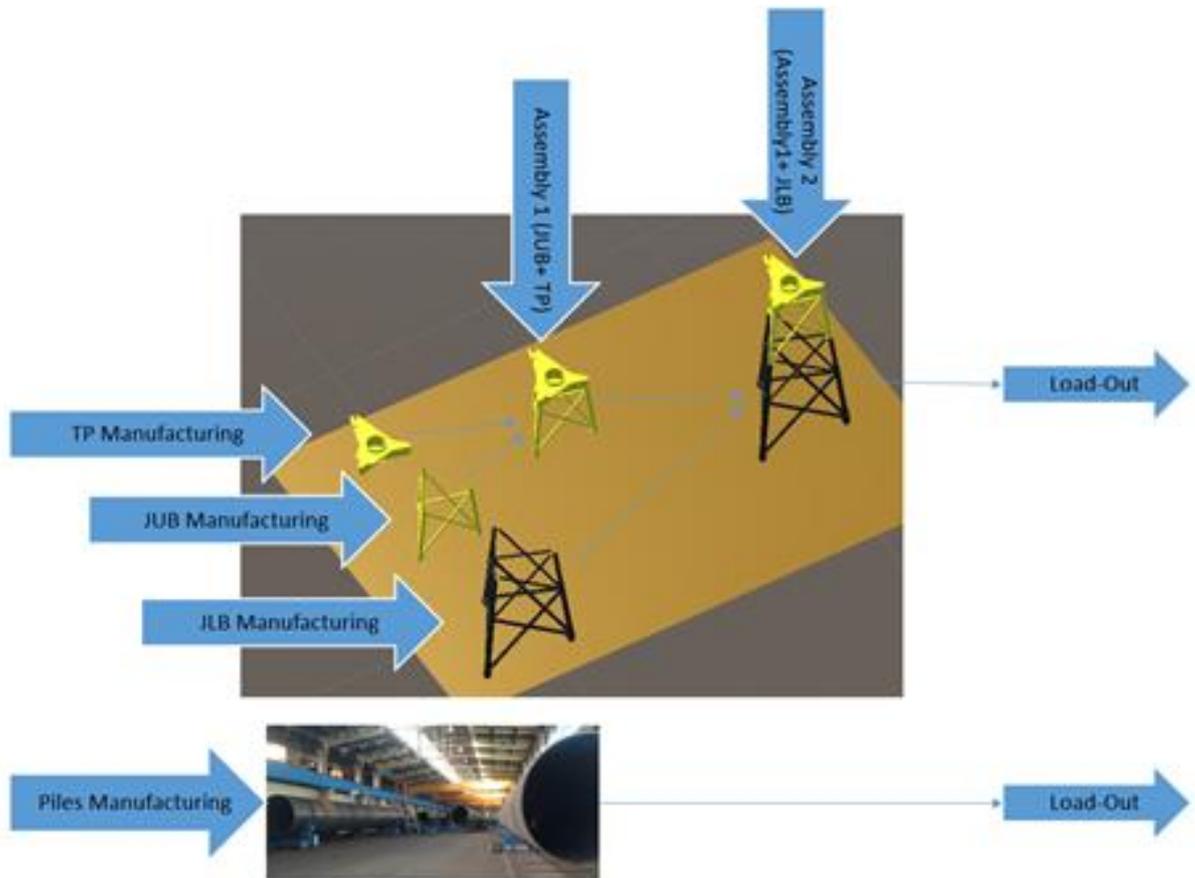


Figura 13: Diagrama de flujo de la fabricación de jackets

Para simplificar el modelo de simulación y los resultados experimentales en este trabajo se va a utilizar únicamente el proceso de fabricación de pilotes que se explica con más detalle en el siguiente apartado.

## 5.2 Fabricación de pilotes

El proceso de fabricación de pilas pasa por varias fases desde la llegada del material al taller hasta el load-out. Después de la recepción del material, las chapas para la construcción de los pilas pasan por diferentes procesos que son los siguientes:

- Corte y biselado
- Curvado de las chapas
- Soldadura longitudinal
- Ensamblaje de las secciones
- Soldadura circular
- Soldadura de camas
- Test no destructivo y reparaciones
- Marcado de la sección
- Inspección final

El diagrama de flujo del proceso de fabricación de pilas se ve representado en la Figura 14.

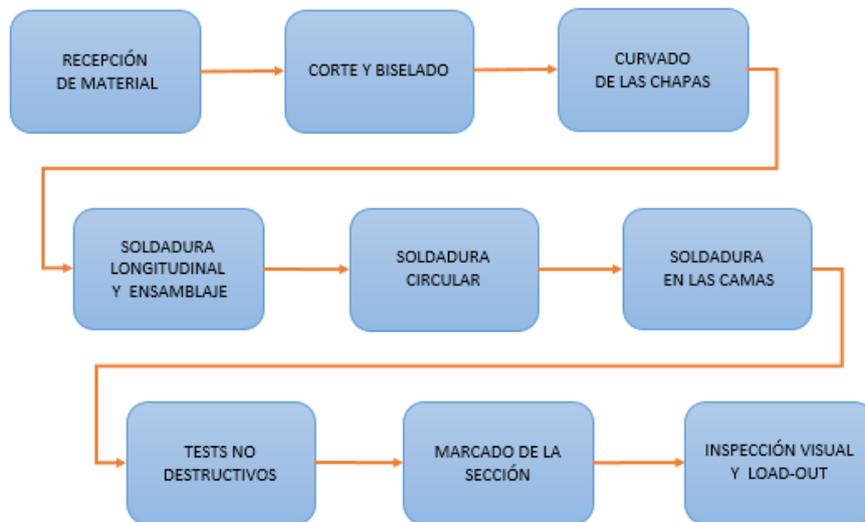


Figura 14: Diagrama de flujo de la fabricación de pilas

### 5.2.1 Recepción del material

Las chapas serán entregadas por una fábrica de acero a la planta de producción en diferentes lotes de acuerdo con las órdenes de pedido. Las chapas tienen dimensiones particulares para cada pilote de cada jacket, es decir, las chapas que componen los pilotes de una jacket no son iguales a la de otra. Los lotes de llegada de chapa se recibirán de acuerdo con la secuencia de pedido que se hará de acuerdo con la secuencia de fabricación planeada para el proyecto, intentando conseguir el mínimo número de chapas en almacén por largos períodos de tiempo.

### 5.2.2 Corte y Biselado

Una vez descargadas las chapas, se transportan a la primera etapa del proceso que es el corte y biselado. Las chapas se cortan utilizando oxicorte y posteriormente se mecanizan con una fresadora para preparar el bisel requerido para la soldadura. Después de este proceso, las chapas están listas para la siguiente tarea, curvado de las chapas.



Figura 15: Biselado de una chapa lista para soldar

### 5.2.3 Curvado de las chapas

Esta tarea comienza un día más tarde de la finalización del corte y biselado. En esta segunda etapa del proceso las chapas se doblan para lograr una forma circular mediante unas máquinas de laminación como las de la Figura 16.



Figura 16: Curvado de las chapas



Figura 17: Curvado de chapas

Las chapas que tengan un espesor grande podrán ser pre-dobladas, en los extremos de las mismas, en la máquina de prensado como la de la imagen inferior, para obtener un mayor rendimiento de la máquina de laminación y doblado de las chapas. Este proceso forma parte de la segunda etapa y sería previo al doblado de las chapas.



Figura 18: Máquina de prensado

### 5.2.4 Soldadura longitudinal y ensamblaje

La soldadura longitudinal se lleva a cabo después del doblado de las chapas en la posición que se muestra en la Figura 19 y Figura 20. Una vez completada la soldadura longitudinal, las chapas se giran a una posición horizontal y se ponen sobre unos rodillos.



Figura 19: Soldadura longitudinal de una parte de un pilote



**Figura 20: Ensamblaje de dos partes de un pilote**

### **5.2.5 Soldadura circular**

El paso siguiente de la secuencia constructiva es completar la soldadura perimetral circunferencial entre los anillos. Estas soldaduras circulares, tanto internas como externas, se realizan sobre los rodillos anteriormente mencionados y con los pórticos de soldadura por arco sumergido.

Los anillos se colocan y alinean en el orden predeterminado para su montaje. Antes de soldar las dos secciones entre sí, existe un previo precalentamiento del acero que rodea la junta.

Las soldaduras, tanto internas como externas, se pueden hacer automáticamente girando los anillos a través de los rodillos mientras la máquina de soldadura permanece estacionaria.

En primer lugar, se realizan las soldaduras circulares internas. Cuando se terminan las soldaduras circulares internas, se volverán a mecanizar para asegurar la falta de defectos en la raíz de la soldadura. Después, se realizan las soldaduras circunferenciales externas, con estaciones SAW de pórtico.



**Figura 21: Máquina para soldadura circular interna**



**Figura 22: Máquina fija para soldadura circular externa**



**Figura 23: Máquina para las soldaduras circulares externas**

Una vez terminadas las soldaduras circulares y longitudinales, se realiza la soldadura circular de los cordones de soldadura interiores en las camas.

### **5.2.6 Test no destructivo y marcado de la sección**

La calidad de las soldaduras se determina mediante los ensayos no destructivos después de la realización de las mismas. Si el ensayo no resulta aprobado, es en esta etapa donde se van a realizar las reparaciones necesarias de soldadura.

Cuando los pilotes superan los ensayos no destructivos y están completamente ensamblados, se pintan las marcas. Estas marcas sirven de referencia a los instaladores a la hora de llevar a cabo la instalación de los pilotes en el mar, puesto que cada uno de los pilotes irá instalado a una profundidad determinada.



**Figura 24: Marcas de los pilotes**

### **5.2.7 Inspección visual y Load-Out**

La inspección visual es llevada a cabo por los inspectores de control de calidad una vez terminados los ensayos no destructivos y tener pintadas las marcas en los pilos.

Una vez que el equipo ha sido liberado por los inspectores de control de calidad tanto del equipo de fabricación como del cliente, los pilos se transportan a una zona de almacenamiento antes de ser transportados.



**Figura 25: Pilotes en la zona de almacenamiento**

## 6 DESARROLLO DE LA INTERFAZ DE INTEGRACIÓN ENTRE MÓDULOS

La interfaz de integración entre los módulos de simulación ha sido desarrollada mediante Visual Basic Application (VBA) en Excel, ya que los softwares que hemos utilizado para el desarrollo de los modelos de simulación ya tienen desarrollada la integración con Excel. Otro motivo de la elección de Excel para realizar la interfaz de usuario ha sido la familiaridad con este software de la gente implicada en la gestión de proyectos. De esta forma se ha desarrollado una herramienta que permite el uso de la simulación de Montecarlo y la simulación de eventos discretos desde Excel, y cuya utilización se representa por el diagrama de flujo de la Figura 26.

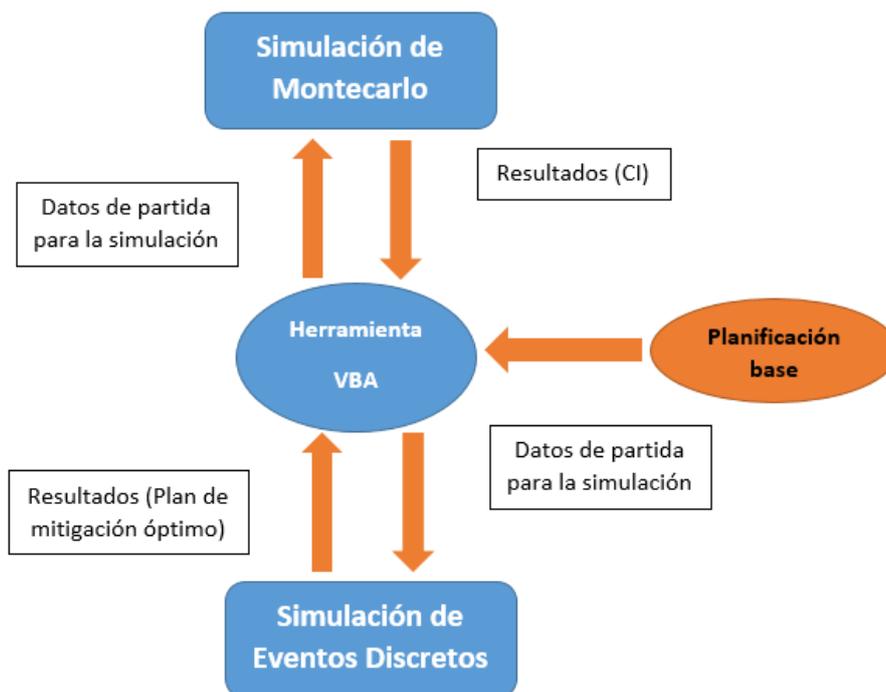


Figura 26: Integración de los dos módulos

La herramienta se inicia en una sola pestaña principal, Figura 27, a partir de la cual dirige al usuario a 3 ramas. La rama 1 controla el módulo de la simulación de Montecarlo, la rama 2 controla el módulo de simulación de eventos discretos, y la rama 3 muestra los resultados de las simulaciones y las tablas de gestión de riesgos.



Figura 27: Interfaz de usuario de los dos módulos

## 6.1 Módulo de simulación de Montecarlo

Este módulo es el más sencillo de los tres desarrollos, ya que, al utilizar un complemento de Excel para la simulación de Montecarlo, la conexión entre ambos programas ya está hecha por los fabricantes del software. Por ese motivo, hemos centrado éste módulo en incluir una guía técnica de uso del complemento utilizado, con el objetivo de que cualquier usuario pueda usar la herramienta, aunque éste no esté familiarizado con el complemento de simulación.

