



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

**Trabajo Fin de Máster**

**CURSO 2017/2018**

---

*CUANTIFICACIÓN DEL IMPACTO DE LOS ÍNDICES  
DE DEFECTOLOGÍA EN PROYECTOS DE EÓLICA  
MARINA MEDIANTE DES*

---

**Máster en Ingeniería Industrial**

**ALUMNA/O**

María Cristina Fernández Pernas

**TUTORAS/ES**

Adolfo Lamas Rodríguez

**FECHA**

SEPTIEMBRE 2018

---

---

## TÍTULO Y RESUMEN

### **Cuantificación del impacto de los índices de defectología en proyectos de eólica marina mediante DES**

#### *Resumen*

La importancia de los procesos de soldadura en el desarrollo de los proyectos de eólica marina desarrollados en los astilleros, así como, las exigentes especificaciones técnicas que se requieren en las soldaduras realizadas hacen que la cuantificación del impacto que generan los defectos en dichas soldaduras tome especial importancia en proyectos de esta envergadura.

Por este motivo, con el objetivo de cuantificar el impacto derivado de los defectos en las soldaduras, en el presente trabajo se llevará a cabo el diseño de un modelo de simulación 3D representativo del proceso de fabricación e inspección de las piezas de transición para un proyecto de fabricación de jackets. Dicho modelo, además de contemplar la estrategia y tiempos de fabricación para la pieza de transición (TP) deberá tener la posibilidad de estudiar diferentes estrategias a la hora de realizar las inspecciones en las soldaduras, así como tener en cuenta diferentes estrategias a la hora de realizar las reparaciones en las soldaduras defectuosas, permitiendo obtener una estrategia de fabricación, inspección y reparación que se ajuste lo más posible a los plazos y costes marcados de antemano por el contrato del proyecto.

### **Cuantificación do impacto dos índices de defectoloxía en proxectos de eólica mariña a través de DES**

#### *Resumo*

A importancia dos procesos de soldadura no desenvolto dos proxectos de eólica mariña desenvolto nos estaleiros, así coma as exixentes especificacións técnicas que se requiren nas soldaduras realizadas, fan que a cualificación do impacto que xeran os defectos en ditas soldaduras teña especial importancia nos proxectos desta envergadura.

Por este motivo, có obxectivo de cuantificar o impacto derivado dos defectos das soldaduras, no presente traballo levarase a cabo o deseño dun modelo de simulación 3D representativo do proceso de fabricación e inspección das pezas de transición para un proxecto de fabricación de jackets. Dito modelo, ademais de contemplar a estratexia e tempos de fabricación para a peza de transición (TP) debera de ter a posibilidade de estudar diferentes estratexias á hora de realizar as inspeccións nas soldaduras, así coma ter en conta diferentes estratexias á hora de realizar reparacións nas soldaduras defectuosas, permitindo obter unha estratexia de fabricación, inspección e reparación que se axuste o máis posible ós prazos e custos marcados de antemán polo contrato do proxecto.

### **Impact quantification of defect rates on offshore wind projects through DES**

#### *Summary*

The importance of the welding process in the development of the Offshore Wind projects carried out in the shipyards, as well as the most demanding technical specifications required for welding, implies that the quantification of the impact caused by the welding defects will be of significant importance for such major projects.

---

For this reason, with the aim of trying to quantify the impact caused by the welding defects, this work will focus on the design of a 3D simulation model for representing the fabrication and inspection process of the transition pieces for a jackets fabrication process. Besides considering the strategy and fabrication times for the transition piece (TP), this model shall offer the possibility of studying different strategies when carrying out welding inspections and also when repairing damaged weldings, allowing a fabrication, inspection and repair strategy that fits as much as possible to the deadlines and costs fixed in advance in the project contract.



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

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

---

*CUANTIFICACIÓN DEL IMPACTO DE LOS ÍNDICES  
DE DEFECTOLOGÍA EN PROYECTOS DE EÓLICA  
MARINA MEDIANTE DES*

---

**Máster en Ingeniería Industrial**

**Documento**

**MEMORIA**

---

---

## ÍNDICE

Título y Resumen.....	3
1 Introducción .....	15
1.1 Situación de la energía eólica en la actualidad .....	15
1.2 Situación de la eólica marina en la actualidad.....	17
1.3 Principales retos para la eólica marina en Europa .....	20
1.4 UMI UDC-NAVANTIA: línea de Modelado y Simulación de procesos de Eólica Marina.....	21
1.5 Introducción a la gestión de la calidad en uniones soldadas .....	23
2 Objetivos.....	27
3 Estado del arte.....	29
3.1 Importancia de los Ensayos No Destructivos (END) en la industria .....	29
3.2 Imperfecciones y criterios de aceptación. Introducción a los END .....	29
3.2.1 Etapas básicas de inspección mediante END.....	30
3.2.2 Resumen: Etapas de la inspección.....	32
3.2.3 Personal de END .....	32
3.3 Inspección Visual, VT .....	33
3.3.1 Herramientas para la inspección visual.....	34
3.3.1.1 Equipos de inspección visual directa. ....	34
3.3.1.2 Equipos de inspección visual indirecta.....	35
3.3.2 Etapas de la inspección visual. ....	36
3.4 Partículas Magnéticas, MT.....	38
3.4.1 Equipamiento: medios de magnetización.....	39
3.4.2 Procedimiento de ensayo. ....	42
3.4.3 Evaluación de las indicaciones. Norma UNE-EN ISO 23278. ....	45
3.4.4 Registro de los resultados. ....	46
3.5 Inspección Ultrasónica, UT .....	46
3.5.1 Equipos para ensayo ultrasónico. ....	47
3.5.2 Preparación para el ensayo. ....	49
3.5.3 Informe de ensayo ultrasónico .....	49
3.6 Normativa de ensayos no destructivos para proyectos offshore.....	50
3.7 Procedimiento para reparaciones en caso de defecto.....	52
3.8 Simulación en gestión de la calidad. Búsqueda de la mejor estrategia de inspección .....	53
4 Análisis Jackets Proyecto Eólica Marina .....	57
4.1 Introducción .....	57

---

4.2	Análisis de probabilidad de defectos en soldadura.....	59
4.3	Análisis soldaduras de la pieza de transición (TP) .....	63
4.4	Análisis porcentaje de fallos por soldadura. ....	70
4.5	Cuantificación costes de inspección .....	72
5	Desarrollo del modelo .....	75
5.1	Introducción .....	75
5.2	Finalidad y propósito del modelo.....	76
5.3	Proceso de fabricación de la pieza de transición .....	76
5.4	Proceso de inspección en un escenario real. ....	80
5.4.1	Taller de fabricación de brazos. Zona de arco sumergido.....	81
5.4.2	Taller de fabricación de brazos. Zona de ensamblaje de los brazos .....	87
5.4.3	Taller de ensamblaje de TPs. ....	90
6	Resultados de la simulación.....	93
6.1	Escenario 1: Análisis del proceso de fabricación de TPs con los tiempos teóricos de inspección. ....	94
6.2	Escenario 2. Análisis del proceso de fabricación de TPs en el proyecto real de fabricación.....	100
6.3	Escenario 3. Reducción del tiempo de espera antes de la inspección de 48 a 24 horas.....	101
7	Conclusiones .....	107
8	Futuras líneas de trabajo.....	109
9	Bibliografía.....	110
1	Capítulos Presupuesto.....	113



---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Capacidad total de generación de energía renovable [13].....	15
Figura 2: Crecimiento de la energía eólica a nivel mundial [14].....	15
Figura 3: Top 10 potencia eólica instalada en el año 2017 [14].....	16
Figura 4: Recursos eólicos en el mundo a una distancia de 10 km de la costa [16] .....	17
Figura 5: Capacidad de energía eólica instalada en Europa [17] .....	18
Figura 6: Parque eólico Hywind Scotland, Peterhead, Scotland [18].....	19
Figura 7: Áreas para la implementación de parques eólicos marinos en España [19] ....	19
Figura 8: Esquema relación entre las normas de la familia ISO 9000. [8].....	24
Figura 9: Relación entre defecto y discontinuidad. ....	31
Figura 10: Etapas de la inspección .....	32
Figura 11: Galgas utilizadas para la inspección visual de soldaduras. [10] .....	35
Figura 12: Boroscopio rígido (imagen superior), Boroscopio flexible (imagen inferior) [8] .....	36
Figura 13: Punto de soldadura agrietado detectado durante la inspección visual previa a la soldadura [10].....	36
Figura 14: Grieta detectada en la pasada de raíz parcialmente tapada por la pasada de relleno [10] .....	37
Figura 15: Posibles imperfecciones durante el soldeo [10].....	37
Figura 16: Principios del ensayo de partículas magnéticas [10] .....	38
Figura 17: Magnetización con yugo electromagnético [10].....	40
Figura 18: magnetización por puntas de contacto [10] .....	41
Figura 19: Magnetización por bobina. [8] .....	42
Figura 20: Principales etapas del proceso de ensayo por partículas magnéticas. ....	42
Figura 21: Direcciones de magnetización.....	43
Figura 22: Generación de indicaciones [8] .....	44
Figura 23: Espectro sonoro [8] .....	47
Figura 24: Palpador de contacto normal [8].....	48
Figura 25: Diferencia entre un palpador de contacto y uno de inmersión [8] .....	48
Figura 26: Marcado de una soldadura defectuosa [9].....	52
Figura 27: Procedimiento de apertura de la soldadura defectuosa para su reparación [9] .....	52
Figura 28: Comparación diferentes estrategias con el software QUINTE [7]. ....	54
Figura 29: Módulos del software QUINTE [7]. ....	54
Figura 30: Despiece de la pieza de transición (superior), Pieza de transición ensamblada (inferior) [9].....	57
Figura 31: Partes por la que está formada la estructura de una jacket [9] .....	58
Figura 32: Pilotes de una jacket [9] .....	58

---

Figura 33: Entorno FlexSim. [12].....	75
Figura 34: Módulo Process Flow de FlexSim. [12] .....	76
Figura 35: Pieza de transición de las jackets del proyecto EA One [9] .....	77
Figura 36: Situación de los talleres de fabricación de TPs en lo talleres de IMENOSA, Fene [11].....	77
Figura 37: Etapas del proceso de fabricación de la TP. ....	78
Figura 38: Distribución del taller de fabricación de brazos [11].....	78
Figura 39: Proceso de fabricación de brazos. ....	79
Figura 40: Proceso de fabricación de la TP después de la fabricación de los brazos.....	79
Figura 41: Modelo pieza de transición (superior) y zona de talleres (inferior) .....	81
Figura 42: Modelo en FlexSim zona de arco sumergido.....	82
Figura 43: Trabajos realizados en la zona de arco sumergido .....	83
Figura 44: Proceso de inspección en la zona de arco sumergido.....	84
Figura 45: Resumen secuencia trabajos al final del soldeo en la zona B. ....	85
Figura 46: Orden de emisión de informes y reparaciones. ....	86
Figura 47: Modelo en FlexSim zona de almacenaje intermedio. ....	87
Figura 48: Modelo en FlexSim zona de ensamblaje de brazos. ....	87
Figura 49: Trabajos realizados en la zona de ensamblaje de brazos. ....	88
Figura 50: Realización de inspecciones en la zona de ensamblaje de brazos. ....	89
Figura 51: Reparaciones en la zona de fabricación de brazos. ....	89
Figura 52: Modelos en FlexSim taller ensamblaje de TPs.....	91
Figura 53: Utilización soldador de arco sumergido.....	95
Figura 54: Utilización de los armadores del taller de maquinaria.....	96
Figura 55: Utilización de los soldadores de ensamblaje de brazos con tiempo de espera antes de la inspección de 48 horas .....	96
Figura 56: Utilización de los inspectores del taller de maquinaria .....	97
Figura 57: Evolución de los informes pendientes de entrega en función del avance del proyecto .....	97
Figura 58: Gráfica acumulada de reparaciones en el taller de maquinaria en función del avance del proyecto .....	97
Figura 59: Evolución de los informes pendientes de entrega en función del avance del proyecto con un solo inspector .....	98
Figura 60: Utilización de los inspectores del taller de maquinaria con un solo inspector	98
Figura 61: Evolución de los informes pendientes de entrega en función del avance del proyecto para el caso dos del escenario 1.....	100
Figura 62 Utilización soldador arco sumergido con tiempo de espera antes de la inspección de 24 horas.....	102
Figura 63: Utilización en las zonas de la mesa de arco sumergido .....	103
Figura 64: Utilización de los armadores del taller de maquinaria.....	103

---

Figura 65: Utilización de los soldadores de ensamblaje de brazos con tiempo de espera antes de la inspección de 24 horas .....	104
Figura 66: Utilización de los inspectores del taller de maquinaria con 2 inspectores ....	104
Figura 67: Evolución de los informes pendientes de entrega en función del avance del proyecto para el escenario 3. ....	105
Figura 68: Tecnología Phased Array.....	109

---

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Líneas de actuación de la UMI Navantia – UDC [20].....	22
Tabla 2: Relación entre los fenómenos físicos y el proceso por el cuál se identifican. [8] .....	30
Tabla 3: Tipos de imperfecciones.....	31
Tabla 4: Niveles de certificación del personal de END [8] .....	33
Tabla 5: Conocimientos y responsabilidades del inspector según UNE 14618 [8].....	33
Tabla 6: Ventajas y limitaciones del ensayo por partículas magnéticas [8].....	39
Tabla 7: Ventajas y limitaciones del uso de imanes permanentes [8].....	40
Tabla 8: Ventajas y limitaciones del método de magnetización con yugo electromagnético[8] .....	40
Tabla 9: Ventajas y limitaciones del uso de cabezales de contacto [8].....	41
Tabla 10: Ventajas y limitaciones del método de magnetización por puntas de contacto [8].....	42
Tabla 11: Ventajas y limitaciones del método de magnetización por bobina [10] .....	42
Tabla 12: Medio de magnetización empleado según el tipo de magnetización.....	44
Tabla 13: Características de los exámenes residual y continuo [10] .....	45
Tabla 14: Nivel de aceptación de acuerdo con la Norma UNE-EN ISO 23278 [8] .....	45
Tabla 15: Correlación entre los distintos niveles de calidad [8] .....	46
Tabla 16: Porcentaje de inspección según el tipo de soldadura y su categoría [9] .....	50
Tabla 17: Tiempos de espera mínimos después de la soldadura en función del tamaño de la misma y su heat input [9] .....	51
Tabla 18: Principales características de las jackets utilizadas para el estudio [21].....	58
Tabla 19: Porcentaje de defectos en la pieza de transición durante el año 2015. ....	59
Tabla 20: Porcentaje de defectos en la pieza de transición durante el año 2016 .....	60
Tabla 21: Porcentaje de defectos de las uniones en “x” en JUB y JLB durante el año 2015.....	60
Tabla 22: Porcentaje de defectos de las uniones en “x” en JUB y JLB durante el año 2016.....	61
Tabla 23: Porcentaje de defectos de la unión de los brazos a las patas durante el año 2015.....	61
Tabla 24: Porcentaje de defectos de la unión de los brazos a las patas durante el año 2016.....	62
Tabla 25: Porcentaje de defectos en el resto de elementos durante el año 2015.....	62
Tabla 26: Porcentaje de defectos en el resto de elementos durante el año 2016.....	63
Tabla 27: Porcentaje de defecto total acumulado en la pieza de transición, año 2015. ..	63
Tabla 28: Porcentaje de defecto total acumulado en la pieza de transición, año 2016. ..	63
Tabla 29: Análisis de todas soldaduras presentes en la pieza de transición. ....	64
Tabla 30: Porcentaje de fallo para cada soldadura dependiendo del tipo de END .....	70

---

Tabla 31: Costes aproximados de ensayo de inspección visual. ....	73
Tabla 32: Costes aproximados de ensayo de partículas magnéticas. ....	73
Tabla 33: Costes aproximados de ensayo de ultrasonidos. ....	73
Tabla 34: Número total de inspecciones por jacket en cada taller. ....	80
Tabla 35: Número total de inspecciones en el total de jackets. ....	80
Tabla 36: Orden de entrada de chapas en la zona de arco sumergido. ....	82
Tabla 37: Soldaduras a inspeccionar en la zona de arco sumergido. ....	86
Tabla 38: Orden de fabricación de brazos. ....	88
Tabla 39: Soldaduras inspeccionadas en la zona de ensamblaje de brazos. ....	90
Tabla 40: Soldaduras inspeccionadas en la zona de ensamblaje de TPs. ....	91
Tabla 41: Llegada de los cilindros centrales desde Avilés. ....	93
Tabla 42: Llegada del acero para la fabricación de las TPs. ....	94
Tabla 43: Ratios utilizadas por el modelo de simulación ....	94
Tabla 44: Resultados del escenario 1. Trabajos de inspección realizados en paralelo con los trabajos de armado y soldeo. ....	94
Tabla 45: Resultados del escenario 1. Trabajos de inspección realizados al final de la fabricación. ....	99
Tabla 46: Resultados del escenario 2. Trabajos de inspección realizados al final de la fabricación. ....	100
Tabla 47: Comparación entre los casos de estudio de los escenarios 1 y 2. ....	101
Tabla 48: Resultados del Escenario 3. Inspección al final de la fabricación ....	102



## 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 Situación de la energía eólica en la actualidad

La evolución de la energía renovable en la última década ha superado con creces todas las expectativas. La capacidad instalada mundial y la producción de todas las tecnologías renovables han aumentado sustancialmente, así como también las políticas de apoyo, que se están expandiendo cada vez a más países en todas las regiones del mundo.

Y es que según los nuevos datos publicados por la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA), a finales de 2017, la capacidad global de generación de energía renovable aumentó en 167 GW alcanzando los 2.179 GW a nivel mundial Figura 1. Esta cifra representa un crecimiento anual alrededor del 8.3%. Este crecimiento se debió, entre otras causas, a la caída de los precios, las mejoras tecnológicas y un entorno político cada vez más colaborador. [13]

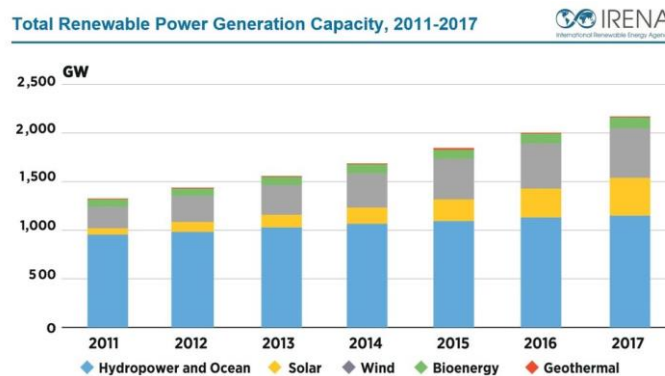


Figura 1: Capacidad total de generación de energía renovable [13]

La mayor evolución en la última década la presenta la energía eólica. Según datos del Global Wind Energy Council (GWEC), tal y como se indica en la figura 2, la capacidad de energía eólica en el mundo creció un 9% en 2017, hasta situarse en 539.123 MW, 52.573 MW más que el año anterior. China, EEUU, Alemania, India y España eran y continúan siendo los primeros productores mundiales Figura 2. [14]

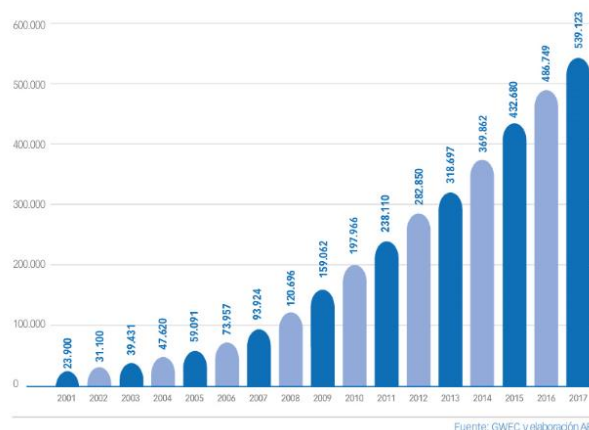


Figura 2: Crecimiento de la energía eólica a nivel mundial [14]

Europa tuvo su mejor año de instalación de potencia eólica con un record de 16.8 GW de nueva capacidad instalada, según datos de WindEurope. La nueva potencia instalada ha estado liderada por Alemania, con la instalación de 6,5 GW, seguido de Reino Unido que ha instalado 4,2 GW.

La GWEC destaca la producción de energía eólica en España y es que, a finales de 2017, según datos de la Asociación Empresarial Eólica (AEE), con 23.170 MW de potencia acumulada -96 MW más respecto al año anterior-, la energía eólica ha sido la segunda fuente de generación eléctrica [15]. Estos datos han propiciado que España haya conseguido el muy meritorio quinto puesto a nivel mundial, -segundo a nivel europeo-, en potencia eólica instalada, solo por detrás de las grandes potencias mundiales: China, Estados Unidos, Alemania e India, Figura 3.

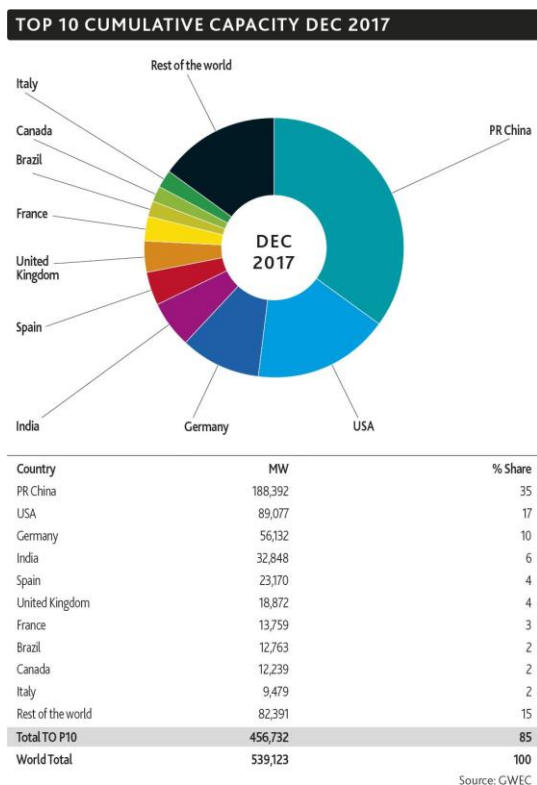


Figura 3: Top 10 potencia eólica instalada en el año 2017 [14]

De los 96 MW, 59,1 (62% del total) corresponden a parques situados en las islas Canarias; perteneciendo el resto a Aragón, Galicia y Castilla y León.

España, por tanto, cerraba el año 2017 con estos magníficos datos:

- El 18% de la energía consumida se ha cubierto con energía eólica, electricidad equivalente a 12 millones de hogares.
- Se han instalado 1090 parques eólicos repartidos en 803 municipios.
- Ha llegado a una cifra de 23.092 MW de potencia instalada.
- La eólica ha sido la segunda tecnología en el mix energético 2017 con una generación de 47.896 GWh.
- Evitó la importación de 9,2 millones de toneladas equivalentes de petróleo (TEP) y 28 millones de toneladas de Co2.
- Ahorró 9.900 euros en 2017 al pequeño consumidor industrial.
- Aproximadamente 22.468 personas trabajan actualmente en el sector eólico. Ésta genera cinco veces más empleo que las tecnologías convencionales.
- Se situó en el quinto país del mundo por potencia eólica instalada tras China, EEUU, Alemania e India.



- Se situó en el séptimo país del mundo y el tercero en Europa en patentes eólicas: el sector invierte alrededor de 85,5 millones de euros al año en I+D.
- Cuarto exportador de aerogeneradores del mundo.

## 1.2 Situación de la eólica marina en la actualidad

La energía eólica marina crece exponencialmente cada año. Según datos de la GWEC, que actualmente representa alrededor de un 3% de la capacidad eólica instalada en el mundo.

Este tipo de tecnología consiste básicamente en aprovechar la velocidad del viento para obtener energía, transformándola posteriormente en energía eléctrica, pero, a diferencia de la eólica terrestre, los aerogeneradores se encuentran en el mar. La capacidad de obtener energía con la eólica offshore es mucho mayor, ya que la velocidad de viento en el mar es mucho mayor y más constante.

La siguiente figura muestra un mapa donde se representan los recursos eólicos a una distancia de 10 km desde la costa. Como se puede observar, las zonas con mayor viento se encuentran en el norte de Reino Unido y sur de Francia. Le siguen, sucesivamente, norte de España, Francia, Bélgica, Noruega, Alemania, Dinamarca, sur de Reino Unido y Suecia Figura 4:.