Como puntos a destacar en la guía de técnica elaborada cabe destacar los siguientes:

- Importación de datos desde Microsoft Project
- Definición de la aleatoriedad en los tiempos de las tareas
  - Tareas individuales
  - Grupos de tareas
- Definición de las celdas objetivo
- Ejecutar la simulación
- Interpretación de los resultados

El motivo de presentar esta información en la guía técnica, es que con ésta información es posible realizar una simulación de Montecarlo a partir del complemento de Excel. No obstante, el complemento utilizado tiene muchas capacidades que en la herramienta diseñada no se explican, ya que para realizar una simulación de Montecarlo con el nivel de detalle que nosotros necesitamos no son necesarias.

Debido a que la guía técnica diseñada no contempla una completa información sobre el complemento, se han puesto referencias a manuales de uso externos a la aplicación, para de esta forma ahorrar tiempo al usuario, en caso de necesitar más información de la proporcionada en la guía técnica desarrollada en la herramienta. Los enlaces externos para el uso del complemento se encuentran en las referencias bibliográficas.

## 6.2 Módulo de simulación de eventos discretos

El módulo desarrollado para utilizar la simulación de eventos discretos es quizás la tarea más destacada en cuanto a la programación en VBA en éste proyecto. En primer lugar, se ha desarrollado una interfaz de usuario amigable para la introducción de los datos de partida del modelo de simulación de eventos discretos. Dicha interfaz de usuario, representada por la Figura 28, presenta en primer lugar la estrategia de fabricación de los piles, y la cual, es usada en el modelo de simulación de eventos discretos, seguidamente se colocan las fechas de llegada de la materia prima, los hitos previstos de finalización y los hitos de loadout, por otra parte en la parte superior izquierda se muestra la fecha de la última actualización de la programación, para que el usuario pueda comprobar cuando fue la última vez que actualizó los datos.

Para un uso más fácil de la interfaz, se han marcado de color amarillo las celdas que el usuario puede cambiar, y a partir de las cuales se pueden definir los datos iniciales de la simulación de eventos discretos.

| Secuencia de fabricación |  |            |       |        | Actualizar          |    |
|--------------------------|--|------------|-------|--------|---------------------|----|
| 1                        | Plates cut and beveling (corte y biselado)         | 3          |       | 3      |                     |    |
|                          | Bending of plates (doblado)                        | 8          | 1FC+1 |        | Fecha actualización |    |
|                          | Longitudinal welding                               | 18         | 2CC+1 | 26     | 9-12-17 12:35       |    |
|                          | Section assembly                                   | 20         | 3CC+2 |        |                     |    |
|                          | Circular welding                                   | 20         | 4CC+2 |        | Salir ExtendSim     |    |
|                          | Welding of beds                                    | 4          | 5FC   | 4      |                     |    |
|                          | Non destructive testing                            | 5          | 6FC+1 | 6      |                     |    |
|                          | Marking of section                                 | 3          | 7FC   | 3      |                     |    |
|                          | Final inspection, expedition and storage at harbou | 2          | 8FC   | 2      |                     |    |
|                          |  |            |       | 44     |                     |    |
| Llegada Acero            |  |            |       |        |                     |    |
|                          |  | Piles      |       | Jacket |                     |    |
|                          | Batch 1 - 10 Jackets                               | 21/06/2017 | 0     | 30     | 1                   | 10 |
|                          | Batch 2 - 10 Jackets                               | 16/03/2017 | 30    | 60     | 10                  | 20 |
|                          | Batch 3 - 10 Jackets                               | 16/03/2017 | 60    | 90     | 20                  | 30 |
|                          | Batch 4 - 12 Jackets                               | 02/01/2018 | 90    | 126    | 30                  | 42 |
|                          |  |            |       |        |                     | 0  |
|                          |  |            |       |        |                     | 0  |
| Hitos Construcción       |  |            |       |        |                     |    |
|                          |  | Piles      |       | Jacket |                     |    |
|                          | Construcción 18 pilotes                            | 04/10/2017 | 0     | 18     | 1                   | 6  |
|                          | Construcción 18 pilotes (n° 19 - n° 36)            | 16/11/2017 | 18    | 36     | 6                   | 12 |
|                          | Construcción 18 pilotes (n° 37 - n° 54)            | 02/01/2018 | 36    | 54     | 12                  | 18 |
|                          | Construcción 18 pilotes (n° 55 - n° 72)            | 12/02/2018 | 54    | 72     | 18                  | 24 |
|                          | Construcción 18 pilotes (n° 73 - n° 90)            | 07/05/2018 | 72    | 90     | 24                  | 30 |
|                          | Construcción 18 pilotes (n° 91 - n° 108)           | 15/06/2018 | 90    | 108    | 30                  | 36 |
|                          | Construcción 18 pilotes (n° 109 - n° 126)          | 03/08/2018 | 108   | 126    | 36                  | 42 |
| Hitos Load Out           |  |            |       |        |                     |    |
|                          |  | Piles      |       | Jacket |                     |    |
| 1                        | LoadOut 18 pilotes                                 | 13/12/2017 | 0     | 18     | 1                   | 6  |
|                          | LoadOut 18 pilotes (n° 19 - n° 36)                 | 14/01/2018 | 18    | 36     | 6                   | 12 |
|                          | LoadOut 18 pilotes (n° 37 - n° 54)                 | 16/02/2018 | 36    | 54     | 12                  | 18 |
|                          | LoadOut 18 pilotes (n° 55 - n° 72)                 | 20/03/2018 | 54    | 72     | 18                  | 24 |
|                          | LoadOut 18 pilotes (n° 73 - n° 90)                 | 07/05/2018 | 72    | 90     | 24                  | 30 |
|                          | LoadOut 18 pilotes (n° 91 - n° 108)                | 15/06/2018 | 90    | 108    | 30                  | 36 |
|                          | LoadOut 18 pilotes (n° 109 - n° 126)               | 03/08/2018 | 108   | 126    | 36                  | 42 |

Figura 28: Parámetros de entrada al modelo de simulación

Estos datos introducidos por el usuario en la interfaz no se pueden manejar en el programa de eventos discretos, ya que todos hacen referencia a la creación de los atributos iniciales de los ítems, y, por lo tanto, deben estar en una sola tabla. Por ese motivo, mediante programación en VBA y en el caso específico de éste proyecto, se crea una matriz de dimensiones 126 x 13, que será la que interpreta el modelo de simulación para representar las condiciones iniciales.

Por otra parte, de cara a los análisis de riesgos que se deban hacer durante el seguimiento del proyecto, es importante definir el estado actual en el que se encuentra la fabricación, por ese motivo, a partir del número de jackets que se han definido en la interfaz de usuario presentada anteriormente, se crea de forma automática una tabla formada por 10 columnas y un número de filas igual al número de pilotes que se deben fabricar. En dicha tabla, representada en la Figura 29, el usuario deberá representar el estado actual del proyecto, es decir, deberá cubrir la tabla con el tiempo restante de fabricación de cada pilote. A partir de esta tabla el modelo de simulación puede interpretar si ya hay pilotes que están finalizados, o los pilotes que están en proceso de fabricación.

| Pilote ID | Plates cut and beveling | Bending of plates (doblado) | Longitudinal welding | Section assembly | Circular welding | Welding of beds | Non destructive testing | Marking of section | Final inspection, expedition | 43   |     |
|-----------|-------------------------|-----------------------------|----------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------------|--------------------|------------------------------|------|-----|
| 1         | 0                       | 0                           | 0                    | 0                | 0                | 0               | 0                       | 0                  | 0                            | 100% | 99% |
| 2         | 0                       | 0                           | 0                    | 0                | 0                | 0               | 0                       | 0                  | 0                            | 100% |     |
| 3         | 0                       | 0                           | 0                    | 0                | 0                | 0               | 0                       | 0                  | 0                            | 100% |     |
| 4         | 0                       | 0                           | 0                    | 0                | 0                | 0               | 0                       | 0                  | 0                            | 100% |     |
| 5         | 0                       | 0                           | 0                    | 0                | 0                | 0               | 0                       | 0                  | 0                            | 100% |     |
| 6         | 0                       | 0                           | 0                    | 0                | 0                | 0               | 0                       | 0                  | 0                            | 100% |     |
| 7         | 0                       | 0                           | 0                    | 0                | 0                | 0               | 0                       | 0                  | 0                            | 100% |     |
| 8         | 0                       | 0                           | 0                    | 0                | 0                | 0               | 0                       | 0                  | 0                            | 100% |     |
| 9         | 0                       | 0                           | 0                    | 0                | 0                | 0               | 0                       | 0                  | 0                            | 100% |     |
| 10        | 0                       | 0                           | 0                    | 0                | 0                | 0               | 0                       | 0                  | 0                            | 100% |     |
| 11        | 0                       | 0                           | 0                    | 0                | 0                | 0               | 0                       | 0                  | 0                            | 100% |     |
| 102       | 3                       | 8                           | 18                   | 20               | 20               | 4               | 5                       | 3                  | 2                            | 0%   | 0%  |
| 103       | 3                       | 8                           | 18                   | 20               | 20               | 4               | 5                       | 3                  | 2                            | 0%   |     |
| 104       | 3                       | 8                           | 18                   | 20               | 20               | 4               | 5                       | 3                  | 2                            | 0%   |     |
| 105       | 3                       | 8                           | 18                   | 20               | 20               | 4               | 5                       | 3                  | 2                            | 0%   |     |
| 106       | 3                       | 8                           | 18                   | 20               | 20               | 4               | 5                       | 3                  | 2                            | 0%   |     |
| 112       | 3                       | 8                           | 18                   | 20               | 20               | 4               | 5                       | 3                  | 2                            | 0%   |     |
| 113       | 3                       | 8                           | 18                   | 20               | 20               | 4               | 5                       | 3                  | 2                            | 0%   |     |
| 114       | 3                       | 8                           | 18                   | 20               | 20               | 4               | 5                       | 3                  | 2                            | 0%   |     |
| 115       | 3                       | 8                           | 18                   | 20               | 20               | 4               | 5                       | 3                  | 2                            | 0%   |     |
| 116       | 3                       | 8                           | 18                   | 20               | 20               | 4               | 5                       | 3                  | 2                            | 0%   |     |
| 117       | 3                       | 8                           | 18                   | 20               | 20               | 4               | 5                       | 3                  | 2                            | 0%   |     |
| 118       | 3                       | 8                           | 18                   | 20               | 20               | 4               | 5                       | 3                  | 2                            | 0%   |     |
| 119       | 3                       | 8                           | 18                   | 20               | 20               | 4               | 5                       | 3                  | 2                            | 0%   |     |
| 120       | 3                       | 8                           | 18                   | 20               | 20               | 4               | 5                       | 3                  | 2                            | 0%   |     |
| 121       | 3                       | 8                           | 18                   | 20               | 20               | 4               | 5                       | 3                  | 2                            | 0%   |     |
| 122       | 3                       | 8                           | 18                   | 20               | 20               | 4               | 5                       | 3                  | 2                            | 0%   |     |
| 123       | 3                       | 8                           | 18                   | 20               | 20               | 4               | 5                       | 3                  | 2                            | 0%   |     |
| 124       | 3                       | 8                           | 18                   | 20               | 20               | 4               | 5                       | 3                  | 2                            | 0%   |     |
| 125       | 3                       | 8                           | 18                   | 20               | 20               | 4               | 5                       | 3                  | 2                            | 0%   |     |
| 126       | 3                       | 8                           | 18                   | 20               | 20               | 4               | 5                       | 3                  | 2                            | 0%   |     |

Figura 29: Estado actual de la fabricación de pilotes

Al rellenar la tabla de la Figura 29, con el avance actual, la herramienta programada en Excel crea de forma automática un diagrama resumen del avance del proyecto, por hito de fabricación, Figura 30. Este diagrama muestra en la celda superior izquierda la fecha de actualización de los datos que se presentan en el diagrama de barras, donde la barra de color verde representa el avance real del proyecto, y la línea central de color rojo representa el avance teórico según la planificación inicial.

| 31/10/2017                                | % Avance Real | % Avance Teórico |  |
|---|---------------|------------------|--|
| Construcción 18 Pilotes                   | 99%           | 100%             |  |
| Construcción 18 Pilotes (nº 19 - nº 36)   | 71%           | 92%              |  |
| Construcción 18 Pilotes (nº 37 - nº 54)   | 13%           | 41%              |  |
| Construcción 18 Pilotes (nº 55 - nº 72)   | 0%            | 2%               |  |
| Construcción 18 Pilotes (nº 73 - nº 90)   | 0%            | 0%               |  |
| Construcción 18 Pilotes (nº 91 - nº 108)  | 0%            | 0%               |  |
| Construcción 18 Pilotes (nº 109 - nº 126) | 0%            | 0%               |  |

Figura 30: Resumen de avance de fabricación

### 6.3 Módulo de resultados y gestión de riesgos

Para el módulo de resultados se ha diseñado una pestaña que muestra un cuadro resumen de los resultados obtenidos. Esta página de resultados permite almacenar de forma automática los resultados actuales, así como, los resultados de simulaciones anteriores, para tenerla como comparativa de resultados, y no tener que vernos obligados a repetir escenarios de simulación.

Las tablas de resultados de este módulo se presentan en la Figura 31, en la cual, las cinco primeras columnas se utilizan para generar la gráfica que se presenta en la parte inferior de la Figura 31, y en la que se representa el uso de turnos de trabajo, los sábados laborables y las mesas utilizadas a lo largo del proyecto. Las gráficas citadas anteriormente, actualizan su información por mes de trabajo, ya que se ha considerado que los cambios de turno, utilización de sábados, y el incremento de mesas se debe hacer por un período mínimo de un mes.

En cuanto a las dos filas restantes de la tabla de resultados, éstas se utilizan para representar el margen (floating) de cada hito, el beneficio obtenido del escenario estudiado, así como el % de reducción del beneficio. Se representa también la comparación del plazo de fabricación de la planificación base con el plazo de fabricación obtenido del simulador. Por último, se representan los días de retraso que se han impuesto como parámetros de entrada al modelo.