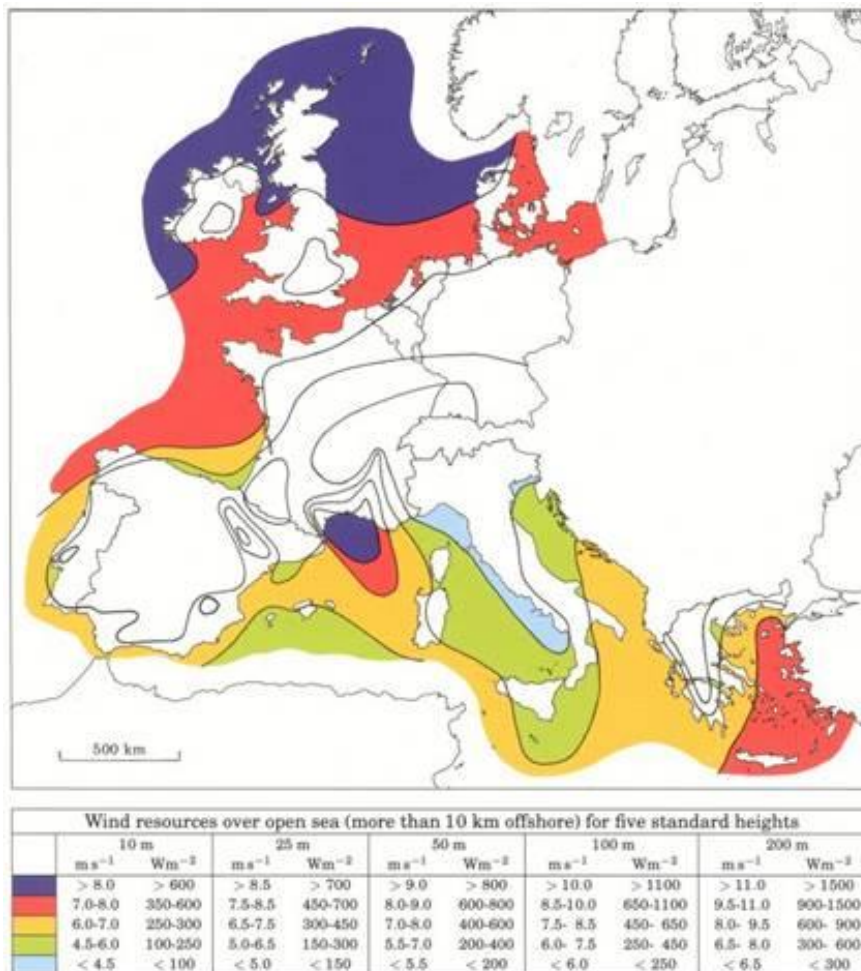
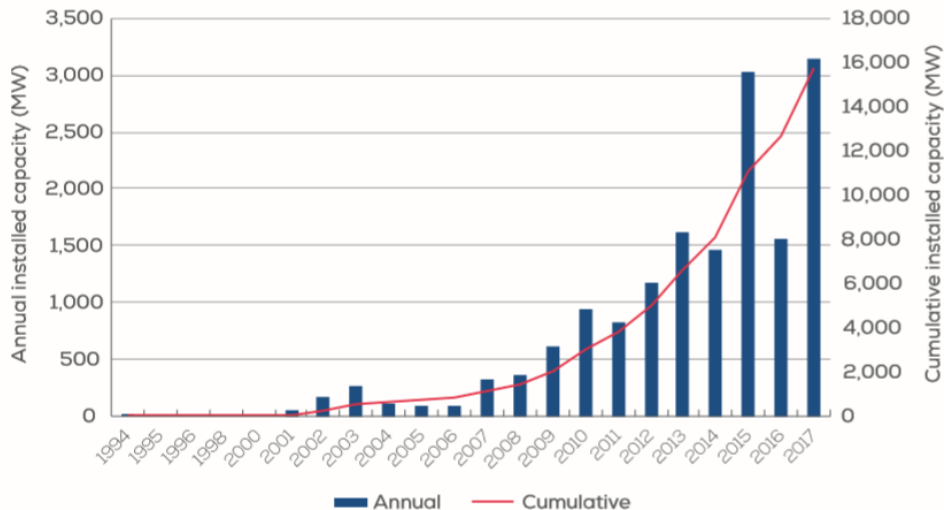


Figura 4: Recursos eólicos en el mundo a una distancia de 10 km de la costa [16]

Por tanto, en Europa, existen varias zonas con suficiente recurso eólico (Mar del Norte, Mar Báltico, Canal de la Mancha, Sur de Francia, Mar Egeo y litoral atlántico de Andalucía) que permite la instalación de parques eólicos marinos. Por ende, no es de extrañar que el

91% de un total de 15.780 MW instalados de energía eólica offshore pertenezca a Europa, donde 3.230 aerogeneradores están en funcionamiento. En 2017, Europa, como se puede observar en la Figura 5, cerró el año con un record de 3.148 MW de capacidad de energía eólica instalada más que el año anterior, gracias a la instalación de 560 aerogeneradores en 17 parques eólicos. [17]



Source: WindEurope

**Figura 5: Capacidad de energía eólica instalada en Europa [17]**

Al cierre del año 2017, la situación de la eólica offshore en Europa fue la siguiente: [17]

- Instalación de 3.148 MW en 2017, el doble que el año anterior, y un 4% más que el anterior record en 2015.
- Instalación de 560 aerogeneradores en 2017 en un total de 17 parques eólicos.
- Nada menos que 82 aerogeneradores están a la espera de ser instalados donde se alcanzaría la cifra de 1.927 MW más instalados.
- Un total de 14 proyectos, incluyendo el primer parque eólico flotante en Escocia, fueron completados en el año 2017. Para el 2018 se esperan un total de once proyectos en Alemania y Reino Unido que producirán una capacidad de energía eólica offshore instalada acumulada de 18.7 GW.
- Un total de 4.149 turbinas instaladas produciendo 15.780 MW de energía aprovechable.
- Un total de 92 parques eólicos en 11 países europeos.

Sin lugar a dudas, el mayor hito conseguido por Europa a día de hoy ha sido la creación del primer parque flotante del mundo en Escocia, propiedad de la petrolera noruega Statoil. Se trata de cinco aerogeneradores Siemens de 6 MW instaladas en estructuras flotantes fabricadas en Navantia Fene. Este parque eólico llamado Hywind Scotland, puesto en marcha en octubre de 2017, y con un a distancia de la costa de unos 25 kilómetros produce actualmente 30 MW de energía capaz de alimentar a más de 20.000 hogares, Figura 6:.



Figura 6: Parque eólico Hywind Scotland, Peterhead, Scotland [18]

En España, la situación del litoral es un poco más delicada que esos litorales del Mar del Norte, ya que España no cuenta con una plataforma continental y por tanto las profundidades a determinadas distancias de la costa son mucho mayores. Por tanto, la eólica marina en España está todavía en fase de despegue. Algunos de los factores que marcan el avance de implantación de esta tecnología en nuestro país son los siguientes: [19]

- La regulación nacional que establece que establece el procedimiento de zonas medioambientalmente viables para la construcción de los parques eólicos marinos y otorga los permisos para la construcción de los parques.
- Costes asociados a tecnologías emergentes o desarrolladas y existencia de un marco retributivo estable que aporte rentabilidad a los proyectos
- Desarrollo adecuado de infraestructuras (puertos, carreteras, etc.) e industria (metal, obra civil, etc.) que permita la ejecución de proyectos de gran envergadura. Sin embargo, las soluciones ya se encuentran en camino, enfocándose mayormente a soluciones flotantes, tecnología más cara y mayor tiempo de desarrollo, pero muy competitiva.

El estudio estratégico ambiental en España establece zonas para la implementación de parques eólicos marinos. Distingue entre zonas aptas, zonas con limitaciones (condicionada por la realización de estudios previos) y zonas de exclusión Figura 7.

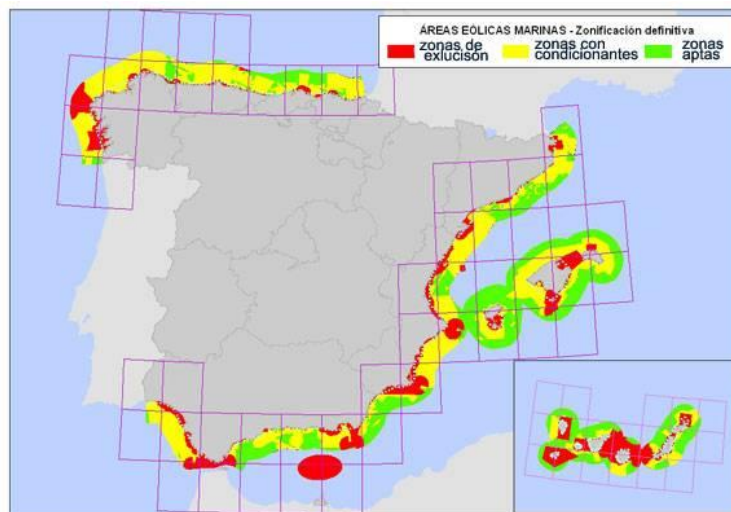


Figura 7: Áreas para la implementación de parques eólicos marinos en España [19]

Este estudio exige además una distancia mínima de los parques eólicos marinos a la línea costera de 8 kilómetros.

A pesar de la desventaja de la situación de litoral, hay que tener en cuenta el impacto económico, y es que un parque eólico marino requiere una inversión más alta que uno

terrestre. En un parque terrestre, el aerogenerador ocupa aproximadamente el 80% de los costes totales; no es así para uno marino, en el que este porcentaje se reparte entre el aerogenerador, la cimentación, la estructura y la interconexión a la red eléctrica. Para los parques eólicos terrestres se estiman unos costes de 1,2 millones de euros por MW instalado, mientras que para los eólicos marinos unos 2,8 millones de euros por MW instalado, y esto dependiendo del terreno, de la conexión eléctrica, etc.

### **1.3 Principales retos para la eólica marina en Europa**

A medida que las tecnologías maduran y continúa en marcha el objetivo de reducción de costes, el futuro se ve bastante claro para la energía eólica marina. Desde que en 1991 se desarrolló el primer proyecto de eólica marina, la capacidad instalada total solamente traspasó la barrera de los 1.000 MW en 2008. A partir de este año, comenzaron a surgir nuevos retos para la eólica en Europa, entre ellos, mejora de las turbinas, construcción de soportes, mejora de la infraestructura eléctrica, montaje e instalación y mantenimiento.

Con todos los datos que se han aportado en los capítulos anteriores, queda bien claro que Europa continúa mostrando un buen camino a seguir y sobre todo aumentando cada vez más la capacidad de construcción. A finales de 2016, casi el 88% de las instalaciones eólicas marinas del mundo estaban ubicadas en aguas europeas; además, se espera que el crecimiento en este sector continúe. WindEurope declaró en su informe de 2017 llamado "Escenarios para el 2030" que la capacidad total instalada en alta mar podría multiplicarse por cinco a 70 GW en 2030 según un escenario medio, o hasta 99 GW en un escenario optimista. La mayoría de las instalaciones eólicas marinas se instalarán en el Mar del Norte, con casi 48 GW instalados para 2030 en el escenario medio [1].

A día de hoy los nuevos retos para 2020/2030 en el sector eólico marino en Europa son los siguientes: [1]

- Turbinas de mayor tamaño.

Todos proyectos eólicos marinos a nivel mundial están incorporando las últimas innovaciones en tecnología de turbinas eólicas, ya que los fabricantes están construyendo cada vez turbinas más grandes en estructuras de soporte avanzadas a profundidades aún mayores. Un mayor tamaño de turbina implica una mayor capacidad de capturar más energía y una mayor eficiencia, además de menores costos de mantenimiento y, por tanto, son clave en el impulso de la industria para minimizar los costos y maximizar la eficiencia.

- Reducción de costos.

La industria eólica marina se propuso reducir los precios hacia el objetivo de 100 €/MWh para 2020. Con la ayuda de turbinas más grandes y eficientes, los precios de subasta en muchos casos han excedido los objetivos de reducción de costos con proyectos que ofrecen ofertas significativamente por debajo de ese valor. El "Global Wind Energy Council" declaró en su pronóstico de mercado para 2017-2021 lo siguiente: "de repente, el offshore es competitivo con la energía eólica terrestre, y las repercusiones se han dejado sentir en todo el mundo, preparando el escenario para una ronda de grandes inversiones en alta mar no solo en Europa, sino también en Asia y América del Norte".

- Futuro flotante

Desde hace relativamente poco, los parques eólicos marinos flotantes están ganando impulso. Un ejemplo de esto, es el parque eólico Hywind Scotland de 30MW, del que se habla en el apartado anterior. Las turbinas eólicas flotantes tienen potencial para lugares donde el agua es demasiado profunda para las típicas turbinas de fondo fijo. Esta promesa aumentará a medida que continúen los avances tecnológicos y las reducciones de costos. Statoil promete mercados clave para su tecnología Hywind en Europa, Japón y la costa oeste de EE. UU., y predice que podría haber casi 13 GW de capacidad eólica instalados para 2030.

En cuanto a la eólica marina en España, a pesar de ser uno de los países europeos con más kilómetros de costa, no dispone de ningún aerogenerador en sus costas. De acuerdo al Plan de Energías Renovables 2011-2020 elaborado por el ministerio de Energía, España debería contar ya en 2015 con una potencia instalada de 22 MW, y de 750 MW para 2018. La Asociación Empresarial Eólica (AEE) estima en unos seis años el tiempo necesario para activar un parque eólico marino, entre las actividades previas a realizar estarían: los estudios preliminares, reserva de la zona, autorizaciones administrativas, y la construcción y puesta en marcha, por lo que no se cuenta con que la previsión de cara a 2020 se cumpla.

Desde WindEurope inciden en varias cuestiones [2]:

- Falta de interconexiones de alta capacidad entre ambos lados de los pirineos.
- Marco jurídico desfavorable a las energías renovables en general, y al viento en alta mar en particular.
- Falta de atractivo para los operadores del resto de Europa debido a la obstrucción que supone en sí misma la península ibérica.

Sin embargo, desde la Asociación de Productores de Energías Renovables, el presidente de la sección marina, Francisco García Lorenzo, afirma que la energía offshore “no puede ser la gran ausente de las renovables en España” y apunta hasta diez razones que la avalan. Entre ellas, destaca los centros de investigación “únicos en el mundo”, como Plocan, Bimep, Ccob IH Cantabria o Cehipar, con “muy buenos investigadores y personal científico y una industria auxiliar altamente competitiva” a nivel global.

Numerosos ingenieros pertenecientes a empresas españolas contribuyen a la construcción y puesta en marcha de los parques más potentes del Norte de Europa. Iberdrola se convirtió en 2014 en la primera empresa española en proyectar y poner en funcionamiento un parque eólico en Reino Unido, el West of Duddon Sands (WoDS), invirtiendo junto a ScottishPower más de 1800 millones de euros. Otro ejemplo es el de la UTE entre Navantia-Windar, que juntos fabricaron en Fene, Ferrol, 29 jackets y 116 pilas así como una subestación eléctrica para el parque Wikinger. La misma UTE construyó este mismo año cinco subestructuras flotantes tipo spar para el parque escocés y, además, actualmente están inmersos en la construcción de 42 estructuras o jackets marinos para el parque East Anglia One, también situado en Escocia.

## **1.4 UMI UDC-NAVANTIA: línea de Modelado y Simulación de procesos de Eólica Marina**

La Universidad de la Coruña (UDC) y Navantia acordaron en 2015 establecer colaboración en el campo del I+D+i con el objetivo de iniciar un proceso de transformación orientado a la sostenibilidad de la empresa en el mercado del siglo XXI e íntimamente relacionado con la industria 4.0, siendo la innovación tecnológica un factor esencial en este proceso. Incrementar la competitividad del astillero es otro de los objetivos cara afrontar la reducción de costes que exige el sector de la eólica marina para asegurar su competitividad mediante la mejora de procesos productivos existentes y desarrollo de otros nuevos con la finalidad de aumentar I, mediante la mejora de los procesos productivos existentes y desarrollo de otros nuevos. El fin último es aumentar la productividad y reducir costes. Navantia se propone introducir estas mejoras en sus factorías, principalmente en las de Ferrol, junto con la UMI UDC-NAVANTIA, expresando su deseo de convertirse en un astillero 4.0.

Para conseguir los objetivos que se citaron anteriormente se establecen las siguientes áreas de actuación:

- Transformación de los métodos productivos para mejorar su eficiencia.
- Desarrollo de nuevos esquemas de la logística de la planta.
- Automatización de los procesos productivos.
- Desarrollo de herramientas y dispositivos TIC específicos para ingeniería, producción y gestión del conocimiento.

- Transferencia de los nuevos desarrollos a la cadena de suministro.

Todo lo anterior debe de concluir finalmente en el diseño de una nueva planta que signifique la modernización y adaptación al entorno 4.0 del astillero de Navantia en Ferrol. [20]

Las líneas de investigación y/o actuación que actualmente sigue la UMI son las siguientes:

**Tabla 1: Líneas de actuación de la UMI Navantia – UDC [20]**

<b>Modelado y Simulación de Procesos en el Astillero</b>
<b>Optimización de Procesos</b>
<b>Observatorio de Robótica y Automatización</b>
<b>Trazabilidad y Auto-ID Tuberías</b>
<b>Información en Planta y Realidad Aumentada</b>
<b>Sistema Integral de Gestión de la Información. Industrial Internet of Things</b>
<b>Modelado y Simulación de Procesos de Eólica Marina</b>
<b>Proyecto “Sin Cables”</b>
<b>Proyecto “Tubos de Cierre”</b>
<b>Sistemas Auto-Reconfigurables</b>
<b>Utilización de Adhesivos en la Construcción Naval</b>
<b>Control Estadística de Procesos</b>
<b>Proyecto de Ciberseguridad</b>
<b>Operación de UAV’s en espacios exteriores y confinados</b>

El objetivo principal de la línea de Modelado y Simulación de procesos de Eólica Marina es el diseño de un modelo de simulación que represente en un entorno virtual la situación actual y futura del astillero, sirviendo como herramienta de ayuda a la dirección de proyectos de eólica marina en la toma de decisiones.

Para lograr esto, esta línea de la UMI está desarrollando modelo que aglutine cada una de las etapas del proceso de construcción real de los distintos proyectos actuales y futuros del astillero, con el propósito de, entre otros: [20]

- Identificar y analizar los cuellos de botella.
- Analizar y optimizar el uso de recursos.
- Realizar un análisis económico: costes, flujo de caja, inversiones futuras, etc.
- Identificar y reducir las ineficiencias del proceso.
- Estudiar la implantación de técnicas Lean Manufacturing y de reglas de despacho.
- Etc.

El auge de la eólica marina a nivel mundial en los últimos años ha favorecido en gran medida a nuestro país gracias mayormente a la alianza entre Navantia y Windar Renovables, la cual ha posibilitado la contratación de cuatro proyectos de eólica marina ya ejecutados o en ejecución en el Astillero de Navantia Ría de Ferrol, Factoría de Fene.

La alianza comenzó en diciembre de 2014, mediante la formación de la primera Unión Temporal de Empresas (UTE) para la contratación del Proyecto Wikinger Jackets, consistente en la fabricación de 29 estructuras tipo jacket para el campo Wikinger, desarrollado por la

empresa española Iberdrola. Este proyecto ha sido ya entregado durante el tercer trimestre de 2016.

Fruto de los buenos resultados obtenidos con el proyecto Wikinger Jackets, durante junio de 2015 y diciembre de 2016 se han conseguido las adjudicaciones de los Proyectos Hywind (fabricación de 5 estructuras tipo SPAR) para la empresa noruega STATOIL y Nissum Bredning (fabricación de 4 estructuras tipo Jacket) para la multinacional Siemens Wind Power, respectivamente. Ambos proyectos han sido también total y satisfactoriamente entregados.

Más recientemente, enero 2017, la alianza entre Navantia y Windar Renovables, ha resultado de nuevo adjudicataria, en este caso por Scottish Power Renewables (filial de Iberdrola) del Proyecto East Anglia One, con la fabricación de 42 estructuras tipo Jacket para el campo offshore de igual nombre que esta empresa inglesa está desarrollando en aguas del Mar del Norte. Estas estructuras se encuentran en fase de ejecución en el Astillero de Navantia Ría de Ferrol, Factoría de Fene, con previsión de entregas entre marzo y agosto de 2018.

Actualmente, Navantia y Windar se enfrentan al que será su quinto proyecto esta vez con su país vecino, Portugal, para la fabricación de una de las tres cimentaciones flotantes para el proyecto Winfloat, que constará de tres aerogeneradores de 25 MW de potencia situados a 20 kilómetros de las costas de Viana de Castelo. Los primeros trabajos ya han comenzado en las instalaciones asturianas y, en torno el mes de agosto de año se iniciarán las tareas en las factorías de Fene, Ferrol. La fecha final de obra se espera para el próximo agosto de 2019. [\[20\]](#)

En todos los proyectos industriales y más en proyectos de esta envergadura es imprescindible una buena gestión de la calidad. Sin ésta, todos los propósitos para el futuro astillero 4.0.: reducciones de costes, incremento de productividad, optimización, etc., serían inalcanzables.

Por esta razón, en este proyecto se quiso subrayar la importancia de la gestión de la calidad en este tipo de proyectos, aportando un nuevo objetivo a la línea de investigación de Modelado y Simulación de procesos de Eólica Marina. Debido a que éstas estructuras eólicas contienen gran cantidad soldaduras las cuales deben ser correctamente inspeccionadas, en este trabajo se destacará la importancia de una buena inspección y qué consecuencias negativas supone no llevar a cabo un adecuado control de calidad sobre estas soldaduras y en qué factores puede afectar a un proyecto de fabricación de estructuras offshore.

## 1.5 Introducción a la gestión de la calidad en uniones soldadas

El concepto control de calidad nació principalmente del ámbito empresarial, (control de costes, control de producción, etc.), de la sistematización y planificación de las acciones de calidad que existían en la empresa desde tiempo atrás y que, fundamentalmente, consistían en inspecciones y ensayos. En este sentido podemos establecer la definición de control de calidad como: *“parte de la gestión de la calidad orientada al cumplimiento de los requisitos de la calidad. ISO 9000:2005”*. La familia de normas ISO 9000, contienen las pautas para establecer un sistema de aseguramiento interno de la calidad, que actúa sobre todas las funciones empresariales, y que determina el diseño e implantación de un sistema de aseguramiento de la calidad que persigue, como objetivo principal, determinar el grado de fiabilidad de un conjunto inspeccionado. Es decir, poder conocer si los productos inspeccionados van a poder ser utilizados para las condiciones para las que fue diseñado, debido al nivel de calidad conseguido, Figura 8. [\[8\]](#)

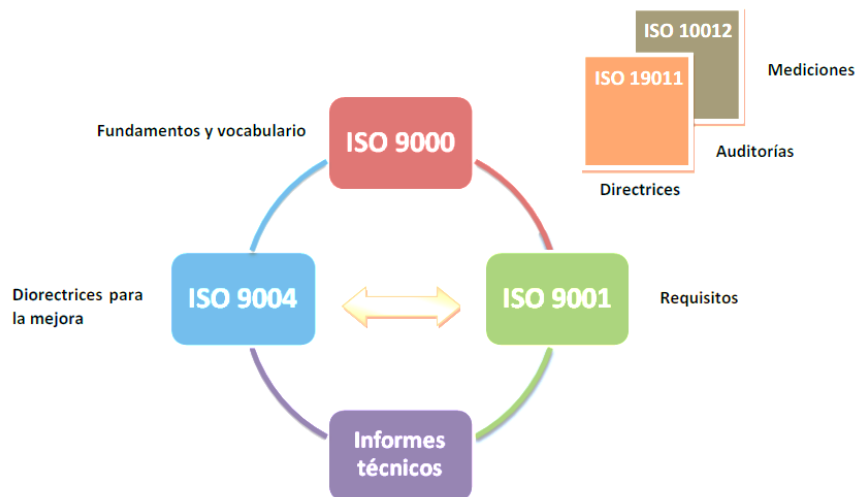


Figura 8: Esquema relación entre las normas de la familia ISO 9000. [8]

Por otro lado, el control de calidad de uniones soldadas se define como el “conjunto de actividades encaminadas a asegurar un determinado grado de fiabilidad de un conjunto soldado, mediante la verificación del mismo por medios adecuados durante diferentes fases del proceso productivo”.

La importancia se desprende de la responsabilidad de los equipos y construcciones que actualmente se fabrican por soldadura, los cuales, en determinadas condiciones de fallo, afectan seria y directamente a la seguridad pública. Ejemplo de esto son: aviones, buques, trenes, plantas generadoras de energía (térmicas, hidroeléctricas y nucleares), complejos petroquímicos y transformadores de energía, puentes, estructuras metálicas, conducciones y transportes de gases y líquidos, etc...

El convencimiento de la importancia de controlar la calidad e inspeccionar estos conjuntos soldados, ha sido la causa de que, en todos los países industrializados, se hayan publicados códigos, especificaciones y normas relativos a su construcción e inspección. Además, en la mayoría de dichos países, es la propia Administración la que establece la obligatoriedad de construir e inspeccionar siguiendo unas determinadas normas, así como que el personal que las ejecute tenga unos conocimientos y experiencia mínimos. Al mismo tiempo, la industria también se ha hecho eco de esta necesidad.

Por tanto, una vez definido el que un conjunto soldado va ser sometido a un determinado control de calidad se deberá establecer un orden o sistemática acerca de la forma, del cómo y del cuándo va a ser desarrollado. Casi todo programa de control de calidad precisa utilizar técnicas de inspección y éstas suponen, en muchos casos, la mayoría de las acciones a tomar, pero siempre dentro del contexto más amplio, que es de control de calidad. Un programa integrado de control de calidad debe contar con las fases de:

- Formación y entrenamiento del personal.

La eficacia de cualquier sistema de control de la calidad va a depender sustancialmente de la formación, entrenamiento y experiencia previa del personal involucrado en dicha tarea. Esta regla sería aplicable a cualquier proceso, si bien, en el caso del control de calidad es especialmente importante en la realización de inspecciones y Ensayos No Destructivos, donde la capacidad del personal es trascendental para una correcta realización del ensayo.