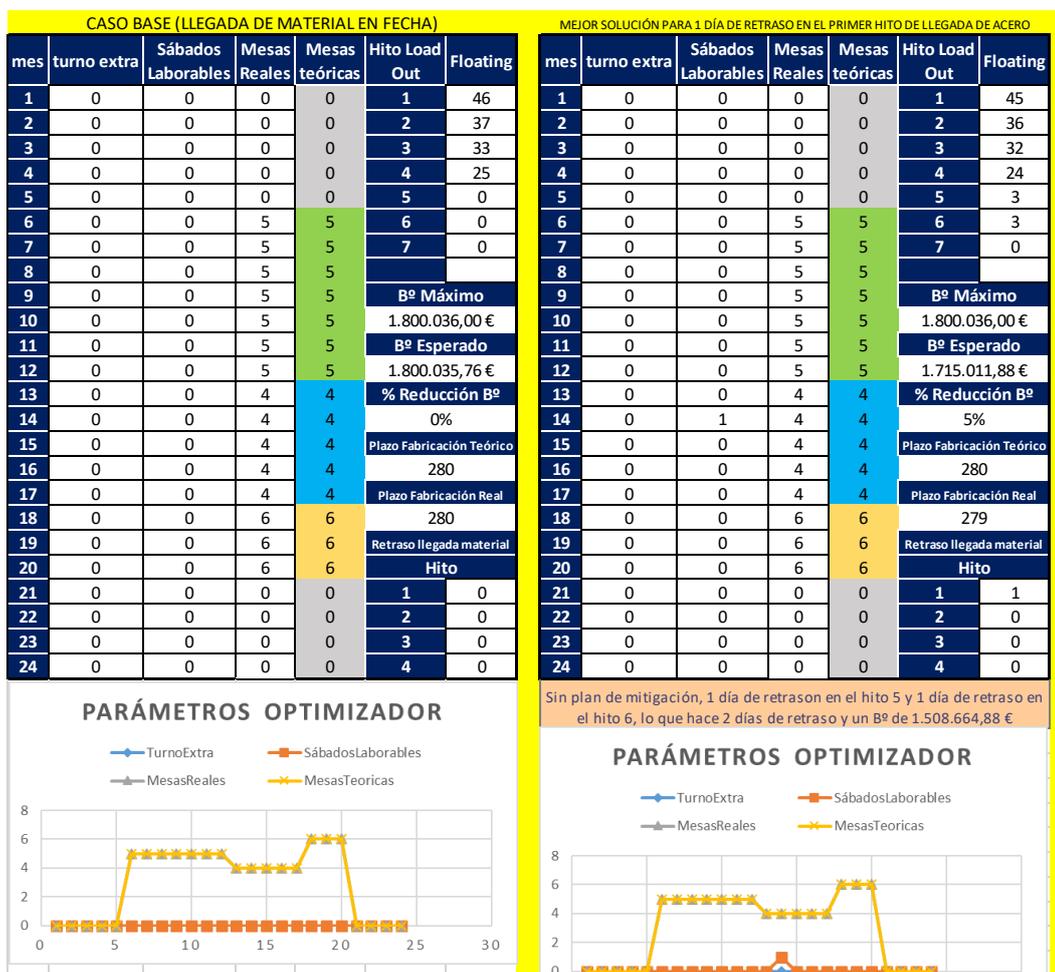


Figura 31: Resultados obtenidos en la simulación

El módulo de resultados presenta un diagrama de comparación de las fechas de fabricación estimadas en la planificación base, y las que calcula el modelo de simulación. El diagrama representado en la Figura 32, marca a partir de la línea central amarilla los días de adelanto o retraso que el modelo de simulación calcula con respecto a la línea base.

| id  | Fin Planificado | Fin Real   | # | # | # | # | # | # | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | # | # | # | # | # |
|-----|-----------------|------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1   | 04/10/2017      | 22/06/2017 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 18  | 04/10/2017      | 06/11/2017 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 19  | 16/11/2017      | 06/11/2017 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 36  | 16/11/2017      | 11/12/2017 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 37  | 02/01/2018      | 11/12/2017 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 54  | 02/01/2018      | 16/01/2018 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 55  | 12/02/2018      | 16/01/2018 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 72  | 12/02/2018      | 26/02/2018 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 73  | 07/05/2018      | 02/04/2018 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 90  | 07/05/2018      | 04/05/2018 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 91  | 15/06/2018      | 04/05/2018 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 108 | 15/06/2018      | 14/06/2018 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 109 | 03/08/2018      | 27/07/2018 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 126 | 03/08/2018      | 03/08/2018 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |

Figura 32: Adelantos o retrasos respecto a la línea base

En este módulo, también se ha elaborado una gráfica de seguimiento del proyecto, denominada habitualmente curva S, nombre que recibe debido a su forma. Esta gráfica permite ver en la herramienta como es la comparación entre el avance real y el planificado para el proyecto. Además, es buena herramienta de muestra de resultados de cara al equipo de proyecto, ya que este formato de curva es muy utilizado en los proyectos desarrollados en el astillero.

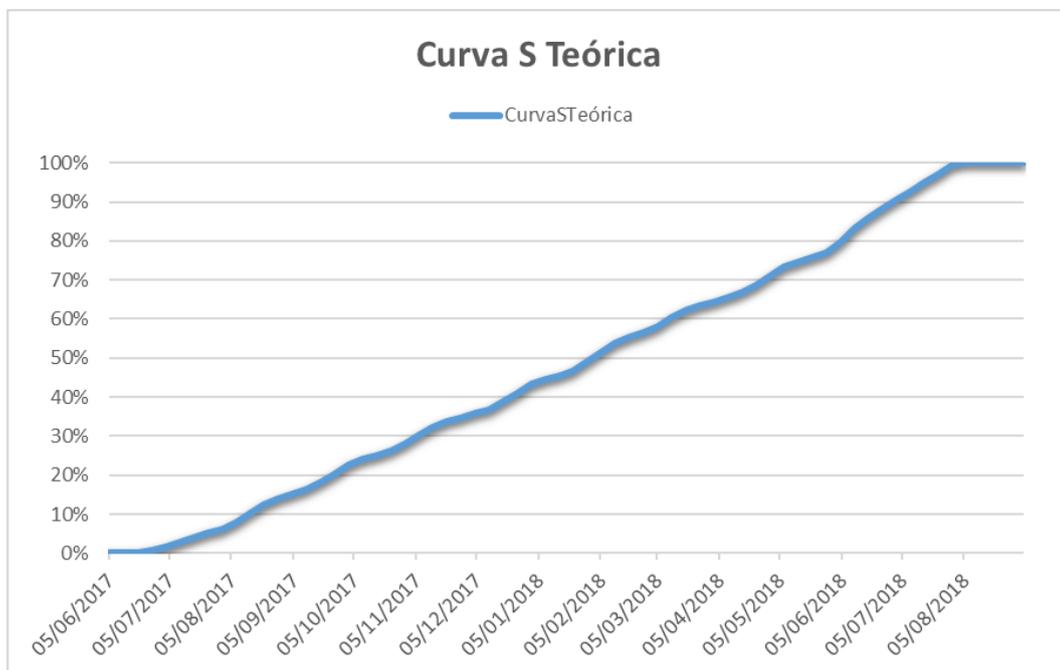


Figura 33: Curva S teórica de la fabricación de pilotes

## 7 DESARROLLO DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN

Para llevar a cabo el desarrollo de la herramienta paramétrica y modular de gestión de riesgos se han diseñado dos modelos de simulación.

El primer modelo se ha desarrollado con el complemento de Excel @Risk, y es el núcleo del módulo de simulación de Montecarlo, a partir del cual se obtendrá la valoración cuantitativa del riesgo que se pretende simular.

El segundo modelo se ha desarrollado con el software ExtendSim, y es el núcleo del módulo de simulación de eventos discretos, que es utilizado para diseñar los planes de mitigación específicos para cada riesgo.

### 7.1 Modelo de simulación de Montecarlo

El modelo de simulación de Montecarlo que representa el proceso de fabricación de pilotes ha sido desarrollado con @Risk, que es un complemento de Excel de la compañía Palisade y que permite hacer la simulación de una planificación mediante el método de simulación de Montecarlo.

Para crear el modelo de simulación de Montecarlo se importó mediante @Risk la planificación base del proyecto de fabricación desde MS Project a Excel, en donde se definieron mediante distribuciones estadísticas los tiempos de fabricación para cada etapa.

Para una mejor interpretación del modelo de simulación de Montecarlo, la Figura 34 muestra en su parte izquierda el aspecto del modelo de simulación en Excel, y en la parte derecha las gráficas que muestran los resultados de la simulación.

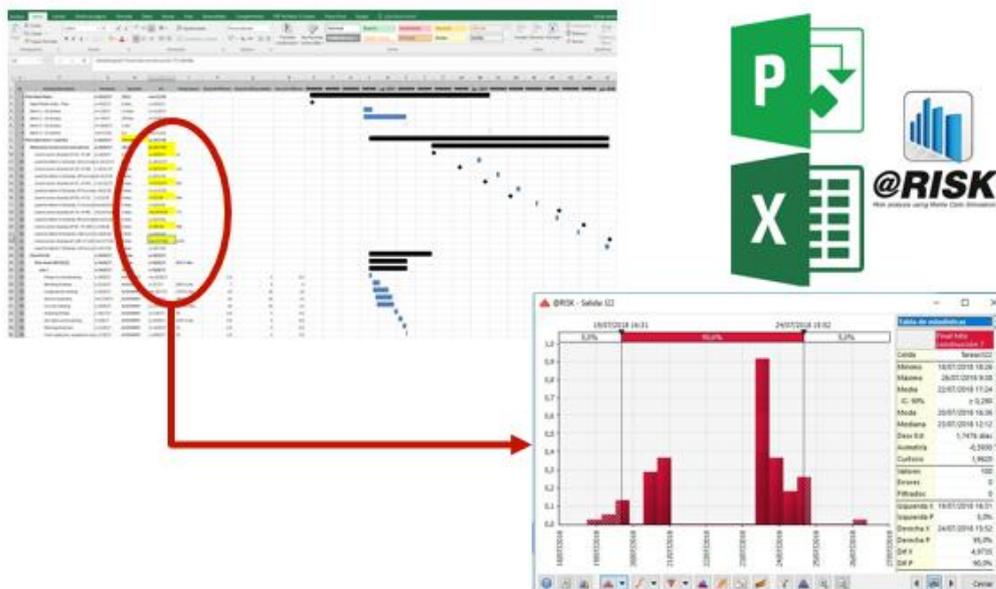


Figura 34: Resultados de la simulación de Montecarlo con @Risk

Para poder llevar a cabo la simulación, se definieron las celdas objetivo con respecto a las cuales se quería hacer la simulación, obteniendo de éstas la gráfica de resultados.

En la gráfica de resultados se muestran las fechas estimadas mediante la simulación de Montecarlo para cada uno de los hitos de entrega, permitiendo obtener la probabilidad de

cumplimiento o incumplimiento de los hitos del cliente, es decir, calculando de forma cuantitativa la probabilidad de ocurrencia de un riesgo y su impacto.

## 7.2 Modelo de simulación de eventos discretos

El modelo de simulación de eventos discretos que representa el proceso de fabricación de pilotes se desarrolla de acuerdo con la estrategia constructiva que se puede apreciar en la Figura 35.

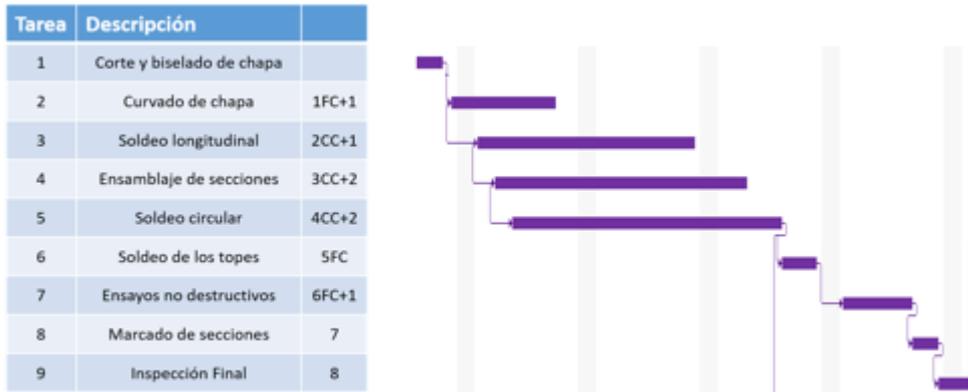


Figura 35: Diagrama de Gantt de la fabricación de pilotes

Según la estrategia constructiva, primero se realiza el corte y biselado de las chapas, luego en paralelo se realizan las tareas de: curvado de las chapas, soldadura longitudinal, ensamblaje parcial y soldadura circular. Luego de realizar estas tareas, se realizan las soldaduras en las camas de todos los ensamblajes parciales. Al terminar este proceso, se realiza un ensayo no destructivo para terminar con la inspección visual y pasar a la zona de almacenamiento.

El modelo de simulación se encuentra resumido en la Figura 36 en donde se pueden apreciar las diferentes partes, reflejadas con diferentes colores.