- Control de suministros y suministradores.

Existen diferentes mecanismos y sistemas de control que pueden aplicarse a los suministros y a los proveedores en función de la responsabilidad del producto o servicio subcontratado, de si se trata de un producto de mercado o de un producto específico, etc. El



método de control, también se encuentra influenciado por la cadencia con la que se subcontrata el servicio o producto.

- Control del equipo de mediciones, ensayos y pruebas.

Pocos son ya los productos industriales a los que no se les exige una certificación por sus respectivos fabricantes. Para que tal certificación sea responsable es imprescindible que los equipos y medios, utilizados durante el control de la calidad, estén a su vez debidamente “controlados” en cuanto a su idoneidad y grado de precisión.

- Control del proceso de fabricación.

El control del proceso de fabricación implica el control de todas las entradas al proceso, así como del proceso en sí mismo. Esto implica que el control del proceso de fabricación incorpora actividades o puntos de inspección que deben realizarse antes, durante y después del proceso de soldeo.

- Control de desviaciones.

Con esta fase lo que se pretende es conocer las desviaciones que se producen, para poder analizarlas y obtener conclusiones que permitan evitarlas en el futuro. Control de costes.

Finalmente, un aspecto fundamental del control de calidad es el control de costes. Podemos distinguir dos grandes bloques de costes:

- Costes directo de inspección. Engloba el coste total del personal empleado en las labores de inspección, coste de los ensayos realizados, coste del instrumental de inspección, calibraciones, etc.
- Coste de no calidad. Englobaría el coste total de las reparaciones, tiempo de personal, coste de re-inspección, materiales empleados, etc.

Aunque el control de calidad, normalmente, es realizado por el departamento de calidad, resulta crucial la cooperación del resto de departamentos de la empresa. Debe ser un objetivo común de todos los departamentos garantizar un grado de fiabilidad adecuado. De todo lo anterior se puede decir que el control de calidad supone un factor que influye notoriamente en la competitividad industrial, por lo que, obviamente, debe ser considerado a todos los niveles con la necesaria profundidad, rigurosidad y responsabilidad. [8]



## 2 OBJETIVOS

En muchos proyectos tanto de tipo onshore como offshore, el proceso de inspección en general se tiende a infravalorar, estimando unos costes teóricos iniciales que en absoluto se asemejan a los costes reales. Lo que finalmente suele suceder, además retrasos significativos en los tiempos de entrega, es que, teniendo en cuenta los procesos de inspección, si comparamos el coste real del proyecto con el valor ganado, se puede concluir que hay una diferencia considerable, siendo el coste real mucho mayor.

Por ese motivo el presente trabajo fin de master tiene por objetivo estudiar y evaluar de forma cuantitativa el impacto que tiene en un proyecto de eólica offshore los defectos en las soldaduras realizadas durante el proceso de fabricación. Dicho impacto deberá ser evaluado en cuanto al plazo de fabricación y los costes del proyecto, demostrando la importancia de las tareas de inspección en el proceso de fabricación.

Con el fin de alcanzar este objetivo principal, se plantea desarrollar un modelo de simulación de eventos discretos 3D que represente el proceso de fabricación de las piezas de transición en un proyecto de fabricación de jackets, así como, las diferentes estrategias de inspección de soldadura y las diferentes estrategias de reparación de defectos en la soldadura. Dicho modelo deberá permitir al usuario obtener una combinación de las estrategias que se ajuste a los hitos definidos de forma previa a la fabricación por el contrato con el cliente.

Para lograr el objetivo final del proyecto descrito en los párrafos anteriores, en este trabajo se define una metodología de desarrollo del modelo basada en los siguientes pasos:

1. Se va a continuar trabajando en el modelo de simulación realizado por un antiguo alumno de esta escuela, en el cual se modificara la estrategia de fabricación de las piezas de transición a la estrategia actual, y se implementara en el modelo la introducción de datos históricos para cada soldadura realizada en la pieza de transición en detrimento de la introducción de datos por bloque de trabajo.
2. Se analizarán los datos históricos correspondientes a los defectos en las soldaduras de diferentes proyectos de fabricación de jackets, con el objetivo de centrar los esfuerzos de modelado en las soldaduras con más probabilidad de defectos.
3. Se desarrollará un módulo de simulación de eventos discretos en Flexsim correspondiente a las estrategias de inspección de las soldaduras, así como, la parte correspondiente a las reparaciones debidas a los defectos encontrados en las soldaduras, que deberá ser implementado en el modelo que se propone modificar en el punto 1 de estos objetivos intermedios
4. Se deberá realizar una interfaz de interpretación de datos por cada taller interviniente en el proceso de fabricación de la pieza de transición, con el objetivo de facilitar la interpretación de los resultados, y su mejor explicación al personal encargado de implantar las soluciones propuestas por la simulación en el proyecto real de fabricación.
5. Se deberán proponer diferentes estrategias de inspección, paso para el cual será imprescindible mantener reuniones con profesionales expertos en materia de inspección lo que permitirá que todos los escenarios que se propongan sean escenarios viables en un proyecto real.

A través de los pasos mencionados anteriormente se definirá el modelo de simulación 3D que será utilizado para la realización de este trabajo fin de master, y que, al mismo tiempo, en colaboración con la línea de investigación de la UMI "Modelado y simulación de procesos de eólica marina", deberá ser implantado en el modelo completo de simulación para proyectos de fabricación de jackets.



## 3 ESTADO DEL ARTE

### 3.1 Importancia de los Ensayos No Destructivos (END) en la industria

Los Ensayos No Destructivos, END, NDT (Non Destructive Testing) en inglés, como su propio nombre indica, son un conjunto o familia de técnicas que tienen una característica en común, y es que no dañan ni alteran de forma permanente sus propiedades físicas, mecánicas, químicas o dimensionales.

Los END desempeñan un papel de vital importancia para garantizar la calidad y la confiabilidad de numerosos productos que son de primordial importancia para la seguridad de nuestras vidas. Cantidades de accidentes y lesiones se han evitado gracias a la detección temprana y eliminación de los defectos a través de una inspección previa, es por eso que miles de millones de piezas fabricadas son inspeccionadas a diario utilizando uno o más métodos de END. Una inspección temprana mediante END no sólo previene accidentes o lesiones humanas sino también grandes pérdidas económicas producidas por los costosos retrabajos y retrasos en el envío al cliente [3].

El control y la optimización del proceso de fabricación también es un área importante donde los END pueden contribuir, por ejemplo, una máquina puede ser inspeccionada a lo largo de su ciclo de vida completo para garantizar su integridad continua.

Si analizamos el caso de una plataforma offshore, es decir, instalada bajo el mar, el proceso de inspección comienza desde el inicio de su construcción hasta la estructura totalmente conformada. Una vez colocada en su posición, es necesario realizar inspecciones regulares, complementarias a otras técnicas, para garantizar su funcionamiento durante su vida útil sin interrupción de la operación normal de la estructura [4].

Los END a menudo se suelen utilizar conjuntamente con un programa de diseño y modelado para el diseño de nuevos materiales, componentes o productos donde la I+D juega también un papel relevante.

### 3.2 Imperfecciones y criterios de aceptación. Introducción a los END

Los ensayos no destructivos aplicados en un control de calidad estadístico permiten comprobar, con un cierto grado de seguridad, la calidad de una producción. Para ello, es necesario utilizar un número determinado de muestras, proporcionando datos sobre una zona local del producto. Los ensayos no destructivos permiten la inspección del 100% de una producción y la inspección de todo el volumen de un producto permitiendo detectar imperfecciones, asegurando de esta manera cierto grado de fiabilidad. [8]

El empleo de ensayos no destructivos a un sistema productivo confiere las siguientes ventajas al sistema:

- Permiten la inspección del 100% de una pieza o una producción y la obtención de datos de todo su volumen, contribuyendo a mantener un nivel de calidad uniforme en el producto y en la producción.
- Proporcionan beneficios económicos directos e indirecto.
- El éxito de la aplicación de un ensayo no destructivo en una inspección de un proceso industrial está supeditado, fundamentalmente, al cumplimiento de los siguientes requisitos:

- Que, teniendo en cuenta los factores económicos, el ensayo sea programado bajo el criterio de rendimiento y beneficio económico máximos.

Para cumplir los requisitos anteriores se utilizan dispositivos de explotación especiales, diseñados para cada problema. Cada método de ensayo no destructivo se basa en algún fenómeno físico que nos permite identificar la imperfección, estos fenómenos físicos y el proceso por el cual se pueden identificar son:

**Tabla 2: Relación entre los fenómenos físicos y el proceso por el cuál se identifican. [8]**

Fenómeno físico	Ensayo No Destructivo
Luz visible	Inspección visual
Tensión superficial	Líquidos penetrantes
Energía Electromagnética (campo magnético)	Partículas magnéticas
Energía Electromagnética (fotones)	Rayos X
Energía Electromagnética (corriente)	Corrientes inducidas
Energía mecánica (ondas elásticas)	Ultrasonidos
Energía mecánica (ondas elásticas)	Emisión acústica

Los ensayos no destructivos empleados en la detección de defectos en estructuras offshore son tres: inspección visual, partículas magnéticas y ultrasonidos. En apartados posteriores se analizarán cada una de estas técnicas, así como los equipos empleados para realizarlas.

### *3.2.1 Etapas básicas de inspección mediante END*

A continuación, se detallan cada una de las etapas básicas que se deben seguir para llevar a cabo una correcta inspección mediante END. [8]

#### **1º) Elección del método y técnicas adecuadas**

Para la elección del método y técnicas adecuadas, hay que tener presente la naturaleza del material, su estado estructura y forma del producto, así como conocer el tipo de heterogeneidades que se pretenden detectar

Por otra parte, cada método posee una sensibilidad limitada, la cual podrá ser adecuada al examen en cada caso concreto, por tanto, será preciso especificar los límites de sensibilidad y tolerancia requeridos en el ensayo y el nivel de calidad o nivel de aceptabilidad requerido en el producto.

#### **2º) Obtención e interpretación de las indicaciones**

Para la detección de heterogeneidades mediante ensayos no destructivos, las limitaciones existentes en la obtención de una indicación vienen supeditadas a su naturaleza, a su morfología, a su situación, orientación y su tamaño. Para producir una indicación propia de una heterogeneidad presente en el material, es preciso tener un conocimiento sobre las

características de los productos, así como los tipos de heterogeneidades que se puedan detectar mediante las diferentes técnicas de inspección.

Una vez obtenida la indicación, es preciso establecer una correlación entre la indicación observada con la propia naturaleza, morfología, situación, orientación y tamaño de la discontinuidad que haya generado la indicación, dependiendo ésta, principalmente, de la experiencia del técnico que realice el ensayo.

La norma clasifica las imperfecciones en 6 grupos diferentes:

**Tabla 3: Tipos de imperfecciones**

Tipos de imperfecciones	
1	Grietas
2	Cavidades
3	Inclusiones sólidas
4	Falta de fusión y penetración
5	Imperfecciones de forma y dimensionales
6	Otras imperfecciones

### 3º) Evaluación de la indicación. Criterio de aceptación

La indicación se deberá evaluar, o lo que es lo mismo, comparar con un criterio de aceptación. La labor del inspector no consiste en decidir si una soldadura está bien o no, sino que podrá decir si la zona examinada cumple con un criterio de aceptación previamente establecido.

Hay que subrayar que es el criterio de aceptación lo que convierte una imperfección o discontinuidad en defecto. Una discontinuidad o imperfección es una alteración, local o no, del material sometido a inspección y, un defecto es una imperfección que no cumple con un nivel de calidad o criterio de aceptación establecido. Esto viene a decir que un defecto es siempre una discontinuidad o imperfección, pero una discontinuidad no tiene por qué ser un defecto Figura 9.



**Figura 9: Relación entre defecto y discontinuidad.**

Es necesario subrayar que, si esta última etapa no queda perfectamente definida, el ensayo no destructivo será totalmente ineficaz.

### 3.2.2 Resumen: Etapas de la inspección

A continuación se representa, mediante un flujograma, un breve resumen del proceso que se debe seguir a la hora de llevar a cabo una inspección Figura 10.

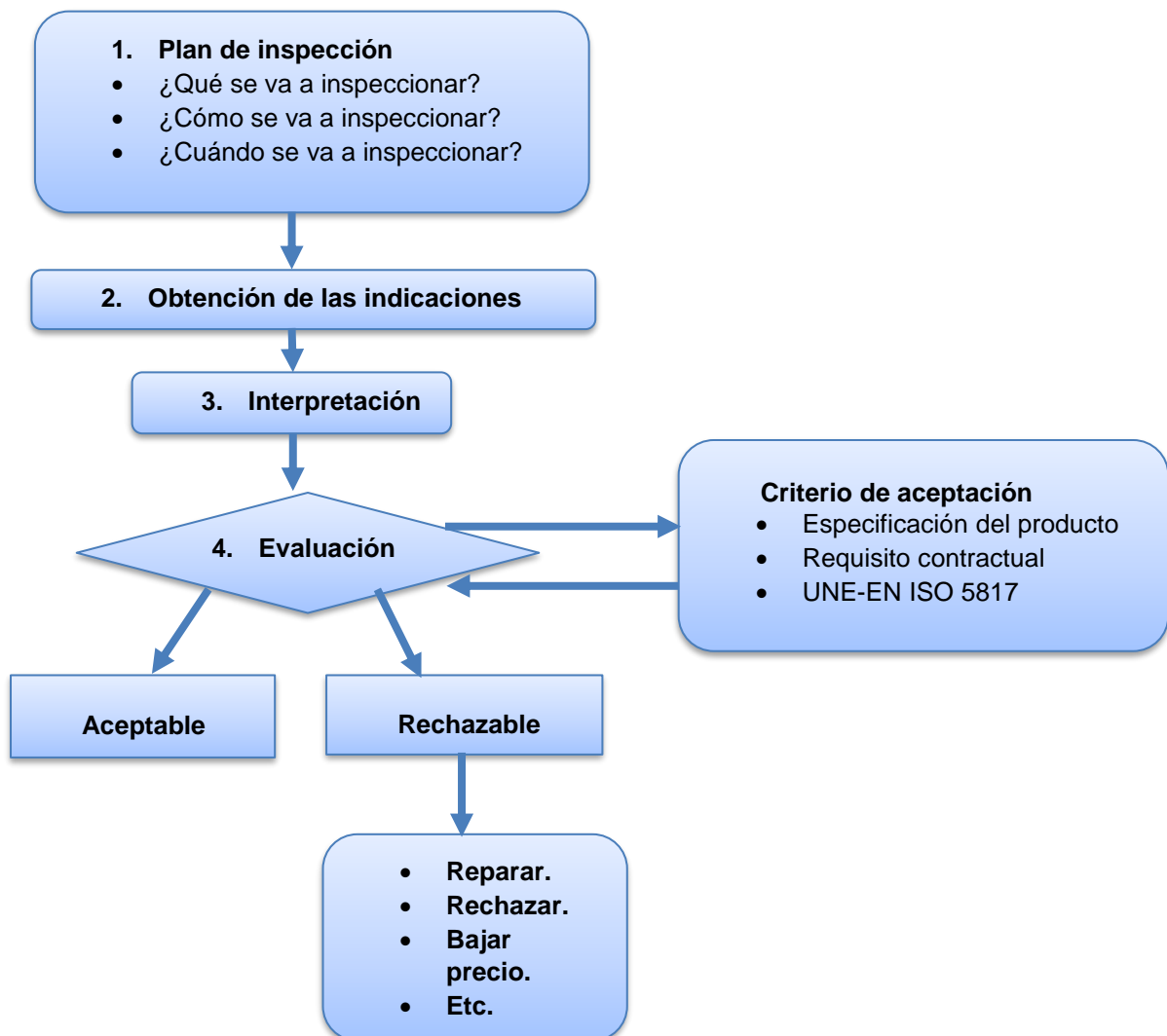


Figura 10: Etapas de la inspección

### 3.2.3 Personal de END

La realización de ensayos no destructivos no proporciona resultados directos y absolutos, sino manifestaciones indirectas, que son necesarias interpretar por parte del inspector. Para asegurar una correcta interpretación de dichos resultados, es necesario que el personal encargado posea una preparación y cualificación adecuada. Lo anterior, es igualmente aplicable para la persona que realiza el propio ensayo, ya que los resultados obtenidos dependen de si el ensayo se ha realizado de forma correcta y, por tanto, de la destreza y los conocimientos del propio operador del ensayo.

La norma UNE-EN ISO 9712 describe tres niveles distintos de certificación del personal de END, en función de las responsabilidades y tareas para las cuales tiene capacidad de desarrollar, a lo largo del proceso de ensayo. [8]



**Tabla 4: Niveles de certificación del personal de END [8]**

<b>Nivel 1</b>	Posee la capacidad para realizar el ensayo, siguiendo un procedimiento de ensayo preestablecido, bajo la supervisión de un inspector nivel 2 o 3.
<b>Nivel 2</b>	Posee la capacidad para realizar el ensayo.
<b>Nivel 3</b>	Posee la capacidad para realizar y dirigir el ensayo no destructivo.

### 3.3 Inspección Visual, VT

La inspección visual, es el ensayo no destructivo más utilizado. Las razones fundamentales de su empleo son: la sencillez, facilidad de utilización, rapidez de ejecución y la economía de su aplicación. Sin embargo, a pesar de su simplicidad, jamás deberá ser olvidada, inclusive cuando está prevista la ejecución de otros ensayos más sofisticados que siempre deberá efectuarse una inspección visual como fase previa, esto nos facultará el trabajo posterior, y, en numerosas ocasiones, será elemento determinante para proseguir la secuencia de producción establecida con verdaderas posibilidades de éxito.

La inspección visual no es determinante para clasificar una soldadura como aceptable ya que este ensayo está limitado únicamente a la superficie. Para estudiar la subsuperficie o el interior del material, se debe aplicar otros ensayos como radiografía, ultrasonidos, partículas magnéticas, etc.

Las normas que describen a la figura del inspector visual son UNE-EN ISO 9712 y UNE 14618 pero, no hay que olvidar que, el primer inspector de la unión soldada, es siempre el soldador que, aunque no cuente con una certificación para hacer inspecciones, tiene gran experiencia en el proceso de soldeo y material con el que trabaja diariamente. [10]

En la Tabla 5 Se muestran algunos conocimientos y responsabilidades exigidos a un inspector de construcciones soldadas según UNE 14618 así como las características de los niveles 1, 2 y 3 relacionados con la inspección visual.

**Tabla 5: Conocimientos y responsabilidades del inspector según UNE 14618 [8]**

	Nivel según UNE 14618		
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Conocimiento sobre los puntos a inspeccionar antes, durante y después de la soldadura.	SÍ	SÍ	SÍ
Conocimiento sobre qué herramientas utilizar para realizar la inspección visual.	NO	SÍ	SÍ
Conocimientos sobre ventajas y limitaciones de la inspección visual.	NO	SÍ	SÍ
Evaluación de imperfecciones:			
- Tamaño	NO	SÍ	NO
- Posición	NO	SÍ	SÍ
- Especificación	NO	SÍ	SÍ
- Aceptación y rechazo	NO	NO	SÍ
- Normas EN	NO	SÍ	SÍ

### 3.3.1 Herramientas para la inspección visual.

La inspección visual puede llevarse a cabo de dos maneras: [\[8\]](#)

- **Inspección visual directa:** Inspección visual que se efectúa sin interrupción del recorrido óptico entre el ojo del inspector y la pieza a estudiar. Este ensayo puede efectuarse con o sin ayuda de, por ejemplo, espejos, lentes, galgas, etc.
- **Inspección visual indirecta o remota:** Inspección visual que se efectúa con interrupción del recorrido óptico entre el ojo del inspector y la pieza a estudiar. La inspección visual indirecta cubre la utilización de fotografía, sistemas de vídeo, sistemas automatizados, etc.

#### 3.3.1.1 Equipos de inspección visual directa.

##### I. Ayudas ópticas.

La óptica geométrica es la disciplina que explica la manipulación de la luz por medio de accesorios mecánicos que producen una imagen para la observación humana. Es habitual que el inspector visual necesite de determinados utensilios para realizar su trabajo como espejos o lentes, siendo éste última el más utilizado para aumentar la imagen que observa el inspector.

##### II. Dispositivos de iluminación.

A veces es necesario contar con una “luz extra” para poder realizar la inspección visual, por ejemplo, para inspeccionar la raíz de una soldadura de una tubería donde no llega la luz ambiental. Es habitual que el inspector lleve una pequeña linterna que le ayude en su tarea.

##### III. Medición dimensional.

Para que la caracterización de una indicación esté completa, es necesario conocer sus dimensiones. Un criterio de aceptación puede dar como aceptable o rechazable una indicación en función de sus dimensiones.

En inspección visual de soldaduras es habitual tener que tomar medidas de profundidad y longitud de mordeduras, ángulos de acuerdo, sobreespesores, excesos de penetración, deformación angular, desalineamiento de piezas unidas a tope, longitud y espesor de inclusiones de escoria, etc.

Las galgas son instrumentos utilizados por los inspectores en la inspección visual de una soldadura para este tipo de fines. En la Figura 11 se muestran algunos ejemplos de su uso:

Detalle a medir	Esquema del dato a medir	Dimensión medida con la galga
<b>Pie (z)</b> El espesor de garganta (a) no se puede medir directamente. $a = z/\sqrt{2}$		
<b>Profundidad de una mordedura (h)</b>		
<b>Sobreespesor en uniones a tope (h)</b>		
<b>Exceso de concavidad o convexidad del cordón en uniones en ángulo.</b> $c = e - (z/\sqrt{2}) \quad c = (z/\sqrt{2}) - e$ Siendo c el valor de exceso de convexidad (izq.) o concavidad (dcha.), z el pie y e el valor medido con la galga.		
<b>Ángulo del chafán (β)</b>		
<b>Falta de alineación entre chapas o tubos (h)</b>		

Figura 11: Galgas utilizadas para la inspección visual de soldaduras. [10]

### 3.3.1.2 Equipos de inspección visual indirecta.

El equipo comúnmente utilizado para realizar inspecciones visuales indirectas es el boroscopio. El boroscopio o boróscopo, es un accesorio que se utiliza en las inspecciones visuales en las cuales no disponemos de un espacio físico a través del cual poder ver, lo cual nos obliga a utilizar un instrumento que tenga un tamaño reducido para acceder a través de los huecos, y que en algunos casos permita incluso el giro. Disponen de una fuente de iluminación que funciona por fibra óptica, lo cual asegura una correcta iluminación de toda la zona a inspeccionar incluso cuando se produce una rotación de la cabeza del boroscopio. En la Figura 12 se pueden ver las dos clases boroscopios disponibles: los rígidos y los flexibles. [8]

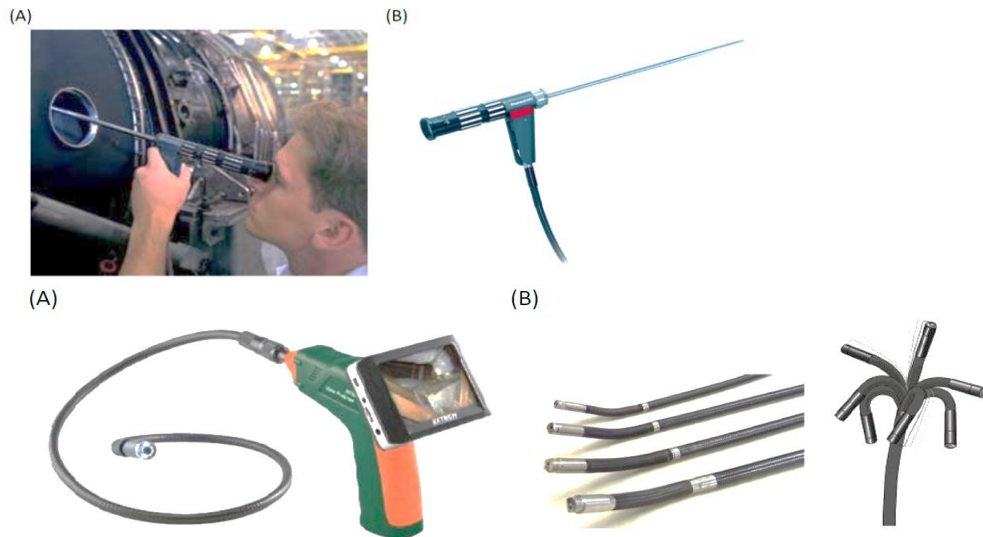


Figura 12: Boroscopio rígido (imagen superior), Boroscopio flexible (imagen inferior) [8]

### 3.3.2 Etapas de la inspección visual.

La norma UNE-EN ISO 17637 es una herramienta muy útil para determinar qué aspectos se deben considerar a la hora de hacer la inspección visual antes, durante y después de una soldadura. A continuación, se describen cada una de las etapas. [10]

#### 1º) Inspección visual antes de la soldadura

Cuando se requiere la inspección visual antes del soldeo, la unión debe examinarse para verificar que:

- El material base y el tipo de producto se corresponde con el especificado en el plano de fabricación y con la especificación de procedimiento de soldeo (WPS ó WPS).
- La forma y dimensiones de la preparación de bordes cumpla con los requisitos de la especificación del procedimiento de soldeo.
- Las caras de fusión y las superficies adyacentes estén limpias de óxido y pintura, y que se haya realizado cualquier tratamiento superficial de acuerdo con la norma de aplicación o la norma de producto.
- Las piezas a unir por soldeo se han fijado correctamente entre sí de acuerdo con los planos o instrucciones de fabricación.
- Los puntos de soldadura que sujetan el conjunto y que después se van a refundir durante el soldeo definitivo, estén libres de defectos como grietas, porosidad, inclusiones, etc.



Figura 13: Punto de soldadura agrietado detectado durante la inspección visual previa a la soldadura [10]

## 2º) Inspección visual durante el soldeo según UNE-EN ISO 17637

Cuando se requiera, la soldadura se debe examinar durante el proceso de soldeo para verificar que:

- Cada pasada o capa de metal de soldadura se limpie antes de que sea cubierta por la siguiente, prestando especial atención en las uniones entre el metal de soldadura y la cara de fusión.
- No haya imperfecciones visibles, por ejemplo, grietas o cavidades. Si se observasen imperfecciones, se debe informar de ello para que puedan tomarse acciones correctoras antes de que se deposite más metal de soldadura.
- La transición entre pasadas y entre la soldadura y el metal base tiene una forma tal que puede conseguirse una fusión satisfactoria durante el soldeo cuando se suelde la siguiente pasada.
- La profundidad y forma del resanado esté de acuerdo con la WPS o pWPS o sea comparable a la del chaflán original, con el fin de garantizar la completa eliminación del metal de soldadura tal y como esté especificado.
- Después de cualquier reparación que sea necesaria, la soldadura quede conforme a los requisitos originales de la especificación del procedimiento de soldeo.

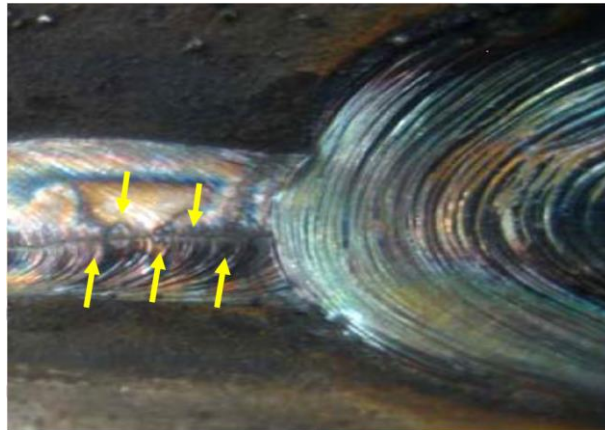


Figura 14: Grieta detectada en la pasada de raíz parcialmente tapada por la pasada de relleno [10]

En Figura 15 Se muestran algunas imperfecciones se pueden detectar durante el soldeo.

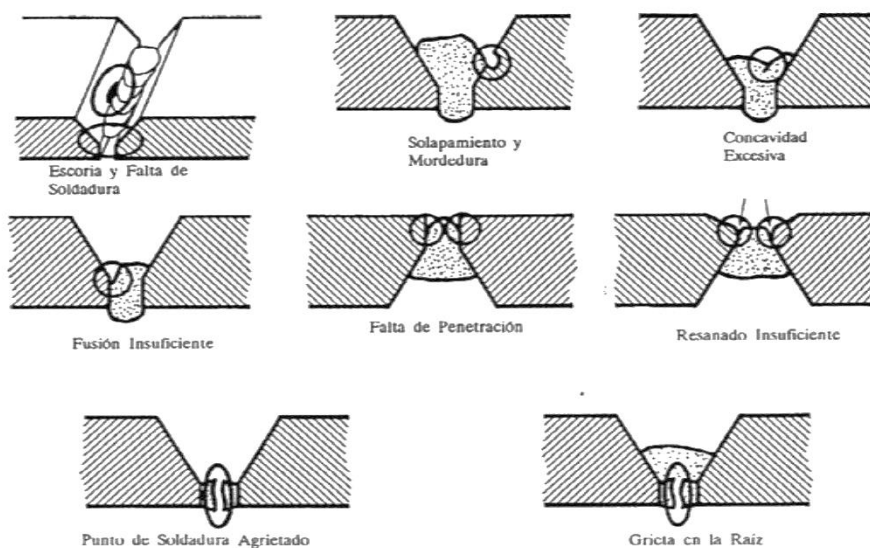


Figura 15: Posibles imperfecciones durante el soldeo [10]

### 3º) Inspección visual después del soldeo según UNE-EN ISO 17637

La soldadura terminada debe inspeccionarse según el plan de inspección y evaluarse de acuerdo con el criterio de aceptación en él indicado. Además, debe tenerse en cuenta que aunque la soldadura haya quedado libre de defectos, el conjunto soldado puede haber quedado deformado y no cumplir con las especificaciones.

La inspección de una unión soldada no quedará completa sin verificar que:

- Cualquier mordedura está dentro de los requisitos establecidos para el criterio de aceptación.
- Cualquier imperfección, tales como grietas o porosidad, detectada con el empleo de ayudas ópticas cuando sea necesario, en la superficie de la soldadura y ZAT (Zona Afectada Térmicamente) cumple con los criterios de aceptación establecidos.
- Cualquier utillaje temporal soldado al conjunto final para facilitar la fabricación o montaje y que sea perjudicial para el funcionamiento del equipo o dificulte su examen debe retirarse de forma que no se dañe al equipo. La zona donde el accesorio estuvo soldado se debe inspeccionar para asegurar que queda libre de grietas.
- Cualquier marca de cebado esté dentro de los límites del criterio de aceptación.

### 3.4 Partículas Magnéticas, MT

El ensayo por partículas magnéticas, PM o, más comúnmente, MT (Magnetic Testing en inglés) es un ensayo no destructivo capaz de detectar discontinuidades superficiales y subsuperficiales. Esta capacidad de detección se basa en las distorsiones locales de un flujo magnético, creadas por la presencia de discontinuidades presentes en piezas magnetizadas, dando lugar a la aparición de campos de fuga en el entorno de dichas discontinuidades, los cuales son capaces de atraer finas partículas ferromagnéticas. En la Figura 16, se representan esquemáticamente los principios del ensayo por partículas magnéticas. [10]

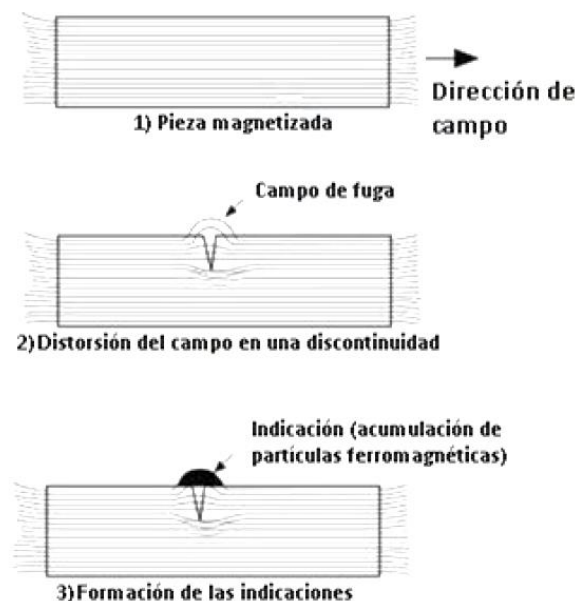


Figura 16: Principios del ensayo de partículas magnéticas [10]

Las líneas de fuerza del campo magnético se deforman como consecuencia de la presencia de una heterogeneidad y, concretamente, al modificarse la permeabilidad magnética del medio, permitiendo la detección de los siguientes defectos:

- Defectos superficiales: en función de la orientación respecto al campo magnético: pueden ser:
  - Defecto perpendicular al campo → Campos de fuga importantes → Indicación elevada.
  - Defecto paralelo al campo → Campos de fuga poco importantes → Indicación baja.
- Defectos subsuperficiales: Campos de fuga poco importantes → Indicación baja.
- Defectos internos: Campo de fuga interno → No detectable.

Como cualquier END, el ensayo por partículas magnéticas, tiene una serie de ventajas e inconvenientes o limitaciones, las cuales se describen a continuación en la Tabla 6:

**Tabla 6: Ventajas y limitaciones del ensayo por partículas magnéticas [8]**

VENTAJAS	LIMITACIONES
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permite detectar tanto discontinuidades superficiales como subsuperficiales.</li> <li>- Es el método más sensible para las discontinuidades superficiales.</li> <li>- Forma imágenes de las imperfecciones en la superficie de la pieza a ensayar.</li> <li>- No es necesario calibrar el equipo ni condiciones de ensayo especiales.</li> <li>- El ensayo no se ve excesivamente influenciado por la condición superficial del componente a ensayar.</li> <li>- Es aplicable a componentes pintados.</li> <li>- Es aplicable a cualquier tamaño de pieza.</li> <li>- Los resultados no se ven muy fuertemente influenciados por la destreza del operador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Solo es aplicable a materiales ferromagnéticos.</li> <li>- La sensibilidad del ensayo está fuertemente influenciada por la orientación de la imperfección, con respecto al campo magnético. Más sensible cuanto más perpendicular sea ésta.</li> <li>- Suele ser necesario desmagnetizar el componente ensayado, lo que alarga el tiempo de ensayo.</li> <li>- Pinturas y recubrimiento electrolíticos pueden disminuir la sensibilidad del ensayo.</li> <li>- Puede ser necesario aplicar altas intensidades de corriente.</li> <li>- Se deben evitar calentamientos y quemados locales, sobre todo en piezas terminadas.</li> </ul>

### 3.4.1 Equipamiento: medios de magnetización.

A la hora de realizar un ensayo por partículas magnéticas necesitaremos, principalmente, equipos que nos permitan magnetizar las piezas a ensayar y las propias partículas magnéticas, que nos permitirán detectar los campos de fuga que generarán las indicaciones, producto de la existencia de imperfecciones. Además, para una correcta ejecución del ensayo, también pueden ser necesarios equipos tales como: indicadores de campo, luxómetros, lámparas de luz UV, etc.

Para producir campos magnéticos, adecuados para llevar a cabo en ensayo por partículas magnéticas, podemos emplear dos sistemas de magnetización: por imanes o por corriente eléctrica. [10]

#### A. Por imanes.

En un imán, las líneas de fuerza del campo magnético que circulan por el exterior salen del polo norte y entran por el polo sur. Si entre ambos polos situamos un material ferromagnético, las líneas de fuerza en vez de ubicarse en el aire, pasarán a través de dicho material. Por tanto, dicho material se habrá magnetizado, y cualquier discontinuidad que corte al campo magnético con un ángulo de entre 45° y 90°, generará un campo de fuga, que atraerá a las partículas magnéticas, generando una indicación.

Los principales métodos de magnetización por imanes son:

- Imán permanente.

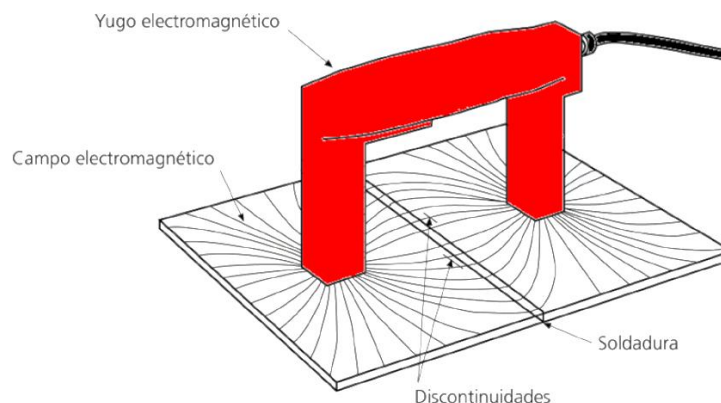
Cuando un material ferromagnético se sitúa entre los polos de un imán permanente, las líneas de fuerza pasan a cerrar el circuito a través de la pieza, ya que los materiales ferromagnéticos presentan una reluctancia (resistencia al paso del flujo magnético) mucho menor que en el aire, quedando la pieza magnetizada. Las ventajas y limitaciones de este método se muestran a continuación en la Tabla 7.

**Tabla 7: Ventajas y limitaciones del uso de imanes permanentes [8]**

VENTAJAS	LIMITACIONES
<ul style="list-style-type: none"> <li>- No requiere fuente de energía eléctrica.</li> <li>- Fácil de transporta.</li> <li>- No se producen quemados locales del componente a ensayar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Campo magnético de intensidad reducida.</li> <li>- Poca manejabilidad.</li> </ul>

- Yugo electromagnético.

Un yugo electromagnético no es más que un electroimán con forma de “U”, y que está dotado de una bobina, cuya finalidad es la de generar la corriente de magnetización. Los yugos electromagnéticos permiten obtener campos más potentes, en comparación con los imanes permanentes, y regulables a voluntad Figura 17.



**Figura 17: Magnetización con yugo electromagnético [10]**

Las ventajas y limitaciones de este método se muestran a continuación en la Tabla 8.

**Tabla 8: Ventajas y limitaciones del método de magnetización con yugo electromagnético[8]**

VENTAJAS	LIMITACIONES
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ideal para trabajos en campo.</li> <li>- No se producen quemados locales del componente a ensayar.</li> <li>- Se pueden emplear con revestimientos de hasta 40 micras</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Difícil cálculo de intensidad de corriente aplicada.</li> <li>- Acumulación de partículas en los extremos de la pieza</li> </ul>

*B. Por corriente eléctrica.*

Cuando sobre un material conductor, se aplica una corriente eléctrica, ésta generará un campo magnético, perpendicular a la dirección de la corriente aplicada. Este campo magnético



se denomina campo magnético inducido, y es el campo magnético que emplearemos para magnetizar el componente a ensayar.

Para conseguir la magnetización mediante corriente eléctrica, se emplea principalmente: [\[10\]](#)

- Cabezales de contacto.

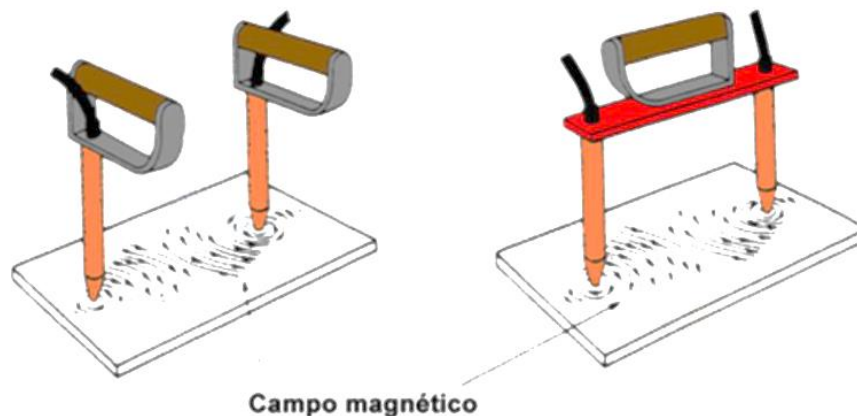
Este medio de magnetización, mediante cabezales de contacto, suele estar montado en los equipos estacionarios de ensayo (véase Anexo A). Los cabezales de contacto transmiten una corriente eléctrica a través del componente a ensayar, de manera que se creará un campo magnético circunferencial. Las ventajas y limitaciones de este método se muestran a continuación en la Tabla 9.

**Tabla 9: Ventajas y limitaciones del uso de cabezales de contacto [\[8\]](#)**

VENTAJAS	INCONVENIENTES
<ul style="list-style-type: none"><li>- Fácil de aplicar.</li><li>- Posibilidad de calcular la corriente aplicada.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Posibles quemaduras y deterioros de las piezas en los puntos de contacto.</li><li>- No se pueden inspeccionar componentes de sección hueca.</li></ul>

- Puntas de contacto.

Son equipos portátiles y constan de dos puntas, o punzones, que hacen el papel de electrodos, de manera que a través de estas se hace llegar a la pieza una corriente eléctrica, que magnetiza localmente el componente a ensayar Figura 18.



**Figura 18: magnetización por puntas de contacto [\[10\]](#)**

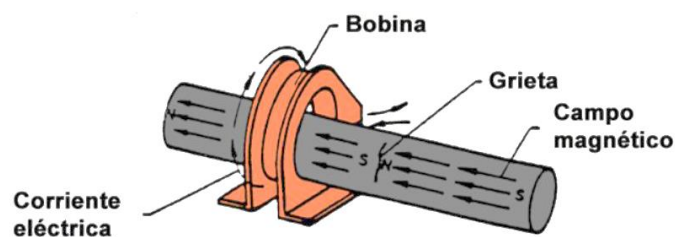
Las ventajas y limitaciones de este método se muestran a continuación en la Tabla 10.

**Tabla 10: Ventajas y limitaciones del método de magnetización por puntas de contacto [8]**

VENTAJAS	INCONVENIENTES
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adecuado para inspecciones locales en piezas de gran tamaño.</li> <li>- Posibilidad de calcular la corriente aplicada.</li> <li>- Muy sensible en imperfecciones subsuperficiales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Posibles quemaduras y deterioros de las piezas en los puntos de contacto.</li> <li>- Solo es aplicable en piezas de gran tamaño.</li> </ul>

- Bobina.

Cuando una corriente eléctrica, continua o alterna, circula por un conductor que se enrolla, formando una bobina de una o más vueltas, se crea un campo magnético cuyas líneas de fuerza, en el interior de la bobina o solenoide, son paralelas a su eje. Si, en estas condiciones, introducimos en el núcleo de la bobina una barra de un material ferromagnético, de modo que su eje coincida con el de la bobina, o sea paralelo al mismo, la barra se magnetizará longitudinalmente. Las bobinas se emplean en la magnetización de piezas, cuando se desea obtener una magnetización longitudinal de la pieza en cuestión.



**Figura 19: Magnetización por bobina. [8]**

Las ventajas y limitaciones de este método se muestran a continuación en la Tabla 11.

**Tabla 11: Ventajas y limitaciones del método de magnetización por bobina [10]**

VENTAJAS	INCONVENIENTES
<ul style="list-style-type: none"> <li>- No se producen quemados locales del componente a ensayar. Posibilidad de calcular la corriente aplicada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La magnetización está muy influenciada por la proximidad a la bobina, siendo esta magnetización mayor, cuanto menor es dicha distancia.</li> </ul>

### 3.4.2 Procedimiento de ensayo.

A continuación, se describen las principales etapas del ensayo por partículas magnéticas. [8]



**Figura 20: Principales etapas del proceso de ensayo por partículas magnéticas.**

## 1º) Preparación de la superficie.

Antes de comenzar el ensayo propiamente dicho, es necesario que la superficie a inspeccionar tenga unas condiciones mínimas, que permita realizar la inspección de la mejor manera posible. Una excesiva rugosidad superficial puede reducir la movilidad de las partículas. Las superficies revestidas con una capa fina de pintura no magnética, por ejemplo, imprimación, también pueden examinarse si la capa de pintura no está deteriorada y su espesor no supera las 40  $\mu\text{m}$ , por encima del cual, la sensibilidad disminuye.

Las piezas a examinar deben estar libres de cascarilla, aceite, marcas de mecanizado, suciedad, pintura adherida de espesor excesivo o suelta, y cualquier otra materia ajena que pueda afectar la sensibilidad del ensayo.

## 2º) Magnetización.

La magnetización de la pieza, en el ensayo por partículas magnéticas, tiene por objeto sumergir a la pieza en un campo magnético de intensidad y dirección conocidas, en función de la orientación esperada de las discontinuidades que se pretendan detectar a través del ensayo. La dirección del campo magnético, deberá ser la adecuada, de manera que forme un ángulo de entre  $45^\circ$  y  $90^\circ$  con la orientación de la discontinuidad.

De la utilización combinada de dos direcciones perpendiculares entre sí se puede conseguir detectar defectos en todas las direcciones, tal y como se representa a continuación en la Figura 21.

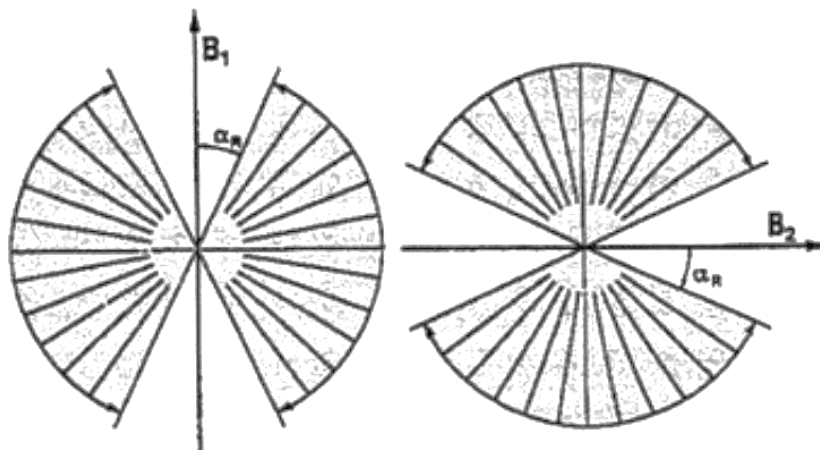


Figura 21: Direcciones de magnetización.

En función de la dirección del campo magnético producido, en el ensayo por partículas magnéticas, se trabaja con campos longitudinales y campos magnéticos circunferenciales.

Para producir campos magnéticos idóneos, podemos utilizar dos sistemas de magnetización: por imanes y por corriente eléctrica. La magnetización por corriente eléctrica se puede llevar a cabo trabajando tanto con corriente alterna, como con continua. El empleo de un tipo u otro, de corriente, depende de las condiciones de ensayo.

En función de las necesidades de ensayo, la magnetización deberá cumplir ciertos requisitos y, por tanto, la selección del medio de magnetización, será de crucial importancia con el fin de obtener los resultados adecuados.

En la Tabla 12, se describen las características de los medios de magnetización más corrientes, en relación al campo magnético generado. [\[10\]](#)

**Tabla 12: Medio de magnetización empleado según el tipo de magnetización.**

MEDIO DE MAGNETIZACIÓN	TIPO DE MAGNETIZACIÓN
Imán permanente	Longitudinal
Yugo	Longitudinal
Electrodos	Circular
Bobina	Longitudinal
Cabezales de contacto	Circular
Conductor central	Circular

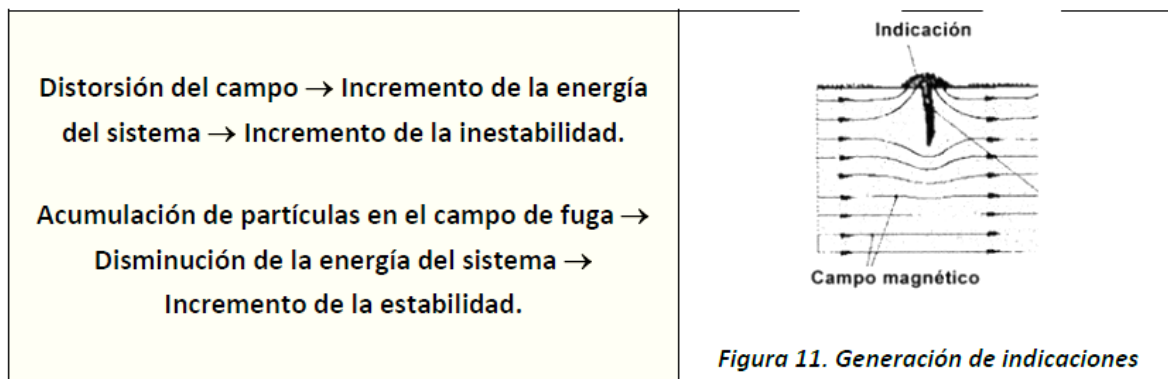
Es importante destacar que, cuando el ensayo se realiza en inspección de soldaduras, la magnetización se realizará con corriente alterna, salvo requisito contractual en contra. Se debe utilizar cualquiera de los siguientes métodos de magnetización:

- Yugos electromagnéticos.
- Equipos de paso de corriente por electrodos.
- Técnicas de conductor central, conductor adyacente o bobina.

### 3º) Aplicación de las partículas magnéticas.

Una vez magnetizada la pieza, lo siguiente es poner de manifiesto los campos de fuga generados por las discontinuidades, superficiales y subsuperficiales, dando lugar a las indicaciones.

Las partículas tienden a corregir la deformación producida por la heterogeneidad reduciendo la energía total del sistema, actuando como detectores del campo de fuga y formando una imagen sobre la superficie de la pieza y que se corresponde exactamente con la trayectoria superficial de la discontinuidad. Este principio se puede resumir atendiendo al siguiente balance de energía Figura 22:



**Figura 22: Generación de indicaciones [8]**

En función de cuando se aplican las partículas magnéticas, en relación a la magnetización, se hablará de dos tipos de examen:

- ❖ **Examen continuo**, en el que la magnetización y la aplicación de las partículas magnéticas se llevan a cabo de forma simultánea.
- ❖ **Examen residual**, en el que la aplicación de las partículas se hace después de la magnetización de la pieza.

En la Tabla 13 se indican las principales características de ambos tipos de exámenes:

**Tabla 13: Características de los exámenes residual y continuo [10]**

EXAMEN RESIDUAL	EXAMEN CONTINUO
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sólo es aplicable en materiales con elevada retentividad, como por ejemplo aceros duros.</li> <li>- Menor sensibilidad que el examen continuo, motivo por el cual se suele llevar a cabo con partículas fluorescentes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayor sensibilidad que el examen residual e insustituible cuando se trata de aceros de bajo contenido en carbono.</li> <li>- Mayor velocidad de ensayo, ya que la magnetización y la aplicación de las partículas se llevan a cabo simultáneamente.</li> <li>- Cuando se emplea el método continuo con partículas magnéticas húmedas, debe prestarse especial atención a que sólo se apliquen las partículas mientras se genera el campo magnético.</li> </ul>

#### 4º) Observación.

Una vez aplicadas las partículas magnéticas, el siguiente paso es la observación del elemento a ensayar, con el fin de detectar las posibles indicaciones que se manifiesten. El que esta fase sea de carácter decisivo no implica que tenga mayor importancia que las demás, ya que sólo si las anteriores se han cumplido satisfactoriamente queda garantizado un óptimo resultado del control.