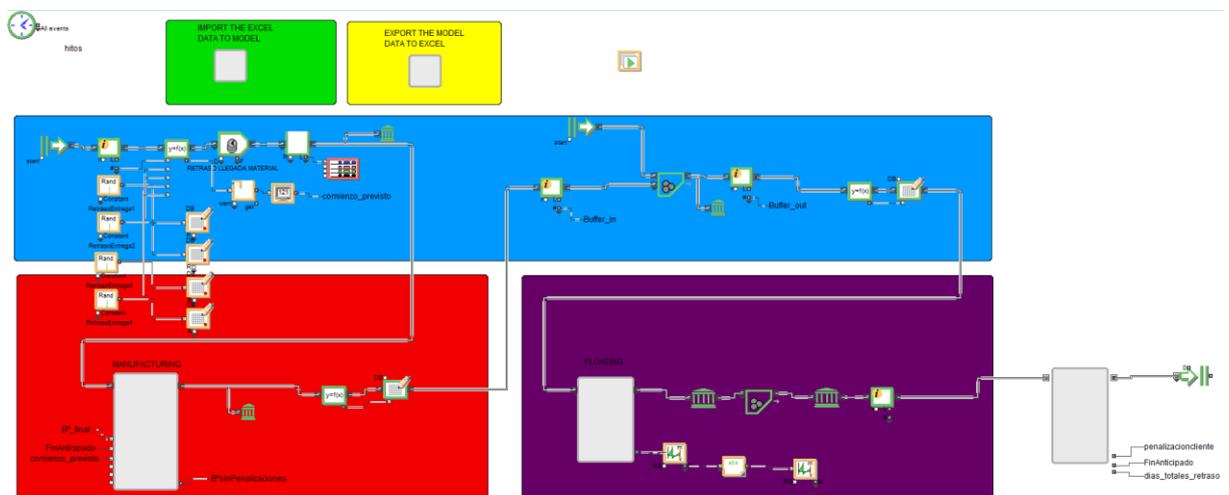
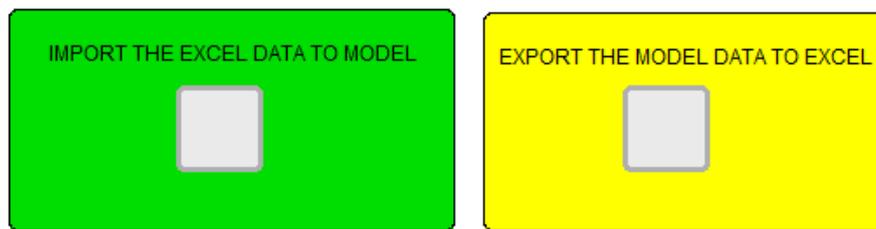


Figura 36: Modelo de simulación de ExtendSim

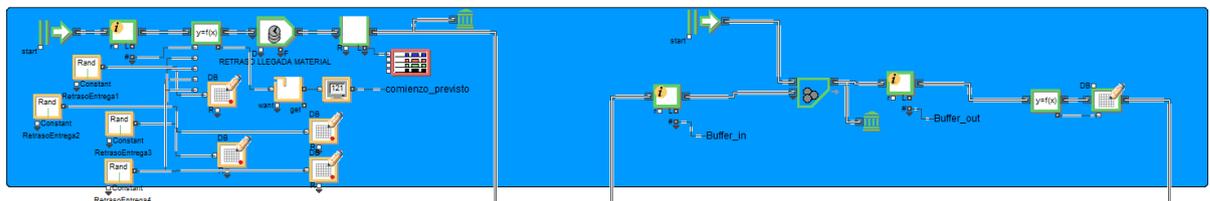
En la parte superior, bloques verde y amarillo, representan el intercambio de datos entre una hoja de cálculo de Excel y el modelo de simulación. El primero de ellos, importa los datos de una hoja de cálculo, y representa el tiempo cero en el modelo de simulación. Por otro lado, el bloque amarillo, exporta los resultados obtenidos al final de la simulación.

De esta hoja de cálculo se leerán los datos referidos a la llegada del material, turnos de los trabajadores e hitos de entrega de los pilotes. Los resultados que se calculen dentro del modelo como son: fechas de finalización de cada pile, fechas de entregas de pilotes, margen (floating) de las tareas y los costes de fabricación, que se exportarán a la hoja de cálculo para trabajar más fácilmente con esos datos.



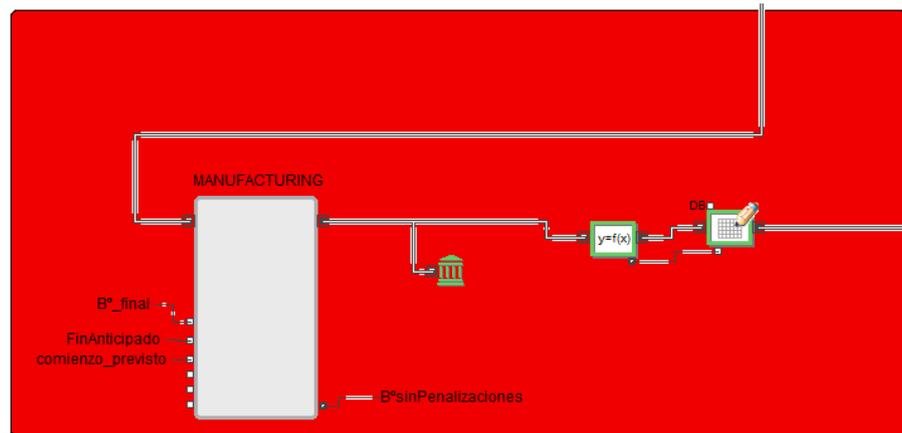
**Figura 37: Bloques de entrada y salida de datos del modelo de simulación**

El siguiente, bloque azul, son los bloques que sirven para crear las piezas necesarias para la fabricación de los pilotes de acuerdo con las órdenes de compra, fechas de los hitos de entrega, dimensiones de los almacenes..., es decir, los parámetros necesarios para que el modelo no rompa las restricciones impuestas.



**Figura 38: Creación de ítems para la simulación**

En el siguiente bloque, bajo un fondo rojo, se modeliza la línea de fabricación en sí. Este bloque genérico se alimenta de la llegada de material y finaliza con las chapas de los pilotes listas para el envío. Dentro de este bloque se realizan todas las tareas necesarias para la fabricación de los pilotes según la secuencia constructiva mencionada anteriormente. Además de llevarse a cabo la fabricación de los pilotes, dentro de este bloque, se calculan todos los costes relacionados al proyecto (turnos extras, sábados extras, mesas adicionales, etc). Para esto, es necesario contar el número de días que se trabaja con 2 turnos, con 3 turnos, el número de sábados con 2 y 3 turnos, y finalmente se aplican los costes a cada uno de los diferentes factores.



**Figura 39: Bloque resumen de la línea de fabricación de pilotos**

La línea de fabricación se modeliza de acuerdo a la estrategia constructiva. Al principio de la línea de fabricación se modeliza con un bloque los posibles retrasos que puedan surgir en la línea de fabricación. Estos retrasos debidos a diferentes imprevistos pueden surgir durante el transcurso del proyecto. Para representar la estrategia constructiva se han utilizado un total de 217 bloques, de los cuales la parte principal está representada en la Figura 40. En la Figura 41 se ve representado en diferentes recuadros cómo se calcula el número de días con 3 turnos en el proyecto, el número de días sábados con 2 y 3 turnos, el coste del personal, los ingresos y el beneficio del proyecto.

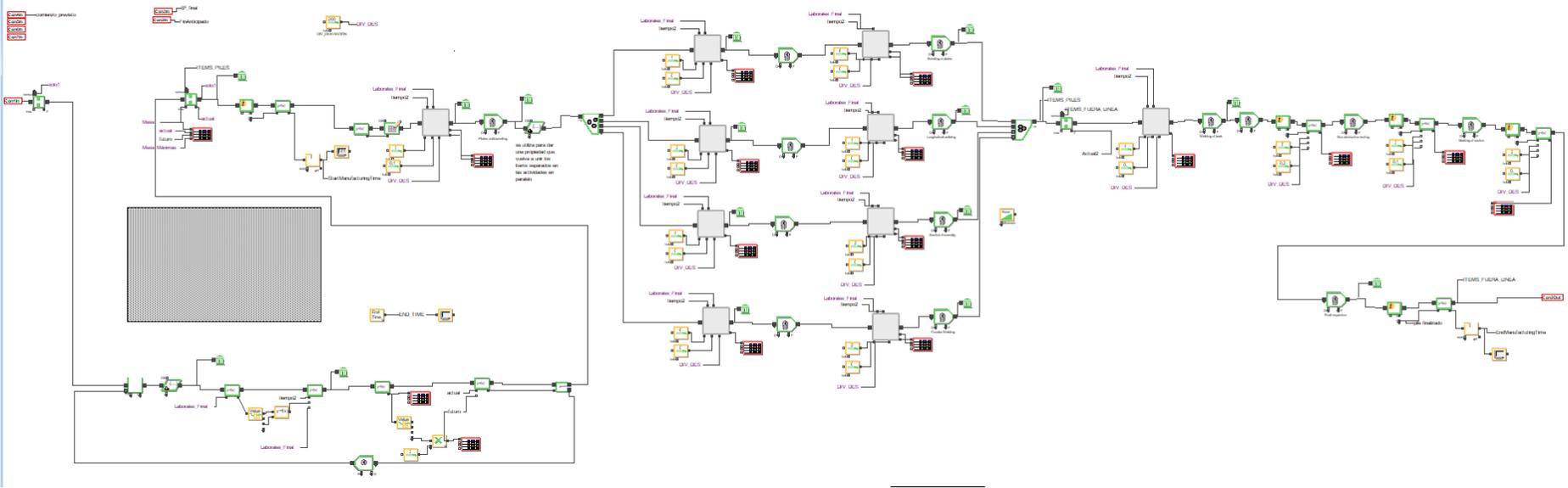


Figura 40: Fabricación de pilotes según la estrategia constructiva

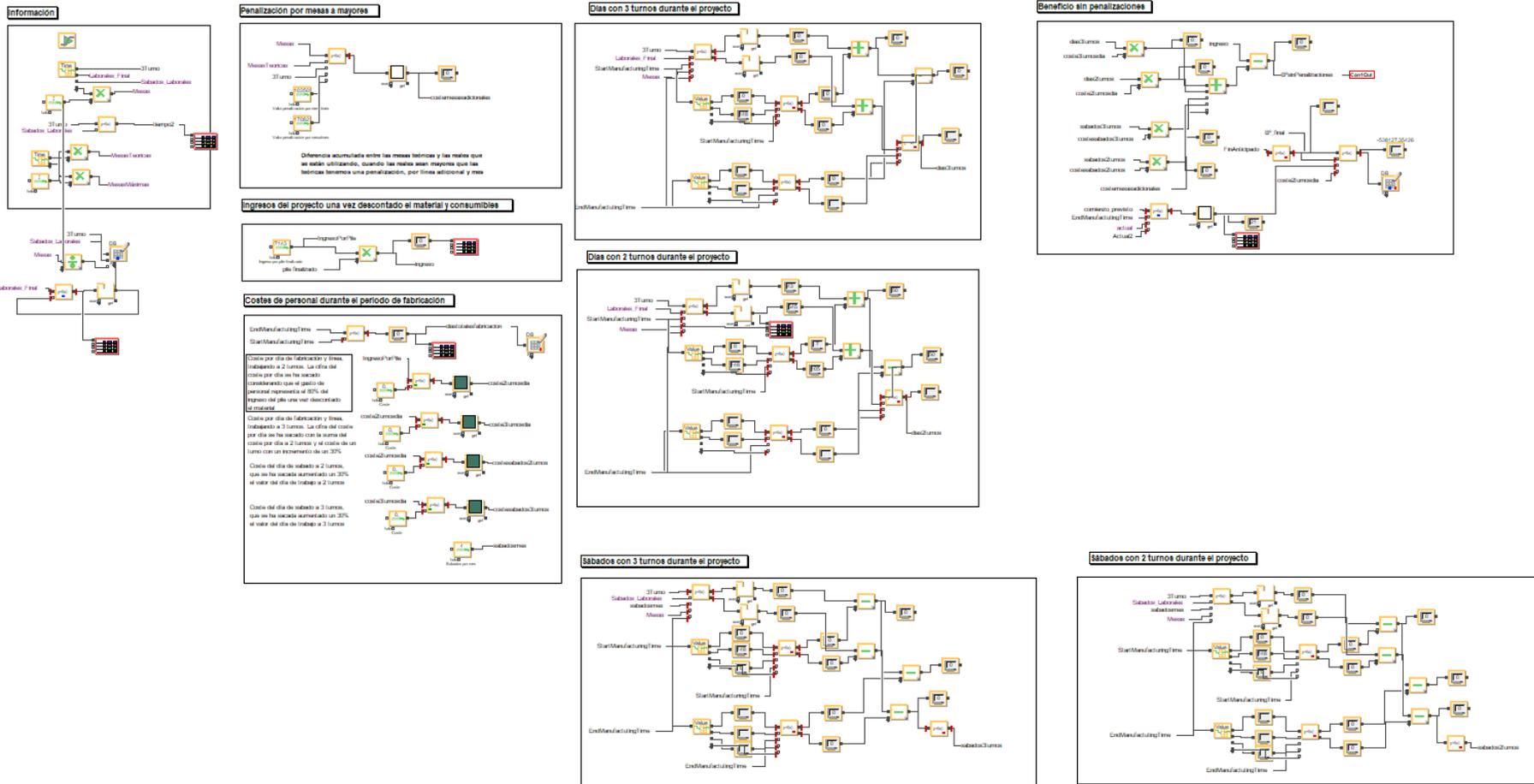


Figura 41: Cálculo de los costes y beneficio del proyecto

Los tiempos de procesos de las tareas de trabajo se aproximan mediante una distribución triangular basada en los tiempos de la planificación base, y los datos históricos extraídos de proyectos similares desarrollados en el astillero.

Por otra parte, debido a la dificultad del software utilizado para diseñar el modelo de simulación de eventos discretos para trabajar al mismo tiempo con dos o más calendarios, el modelo tiene como tiempo de tareas base dos turnos. Luego, si el modelo utiliza 3 turnos para los tiempos de las tareas, éste se divide por 1,5 y, si el modelo utiliza los sábados como día laborable se divide por 1,2. Es importante señalar que en este trabajo es imposible utilizar únicamente un sábado, o usar un tercer turno por un período inferior a un mes, debido a que el modelo de simulación considera los cambios en el calendario al comienzo de cada mes.

De acuerdo con el último párrafo, el tiempo de las tareas en el modelo se calcula con el siguiente código:

```
/*CurrentTurn >> Estate of the current turn  
FutureTurn>>Estate of the future turn  
CurrentTime>>Current simulation time  
WorkTime>> Tasks time with 2 labour turn per day  
ChangeTurn>>First day for each month*/  
double WorkThisMonth;  
  
if(CurrentTurn==FutureTurn || (currentTime+WorkTime)<ChangeTurn)  
{  
    ProcTime=ceil(WorkTime / CurrentTurn);  
}  
else  
{  
    WorkThisMonth=( ChangeTurn -currentTime)/ CurrentTurn;  
    ProcTime=ceil(WorkThisMonth +( WorkTime -  
        WorkThisMonth * CurrentTurn)/ FutureTurn);  
}
```

En relación con el coste definido en el modelo de simulación de eventos discretos, es interesante resaltar los costes de la Tabla 12.

| Descripción  | Coste (€) | Acrónimo |
|--|-----------|----------|
| Coste del día de fabricación con 2 turnos de mano de obra y por estación de trabajo activa | 5370      | CMD2T    |
| Coste del día de fabricación con 3 turnos de mano de obra y por estación de trabajo activa | 8879      | CMD3T    |
| Coste de un sábado con 2 turnos de mano de obra y por estación de trabajo activa           | 6995      | CMS2T    |
| Coste del día de un sábado con 3 turnos de mano de obra y por estación de trabajo activa   | 11541     | CMS3T    |
| Coste por día sin trabajo (retraso en la entrega del material)                             | 26895     | CDA      |
| Coste del día debido a finalizar el proyecto antes de lo planeado                          | 75000     | CDD      |

**Tabla 12: Costes del modelo de simulación**

Los costes diarios presentados en la Tabla 12 son calculados por la ecuación 2, la ecuación 3 y la ecuación 4.

$$CMD3T = \left(\frac{CMD2T}{2}\right) * 1,3 + CMD2T \quad \text{(Ecuación 2)}$$

$$CMS2T = CMD2T * 1,3 \quad \text{(Ecuación 3)}$$

$$CMS3T = CMD3T * 1,3 \quad \text{(Ecuación 4)}$$

Por lo tanto, el beneficio del Proyecto está definido en el modelo de simulación por:

$$BENEFICIO = INGRESO_{PILE} * N^o_{PILES} - (D2T * CMD2T + D3T * CMD3T + S2T * CMS2T + S3T * CMS3T + DSA * CDA + DA * CDD) \quad \text{(Ecuación 5)}$$

Donde:

- D2T: días de trabajo a 2 turnos
- D3T: días de trabajo a 3 turnos
- S2T: sábados laborables a 2 turnos
- S3T: sábados laborables a 3 turnos
- DSA: días con la fabricación parada por falta de acero
- DA: días que se termina con adelanto respecto a la planificación base.

Al mismo tiempo, el modelo de simulación de eventos discretos ha sido combinado con un optimizador de algoritmos genéticos. El optimizador juega con 45 variables, lo que significa un total de  $3,51844 * 10^{12}$  escenarios posibles. Como se trata de una optimización de la planificación basada en la planificación de costes, ha sido necesario usar una serie de restricciones para evitar calendarios incoherentes, como podrían ser los calendarios de la Figura 42 para las estaciones de trabajo utilizadas.

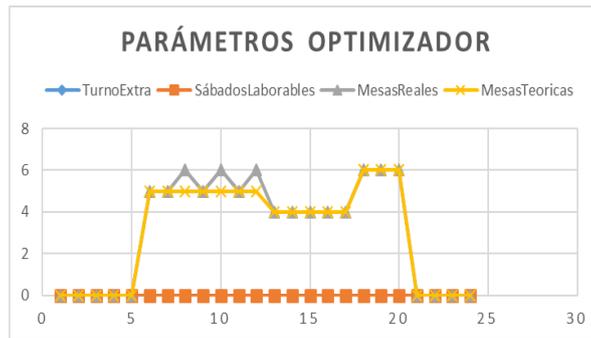


Figura 42: Mesas de trabajo disponibles para la fabricación

Del mismo modo, tenemos un ejemplo en la Figura 43 para la combinación entre el uso de los sábados y el tercer turno.

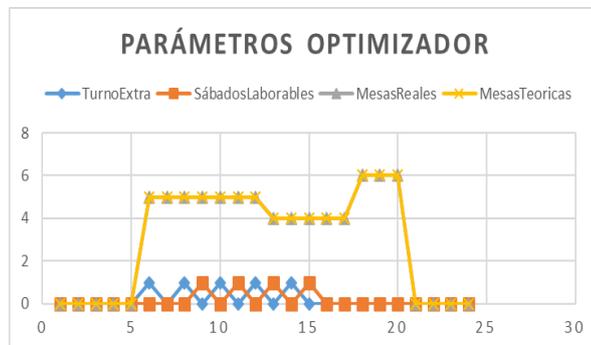


Figura 43: Sábados y tercer turno disponibles en la fabricación

En cuanto a la ecuación de las restricciones será como la del siguiente código:

```

For (i=5; i<20; i++)
{
    If(Month[i]!=Month[i+1] && Month[i+1]!=Month[i+2]) Reject=TRUE;
    If(SaturdayMonth[i]!=SaturdayMonth[i+1] && SaturdayMonth[i+1]!=SaturdayMonth[i+2] &&
    SaturdayMonth[i+2]!=SaturdayMonth[i+3]) Reject=TRUE;
    If(3TurnMonth[i]!= 3TurnMonth[i+1] && 3TurnMonth[i+1]!= 3TurnMonth[i+2] &&
    3TurnMonth[i+2]!= 3TurnMonth[i+3]) Reject=TRUE;
}
    
```

## 8 RESULTADOS

Dentro de este apartado se van a analizar diferentes escenarios que se pueden dar en un proyecto de fabricación. En este proyecto, con el objetivo de mostrar cómo se hace la gestión de riesgos en un proyecto real vamos a utilizar la línea de fabricación de pilotes, la cual hemos explicado en el apartado 5 de esta memoria.

Para realizar la simulación de los escenarios se va a partir de la planificación base de fabricación de pilotes, la cual cuenta con las siguientes restricciones:

- El máximo número de líneas disponibles para la fabricación es de 6 líneas. Cada línea fabrica los pilotes de 1 jacket a la vez, es decir, cada línea fabrica 3 pilotes en paralelo.
- De las fechas 20/02/2018 a 20/04/2018 hay dos líneas ocupadas por otro proyecto, por lo que no podrán ser utilizadas.
- La habilitación de cada línea a mayores de las planificadas tiene un coste de 103.500€ si se trabaja a 2 turnos y 170.820€ en caso de trabajar a 3 turnos
- La planificación base está hecha trabajando con semanas de 5 días laborables y 2 turnos de trabajo por día.
- La incorporación de un tercer turno supondrá un 30% más de coste con respecto a los otros dos turnos y se deberá mantener por lo menos durante un mes.
- Las horas extras tendrán un sobrecoste del 30% con respecto a las horas de trabajo base.
- Si se incluyen los sábados como día laborable, las horas del sábado se contabilizarán como horas extras.
- Los plazos de entrega de los pilotes son fechas fijadas al comienzo del contrato cuyo incumplimiento acarrea penalizaciones económicas.

Con el objetivo de mostrar las posibilidades de la herramienta creada, se definen 3 escenarios, el primer escenario es usado para la validación del modelo de eventos discretos, en segundo lugar, se estudia la aplicación del modelo para calcular las penalizaciones que se deben imponer al suministrador de materia prima por los retrasos en la entrega de material. Por último, se presenta un caso real de diseño de planes de mitigación.

### 8.1 Validación del modelo de simulación de eventos discretos

La estrategia de fabricación que se ha utilizado para realizar el modelo de simulación, es la misma que se utiliza en la planificación base, por lo tanto, si el modelo de simulación se utiliza con tiempos determinísticos, los resultados que aporta el modelo tienen que ser iguales a los de la planificación base.

Por ese motivo, con el objetivo de validar el modelo de simulación de eventos discretos se ha simulado el escenario equivalente a la planificación base, del cual se ha obtenido el diagrama de la **Figura 44**, donde se puede apreciar la fecha de finalización que calcula el modelo para el primer y el último pile de cada hito.

| CASO BASE (LLEGADA DE MATERIAL EN FECHA) |             |                    |              |                |                                  |          |
|--|-------------|--------------------|--------------|----------------|----------------------------------|----------|
| mes                                      | turno extra | Sábados Laborables | Mesas Reales | Mesas teóricas | Hito Load Out                    | Floating |
| 1  | 0           | 0                  | 0            | 0              | 1                                | 46       |
| 2  | 0           | 0                  | 0            | 0              | 2                                | 37       |
| 3  | 0           | 0                  | 0            | 0              | 3                                | 33       |
| 4  | 0           | 0                  | 0            | 0              | 4                                | 25       |
| 5  | 0           | 0                  | 0            | 0              | 5                                | 0        |
| 6  | 0           | 0                  | 5            | 5              | 6                                | 0        |
| 7  | 0           | 0                  | 5            | 5              | 7                                | 0        |
| 8  | 0           | 0                  | 5            | 5              |                                  |          |
| 9  | 0           | 0                  | 5            | 5              | <b>Bº Máximo</b>                 |          |
| 10                                       | 0           | 0                  | 5            | 5              | 1.800.036,00 €                   |          |
| 11                                       | 0           | 0                  | 5            | 5              | <b>Bº Esperado</b>               |          |
| 12                                       | 0           | 0                  | 5            | 5              | 1.800.035,76 €                   |          |
| 13                                       | 0           | 0                  | 4            | 4              | <b>% Reducción Bº</b>            |          |
| 14                                       | 0           | 0                  | 4            | 4              | 0%                               |          |
| 15                                       | 0           | 0                  | 4            | 4              | <b>Plazo Fabricación Teórico</b> |          |
| 16                                       | 0           | 0                  | 4            | 4              | 280                              |          |
| 17                                       | 0           | 0                  | 4            | 4              | <b>Plazo Fabricación Real</b>    |          |
| 18                                       | 0           | 0                  | 6            | 6              | 280                              |          |
| 19                                       | 0           | 0                  | 6            | 6              | <b>Retraso Llegada material</b>  |          |
| 20                                       | 0           | 0                  | 6            | 6              | <b>Hito</b>                      |          |
| 21                                       | 0           | 0                  | 0            | 0              | 1                                | 0        |
| 22                                       | 0           | 0                  | 0            | 0              | 2                                | 0        |
| 23                                       | 0           | 0                  | 0            | 0              | 3                                | 0        |
| 24                                       | 0           | 0                  | 0            | 0              | 4                                | 0        |

| id  | Fin Planificado | Fin Real   | #####987654321 | 123456789##### |
|-----|-----------------|------------|----------------|----------------|
| 1   | 04/10/2017      | 24/08/2017 |                |                |
| 18  | 04/10/2017      | 04/10/2017 |                |                |
| 19  | 16/11/2017      | 04/10/2017 |                |                |
| 36  | 16/11/2017      | 16/11/2017 |                |                |
| 37  | 02/01/2018      | 16/11/2017 |                |                |
| 54  | 02/01/2018      | 02/01/2018 |                |                |
| 55  | 12/02/2018      | 02/01/2018 |                |                |
| 72  | 12/02/2018      | 12/02/2018 |                |                |
| 73  | 07/05/2018      | 26/03/2018 |                |                |
| 90  | 07/05/2018      | 07/05/2018 |                |                |
| 91  | 15/06/2018      | 07/05/2018 |                |                |
| 108 | 15/06/2018      | 15/06/2018 |                |                |
| 109 | 03/08/2018      | 30/07/2018 |                |                |
| 126 | 03/08/2018      | 03/08/2018 |                |                |

Figura 44: Escenario línea base

Por otra parte, el modelo también calcula el beneficio esperado para el caso base, que en éste caso es en torno a 1.800.000 €, el cual se corresponde con lo esperado en la planificación base, y que se puede calcular de forma resumida con la ecuación 5, presentada en el apartado 7.2, y en la que debemos substituir los valores presentes en la Tabla 13, para lo referente a la fabricación y los valores de la Tabla 12 (apartado 7.2), para los costes.

| Parámetro | Valor |
|-----------|-------|
| D2T       | 280   |
| D3T       | 0     |
| S2T       | 0     |
| S3T       | 0     |
| DSA       | 0     |
| DA        | 0     |

Tabla 13: Datos del escenario de la línea base

Finalmente, para éste escenario, se muestra la gráfica de utilización de líneas de fabricación que exporta el modelo de simulación, donde la línea de color azul indica los pilotes bajo fabricación según la planificación base, la línea roja representa como se han fabricado los pilotes en el modelo de simulación, la línea negra representa los pilotes máximos que se pueden fabricar en paralelo, y la línea verde es una previsión de futuro de la línea negra, es

decir, controla que los pilotes no entren en la línea de fabricación si ésta tienen que ser cerrada en un período inferior al de fabricación de los pilotes que van a entrar en dicha línea.

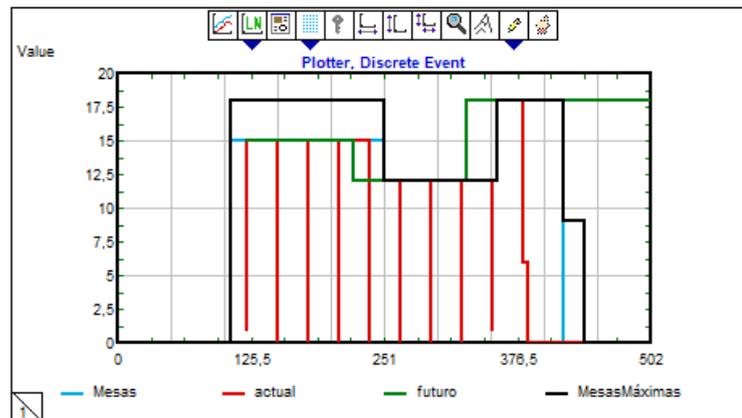


Figura 45: Representación del uso de las mesas en el proyecto

## 8.2 Validación del optimizador de eventos discretos

Un aspecto importante a la hora de utilizar modelos de simulación acompañados de optimizadores, es comprobar el buen funcionamiento del optimizador. El objetivo de la comprobación es evitar casos como los presentados en la Figura 42 o de la Figura 43 del apartado 7.2, y los cuales quitarían credibilidad al optimizador.