#### 3.4.3 Evaluación de las indicaciones. Norma UNE-EN ISO 23278.

Como resultado de la realización del ensayo, se obtendrán una serie de indicaciones, y son estas indicaciones las que se deben interpretar. El interpretar una indicación, no es más que determinar cuál es la causa por la cual ha aparecido dicha indicación. En el ensayo por partículas magnéticas, las discontinuidades se clasifican como falsas, relevantes o irrelevantes, en función del efecto que producirá dicha indicación.

La norma UNE-EN ISO 23278: “*Ensayo no destructivo de uniones soldadas. Ensayo de uniones soldadas mediante partículas magnéticas. Niveles de aceptación*”, toma como base el tamaño de las indicaciones a la hora de establecer los distintos niveles de calidad que se emplean en la evaluación de las indicaciones, tal y como puede verse en la Tabla 14. [8]

**Tabla 14: Nivel de aceptación de acuerdo con la Norma UNE-EN ISO 23278 [8]**

Tipo de indicación	Nivel de aceptación <sup>1)</sup>		
	1	2	3
Indicación lineal l=longitud de la indicación	$l \leq 1,52$	$l \leq 3$	$l \leq 6$
Indicación no lineal d=Medida del eje mayor	$d \leq 2$	$d \leq 3$	$d \leq 4$
<sup>1)</sup> Los niveles de aceptación 2 y 3 pueden especificarse con un sufijo “X” que significa que todas las indicaciones alargadas detectadas deben evaluarse con el nivel 1. Sin embargo, la probabilidad de detección de indicaciones más pequeñas que las correspondientes al nivel de aceptación original puede ser pequeña.			

En numerosas aplicaciones, necesitamos relacionar estos niveles de calidad con los niveles de calidad especificados en la Norma UNE-EN ISO 5817: “*Soldeo. Uniones soldadas por fusión de acero, níquel, titanio y sus aleaciones. Niveles de calidad para las imperfecciones*” Tabla 15.

**Tabla 15: Correlación entre los distintos niveles de calidad [8]**

Niveles de calidad de acuerdo con ISO 5817 o ISO 10042	Criterios de aceptación de acuerdo con ISO 23278
B	2X
C	2X
D	3X

#### **3.4.4 Registro de los resultados.**

Al finalizar el ensayo por partículas magnéticas es necesario registrar los resultados obtenidos en el mismo, y reflejar toda la información que pueda resultar de interés, con el fin de facilitar y soportar la toma de decisiones sobre cómo actuar a continuación, en cuanto al elemento inspeccionado. Los principales datos a registrar son: [10]

- Nombre del organismo/inspector que realiza el ensayo.
- Objeto de ensayo.
- Lugar y fecha de ensayo.
- Material base y de aporte.
- Tratamiento térmico posterior al soldeo.
- Tipo de unión.
- Espesor del material.
- Proceso/s de soldeo.
- Temperatura de ensayo del objeto a ensayar.
- Procedimiento o instrucción seguida para la realización del ensayo, y descripción de los parámetros.
- Niveles de aceptación.
- Descripción y localización de las indicaciones obtenidas.
- Resultado del ensayo con referencia a los niveles de aceptación utilizados.

Identificación, cualificación y firma del personal que realizó el ensayo

### **3.5 Inspección Ultrasónica, UT**

La inspección mediante ultrasonidos es un método de ensayo no destructivo en el cual se introducen haces de ondas sonoras de alta frecuencia en el material con el objetivo de detectar discontinuidades en el material. Estas ondas ultrasónicas viajan a través del material con cierta pérdida de energía —atenuación— y son reflejadas por las superficies de interfase. Las ondas que reflejadas se representan y analizan para definir la presencia, localización y dimensionamiento de discontinuidades en el material.

Ejemplos de discontinuidades que producen interfaces reflectantes son las grietas, laminaciones, cavidades de contracción, poros, inclusiones de escoria, faltas de unión, etc. Estas discontinuidades producen interfaces reflectantes que pueden detectarse con facilidad.

La inspección por ultrasonidos es uno de los métodos de ensayo no destructivo más ampliamente utilizados, siendo la aplicación principal la detección y caracterización de discontinuidades internas. Asimismo, también se utiliza para detectar discontinuidades superficiales, definir las características de unión entre superficies, medir espesores y, en mucha menor extensión, para determinar propiedades físicas, estructura, tamaño de grano y constantes elásticas de los materiales. [8]

Los ultrasonidos son ondas acústicas de idéntica naturaleza que las ondas sonoras, diferenciándose de éstas en que su campo de frecuencias se encuentra por encima de la zona audible. La Figura 23 representa las tres bandas que se pueden distinguir en el espectro acústico, que son:

- **Infrasónica:** frecuencia inferior a 16 ciclos/segundo o Hertz.
- **Sónica (audible):** frecuencias comprendidas entre 16 Hz y 20 kHz.
- **Ultrasónica:** frecuencias superiores a los 20 kHz.

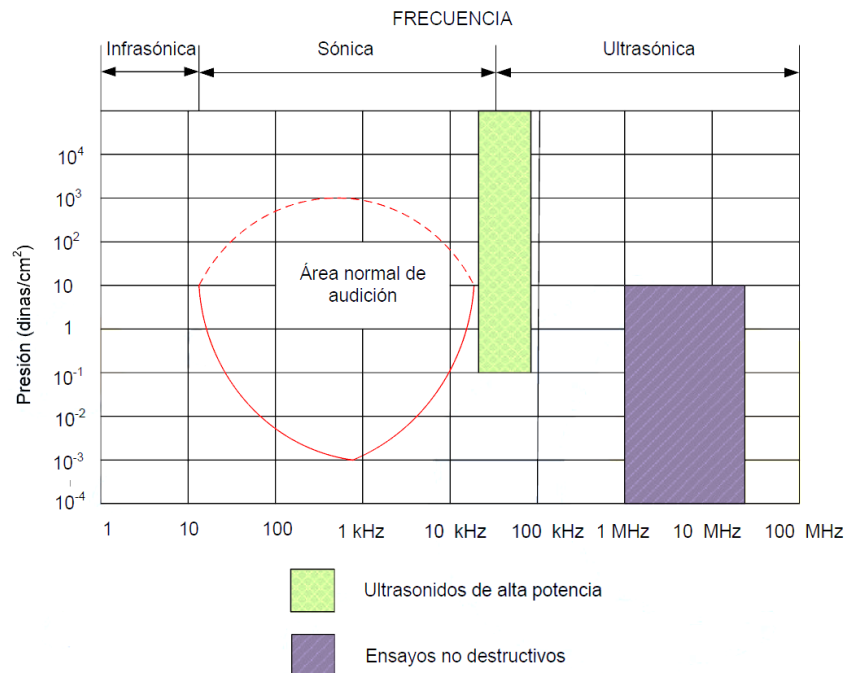


Figura 23: Espectro sonoro [8]

En principio, las ondas ultrasónicas pueden propagarse dentro de todos los medios donde haya fracciones de materia, átomos o moléculas capaces de vibrar, por lo que su propagación podrá tener lugar en los gases, líquidos y sólidos. Por el contrario, no podrán producirse o propagarse en el vacío. Estas ondas son absorbidas, en mayor o menor medida por todos los materiales a causa de la transformación de su energía vibratoria en calor. Dado que algunos materiales tienen un gran poder de absorción, no todos ellos serán aptos para la propagación de ondas ultrasónicas

Estos fenómenos de transmisión, absorción, reflexión y refracción de las ondas ultrasónicas, unidos al hecho de que, en contraste con la óptica se añade aquí un nuevo fenómeno, consistente en que un tipo de onda puede transformarse en otro, es decir, las ondas longitudinales en transversales y viceversa, son la base de la aplicación de los ultrasonidos al reconocimiento de los materiales. [10]

### 3.5.1 Equipos para ensayo ultrasónico.

En este apartado se enumeran los equipos más utilizados para realizar un ensayo por ultrasonidos: [8]

#### I. Palpadores

En el campo de ensayos no destructivos un palpador es un dispositivo que permite convertir un pulso de energía eléctrica en energía mecánica, en forma de ondas de sonido, las cuáles viajan a través del material. Las ondas de sonido que se reflejan en el material, son, a su vez, convertidas por el palpador en un pulso de energía eléctrica que puede ser procesado y representado en un aparato de medida adecuado. El palpador actúa como un "altavoz ultrasónico" y "micrófono", generando y recibiendo pulsos de ondas de sonido a frecuencias mucho más altas que el rango de audición humana.

A continuación, se detallan los diferentes tipos de palpadores:

#### i. Palpadores de contacto

Se emplean en los equipos que operan por los métodos de impulso-eco, de transparencia y de resonancia. La mayor parte de estos palpadores llevan incorporados osciladores diseñados para emitir ondas longitudinales.

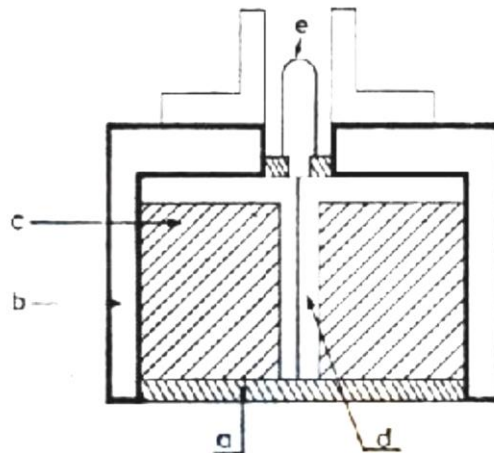


Figura 24: Palpador de contacto normal [8]

### ii. Palpadores de inmersión

Este tipo de palpadores se utiliza cuando se precisa realizar exploraciones de gran extensión, bien sumergiendo la muestra en un tanque, bien mediante el empleo de técnicas de inmersión local. También se utilizan en inspecciones automáticas.

La transmisión de los ultrasonidos entre el palpador y la muestra se efectúa a través de una columna de líquido, es decir, sin contacto directo, presión ni rozamiento entre el palpador y el material. En la Figura 25 se muestra la diferencia a la hora de aplicar un palpador de contacto y otro de inmersión.

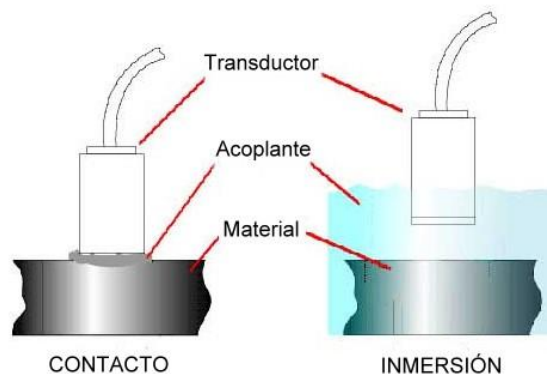


Figura 25: Diferencia entre un palpador de contacto y uno de inmersión [8]

### iii. Palpadores especiales

Una de las ventajas del ensayo por ultrasonidos es su versatilidad que, en gran medida, se debe a la posibilidad de construir el palpador que mejor se adapte a cada problema. En la mayoría de los casos, los palpadores especiales presentan una configuración externa, diseñada de forma que les permite acceder a determinadas zonas críticas de las muestras. Así, se construyen palpadores para ensayar álabes de turbinas, dientes de engranaje o cualquier otra pieza de geometría compleja en la que la zona de acceso no permite el empleo de palpadores convencionales.

## II. Equipos de ultrasonidos



Dada la gran diversidad de aplicaciones de los ultrasonidos, no es posible diseñar un equipo que pueda satisfacer las exigencias propias de cada una de ellas, existiendo, por tanto, una gran variedad de equipos. En cuanto a su aplicación al campo de los ensayos no destructivos se refiere, según la finalidad del ensayo, detección e identificación de heterogeneidades o defectos (defectología), control de espesores en fabricación o mantenimiento (metrología) o problemas de caracterización sobre naturaleza y estado de materiales, las características de diseño de los equipos que han de servir para resolver cada uno de estos problemas, han de ser diferentes entre sí. Lo mismo ocurre por cuando se relaciona con la naturaleza de los objetos sometidos a examen, sea esta metálica o no metálica.

Los dos métodos principales de inspección por ultrasonidos son:

- transmisión
- transparencia de impulso-eco.

La diferencia principal entre ambos es que en transmisión solo se mide la amplitud de la señal, mientras que el impulso-eco se puede utilizar para medir amplitud y tiempo. [\[10\]](#)

### *3.5.2 Preparación para el ensayo.*

En este apartado se detallan dos elementos necesarios previo a la realización del ensayo ultrasónico. [\[8\]](#)

#### I. Acoplantes y preparación de las superficies.

Al utilizar la técnica por contacto se hace imprescindible el empleo de un medio acústicamente conductor interpuesto entre el palpador y el material a examinar. Este medio suele denominarse “acoplante”.

En cuanto a la preparación de las superficies hay que tener muy en cuenta que, tanto en el caso de las uniones soldadas como en cualquier otro, el método empleado para la limpieza o preparación de las superficies para el ensayo por ultrasonidos no alterará al metal base ni afectará al acabado final de la pieza. Es importante que la superficie esté lo suficientemente limpia y lisa para permitir que la señal del eco de fondo correspondiente al lado opuesto de la chapa se mantenga por lo menos en un 50% del total de la escala durante la exploración. Cualquier residuo de grasa, óxido o suciedad deberá ser eliminado antes de hacer el ensayo.

#### II. Calibración

En el campo de la inspección ultrasónica, no se trata de una calibración propiamente dicha; el término calibración en este campo se utiliza para describir las operaciones de verificación y ajuste del equipo en conjunto con los palpadores utilizados.

Como operación previa al proceso de inspección por ultrasonidos es necesario proceder con los siguientes pasos:

- 1º) Comprobación satisfactoria del estado de funcionamiento del equipo.
- 2º) Calibración conjunta del equipo, palpador o palpadores y cables de conexión que vayan a ser utilizados en el trabajo de inspección de que se trate.

### *3.5.3 Informe de ensayo ultrasónico*

Los resultados de los ensayos no destructivos mediante ultrasonidos, se deben recoger en informes escritos. Los informes incluyen datos acerca de las soldaduras o volumen examinado (marcado sobre esquemas o planos del componente examinado), la localización de cada reflector registrado, y la identificación del operador que realizó cada ensayo de las piezas examinadas. Por lo general también deben conservarse registros de calibración, ajuste o verificación de los equipos y bloques de calibración utilizados.

Para cada ensayo ultrasónico, debe identificarse y registrarse al menos la siguiente información: [10]

- Procedimiento de ensayo
- Sistema de ensayo ultrasónico utilizado (equipo, palpadores y dispositivos especiales)
- Identidad del personal que ha realizado los ensayos y nivel de cualificación
- Datos de ajuste del equipo (campo, dB)
- Identificación y situación de la soldadura o volumen inspeccionado
- Identificación de la superficie desde la que se ha realizado el ensayo
- Mapa, esquema o registro de las indicaciones detectadas o áreas exentas de indicaciones
- Fecha y lugar en que se realizaron los ensayos
- Acoplante empleado
- Identificación de los bloques de calibración empleados
- Acondicionamiento de la superficie
- Frecuencia
- Equipos especiales

### 3.6 Normativa de ensayos no destructivos para proyectos offshore

En este apartado se indicarán las normas y especificaciones marcadas en el proyecto que se va a analizar en este trabajo y que se han seguido para analizar los distintos escenarios en el modelo.

Para comenzar, la Tabla 16 recoge el mínimo alcance para inspección de soldaduras:

**Tabla 16: Porcentaje de inspección según el tipo de soldadura y su categoría [9]**

Categoría	Especial/Primaria			Secundaria			Secundaria/Terciaria		
	UT	MT	VT	UT	MT	VT	UT	MT	VT
<b>Tipo de unión</b>									
Unión a tope	100%	100%	100%	20%	20%	100%	5%	100%	100%
Uniones en T a penetración completa	100%	100%	100%	20%	20%	100%	5%	100%	100%
Uniones en T a penetración parcial y soldaduras a filete	-	100%	100%	-	20%	100%	-	5%	100%

Ya que la estructura que se analizará más adelante pertenecerá a la categoría de acero primario, el porcentaje de inspección para cada soldadura será el siguiente:

- Para ensayo UT → 100% en soldaduras a tope, uniones en T y penetración completa.
- Para ensayo MT → 100% para soldaduras a tope, uniones en T, penetración parcial y soldadura a filete.
- Para ensayo VT → 100% para las mismas soldaduras anteriores.

Además, los criterios que se llevarán a cabo para realizar las inspecciones son los siguientes:

- Todas las uniones soldadas se evaluarán mediante inspección visual, independientemente de otras inspecciones y se realizará antes de cualquier inspección.
- Para la primera jacket que se fabrica, las cinco primeras soldaduras deberán ser testeadas al 100%, sin seguir la tabla antes mencionada.

Hay que tener en cuenta que para realizar el ensayo después de la realización de una soldadura, es obligatorio esperar un mínimo de tiempo para ser inspeccionada, este tiempo puede estar entre 24 y 48 horas. [9]

El tiempo de espera puede acordarse previamente con el cliente o bien se puede hacer un cálculo a partir de la siguiente tabla:

**Tabla 17: Tiempos de espera mínimos después de la soldadura en función del tamaño de la misma y su heat input [9]**

MINIMUM HOLDING TIMES		
Weld Size (mm) <sup>a</sup>	Heat input Q (kJ/mm)	Holding time (hours) <sup>b,c</sup>
$a$ or $t \leq 12$	$\leq 3$	8
	$> 3$	16
$a$ or $t > 12$	$\leq 3$	16
	$> 3$	24

a) Sizes apply to the nominal throat thickness “ $a$ ” of a fillet weld or the nominal material thickness “ $t$ ” of a full penetration weld. For individual partial penetration butt welds, the governing criteria is the nominal weld depth  $a$ , but for pairs of partial penetration butt welds welded simultaneously, it is the sum of the weld throats  $a$ .

b) The time between weld completion and commencement of NDT shall be stated in the weld traceability sheet. In welding in site, date and time of completion of the same shall be recorded.

c) The hold time applies to materials from S235 to S460.

Donde “ $a$ ” es el espesor nominal para una soldadura a filete y “ $t$ ” para una a penetración total.

Como el espesor de la soldadura que se realizan en la estructura a analizar es mayor de 12 milímetros, el tiempo de espera para la inspección podría reducirse de 48 a 24 horas en caso de ser necesario. [9]

En general, las siguientes normativas son las aplicables para la evaluación de ensayos no destructivos, criterios de aceptación y certificación de los técnicos de ensayos: [10]

- CEN/TR 15135: Soldeo. Diseño y ensayo no destructivo de soldaduras.
- UNE-EN ISO 6520-1: Soldeo y técnicas afines. Clasificación de las imperfecciones geométricas en los materiales metálicos. Parte 1: Soldeo por fusión.
- UNE-EN ISO 6520-2: Soldeo y procesos afines. Clasificación de las imperfecciones geométricas en las soldaduras de materiales metálicos. Parte 2: Soldeo por presión.
- UNE-EN ISO 5817: Soldeo. Uniones soldadas por fusión de acero, níquel, titanio y sus aleaciones (excluido el soldeo por haz de electrones). Niveles de calidad para las imperfecciones.
- UNE-EN ISO 10042: Soldeo. Uniones soldadas por arco en aluminio y sus aleaciones. Niveles de calidad para las imperfecciones.
- UNE-EN ISO 13919-1 y 2: Soldeo. Uniones soldadas por haz de electrones y por láser. Guía sobre los niveles de calidad en función de las imperfecciones. Parte 1: Acero. Parte 2: Aluminio y sus aleaciones soldables.
- UNE-EN ISO 9013: Corte térmico. Clasificación de los cortes térmicos. Especificación geométrica de los productos y tolerancias de calidad.
- UNE-EN ISO 17635: Ensayo no destructivo de uniones soldadas. Reglas generales para los materiales metálicos.
- UNE-EN ISO 9712: Ensayos no destructivos. Cualificación y certificación del personal que realiza ensayos no destructivos.

- CEN/TR 15235: Soldeo. Método para la evaluación de imperfección en estructuras metálicas.

### 3.7 Procedimiento para reparaciones en caso de defecto

Cuando una soldadura previamente inspeccionada mediante uno o más métodos de ensayo no destructivo presenta algún tipo de defecto, es obligatoria su reparación inmediata ya que puede afectar al proceso normal de producción. En este caso, el inspector dejará constancia de dicho defecto simplemente marcando una línea en la zona defectuosa tal y como se muestra en la Figura 26: [9]

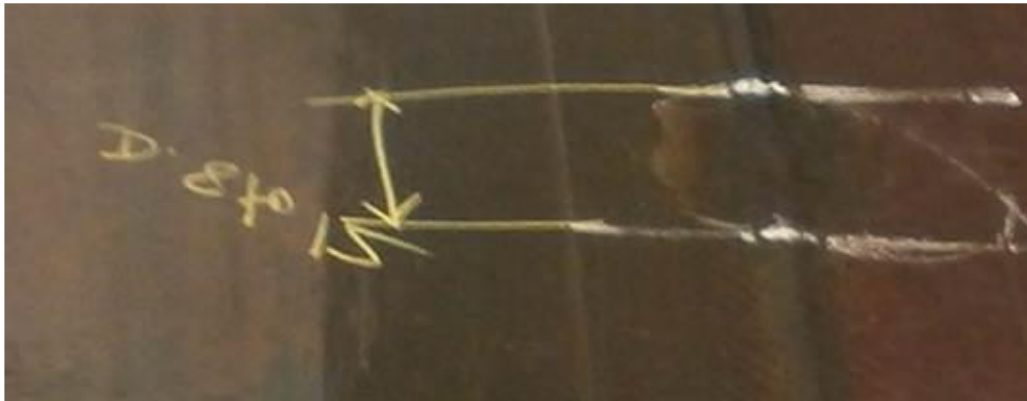


Figura 26: Marcado de una soldadura defectuosa [9]

La marca, además de mostrar la ubicación del defecto, también mostrará la profundidad y su longitud. En el caso de la figura anterior, la profundidad empieza a 8 milímetros desde la superficie externa hasta los 15 milímetros.

El proceso de reparación de la soldadura deberá seguir una serie de pasos, los cuáles son comunes a cualquier proyecto de eólica offshore: [9]

- 1º) Antes de comenzar el proceso de reparación, el soldador chequeará primero la locación, profundidad y longitud del defecto que el inspector ha marcado previamente. A continuación, procederá a abrir el área afectada con el equipo correspondiente Figura 27.

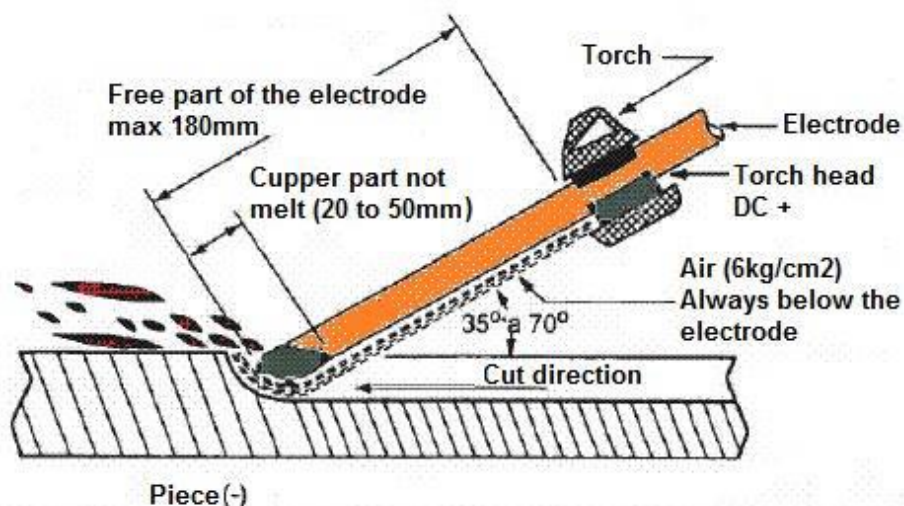


Figura 27: Procedimiento de apertura de la soldadura defectuosa para su reparación [9]

- 2º) Después de eliminar la soldadura, el soldador deberá asegurarse de que el defecto se ha eliminado completamente; para ello, un técnico de ensayos realizará los ensayos

no destructivos correspondientes hasta asegurarse de que el defecto ha sido erradicado.

3º) Una vez se chequea que el defecto ha sido eliminado por completo, el soldador limpiará el área afectada con una máquina amoladora.

4º) Para volver a realizar la soldadura, la preparación previa antes de comenzar a soldar debe tener las siguientes características:

- La parte inferior de la ranura debe tener un ancho mínimo de 5 milímetros.
- Los laterales de la ranura deben tener un ángulo un poco más grande que la vertical.
- La superficie de la ranura se debe rectificar para obtener una superficie lo suficientemente lisa a lo largo del área para ser soldado.