Por ese motivo, una vez que la herramienta tiene el diseño completo, se han planteado una serie de escenarios de fácil solución para la persona que realiza la planificación, pero que para el optimizador tienen la misma dificultad que cualquier otro escenario.

El primer escenario que se planteó es el retraso de un día en la llegada del primer hito de acero, este retraso en el proyecto real no es significativo, ya que se puede mitigar tan solo con la curva de aprendizaje del proyecto, pero si lo centramos en una planificación determinística, supondrá el desplazamiento de la fabricación en 1 día, lo que llevará a la planificación a retrasarse un día en todos los hitos de loadout en los cuales su floating sea 0, en éste caso los hitos 5, 6 y 7. A pesar de que cómo hemos comentado anteriormente, éste escenario no se puede comparar con un escenario real, la forma de resolverlo para el optimizador es la misma que si se trata de un escenario basado en datos y supuestos reales de un proyecto de fabricación, la diferencia de este escenario está que la resolución manual es sencilla, ya que es de suponer que si utilizamos una jornada de sábado, se compensará el día perdido por el retraso de material.

Una vez puesto en escena el caso a estudiar, los resultados obtenidos del optimizador se muestran en la Figura 46, en la que se puede ver la elección de utilizar los sábados del mes 14 para mitigar el efecto del día de retraso. En éste punto es importante aclarar, que el optimizador se ha limitado para que no utilice un solo sábado, sino que, en caso de usar los sábados como solución, deberá utilizar los sábados de un mes completo, por ese motivo, y también debido a que el día de retraso por material se tiene en cuenta para restar de los beneficios, la reducción del beneficio global es del 5%.

Por otra parte, en éste caso, la elección del mes número 14 no es la única solución posible ya que, la utilización de los sábados del mes 13, 15 o 16 tendrían el mismo resultado. Estas otras posibilidades también las muestra el optimizador, pero no se muestran las tablas del resultado en ésta memoria para evitar la colocación de figuras que expresan el mismo resultado.

| MEJOR SOLUCIÓN PARA 1 DÍA DE RETRASO EN EL PRIMER HITO DE LLEGADA DE ACERO |             |                    |              |                |                                  |          |
|--|-------------|--------------------|--------------|----------------|----------------------------------|----------|
| mes  | turno extra | Sábados Laborables | Mesas Reales | Mesas teóricas | Hito Load Out                    | Floating |
| 1  | 0           | 0                  | 0            | 0              | 1                                | 45       |
| 2  | 0           | 0                  | 0            | 0              | 2                                | 36       |
| 3  | 0           | 0                  | 0            | 0              | 3                                | 32       |
| 4  | 0           | 0                  | 0            | 0              | 4                                | 24       |
| 5  | 0           | 0                  | 0            | 0              | 5                                | 3        |
| 6  | 0           | 0                  | 5            | 5              | 6                                | 3        |
| 7  | 0           | 0                  | 5            | 5              | 7                                | 0        |
| 8  | 0           | 0                  | 5            | 5              |                                  |          |
| 9  | 0           | 0                  | 5            | 5              | <b>Bº Máximo</b>                 |          |
| 10   | 0           | 0                  | 5            | 5              | 1.800.036,00 €                   |          |
| 11   | 0           | 0                  | 5            | 5              | <b>Bº Esperado</b>               |          |
| 12   | 0           | 0                  | 5            | 5              | 1.715.011,88 €                   |          |
| 13   | 0           | 0                  | 4            | 4              | <b>% Reducción Bº</b>            |          |
| 14   | 0           | 1                  | 4            | 4              | 5%                               |          |
| 15   | 0           | 0                  | 4            | 4              | <b>Plazo Fabricación Teórico</b> |          |
| 16   | 0           | 0                  | 4            | 4              | 280                              |          |
| 17   | 0           | 0                  | 4            | 4              | <b>Plazo Fabricación Real</b>    |          |
| 18   | 0           | 0                  | 6            | 6              | 279                              |          |
| 19   | 0           | 0                  | 6            | 6              | <b>Retraso Llegada material</b>  |          |
| 20   | 0           | 0                  | 6            | 6              | <b>Hito</b>                      |          |
| 21   | 0           | 0                  | 0            | 0              | 1                                | 1        |
| 22   | 0           | 0                  | 0            | 0              | 2                                | 0        |
| 23   | 0           | 0                  | 0            | 0              | 3                                | 0        |
| 24   | 0           | 0                  | 0            | 0              | 4                                | 0        |

Sin plan de mitigación, 1 día de retraso en el hito 5 y 1 día de retraso en el hito 6, lo que hace 2 días de retraso y un Bº de 1.508.664,88 €

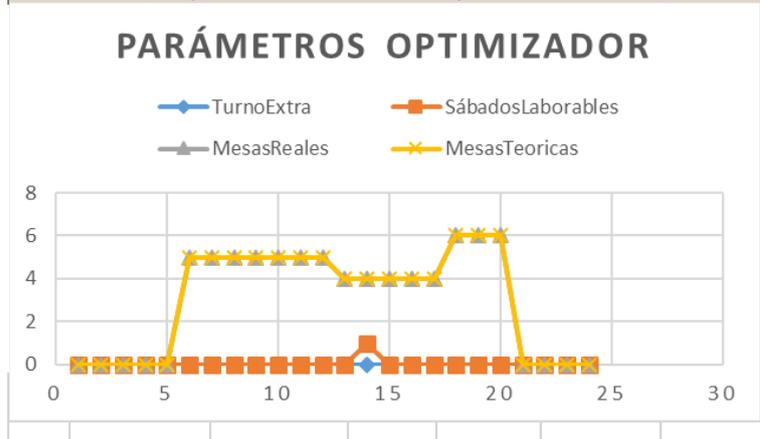


Figura 46: Parámetros del optimizador

El siguiente escenario que se propone para validar el optimizador es el retraso de 3 días en la entrega del acero del primer hito, del cual se obtiene el plan de mitigación representado por la Figura 47. Este escenario es similar al anterior estudiado, además, teniendo en cuenta que el optimizador tiene que usar como mínimo los fines de semana de un mes completo para generar la solución, el resultado del optimizador debería ser el mismo que para el escenario anterior.



Figura 47: Escenario con 3 días de retraso

La Figura 47 representa la utilización de los sábados del mes 15, pero como ha sido comentado anteriormente, tanto los sábados del mes 13, 14, 16 serían válidos. En cuanto a la reducción prevista del beneficio debida al plan de mitigación, para este escenario alcanza un valor del 8%, lo que implica 53.700€ más que en el caso anterior, que son debidos a que

RESULTADOS

MANUEL ESPARÍS SILVA

al principio del proyecto hay 2 días más que en el caso anterior en los que no se trabaja por falta de materia prima, los cuales repercuten en el beneficio final del proyecto.

Estos dos escenarios presentados dan una buena impresión del modelo de simulación de eventos discretos utilizado, pero para asegurar al lector la confiabilidad en el optimizador de algoritmos genéticos utilizado, se van a estudiar dos casos más, cuyos resultados están representados por la Figura 48.



Figura 48: Resultados validación del algoritmo

En la parte izquierda de la Figura 48, se presenta un escenario con un retraso, -33 de 15 días, retraso suficiente para que no dé tiempo a hacer 4 series de pilas antes de reducir el número de mesas. Por ese motivo, el optimizador utiliza los sábados del mes 12, volviendo de esta forma, a poder fabricar 4 series de pilas antes de reducir las mesas.

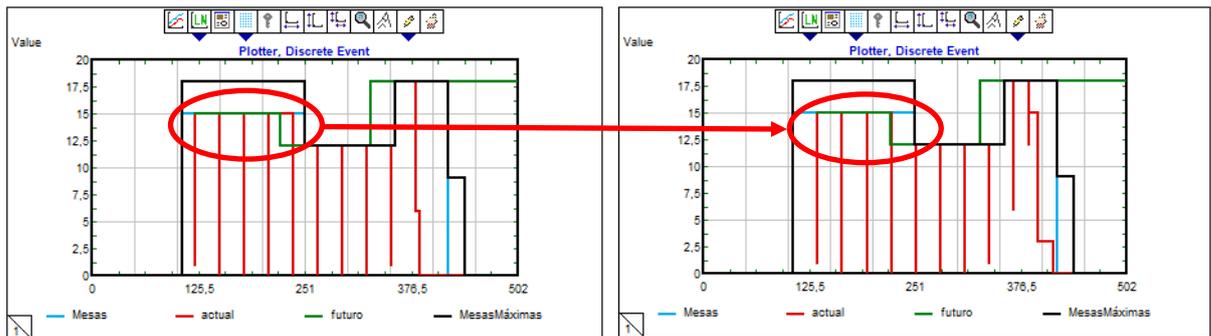


Figura 49: Utilización de las mesas

Luego utiliza un tercer turno en el tramo donde se dispone de 4 líneas de fabricación, ya que es más económico que hacerlo en un tramo donde se disponga de 5 mesas, y, según las cifras usada en éste proyecto, es más económico hacer un 3 turno durante un mes que 4 meses seguidos utilizando los sábados.

En cuanto al escenario cuyos resultados se muestran en la parte derecha de la Figura 48, los retrasos estudiados son de 25 días para el primer hito de llegada de acero y 10 para el segundo hito. Al igual que el caso anterior, los retrasos provocan no poder hacer 4 series de pilotes antes de reducir el número de mesas, por lo tanto, el optimizador diseñado utilizará el tercer turno de fabricación durante un mes y los sábados de tres meses para poder hacer las 4 series antes de reducir el número de mesas.

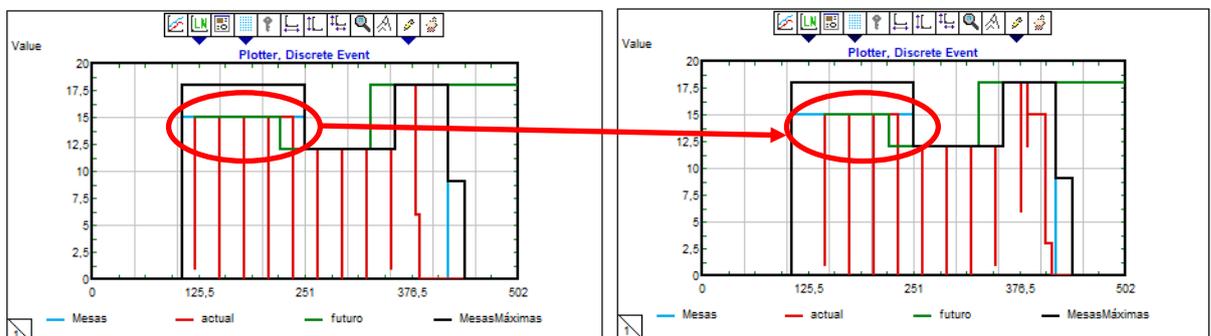


Figura 50: Previsión del uso de las mesas de trabajo

Finalmente, para terminar de mitigar los retrasos, el optimizador propone el uso de la jornada de sábado durante 3 meses, en la etapa de fabricación donde hay tan solo 4 líneas habilitadas.

### 8.3 Diseño de un plan de mitigación para un caso real

Como último escenario de análisis en éste proyecto se va a presentar un escenario real de diseño de un plan de mitigación. En este caso debido a factores externos al astillero, se ha tenido que parar la fabricación durante un mes, llevando el proyecto de una situación estable, y con un avance ajustado al avance planificado a una situación en la que el avance real está muy por debajo de lo esperado en la planificación base, conforme se puede ver en la Figura 51.

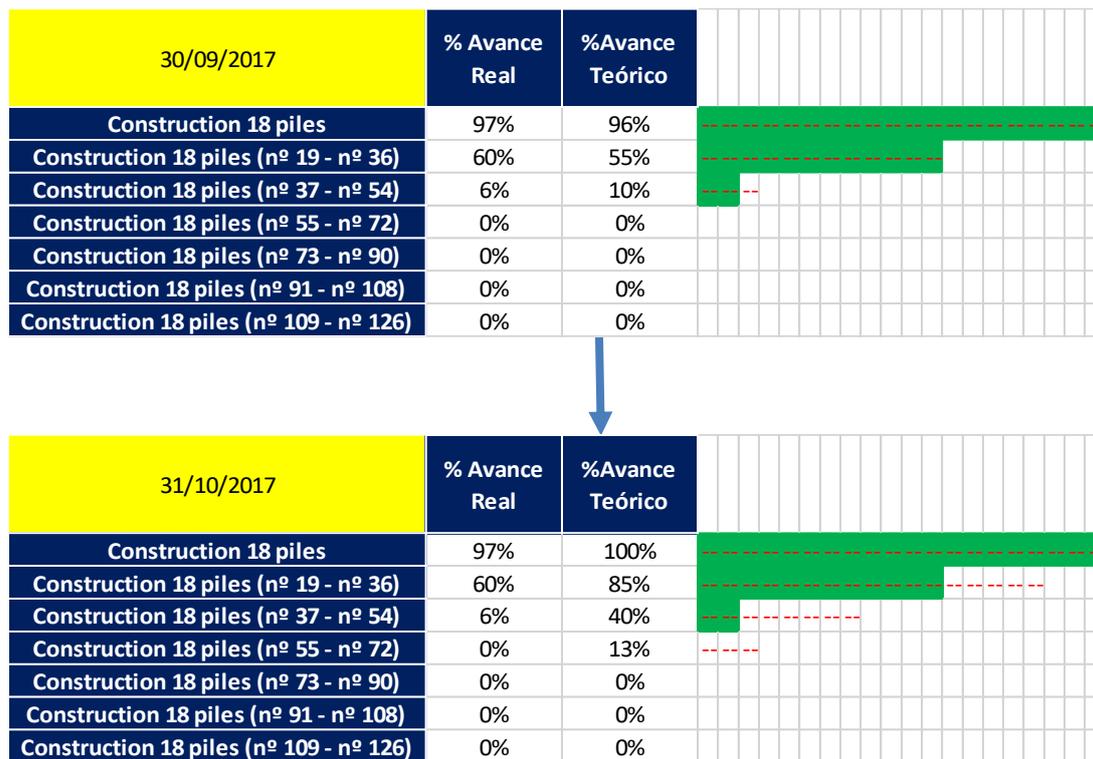


Figura 51: Comparativa entre el avance real y planificado

Esta parada en la fabricación, una vez actualizada en la planificación del proyecto, supone, como se puede ver en la Figura 52, un aumento en el plazo de fabricación, y, por lo tanto, el incumplimiento de varios hitos de load-out, lo que implica que el beneficio del proyecto pase a ser negativo, es decir, este proyecto generaría pérdidas en el astillero.

En este punto, es importante resaltar que este primer análisis solo es indicativo de lo que pasaría si no se hiciese nada para mitigar la parada de la fabricación, pero en ningún caso es un escenario realista, ya que, en estos casos, siempre se va a diseñar un plan de mitigación del riesgo, ya sea más o menos óptimo, pero que influirá en el proyecto para que las cifras representadas en la Figura 52, no se lleguen a producir.

| mes | turno extra | Sábados Laborables | Mesas Reales | Mesas teóricas | Hito Load Out                    | Floating |
|-----|-------------|--------------------|--------------|----------------|----------------------------------|----------|
| 1   | 0           | 0                  | 0            | 0              | 1                                | 25       |
| 2   | 0           | 0                  | 0            | 0              | 2                                | 16       |
| 3   | 0           | 0                  | 0            | 0              | 3                                | 12       |
| 4   | 0           | 0                  | 0            | 0              | 4                                | -25      |
| 5   | 0           | 0                  | 0            | 0              | 5                                | -21      |
| 6   | 0           | 0                  | 5            | 5              | 6                                | -33      |
| 7   | 0           | 0                  | 5            | 5              | 7                                | -29      |
| 8   | 0           | 0                  | 5            | 5              |                                  |          |
| 9   | 0           | 0                  | 5            | 5              | <b>Bº Máximo</b>                 |          |
| 10  | 0           | 0                  | 5            | 5              | 1.800.036,00 €                   |          |
| 11  | 0           | 0                  | 5            | 5              | <b>Bº Esperado</b>               |          |
| 12  | 0           | 0                  | 5            | 5              | -17.408.095,91 €                 |          |
| 13  | 0           | 0                  | 4            | 4              | <b>% Reducción Bº</b>            |          |
| 14  | 0           | 0                  | 4            | 4              | -1067%                           |          |
| 15  | 0           | 0                  | 4            | 4              | <b>Plazo Fabricación Teórico</b> |          |
| 16  | 0           | 0                  | 4            | 4              | 280                              |          |
| 17  | 0           | 0                  | 4            | 4              | <b>Plazo Fabricación Real</b>    |          |
| 18  | 0           | 0                  | 6            | 6              | 309,01                           |          |
| 19  | 0           | 0                  | 6            | 6              | <b>Retraso Llegada material</b>  |          |
| 20  | 0           | 0                  | 6            | 6              | <b>Hito</b>                      |          |
| 21  | 0           | 0                  | 0            | 0              | 1                                | 0        |
| 22  | 0           | 0                  | 0            | 0              | 2                                | 0        |
| 23  | 0           | 0                  | 0            | 0              | 3                                | 0        |
| 24  | 0           | 0                  | 0            | 0              | 4                                | 0        |

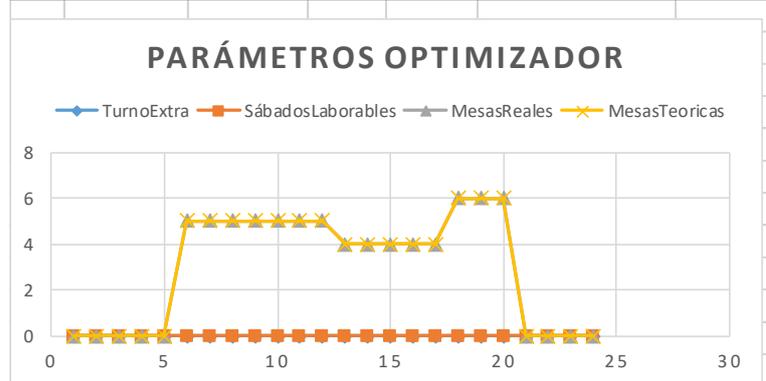


Figura 52: Escenario con parada de la fabricación sin mitigación

Bajo este escenario, una vez que se acordó la reanudación de los trabajos en el astillero, se utilizó la herramienta diseñada para la elaboración de un plan de mitigación que permitiese alcanzar los hitos de load-out y que supusiese una mínima reducción del beneficio esperado del proyecto.

En este caso la herramienta diseñada se utilizó siguiendo los pasos del diagrama de flujo de la Figura 53, partiendo de la planificación con el avance del proyecto a fecha de la reanudación de los trabajos, utilizando posteriormente la simulación de Montecarlo para para calcular el CI, y, por último, utilizar la simulación de eventos discretos para obtener el plan de mitigación de mínimo coste.

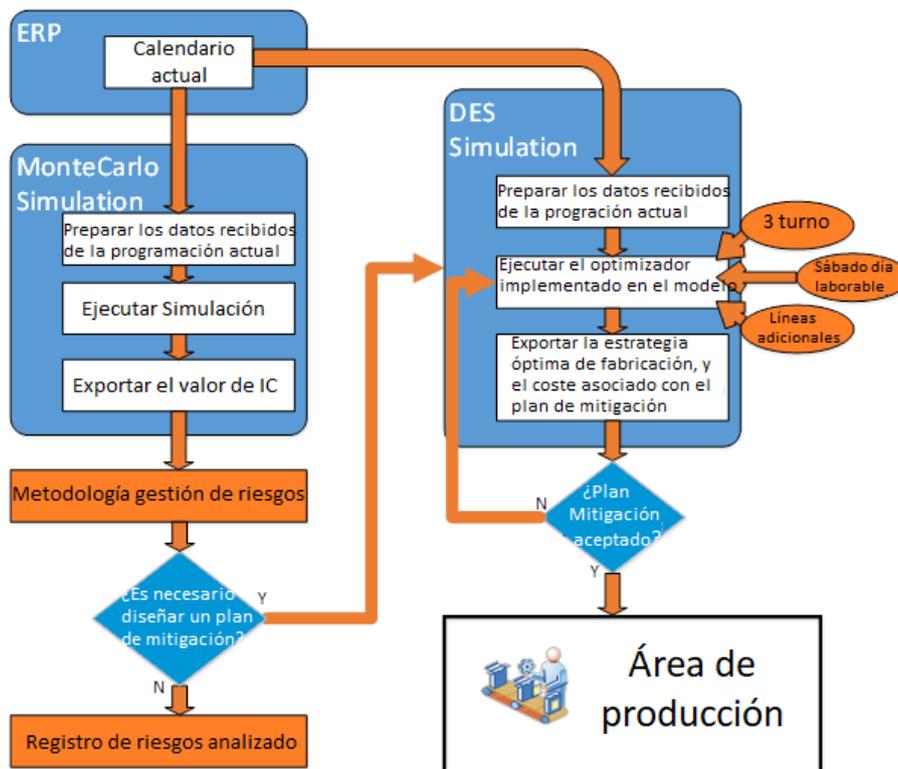


Figura 53: Diagrama de flujo de los dos módulos de simulación integrados

Una vez ejecutada la simulación de Montecarlo, se obtiene la tabla de la Figura 54, en la cual se muestran las probabilidades de retraso para cada hito de loadout. En dicha tabla se ve que los 3 primeros hitos no se ven afectados por el paro en la fabricación, pero para los 4 últimos hitos las probabilidades de retraso son elevadas, con una probabilidad de tener entre 15 y 30 días de retraso superior al 60% para los hitos 4 y 5 (IP alta) y un poco inferior a 60% para los hitos 6 y 7 (IP media). Haciendo referencia a la metodología de gestión de riesgos, un retraso entre 15 y 30 días supone un II medio, por lo tanto, aplicando la ecuación del IC, se obtiene para los hitos 4 y 5 un IC igual a 12, y para los hitos 6 y 7 un IC igual a 9, situándose ambos índices en un nivel de riesgo medio (NRM).

El nivel de NRM como se comentó en la Tabla 11, no requiere acciones inmediatas, pero si requiere la elaboración de una estrategia que mitigue el riesgo. Por otra parte, si se evalúa el riesgo para el proyecto completo y no por hitos independientes el escenario cambia completamente, ya que la suma de los retrasos en los 4 últimos hitos supera los 50 días de retraso en el 100% de las simulaciones de Montecarlo. De esta forma para el proyecto completo tenemos un II igual a 5 y un IP igual a 5, lo que hace un IC igual a 25, o lo que es lo mismo, un nivel de riesgo muy alto (NRMA), por lo que se debe diseñar un plan de mitigación del riesgo con la mayor brevedad.

| Hito<br>LoadOut | Probabilidad de retraso [días] |     |     |     |     |
|-----------------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                 | <5                             | <15 | <30 | <50 | ≥50 |
| Hito 1          | 0%                             | 0%  | 0%  | 0%  | 0%  |
| Hito 2          | 0%                             | 0%  | 0%  | 0%  | 0%  |
| Hito 3          | 0%                             | 0%  | 0%  | 0%  | 0%  |
| Hito 4          | 0%                             | 23% | 63% | 14% | 0%  |
| Hito 5          | 1%                             | 27% | 68% | 4%  | 0%  |
| Hito 6          | 0%                             | 15% | 56% | 29% | 0%  |
| Hito 7          | 0%                             | 18% | 57% | 25% | 0%  |

Figura 54: Probabilidades de retraso de los hitos

Otra forma de identificar la necesidad de diseño de un plan de mitigación es la representación de las curvas S teórica y real que se representa en la Figura 55. Curvas S teórica y real, en dicha figura se representa como sería el avance del proyecto después del parón en la producción comparado con el avance previsto en la planificación base. En ella se ve que, si se mantiene el ritmo de fabricación que se llevaba hasta el momento, es imposible volver a alcanzar la curva S teórica, lo que apoya los resultados de la simulación de Montecarlo, que prevé un retraso total superior a 50 días en la entrega de los pilotes al cliente

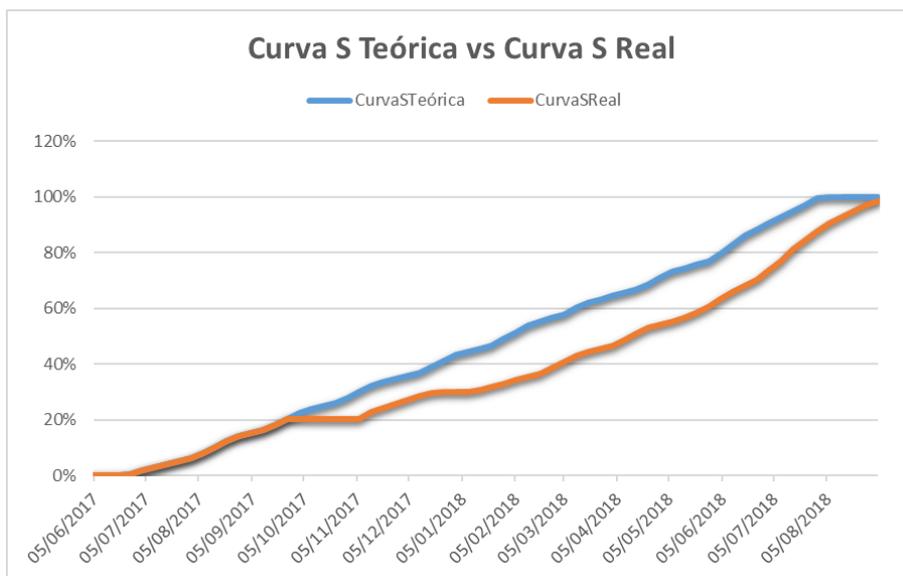


Figura 55: Curvas S teórica y real

Una vez que está clara la necesidad de diseñar un plan de mitigación del riesgo, se ha usado el modelo de simulación de eventos discretos en combinación con el optimizador de algoritmos genéticos para obtener la solución que maximice el beneficio calculado por la ecuación 5.

El resultado obtenido por el modelo se presenta en la Figura 56, en la que, según el optimizador utilizado, la utilización de un tercer turno en los meses 11 y 15, es suficiente para mitigar el riesgo, y no incumplir los hitos de entrega de los pilotes al cliente. A su vez, con los números empleados, y teniendo en cuenta que el mes que se ha parado la producción los gastos del astillero han sido los mismos que si la fabricación continuase, la reducción del

RESULTADOS

MANUEL ESPARÍS SILVA

beneficio es de un 37%, con lo que el beneficio esperado para éste escenario es en torno a 1.100.000 €.

Es interesante resaltar que la mayor parte de la reducción del beneficio ha sido al mantener los gastos del astillero durante el mes que no se ha podido fabricar. Si éstos costes se evitan, el beneficio esperado sería en torno a 1.600.000 €, lo que implica tan solo una reducción del beneficio esperado por la planificación base del 7%.