5º) Al finalizar la soldadura, ésta deberá de ser inspeccionada de nuevo a través de los métodos de ensayos no destructivos que se describirán en los siguientes apartados.

Hay que tener en cuenta que, por norma, a la hora de inspeccionar la soldadura que fue reparada, ésta deberá recorrer toda el área afectada más 100 milímetros a mayores a ambos lados de la soldadura. En una inspección de una soldadura que no ha tenido reparaciones anteriores, el área de inspección sería la soldadura más 20 milímetros a cada lado.

El máximo de reparaciones consecutivas que se pueden realizar sobre una misma soldadura es de dos, ya que debido al aporte de calor en la zona afectada puede generar cambios estructurales y deformaciones del material. En caso de que, después de una segunda reparación el defecto persista, el operador tendrá que informar al personal de calidad para elaborar una No Conformidad interna y decidir la acción correctiva a llevar a cabo. [\[9\]](#)

### **3.8 Simulación en gestión de la calidad. Búsqueda de la mejor estrategia de inspección**

A la hora de gestionar la calidad en una empresa, son muchas las que, actualmente, utilizan algún software de simulación con el fin de encontrar las mejores estrategias para minimizar costes. Esto es debido a que, la relación entre la calidad en la producción y sus implicaciones económicas, es cada vez más complicado de determinar. La gestión de la calidad, no es una simple variable que pueda ajustarse fácilmente en la práctica para el cálculo de costes, ya que intervienen otro tipo de variables difíciles de controlar como por ejemplo la recopilación y el análisis de datos. Numerosas empresas llevan a cabo estrategias de inspección bastante pobres, poco optimizadas, dando como resultado un desperdicio de producto e insatisfacción del cliente [5].

Por tanto, debido a la complejidad que supone recopilar datos reales de un proceso, es aquí donde la simulación juega un papel relevante. A día de hoy no hay muchos programas informáticos específicos para la simulación en el control de calidad; sin embargo, los lenguajes y paquetes de simulación existentes pueden ser útiles para este fin [6].

Un ejemplo de eso es el software desarrollado en 2005 por la Universidad de Dortmund, QUINTE, en Alemania, originalmente desarrollado con lenguaje de programación C/C++, el cual tiene especial aplicación en la industria. Este simulador es capaz de comparar diferentes estrategias en relación, por ejemplo, con los costes de fabricación de un producto y los retrabajos debidos a defectos en la inspección, Figura 28 [7].

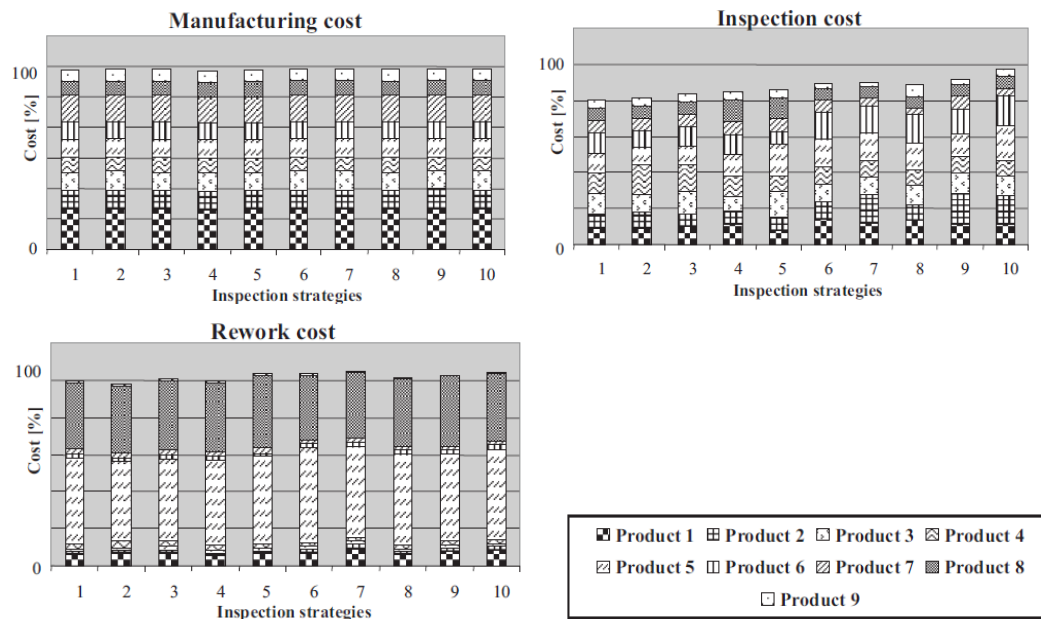


Figura 28: Comparación diferentes estrategias con el software QUINTE [7].

La mayoría de las funciones de este software se congregan en 9 módulos, cada uno de ellos diseñados para cualquier proceso de producción que lleve consigo un proceso de inspección, donde el usuario puede introducir desde tiempos de procesamiento hasta asignación de costes, información sobre fallos y mantenimiento, Figura 29.

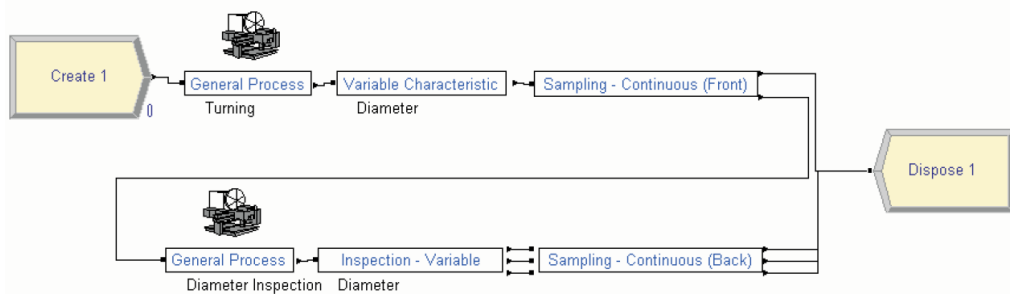
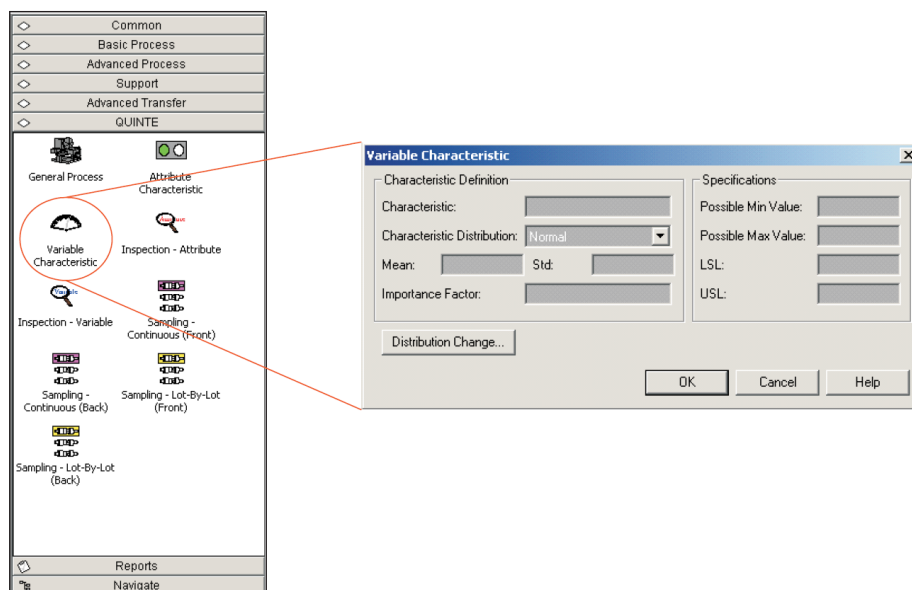


Figura 29: Módulos del software QUINTE [7].

El resultado de este software de simulación permite a una empresa elegir el mejor método de inspección de acuerdo con su objetivo, pudiendo también apoyar en la gestión de inversiones en un nuevo equipo o proceso de fabricación, al ilustrar las consecuencias de los cambios. [7]

Hoy en día, existen en la industria programas muy potentes de simulación de eventos discretos que pueden ser de ayuda para las empresas a la hora de planificar las tareas de inspección en sus proyectos. Sin ir más lejos, durante el desarrollo de este trabajo fin de master se utilizará el software de simulación de eventos discretos FlexSim, del cual se hará una presentación más en detalle a lo largo de este trabajo, y del cual se pueden encontrar diversos casos de aplicación a proyectos reales en su página web (<https://www.flexsim.com/es/case-studies/>).





## 4 ANÁLISIS JACKETS PROYECTO EÓLICA MARINA

En este apartado se analizarán los resultados en cuanto a la inspección de soldaduras de un proyecto real de jackets offshore con la finalidad de proponer posibles soluciones de mejora.

### 4.1 Introducción

Para el análisis de este trabajo se ha utilizado el proceso de fabricación de un proyecto real de estructuras offshore o jackets, más en concreto, la parte de la pieza de transición. En los apartados que siguen se explicará en detalle el por qué se ha decidido analizar dicha parte anteriormente mencionada.

Las jackets son estructuras offshore ancladas al lecho marino, extendiendo su estructura por encima de la superficie del nivel del mar. La estructura se caracteriza por una serie de elementos interconectados entre sí adoptando un conjunto cuya finalidad es soportar el peso de un aerogenerador o turbina eólica. En el proyecto que se ha realizado en el presente trabajo las jackets están dotadas de los siguientes elementos: [9]

- Transition Piece (TP): formada por un cilindro central y 3 brazos ensamblados a éste Figura 30.

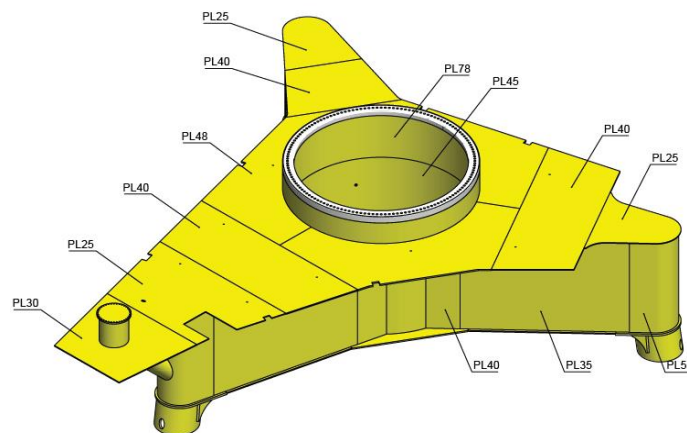
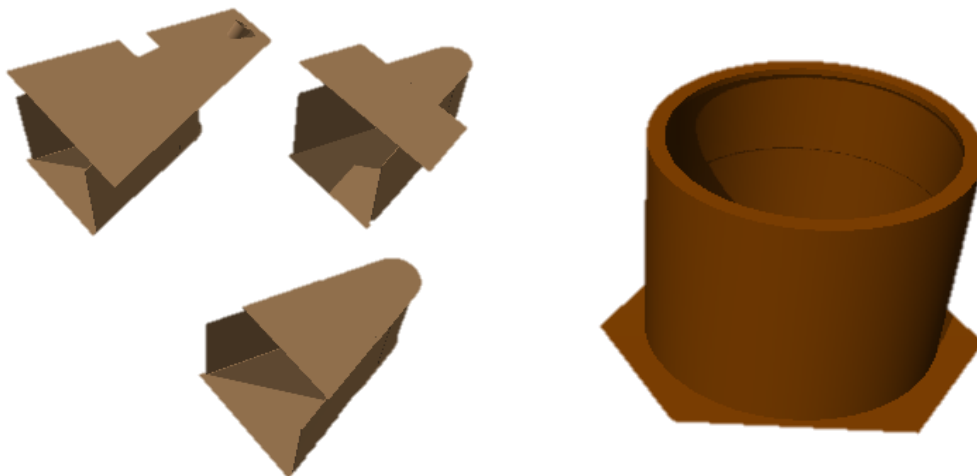


Figura 30: Despiece de la pieza de transición (superior), Pieza de transición ensamblada (inferior) [9]

- Jacket Upper Block (JUB): parte superior de la celosía, representada en color amarillo en la Figura 31.
- Jacket Lower Block (JLB): parte inferior de la celosía, representada en color gris en la Figura 31.

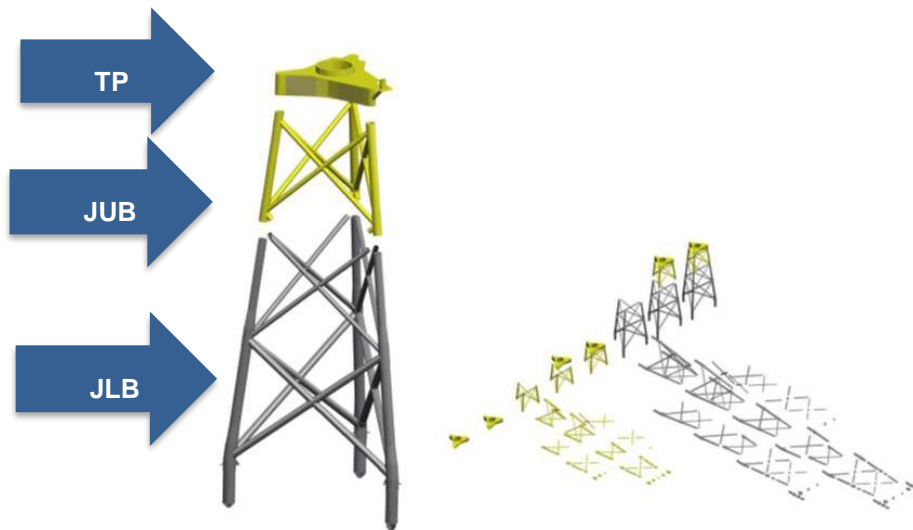


Figura 31: Partes por la que está formada la estructura de una jacket [9]

- Pilotes: es la parte que realiza la función de sujeción de la jacket al lecho marino. Se trata de 3 tubos de sección circular donde se insertan cada una de las patas de la jacket Figura 32.



Figura 32: Pilotes de una jacket [9]

En la Tabla 18 se muestran las principales características de las estructuras cuyos datos han servido de base para la realización de este proyecto:

Tabla 18: Principales características de las jackets utilizadas para el estudio [21]

<b>Profundidad</b>	<b>40-48 m</b>
<b>Configuración</b>	3 patas
<b>Número de clusters</b>	2
<b>Longitud</b>	65,5 m
<b>Peso medio</b>	84.5 Ton
<b>Huella</b>	23 m
<b>Pieza de transición</b>	De cajón
<b>Puerta acceso</b>	En torre turbina

## 4.2 Análisis de probabilidad de defectos en soldadura

En este apartado se explicará detalladamente qué pasos se han seguido para conocer la parte de la estructura de la jacket que más probabilidad de defectos presenta en todos los proyectos de estructuras similares. Los datos que se exponen a continuación se han extraído de un proyecto de estructura offshore similar al analizado en este proyecto.

Las tablas **Tabla 19** y

Tabla 20 recogen los porcentajes de defectos mensuales que se han detectado en las soldaduras analizadas en la pieza de transición. La tabla está formada por las siguientes columnas:

- la primera columna representa el mes en que se han realizado los ensayos, como el proceso de soldeo para esta pieza comenzó en el mes de noviembre, solamente hay datos a partir de este mes;
- la segunda y la tercera representan la longitud de la soldadura inspeccionada total en ese mes y la acumulada;
- la cuarta y quinta columna representan la longitud de soldadura total inspeccionada por mes y la acumulada;
- la sexta y la séptima representan el porcentaje de defectos por mes y el acumulado;
- la octava representa el porcentaje límite de defecto permitido;
- y, por último, la novena columna representa si se ha cumplido el objetivo anterior o no. Este cálculo se realiza comparando el porcentaje de defectos ese mes y el porcentaje objetivo.

**Tabla 19: Porcentaje de defectos en la pieza de transición durante el año 2015.**

UT TRANSICIÓN (2015)								
MONTH	Welded Length	Accumulated Welded Length	UT Rejected Length	UT Accumulated Rejected Length	% Weld Defects	% Accumulated Weld Defects	Objective	Objective
January	---	---	---	---	---	---	---	---
February	---	---	---	---	---	---	---	---
March	---	---	---	---	---	---	---	---
April	---	---	---	---	---	---	---	---
May	---	---	---	---	---	---	---	---
June	---	---	---	---	---	---	---	---
July	---	---	---	---	---	---	---	---
August	---	---	---	---	---	---	---	---
September	---	---	---	---	---	---	---	---
October	---	---	---	---	---	---	---	---
November	14076,00	14076,00	1840,00	1840,00	13,07%	13,07%	5,00%	NOT FULFILLED
December	31152,00	45228,00	300,00	2140,00	0,96%	4,73%	5,00%	FULFILLED
<b>Accumulated</b>	<b>45228,00</b>		<b>2140,00</b>		<b>4,73%</b>	<b>FULFILLED</b>		<b>5,00%</b>

**Tabla 20: Porcentaje de defectos en la pieza de transición durante el año 2016**

UT TRANSICIÓN (2016)								
MONTH	Welded Length	Accumulated Welded Length	UT Rejected Length	UT Accumulated Rejected Length	% Weld Defects	% Accumulated Weld Defects	Objective	Objective
January	48197,00	48197,00	5760,00	5760,00	11,95%	11,95%	5,00%	NOT FULFILLED
February	29362,00	77559,00	0,00	5760,00	0,00%	7,43%	5,00%	FULFILLED
March	45747,00	123306,00	800,00	6560,00	1,75%	5,32%	5,00%	FULFILLED
April	54935,00	178241,00	270,00	6830,00	0,49%	3,83%	5,00%	FULFILLED
May	41259,00	219500,00	2150,00	8980,00	5,21%	4,09%	5,00%	NOT FULFILLED
June	58224,00	277724,00	1310,00	10290,00	2,25%	3,71%	5,00%	FULFILLED
July	61104,00	338828,00	3800,00	14090,00	6,22%	4,16%	5,00%	NOT FULFILLED
August	0,00	338828,00	0,00	14090,00	0,00%	4,16%	5,00%	FULFILLED
September	0,00	338828,00	0,00	14090,00	0,00%	4,16%	5,00%	FULFILLED
October	0,00	338828,00	0,00	14090,00	0,00%	4,16%	5,00%	FULFILLED
November	0,00	338828,00	0,00	14090,00	0,00%	4,16%	5,00%	FULFILLED
December	0,00	338828,00	0,00	14090,00	0,00%	4,16%	5,00%	FULFILLED
<b>Accumulated</b>	<b>338828,00</b>		<b>14090,00</b>		<b>4,16%</b>	<b>FULFILLED</b>		<b>5,00%</b>

La Tabla 21 y Tabla 22 muestran los resultados correspondientes a las uniones en “x”, es decir, las partes que conforman la JUB y la JLB durante los años 2015 y 2016:

**Tabla 21: Porcentaje de defectos de las uniones en “x” en JUB y JLB durante el año 2015**

UT X-Joint-Bracing (2015)								
MONTH	Welded Length	Accumulated Welded Length	UT Rejected Length	UT Accumulated Rejected Length	% Weld Defects	% Accumulated Weld Defects	Objective	Objective
January	---	---	---	---	---	---	---	---
February	---	---	---	---	---	---	---	---
March	---	---	---	---	---	---	---	---
April	---	---	---	---	---	---	---	---
May	---	---	---	---	---	---	---	---
June	---	---	---	---	---	---	---	---
July	40420,00	40420,00	2050,00	2050,00	5,07%	5,07%	5,00%	NOT FULFILLED
August	59350,00	99770,00	0,00	2050,00	0,00%	2,05%	5,00%	FULFILLED
September	84750,00	184520,00	220,00	2270,00	0,26%	1,23%	5,00%	FULFILLED
October	93550,00	278070,00	710,00	2980,00	0,76%	1,07%	5,00%	FULFILLED
November	105210,00	383280,00	2005,00	4985,00	1,91%	1,30%	5,00%	FULFILLED
December	94175,00	477455,00	600,00	5585,00	0,64%	1,17%	5,00%	FULFILLED
<b>Accumulated</b>	<b>477455,00</b>		<b>5585,00</b>		<b>1,17%</b>	<b>FULFILLED</b>		<b>5,00%</b>

**Tabla 22: Porcentaje de defectos de las uniones en “x” en JUB y JLB durante el año 2016**

UT X-Joint Bracing (2016)								
MONTH	Welded Length	Accumulated Welded Length	UT Rejected Length	UT Accumulated Rejected Length	% Weld Defects	% Accumulated Weld Defects	Objective	Objective
January	93900,00	93900,00	360,00	360,00	0,38%	0,38%	5,00%	FULFILLED
February	110690,00	204590,00	0,00	360,00	0,00%	0,18%	5,00%	FULFILLED
March	112550,00	317140,00	1370,00	1730,00	1,22%	0,55%	5,00%	FULFILLED
April	138080,00	455220,00	150,00	1880,00	0,11%	0,41%	5,00%	FULFILLED
May	134870,00	590090,00	140,00	2020,00	0,10%	0,34%	5,00%	FULFILLED
June	147610,00	737700,00	1560,00	3580,00	1,06%	0,49%	5,00%	FULFILLED
July	87930,00	825630,00	370,00	3950,00	0,42%	0,48%	5,00%	FULFILLED
August	1820,00	827450,00	0,00	3950,00	0,00%	0,48%	5,00%	FULFILLED
September	0,00	827450,00	0,00	3950,00	0,00%	0,48%	5,00%	FULFILLED
October	0,00	827450,00	0,00	3950,00	0,00%	0,48%	5,00%	FULFILLED
November	0,00	827450,00	0,00	3950,00	0,00%	0,48%	5,00%	FULFILLED
December	0,00	827450,00	0,00	3950,00	0,00%	0,48%	5,00%	FULFILLED
<b>Accumulated</b>	<b>827450,00</b>		<b>3950,00</b>		<b>0,48%</b>	<b>FULFILLED</b>		<b>5,00%</b>

La Tabla 23 y la Tabla 24 muestran los resultados correspondientes a la unión de los brazos de la jacket a las patas, es decir, la unión de la JUB y la JLB a las patas, durante los años 2015 y 2016:

**Tabla 23: Porcentaje de defectos de la unión de los brazos a las patas durante el año 2015**

UT Brace Joint (2015)								
MONTH	Welded Length	Accumulated Welded Length	UT Rejected Length	UT Accumulated Rejected Length	% Weld Defects	% Accumulated Weld Defects	Objective	Objective
January	---	---	---	---	---	---	---	
February	---	---	---	---	---	---	---	
March	---	---	---	---	---	---	---	
April	---	---	---	---	---	---	---	
May	---	---	---	---	---	---	---	
June	---	---	---	---	---	---	---	
July	---	---	---	---	---	---	---	FULFILLED
August	159836,00	159836,00	960,00	960,00	0,60%	0,60%	5,00%	FULFILLED
September	267889,00	427725,00	1555,00	2515,00	0,58%	0,59%	5,00%	FULFILLED
October	298637,00	726362,00	6920,00	9435,00	2,32%	1,30%	5,00%	FULFILLED
November	257069,00	983431,00	2675,00	12110,00	1,04%	1,23%	5,00%	FULFILLED
December	230739,00	1214170,00	2900,00	15010,00	1,26%	1,24%	5,00%	FULFILLED
<b>Accumulated</b>	<b>1214170,00</b>		<b>15010,00</b>		<b>1,24%</b>	<b>FULFILLED</b>		<b>5,00%</b>

**Tabla 24: Porcentaje de defectos de la unión de los brazos a las patas durante el año 2016**

UT Brace Joint (2016)								
MONTH	Welded Length	Accumulated Welded Length	UT Rejected Length	UT Accumulated Rejected Length	% Weld Defects	% Accumulated Weld Defects	Objective	Objective
January	330574,00	330574,00	9795,00	9795,00	2,96%	2,96%	5,00%	FULFILLED
February	322229,00	652803,00	5100,00	14895,00	1,58%	2,28%	5,00%	FULFILLED
March	380002,00	1032805,00	7640,00	22535,00	2,01%	2,18%	5,00%	FULFILLED
April	356929,00	1389734,00	2335,00	24870,00	0,65%	1,79%	5,00%	FULFILLED
May	168353,00	1558087,00	445,00	25315,00	0,26%	1,62%	5,00%	FULFILLED
June	67000,00	1625087,00	240,00	25555,00	0,36%	1,57%	5,00%	FULFILLED
July	0,00	1625087,00	0,00	25555,00	0,00%	1,57%	5,00%	FULFILLED
August	0,00	1625087,00	0,00	25555,00	0,00%	1,57%	5,00%	FULFILLED
September	0,00	1625087,00	0,00	25555,00	0,00%	1,57%	5,00%	FULFILLED
October	0,00	1625087,00	0,00	25555,00	0,00%	1,57%	5,00%	FULFILLED
November	0,00	1625087,00	0,00	25555,00	0,00%	1,57%	5,00%	FULFILLED
December	0,00	1625087,00	0,00	25555,00	0,00%	1,57%	5,00%	FULFILLED
<b>Accumulated</b>	<b>1625087,00</b>		<b>25555,00</b>		<b>1,57%</b>	<b>FULFILLED</b>		<b>5,00%</b>

Y, por último, las tablas Tabla 25 y Tabla 26 recogen los porcentajes de defectos del resto de elementos secundarios de la jacket, por ejemplo, metopas, anillos, ánodos, etc.