Por lo tanto, el coste del plan de mitigación diseñado está en torno a 120.000 €, que dista mucho de los 17 millones de pérdida que supondría no llevar a cabo el plan de mitigación.

| mes | turno extra | Sábados Laborables | Mesas Reales | Mesas teóricas | Hito Load Out             | Floating |
|-----|-------------|--------------------|--------------|----------------|---------------------------|----------|
| 1   | 0           | 0                  | 0            | 0              | 1                         | 25       |
| 2   | 0           | 0                  | 0            | 0              | 2                         | 22       |
| 3   | 0           | 0                  | 0            | 0              | 3                         | 23       |
| 4   | 0           | 0                  | 0            | 0              | 4                         | 15       |
| 5   | 0           | 0                  | 0            | 0              | 5                         | 1        |
| 6   | 0           | 0                  | 5            | 5              | 6                         | 1        |
| 7   | 0           | 0                  | 5            | 5              | 7                         | 0        |
| 8   | 0           | 0                  | 5            | 5              |                           |          |
| 9   | 0           | 0                  | 5            | 5              | Bº Máximo                 |          |
| 10  | 0           | 0                  | 5            | 5              | 1.800.036,00 €            |          |
| 11  | 1           | 0                  | 5            | 5              | Bº Esperado               |          |
| 12  | 0           | 0                  | 5            | 5              | 1.138.946,54 €            |          |
| 13  | 0           | 0                  | 4            | 4              | % Reducción Bº            |          |
| 14  | 0           | 0                  | 4            | 4              | 37%                       |          |
| 15  | 1           | 0                  | 4            | 4              | Plazo Fabricación Teórico |          |
| 16  | 0           | 0                  | 4            | 4              | 280                       |          |
| 17  | 0           | 0                  | 4            | 4              | Plazo Fabricación Real    |          |
| 18  | 0           | 0                  | 6            | 6              | 280                       |          |
| 19  | 0           | 0                  | 6            | 6              | Retraso Llegada material  |          |
| 20  | 0           | 0                  | 6            | 6              | Hito                      |          |
| 21  | 0           | 0                  | 0            | 0              | 1                         | 0        |
| 22  | 0           | 0                  | 0            | 0              | 2                         | 0        |
| 23  | 0           | 0                  | 0            | 0              | 3                         | 0        |
| 24  | 0           | 0                  | 0            | 0              | 4                         | 0        |

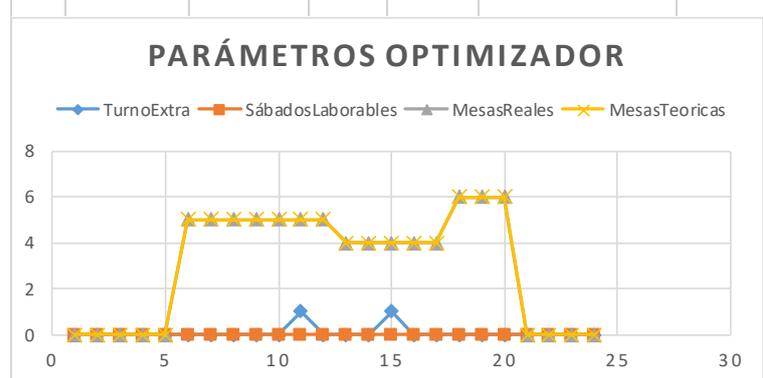
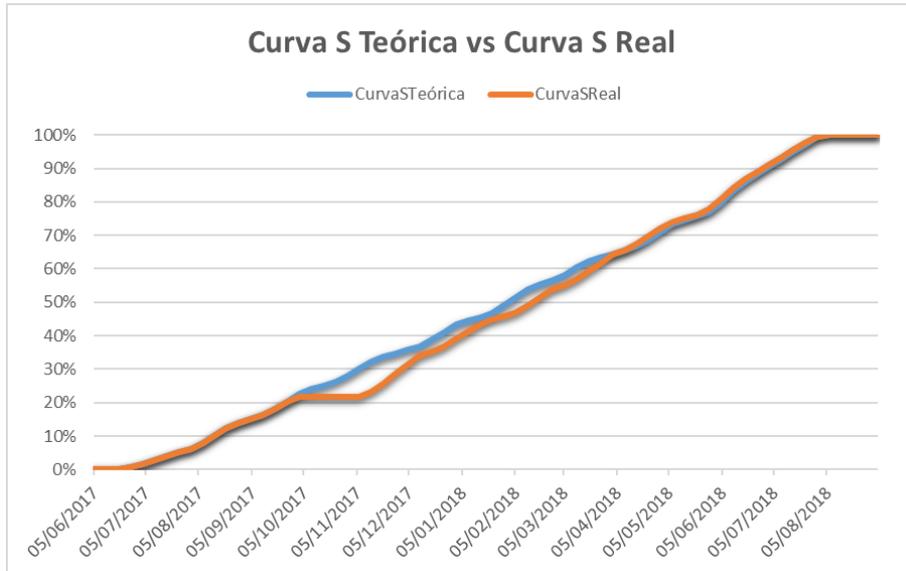


Figura 56: Resultados del plan de mitigación

El efecto que supone el plan de mitigación se puede ver también en la representación de las curvas de avance del proyecto, por ese motivo, la Figura 57, representa una comparativa de la curva S de avance para la planificación base y la curva S de avance que ofrece el modelo de simulación aplicando el plan de mitigación propuesto, siendo fácil identificar en la gráfica

el período de parada en la fabricación, así como, el aumento en el ritmo de trabajo una vez que se reanuda la fabricación.



**Figura 57: Curvas S con el plan de mitigación aplicado**

## 9 CONCLUSIONES

En este proyecto se ha desarrollado una herramienta integrada de ayuda a la gestión de riesgos personalizada para un proyecto de fabricación de pilotes, enlazando la simulación de eventos discretos y la simulación de Montecarlo.

Mediante esta herramienta se tiene la posibilidad de calcular cuantitativamente los riesgos del proyecto, puesto que se han incluido los costes asociados a mano de obra, uso de nuevas líneas de fabricación, utilización de turnos extras, penalizaciones debidas a retrasos y paradas en la fabricación. Con la herramienta desarrollada, al identificar un nuevo riesgo que pueda comprometer el proyecto, es posible proponer planes de mitigación con diferentes escenarios en los cuales se puede elegir, a posteriori, cuál es el mejor de ellos en base a criterios tales como: el coste del plan de mitigación, preferencias de uso de las diferentes medidas de mitigación adoptadas o las posibilidades de nuevas negociaciones con el cliente.

Por otra parte, en los siguientes párrafos se exponen las principales conclusiones que se han obtenido con la realización de este trabajo fin de grado

- En primer lugar, se destaca la efectividad de combinar la simulación de Montecarlo y la simulación de eventos discretos, destacando la primera de ellas por la fácil creación de modelos de simulación a partir de planificaciones deterministas desarrolladas en Microsoft Project o en softwares de planificación similares. Por su parte, la simulación de eventos discretos se diferencia de la simulación de Montecarlo por la inclusión del factor tiempo en la simulación, lo que permite una mejor gestión de los recursos disponibles y que son variables con el transcurso del proyecto.
- Es también destacable la posibilidad de usar un optimizador basado en algoritmos genéticos dentro de la simulación de eventos discretos, ya que estos algoritmos permiten la obtención de soluciones factibles y generalmente cercanas al óptimo con un tiempo de cálculo aceptable. Por su parte, la simulación de eventos discretos aporta en este conjunto su buena gestión de las restricciones establecidas en el modelo.
- En cuanto al proceso de fabricación para el que se ha particularizado la herramienta desarrollada, se destaca como conclusión en este proyecto la gran dependencia que tienen los hitos de fabricación con la mano de obra, por ese motivo, se ha estudiado como principal fuente de soluciones a los riesgos la inclusión de nuevas jornadas laborables o la inclusión de un tercer turno.

En general, en base a todo lo desarrollado en este proyecto, parece interesante resaltar la necesidad de una herramienta cuantitativa de evaluación de riesgos que ayude en la toma de decisiones al equipo de gestión de riesgos. Según las percepciones obtenidas durante la realización de este trabajo, la herramienta de evaluación cuantitativa debe ser usada en combinación con la gestión de riesgos cualitativa que se ha explicado en este trabajo, ya que dicha evaluación cualitativa podrá evitar decisiones erróneas que por diversos motivos pueda tomar el modelo de simulación.

Finalmente, destacar la importancia de tener este tipo de proyecto un buen programa de gestión de riesgos, ya que dicho programa es el que establece los umbrales de riesgos, sin los cuales no sería posible usar la herramienta desarrollada en este proyecto.

## 10 FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

Como futuras líneas de desarrollo a este trabajo, existen diversos puntos a tratar, algunos de los cuales ya se han comenzado en el transcurso de la realización de este trabajo, y que actualmente están en desarrollo.

Una de las principales líneas que está en desarrollo es la integración mediante Visual Basic Automation (VBA) de las herramientas que se han utilizado para la realización de este trabajo, entre las que se incluyen: MSPProject, Excel, @Risk y ExtendSim. Con esta integración lo que se pretende conseguir es la automatización de la importación y exportación de datos entre los diferentes módulos. Por un lado, el módulo de simulación de Montecarlo en el que se integra MSPProject, Excel y @Risk para el cálculo del índice de criticidad (IC) de los riesgos identificados. Y, por otro lado, el módulo de simulación de eventos discretos para integrar MSPProject, Excel y ExtendSim.

También en desarrollo está la colaboración con la línea de la UMI “Modelado y simulación de procesos de eólica marina”, para integrar la herramienta diseñada con su modelo de simulación para la fabricación de jackets, el cual engloba por completo del astillero de Navantia Fene, con dicha integración sería posible utilizar el modelo de la UMI como simulador de eventos discretos, y aplicar los conocimientos obtenidos en este trabajo para la gestión de riesgos a través de simulación.

Centrado este apartado en el planteamiento de líneas futuras, resulta interesante proponer la inclusión de un método metaheurístico aproximativo externo, ya que el que se ha utilizado en este TFM es el un optimizador interno del software de simulación de eventos discretos, el cual presenta ciertas limitaciones a la hora de trabajar con un número de variables elevado.

Finalmente, la Figura 58 muestra otra posibilidad de futuro para este trabajo basada en el modelado 3D del proceso de fabricación con el software de simulación FlexSim. El uso de simuladores de eventos discretos en 3D como es FlexSim, permite mejorar su uso como herramienta de soporte al equipo de dirección de proyecto. Una de las principales razones de esto es que nos permite ver el proceso de fabricación de una forma más real con lo que la disposición de las máquinas en los talleres permite dar una imagen más real del proyecto que una simulación realizada en 2D.

A su vez, hay que tener en cuenta que al desarrollar el modelo en 3D, se puede integrar el modelo con gafas de realidad virtual, dando una sensación de realidad mucho mayor y que transmite una confianza de cara a realizar cambios en el proyecto.



Figura 58: Modelo de simulación en 3D

## 11 BIBLIOGRAFÍA

Cube, P. Von, Härtel, L., Schmitt, R., Ponsard, C., Massonet, P., Landtsheer, R. De, Ospina, G., Printz, S. and Jeschke, S. (2016) 'Monetary Quantification of Supply Risks of Manufacturing Enterprises - Discrete Event Simulation Based Approach', *Procedia CIRP*, 57, pp. 164–170.

Ewea (2017) Reviving wind markets and delivering on our 2030 objectives, The European Wind Industry's to the European Commission's Proposals on a Governance Regulation and a Renewable Energy Directive. Available at: <http://www.ewea.org/statistics/offshore-statistics>.

EWEA (2017) The European offshore wind industry, Key trends and statistics 2016. Available at: <http://www.ewea.org/statistics/offshore-statistics>.

Hojjati, S. N. (2015) 'The use of Monte Carlo simulation in quantitative risk assessment of IT projects', 2621, pp. 2616–2621.

Pee, A., Küster, F., Schlosser, A. (2017) 'Winds of change? Why offshore wind might be the next big thing'. Available at: <http://www.mckinsey.com>

Rezaie, K. (2007) 'Using extended Monte Carlo simulation method for the improvement of risk management: Consideration of relationships between uncertainties', 190, pp. 1492–1501.

Kim, Boram and Tae wan Kim. 2017. "Scheduling and Cost Estimation Simulation for Transport and Installation of Floating Hybrid Generator Platform." *Renewable Energy* 111:131–46.

Liaqat A. Shah, Alain Etienne, Ali Siadat & François Vernadat. 2017. "Process-Oriented Risk Assessment Methodology for Manufacturing Process Evaluation." *International Journal of Production Research* 55:15(June):4516–29.

Singh, Mahender and Amanda J. Schmitt. 2009. "Quantifying Supply Chain Disruption Risk Using Monte Carlo and Discrete-Event Simulation." Pp. 1237–48 in *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*. Hilton Austin Hotel Austin, TX, USA.

Páginas web de consulta:

- <http://www.defensa.com/espana/astillero-40-navantia-futuro-construccion-naval-espanola>
- <http://www.industriaconectada40.gob.es/Paginas/index.aspx#industria-4>
- [http://www.eoi.es/wiki/index.php/GESTI%C3%93N\\_DE\\_RIESGOS\\_en\\_Gesti%C3%B3n\\_de\\_proyectos](http://www.eoi.es/wiki/index.php/GESTI%C3%93N_DE_RIESGOS_en_Gesti%C3%B3n_de_proyectos)
- [www.navantia.es](http://www.navantia.es)
- [http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/agencia-europea-medio-ambiente-informacion-ambiental/POTENCIAL\\_ENERGIA\\_EOLICA\\_TERRESTRES\\_Y\\_MARINA\\_tcm7-272183.pdf](http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/agencia-europea-medio-ambiente-informacion-ambiental/POTENCIAL_ENERGIA_EOLICA_TERRESTRES_Y_MARINA_tcm7-272183.pdf)
- [www.ewea.org](http://www.ewea.org)
- [www.offshorewind.biz](http://www.offshorewind.biz)
- [www.softwaredeingenieria.es](http://www.softwaredeingenieria.es)
- [Introducción a @Risk](#)
- [Manuales y documentación de @Risk](#)