**Tabla 25: Porcentaje de defectos en el resto de elementos durante el año 2015**

UT Resto (metopas, anillos, ánodos...) (2015)								
MONTH	Welded Length	Accumulated Welded Length	UT Rejected Length	UT Accumulated Rejected Length	% Weld Defects	% Accumulated Weld Defects	Objective	Objective
January	---	---	---	---	---	---	---	---
February	---	---	---	---	---	---	---	---
March	---	---	---	---	---	---	---	---
April	---	---	---	---	---	---	---	---
May	---	---	---	---	---	---	---	---
June	---	---	---	---	---	---	---	---
July	450,00	450,00	0,00	0,00	0,00%	0,00%	5,00%	FULFILLED
August	15350,00	15800,00	750,00	750,00	4,89%	4,75%	5,00%	FULFILLED
September	85357,00	101157,00	9897,00	10647,00	11,59%	10,53%	5,00%	NOT FULFILLED
October	121800,00	222957,00	1338,00	11985,00	1,10%	5,38%	5,00%	FULFILLED
November	132904,00	355861,00	5176,00	17161,00	3,89%	4,82%	5,00%	FULFILLED
December	160258,00	516119,00	3328,00	20489,00	2,08%	3,97%	5,00%	FULFILLED
<b>Accumulated</b>	<b>516119,00</b>		<b>20489,00</b>		<b>3,97%</b>	<b>FULFILLED</b>		<b>5,00%</b>

**Tabla 26: Porcentaje de defectos en el resto de elementos durante el año 2016**

UT Resto (metopas, anillos, ánodos...) (2016)								
MONTH	Welded Length	Accumulated Welded Length	UT Rejected Length	UT Accumulated Rejected Length	% Weld Defects	% Accumulated Weld Defects	Objective	Objective
January	131481,00	131481,00	350,00	350,00	0,27%	0,27%	5,00%	FULFILLED
February	191738,00	323219,00	550,00	900,00	0,29%	0,28%	5,00%	FULFILLED
March	201014,00	524233,00	300,00	1200,00	0,15%	0,23%	5,00%	FULFILLED
April	262150,00	786383,00	7760,00	8960,00	2,96%	1,14%	5,00%	FULFILLED
May	244649,00	1031032,00	2238,00	11198,00	0,91%	1,09%	5,00%	FULFILLED
June	336117,00	1367149,00	2170,00	13368,00	0,65%	0,98%	5,00%	FULFILLED
July	158120,00	1525269,00	410,00	13778,00	0,26%	0,90%	5,00%	FULFILLED
August	91731,00	1617000,00	400,00	14178,00	0,44%	0,88%	5,00%	FULFILLED
September	0,00	1617000,00	0,00	14178,00	0,00%	0,88%	5,00%	FULFILLED
October	0,00	1617000,00	0,00	14178,00	0,00%	0,88%	5,00%	FULFILLED
November	0,00	1617000,00	0,00	14178,00	0,00%	0,88%	5,00%	FULFILLED
December	0,00	1617000,00	0,00	14178,00	0,00%	0,88%	5,00%	FULFILLED
<b>Accumulated</b>	<b>1617000,00</b>		<b>14178,00</b>		<b>0,88%</b>	<b>FULFILLED</b>		<b>5,00%</b>

A la vista de los resultados, se puede concluir que la parte de la jacket donde más defectos en soldadura se han detectado es en la pieza de transición, quedando a poca distancia por debajo del porcentaje límite de defecto permitido. Las tablas Tabla 27 y Tabla 28 ponen esto de manifiesto:

**Tabla 27: Porcentaje de defecto total acumulado en la pieza de transición, año 2015.**

AÑO 2015						
<b>Accumulated</b>	<b>45228,00</b>	<b>2140,00</b>	<b>4,73%</b>	<b>FULFILLED</b>		<b>5,00%</b>

**Tabla 28: Porcentaje de defecto total acumulado en la pieza de transición, año 2016.**

AÑO 2016						
<b>Accumulated</b>	<b>338828,00</b>	<b>14090,00</b>	<b>4,16%</b>	<b>FULFILLED</b>		<b>5,00%</b>

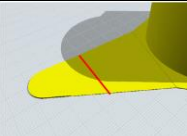

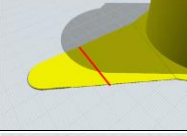
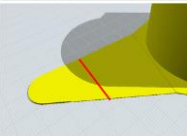

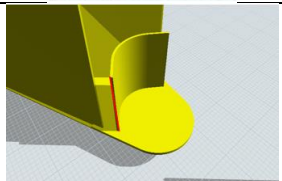
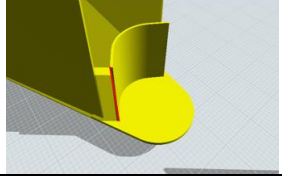
De ahora en adelante, el presente proyecto consistirá en la cuantificación de los defectos de soldadura en el elemento de transición, TP. En los siguientes apartados se hará un análisis detallado de cada una de las soldaduras de las que consta este elemento.

### 4.3 Análisis soldaduras de la pieza de transición (TP)

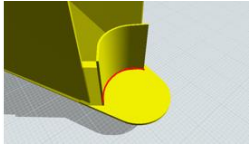
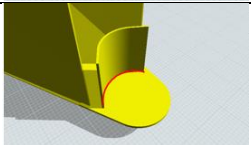
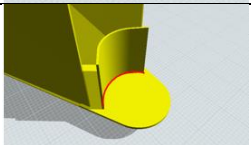
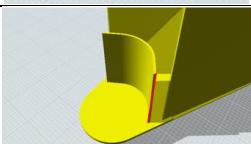
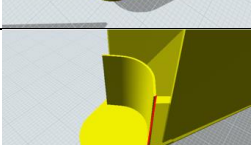
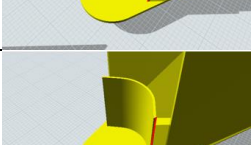
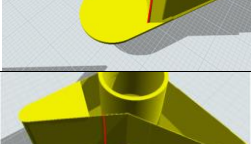
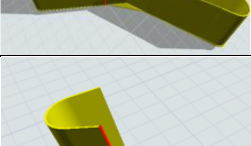
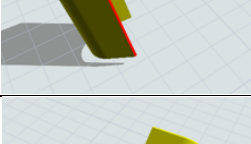
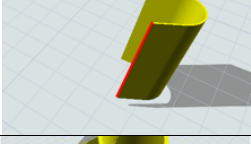
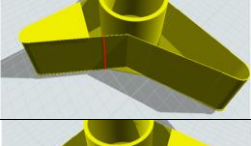
En este apartado se hará un análisis de todas las soldaduras presentes en el elemento de transición. Con este análisis se pretende, además de detallar las características de cada

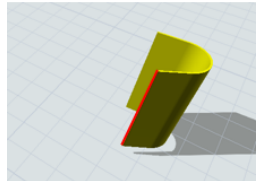
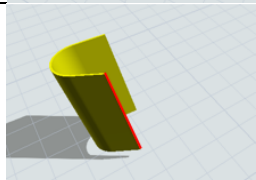
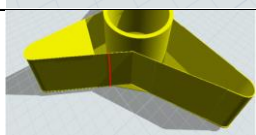
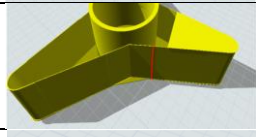
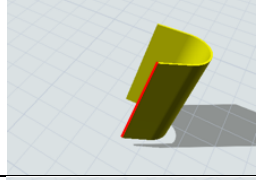
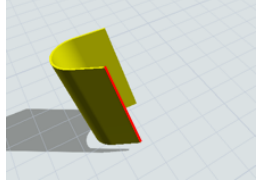
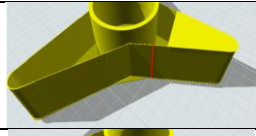
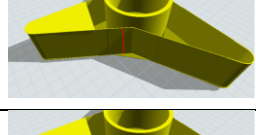
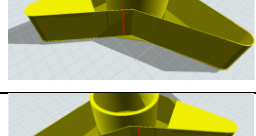
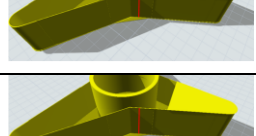
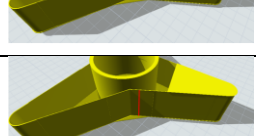
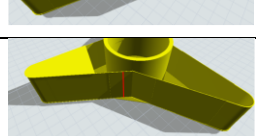
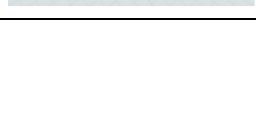
soldadura, dar a conocer el volumen de trabajo que supone para el personal de inspección llevar a cabo el análisis de cada una de ellas. En la Tabla 29 se detallan cada una de las soldaduras con su código, longitud, porcentaje de inspección y localización correspondiente.

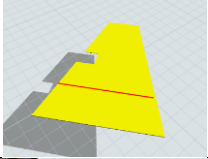

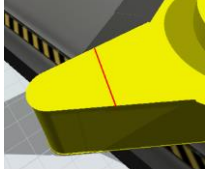
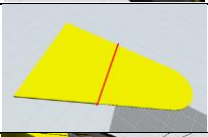
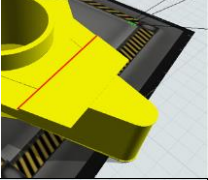
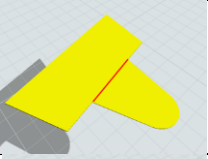
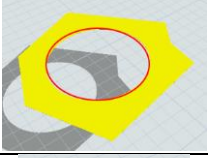
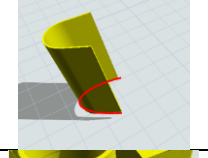
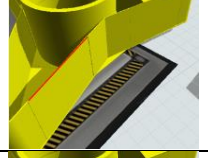
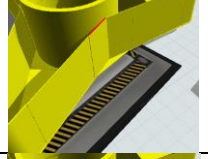
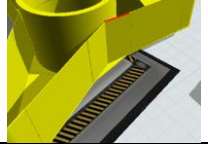
**Tabla 29: Análisis de todas soldaduras presentes en la pieza de transición.**

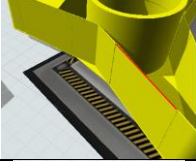
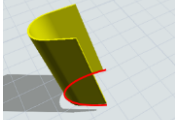
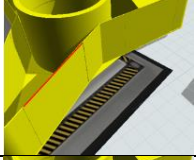
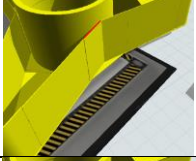
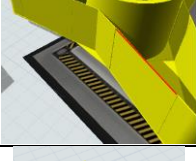

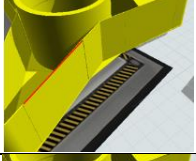
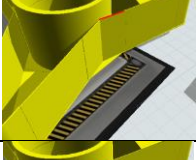
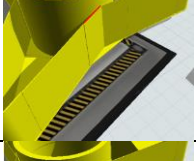
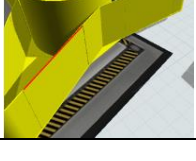
WELD ID	LONG. SOLDADURA (mm.)	%INSPECCIÓN	LOCALIZACIÓN	LEG No.
W0007	2029	100%		A
W0008	4051	100%		A
W0010	3040	100%		B
W0011	4051	100%		B
W0013	3040	100%		C
W0014	4051	100%		C
W0021	1500	100%		A
W0022	1500	100%		B
W0023	1500	100%		C



W0024	1667	100%		A
W0025	1667	100%		B
W0026	1667	100%		C
W0027	1500	100%		A
W0028	1500	100%		B
W0029	1500	100%		C
W0030.1	3393	100%		A
W0030.2	3393	100%		A
W0030.3	3393	100%		A
W0030.4	3393	100%		A
W0030.5	3393	100%		B

W0030.6	3393	100%		B
W0030.7	3393	100%		B
W0030.8	3393	100%		B
W0030.9	3393	100%		C
W0030.10	3393	100%		C
W0030.11	3393	100%		C
W0030.12	3393	100%		C
W0031.1	3393	100%		A
W0031.2	3393	100%		A
W0031.3	3393	100%		B
W0031.4	3393	100%		B
W0031.5	3393	100%		C
W0031.6	3393	100%		C

W0033	5427	100%		A
W0034	6734	100%		A
W0035	3658	100%		B
W0036	2421	100%		B
W0037	6734	100%		C
W0038	3062	100%		C
W0039	18868	100%		-
W0045.1	3341	100%		A
W0045.2	5157	100%		A
W0045.3	1040	100%		A
W0045.4	1040	100%		B

W0045.5	5157	100%		B
W0045.6	3341	100%		B
W0045.7	5157	100%		B
W0045.8	1040	100%		B
W0045.9	1040	100%		C
W0045.10	5157	100%		C
W0045.11	3341	100%		C
W0045.12	5157	100%		C
W0045.13	1040	100%		C
W0045.14	1040	100%		C
W0045.15	5157	100%		A

W0046.1	3341	100%		A
W0046.2	5157	100%		A
W0046.3	1040	100%		A
W0046.4	1040	100%		C
W0046.5	5157	100%		C
W0046.6	3341	100%		C
W0046.7	5157	100%		C
W0046.8	1040	100%		C
W0046.9	1040	100%		B
W0046.10	5157	100%		B

W0046.11	3341	100%		B
W0046.12	5157	100%		B
W0046.13	1040	100%		B
W0046.14	1040	100%		A
W0046.15	5157	100%		A

#### 4.4 Análisis porcentaje de fallos por soldadura.

Una vez estudiadas las soldaduras de las que consta la pieza de transición, y con vistas a poder simular un proceso real de fabricación de TPs con datos lo más fiables posibles, en la Tabla 30 se recogen los porcentajes de fallo previstos para cada soldadura, dependiendo del tipo de ensayo que se trate: partículas magnéticas, ultrasonidos o inspección visual. Los porcentajes de ensayo ultrasonidos se han calculado mediante la recopilación de datos históricos de proyectos similares mientras que los porcentajes para inspección visual y partículas es una estimación dada por expertos en la materia.

**Tabla 30: Porcentaje de fallo para cada soldadura dependiendo del tipo de END**

WELD ID	LONGITUD SOLDADURA [mm]	% de fallo para inspección visual	% de fallo para inspección MT	% de fallo para inspección UT
W0007	3040	0,5	2	1
W0008	4051	0,5	2	4
W0010	3040	0,5	2	1
W0011	4051	0,5	2	4
W0013	3040	0,5	2	1
W0014	4051	0,5	2	4
W0021	1500	0,5	2	1

W0022	1500	0,5	2	1
W0023	1500	0,5	2	1
W0024	1667	0,5	2	4
W0025	1667	0,5	2	4
W0026	1667	0,5	2	4
W0027	1500	0,5	2	1
W0028	1500	0,5	2	1
W0029	1500	0,5	2	1
W0030.1	3393	0,5	2	3
W0030.2	3393	0,5	2	3
W0030.3	3393	0,5	2	3
W0030.4	3393	0,5	2	3
W0030.5	3393	0,5	2	3
W0030.6	3393	0,5	2	3
W0030.7	3393	0,5	2	3
W0030.8	3393	0,5	2	3
W0030.9	3393	0,5	2	3
W0030.10	3393	0,5	2	3
W0030.11	3393	0,5	2	3
W0030.12	3393	0,5	2	3
W0031.1	3393	0,5	2	2
W0031.2	3393	0,5	2	2
W0031.3	3393	0,5	2	2
W0031.4	3393	0,5	2	2
W0031.5	3393	0,5	2	2
W0031.6	3393	0,5	2	2
W0033	5427	0,5	2	1
W0034	6734	0,5	2	4
W0035	3658	0,5	2	4
W0036	2421	0,5	2	1
W0037	6734	0,5	2	4
W0038	3062	0,5	2	1
W0039	18868	0,5	2	0
W0045.1	3341	0,5	2	2
W0045.2	5157	0,5	2	17
W0045.3	1040	0,5	2	1
W0045.4	1040	0,5	2	1
W0045.5	5157	0,5	2	17
W0045.6	3341	0,5	2	2
W0045.7	5157	0,5	2	17
W0045.8	1040	0,5	2	1
W0045.9	1040	0,5	2	1
W0045.10	5157	0,5	2	17
W0045.11	3341	0,5	2	2

W0045.12	5157	0,5	2	17
W0045.13	1040	0,5	2	1
W0045.14	1040	0,5	2	1
W0045.15	5157	0,5	2	17
W0046.1	3341	0,5	2	1
W0046.2	5157	0,5	2	17
W0046.3	1040	0,5	2	0
W0046.4	1040	0,5	2	0
W0046.5	5157	0,5	2	17
W0046.6	3341	0,5	2	1
W0046.7	5157	0,5	2	17
W0046.8	1040	0,5	2	0
W0046.9	1040	0,5	2	0
W0046.10	5157	0,5	2	17
W0046.11	3341	0,5	2	1
W0046.12	5157	0,5	2	17
W0046.13	1040	0,5	2	0
W0046.14	1040	0,5	2	0
W0046.15	5157	0,5	2	17

Como se puede observar, hay una variación en los porcentajes de fallo en una soldadura cuando se realiza un ensayo de ultrasonidos, esto es debido a que la mayor parte de los defectos se detectan mediante esta técnica, ya que es la única que detecta defectos subsuperficiales, los más comunes. Es mucho menos probable que se detecte un defecto por partículas magnéticas, la cual detecta defectos superficiales, y mucho menos todavía en una inspección visual, esto pone de manifiesto la estimación dada para estas técnicas. Además, el hecho de detectar un fallo mediante ultrasonidos, implica tener que realizar una operación de reparación mucho más compleja, esto es, apertura de la soldadura, limpieza y volver a soldar, mientras que un defecto detectado por inspección visual o partículas magnéticas únicamente implicaría pulir esa zona de defecto mediante los útiles apropiados.

A la vista de los resultados, y apoyándonos en el análisis del apartado 4.3, podemos concluir que las soldaduras en donde más defectos se detectan son las que unen las chapas laterales a las inferiores y superiores y las soldaduras que unen las chapas laterales entre sí. Con esto se puede deducir que la zona donde se realizarán dichas soldaduras será el área de mayor complejidad en cuanto a trabajos de inspección y reparación de soldaduras.

## 4.5 Cuantificación costes de inspección

En este apartado se hará un resumen de los costes aproximados de inspección dependiendo del tipo de ensayo no destructivo a realizar.

En primer lugar, los costes asociados a la inspección visual dependerán de la superficie a analizar, si posee bajo o alto índice de defectología, por ejemplo, o si el análisis total de la soldadura requiere un tiempo mayor del estándar.



**Tabla 31: Costes aproximados de ensayo de inspección visual.**

INPECCIÓN VISUAL		
CASOS	COSTE	UD.
1	8,5	€/m
2	15,0	€/m <sup>2</sup>
3	82,0	€/m <sup>2</sup>

- Caso 1: Resto de casos.
- Caso 2: Casos de superficies con bajo índice de defectología y donde no se requiera identificar, marcar en material, dimensionar y croquizar de manera individual cada defecto.
- Caso 3: Casos de superficies con alto índice de defectología y donde sí se requiera identificar, marcar en material, dimensionar y croquizar de manera individual cada defecto de manera que el tiempo empleado para inspección de 1m<sup>2</sup> sea muy elevado en comparación a inspección en condiciones de requisitos de reporte "estándar".

En segundo lugar, los costes asociados al ensayo de partículas magnéticas son ligeramente más flexibles y dependerán de la superficie a analizar:

**Tabla 32: Costes aproximados de ensayo de partículas magnéticas.**

PARTÍCULAS MAGNÉTICAS		
TIPO DE ELEMENTO	COSTE	UD.
Cáncamos de maniobra	8,05	€/ud
En cualquier ámbito	10,20	€/m
Superficies	15,70	€/m <sup>2</sup>

Y, por último, los costes asociados al ensayo por ultrasonidos son algo más restrictivos ya que dependen del tipo de equipamiento que se vaya a utilizar y del espesor de la chapa:

**Tabla 33: Costes aproximados de ensayo de ultrasonidos.**

ULTRASONIDOS			
TIPO	ESPESOR	COSTE	UD.
Inspección por TOFD (Time Of Flight Diffraction)	-	55,0	€/m
	≤ 35 mm	67,0	€/m
	< 35 y ≤ 50 mm	84,0	€/m
	> 50 y ≤ 75 mm	101,0	€/m
	> 75 y ≤ 110 mm	109,5	€/m
	> 110 mm	*	-
Inspección por Phased Array	-	90,5	€/m
	≤ 35 mm	80,0	€/m
	< 35 y ≤ 50 mm	96,5	€/m
	> 50 y ≤ 75 mm	116,5	€/m
	> 75 y ≤ 110 mm	140,2	€/m
	> 110 mm	*	-
<i>* Tarifa a estudiar según espesor concreto</i>			

También hay la posibilidad de que se contrate la empresa por un periodo determinado y ésta imponga su propia tarifa horaria; si esto es así, la empresa de ensayos no destructivos que sea seleccionada por el cliente ofrecerá su propia tarifa y condiciones.

Tampoco hay que olvidar que, dependiendo de la programación inicial o incluso retrasos que pueda llevar el proyecto, es probable que se necesite contratar, fuera de lo estipulado inicialmente, el servicio de un técnico de inspección días como sábados, domingos o festivos, en cuyo caso los precios dados anteriormente pueden verse incrementados entre un 15% y un 25%.

## 5 DESARROLLO DEL MODELO

### 5.1 Introducción

En este apartado se tratará de establecer, a través de una simulación de elementos discretos, diferentes escenarios con el fin de analizar y optimizar el uso de recursos, identificar ineficiencias en el proceso de inspección o estudiar la implantación de nuevas estrategias de inspección durante el proceso de fabricación de una pieza de transición. Al final de este apartado, se llegarán a conclusiones que manifestarán la posibilidad de mejorar las técnicas y estrategias que actualmente se utilizan.

Para llevar a cabo dicho estudio se utilizará un software de simulación de eventos discretos, continuos y mixtos, muy potente en el mercado actual. Se trata de *FlexSim*, Figura 33: un software el cual se utiliza en diversos campos como la fabricación, manejo de materiales, logística y distribución, transporte, etc. A partir de la animación gráfica, FlexSim permite identificar los problemas y valorar soluciones alternativas a casi cualquier proceso industrial antes de su puesta en marcha. [22]

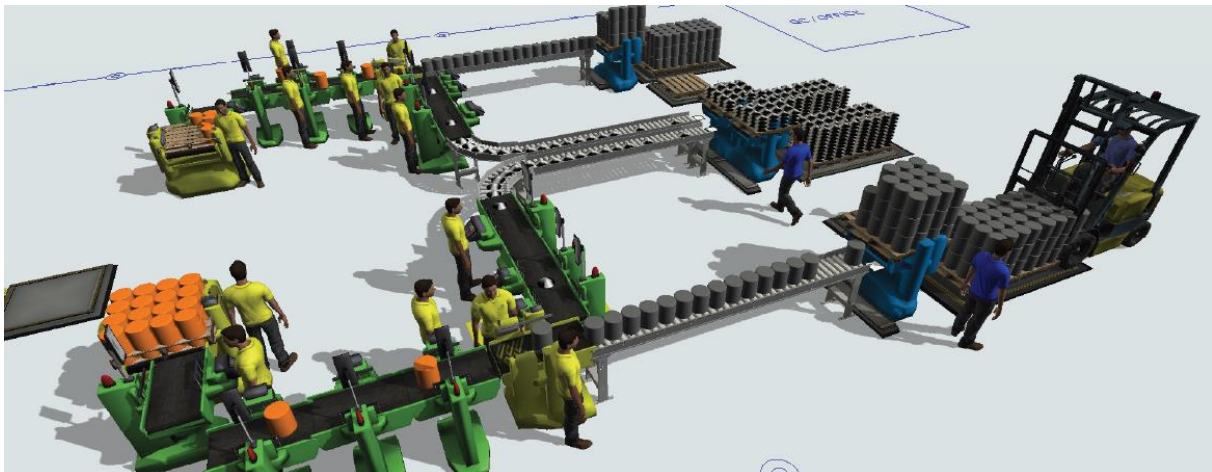


Figura 33: Entorno FlexSim. [12]

El uso de FlexSim no es excesivamente complicado; sin embargo, si hay algo que está siendo cada vez más demandado en los softwares de simulación es la necesidad de poder realizar modelos con conocimientos de programación básicos. Por eso, FlexSim incorpora un módulo denominado "Process Flow", Figura 34, Flujo de Procesos en castellano, que pretende facilitar la comprensión lógica de procesos con un concepto mucho más visual que los métodos actuales.

El Process Flow se basa en actividades que se relacionan entre ellas, recorriéndolas con elementos denominados "Tokens", los cuáles se pueden referenciar o no a objetos 3D del modelo en función de las necesidades, lo que supone una gran ventaja. [12]

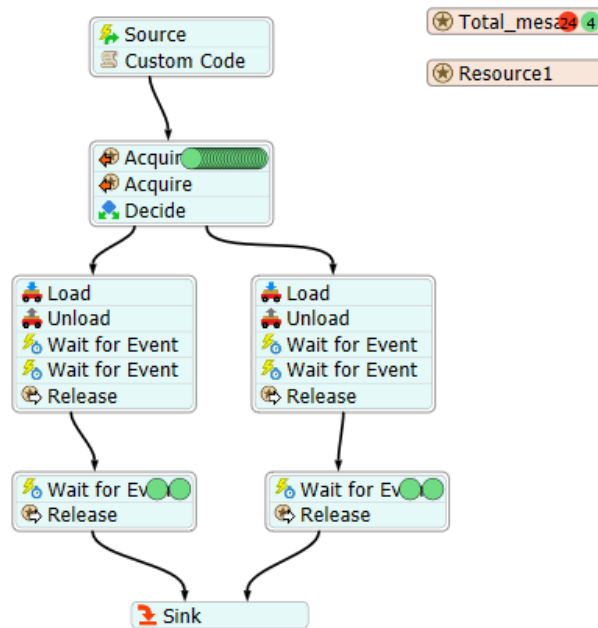


Figura 34: Módulo Process Flow de FlexSim. [12]

FlexSim se está convirtiendo en un programa muy potente en la industria, de hecho, tiene aplicaciones de gran envergadura desarrollados conjuntamente con el mundo de la Industria 4.0, a través de la Realidad Virtual, proporcionando datos en tiempo real.

## 5.2 Finalidad y propósito del modelo

Como se ha comentado en capítulos anteriores, he tenido la fortuna de trabajar durante la gran parte de un proyecto en un departamento de Ensayos No Destructivos perteneciente a la empresa Navantia Ferrol y, como tal, he aprendido no solo muchos de los conocimientos relativos a este campo sino también algunas propuestas de mejora y lecciones aprendidas.

Después de estar en contacto con dos grandes empresas de este campo punteras en el sector naval durante mi estancia, incluidas numerosas reuniones mantenidas con los técnicos de inspección sobre el desarrollo del trabajo, se ha decidido desarrollar varios escenarios con la ayuda de un software de elementos discretos para que el resultado sea lo más parecido a la realidad posible.

Antes de comenzar a explicar el desarrollo de cada uno de los escenarios, se hará una breve descripción del proceso de fabricación de una pieza de transición, ya que los Ensayos No Destructivos tienen lugar durante todo este proceso. En el capítulo siguiente, se describirá y desarrollará en el modelo un escenario real, de tal forma que podamos detectar las posibles carencias o errores y poder eliminarlos o reducirlos.

Finalmente, se propondrán varios escenarios con la finalidad de analizar cuál de ellos puede suponer un impacto positivo sobre los costes totales del proyecto, sobre la fabricación o incluso sobre el tiempo total incurrido en éste.

## 5.3 Proceso de fabricación de la pieza de transición

El proceso de fabricación de la pieza de transición del proyecto al que hace referencia este trabajo está formado por varias etapas o fases las cuáles se desarrollan en una serie de talleres en la zona de IMENOSA en Fene. Lo ideal es que el tiempo de fabricación de una pieza de transición ronde unos 45 días, es decir, mes y medio aproximadamente, aunque estas cifras pueden variar atendiendo a varios factores, siendo el proceso de inspección uno de los más importantes. [11]



Figura 35: Pieza de transición de las jackets del proyecto EA One [9]

El proceso de fabricación e realiza en 3 talleres diferentes:

- Taller A: recepción y almacén de chapas.
- Zona B: recepción y almacenaje de los cilindros centrales.
- Taller C: taller de fabricación de brazos.
- Taller D: ensamblaje de la pieza de transición.



Figura 36: Situación de los talleres de fabricación de TPs en lo talleres de IMENOSA, Fene [11]

El primer paso antes de comenzar la fabricación de cualquier proyecto es la aprobación de documentos: planos constructivos, plan de calidad, plan de soldadura, plan de Ensayos No Destructivos, etc., aprobación de personal, principalmente soldadores e inspectores de ensayos y la calibración de instrumentos de medida. A continuación, comenzaría el proceso de fabricación propiamente dicho.

Se puede decir que el proceso de fabricación de una pieza de transición consta de tres pasos principales representados en la Figura 37.

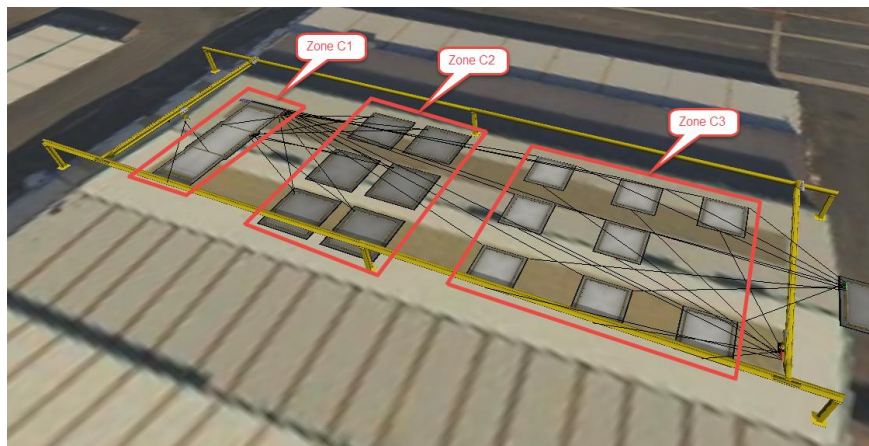


**Figura 37: Etapas del proceso de fabricación de la TP.**

Dado que la fabricación del cilindro central se lleva a cabo en las instalaciones en Avilés (Asturias), suministrado totalmente soldado e inspeccionado, quedará fuera del alcance del proyecto, quedándonos con las dos últimas etapas.

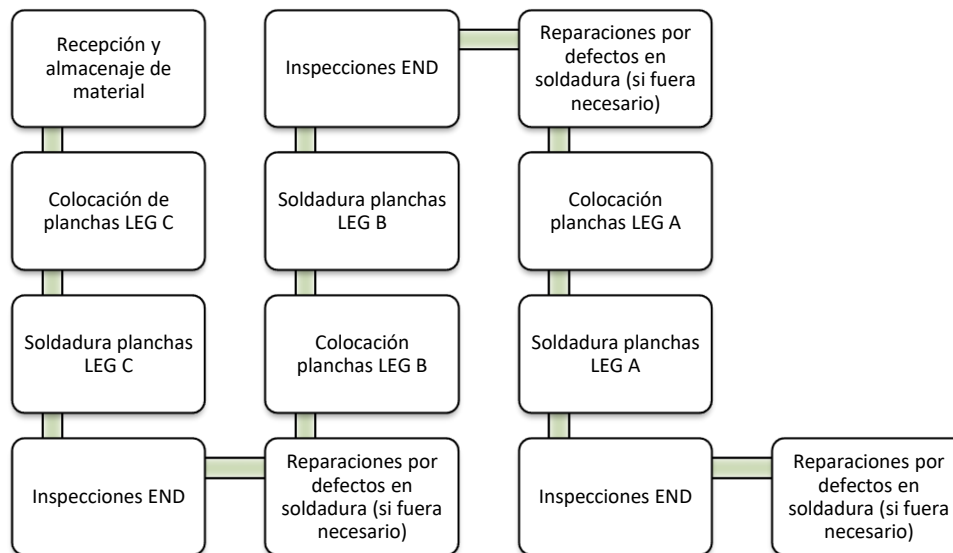
El proceso de fabricación de los brazos, se lleva a cabo en el taller de ensamblaje de brazos, o taller de maquinaria y en tres zonas principales Figura 38:

- zona de soldadura con arco sumergido,
- zona de almacenaje intermedio y
- zona de ensamblaje de los brazos.



**Figura 38: Distribución del taller de fabricación de brazos [11]**

Una vez se comience a soldar, los técnicos de inspección pondrán en marcha su estrategia para atender a las necesidades de fabricación. La Figura 39 muestra en detalle cómo sería el proceso de fabricación de brazos:



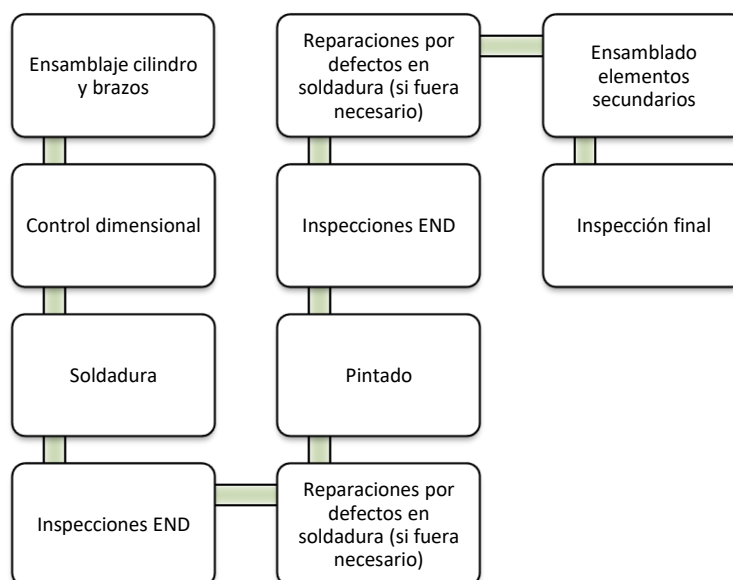
**Figura 39: Proceso de fabricación de brazos.**

El proceso de fabricación comienza con la recepción y almacenamiento de materiales (planchas de acero, consumibles de soldadura y pintura, equipos mecánicos y eléctricos, tubería, etc.). Una vez que tenemos los materiales preparados, las primeras bases se transportan mediante carretilla desde el taller de almacenaje al taller fabricación de brazos, en la zona de arco sumergido. A continuación, se van incorporando el resto de planchas, pasando por las distintas zonas dentro del mismo taller hasta conformar totalmente el brazo.

Las soldaduras se inspeccionan mediante los tres métodos desarrollados en los apartados 3.3, 3.4 y 3.5, por este orden; en caso de detectarse algún defecto en éstas durante alguno de los tres métodos, se seguiría el procedimiento de reparación indicado en el apartado 3.7.

Finalmente, en el taller de ensamblaje de TPs, se conforma totalmente la pieza de transición, soldando cada uno de los brazos al cilindro central. Si se detectaran defectos durante la inspección, el procedimiento de reparación sería idéntico al anterior.

Una vez ensamblada la pieza, se procede al pintado y montaje de elementos secundarios en las cabinas de pintura Figura 40.



**Figura 40: Proceso de fabricación de la TP después de la fabricación de los brazos.**

En cuanto a materia de inspecciones, cabe destacar la importancia, no sólo de que las inspecciones resulten favorables y continúe el proceso de fabricación, sino de mantener los informes correspondientes a cada ensayo cumplimentados correctamente. Esto quiere decir que, aunque una pieza de transición esté totalmente finalizada y preparada para entregar al cliente, hasta que estos informes no estén correctamente cumplimentados, revisados y firmados por éste, no se podrá realizar dicha entrega.

Esto tiene una importancia bastante notable, ya que normalmente se suele retrasar el cumplimentado de informes, dejándolos en muchos casos hacia el final del trabajo de inspección, ya que tiene prioridad el desarrollo de las inspecciones. Lo que suele suceder es aumento del tiempo de entrega, no hablamos de horas ni de días, sino de meses, ya que es complicado rellenar el informe correctamente con los datos apropiados después de haber pasado tiempo desde la inspección. El más mínimo error en este informe es motivo de rechazo de éste.

Además de lo mencionado anteriormente, hay que tener en cuenta el número de inspecciones que se realizan en un proyecto de este tipo, solo en el taller de maquinaria (arco sumergido y ensamblaje de brazos) se realizan como mínimo 117 inspecciones por jacket, sin tener en cuenta las inspecciones debidas a las reparaciones por defectos en soldadura.

La Tabla 34 recoge el número de inspecciones por jacket que se realizan en cada taller de fabricación sin tener en cuenta las debidas a las reparaciones:

**Tabla 34: Número total de inspecciones por jacket en cada taller.**

<b>Número mínimo de inspecciones por jacket en cada taller</b>	
<b>Taller maquinaria (zona arco sumergido)</b>	18
<b>Taller maquinaria (zona ensamblaje de brazos)</b>	99
<b>Taller ensamblaje de TPs</b>	93

Y la Tabla 35 muestra el número mínimo de inspecciones en un total de 42 jackets que forman parte del alcance del proyecto a analizar:

**Tabla 35: Número total de inspecciones en el total de jackets.**

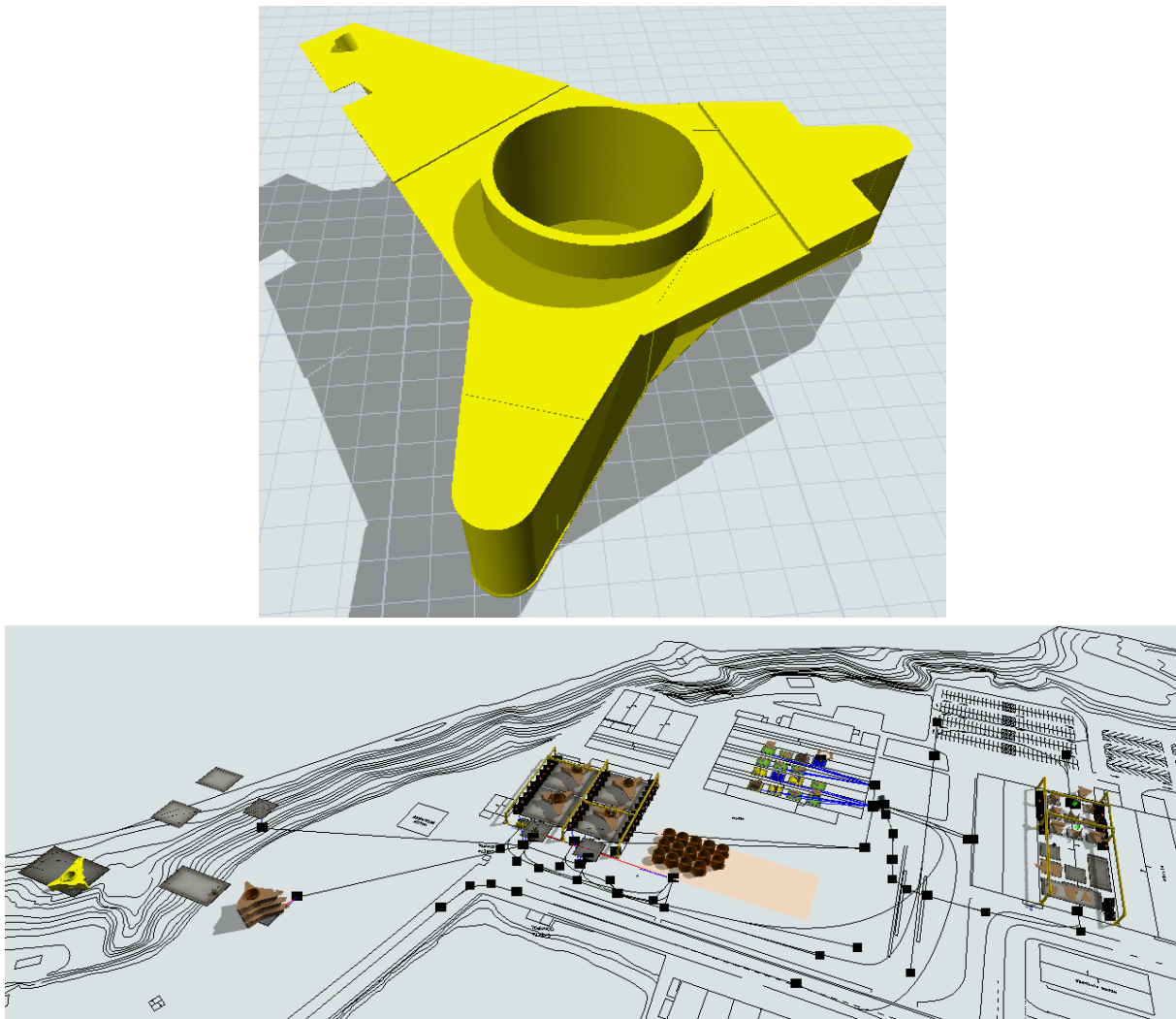
<b>Número mínimo de inspecciones totales en 42 jackets</b>	
<b>Taller maquinaria (zona arco sumergido)</b>	756
<b>Taller maquinaria (zona ensamblaje de brazos)</b>	4.158
<b>Taller ensamblaje de TPs</b>	3.906
<b>TOTAL INSPECCIONES</b>	<b>8820</b>

Es obvio, por tanto, el impacto que puede suponer llevar a cabo una mala o buena estrategia de inspección es un proyecto de jackets de esta envergadura.

## **5.4 Proceso de inspección en un escenario real.**

Comenzaremos por establecer un escenario real de cómo se lleva a cabo un proceso de inspección completo durante la fabricación de la pieza de transición. Para ello se utilizará un modelo de 3D de la misma en entorno FlexSim, Figura 41:.. Esta pieza, como se ha analizado en el apartado 4.3, consta de 70 soldaduras, las cuáles serán inspeccionadas, una vez soldadas, mediante los tres métodos de ensayos no destructivos descritos anteriormente en los apartados 3.3, 3.4 y 3.5.





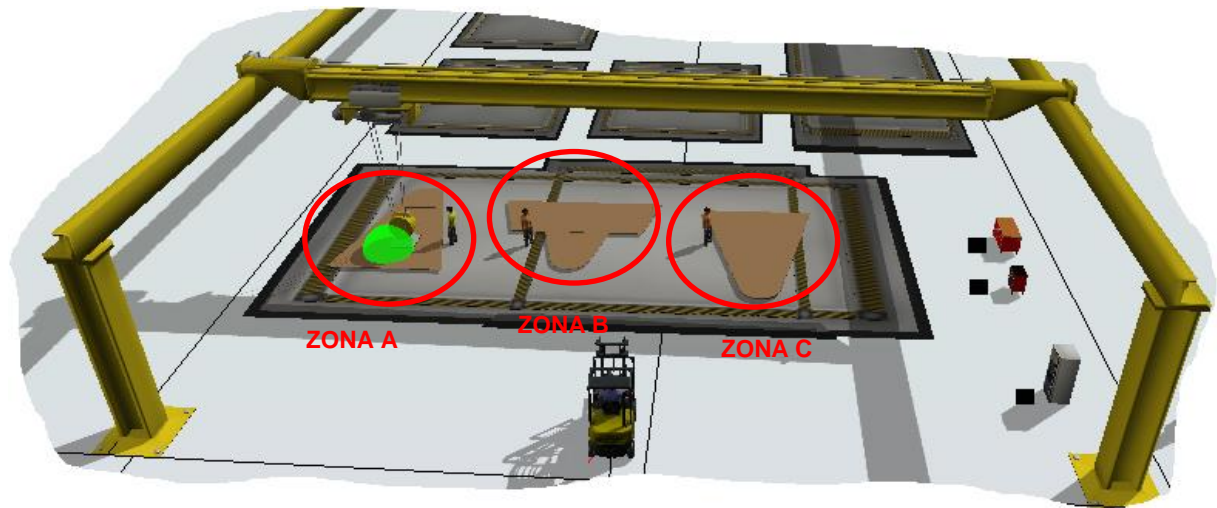
**Figura 41: Modelo pieza de transición (superior) y zona de talleres (inferior).**

#### ***5.4.1 Taller de fabricación de brazos. Zona de arco sumergido***

Siguiendo el proceso de fabricación que se ha descrito en el apartado anterior, se ha diseñado un bloque en FlexSim a partir del Process Flow. Según la planificación inicial, el objetivo es la fabricación de 3 brazos de una pieza de transición por semana; por esta razón, el proceso comienza con una fuente que emite órdenes cada 5 días; una vez que llega la orden, las tres primeras bases pasan al taller de fabricación de brazos y a la zona de arco sumergido con la finalidad de iniciar la fabricación de las bases y las tapas de los brazos.

Dado que la zona de arco sumergido dispone de 3 celdas de trabajo, se colocarán las 3 primeras bases en cada una de ellas. Los trabajos realizados en esta zona se dividen a su vez en tres:

- Zona A: armado y soldeo por la cara A.
- Zona B: soldeo por la cara B. En caso de que la zona C esté ocupada por la reparación de una pieza, las inspecciones se realizarían en esta zona.
- Zona C: zona dispuesta para la inspección de las piezas. En caso de que la soldadura presentara algún defecto la pieza se repararía también en esta zona.



**Figura 42: Modelo en FlexSim zona de arco sumergido.**

El proceso de armado, soldeo, e inspección que se lleva a cabo en la zona de arco sumergido se puede resumir en los siguientes pasos:

- 1º) Cuando el modelo emite una orden, en la zona A se inicia el armado y soldeo por la cara superior de la base del brazo C.
- 2º) Cuando termina el soldeo de la cara superior de la base, la pieza se voltea y se transporta a la zona B, zona en la cual se inicia el soldeo de la cara inferior de la base. Al transportar esta pieza a la zona B, ya se puede comenzar en la zona A con el armado y soldeo por la cara superior de la tapa del brazo C
- 3º) Una vez terminado el soldeo de la cara inferior de la primera base, se comprueba si la zona C está libre. En caso afirmativo, se transporta la pieza a la zona C para ser inspeccionada y/o reparada en caso de presentar algún defecto en soldadura. En caso negativo, es decir, que la zona C esté ocupada, se realizará la inspección en la zona B y, a su vez, si la pieza inspeccionada en la zona B necesitara ser reparada, esperaría a que la zona C estuviera libre para comenzar el proceso de reparación.
- 4º) Durante el proceso, cuando la zona A quede libre, se sigue trabajando en las demás bases y tapas necesarias para la formación de la pieza de transición. El orden de entrada de las bases y tapas se visualiza en la Tabla 36:

**Tabla 36: Orden de entrada de chapas en la zona de arco sumergido.**

Orden de entrada de chapas en la zona de arco sumergido	
1	Base brazo C
2	Tapa brazo C
3	Base brazo B
4	Tapa brazo B
5	Base brazo A
6	Tapa brazo A

El proceso de inspección no comienza hasta transcurrido un tiempo mínimo. Este tiempo varía entre 24 y 48 horas, por este motivo, el modelo de simulación está diseñado para que tome este tiempo de espera como un input, con el objetivo de que pueda ser ajustado según el escenario que se quiera analizar.

Para representar los trabajos realizados en la zona de arco sumergido en el modelo de simulación, se ha desarrollado el Process Flow de la Figura 43.

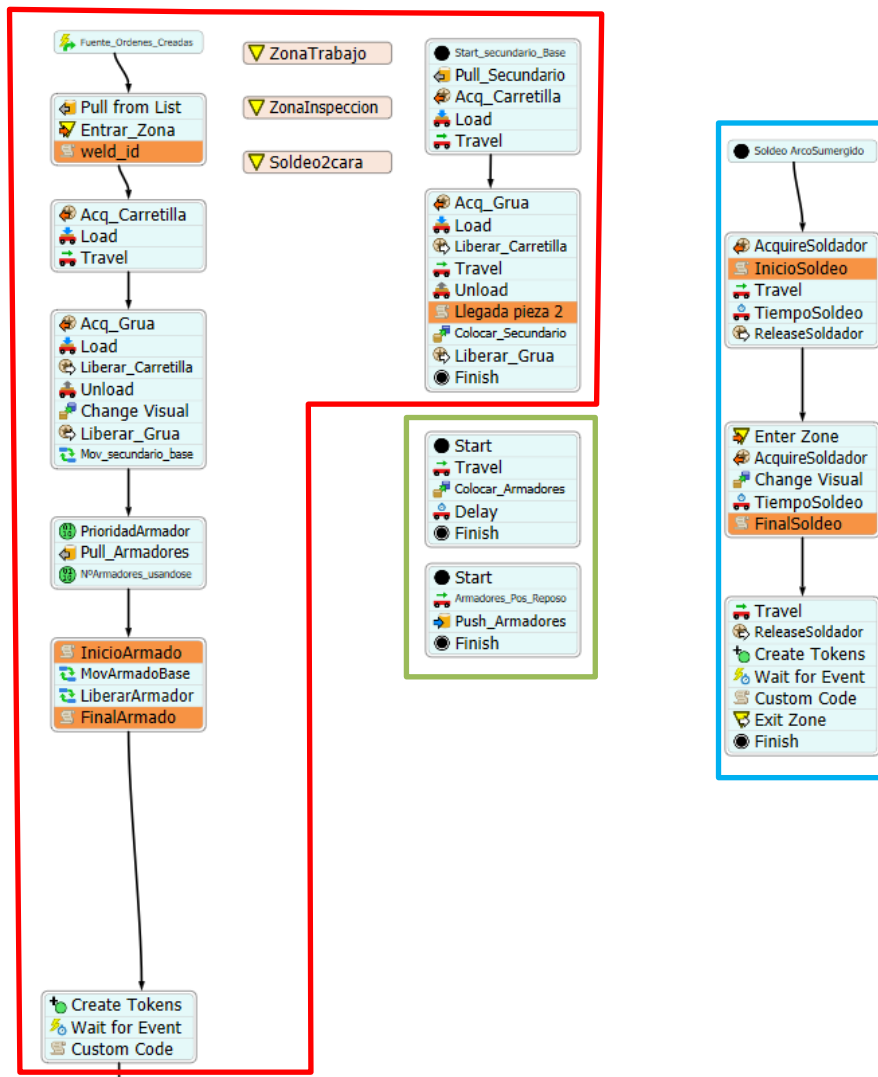


Figura 43: Trabajos realizados en la zona de arco sumergido

Los bloques que se encuentran dentro de la figura de color rojo se utilizan para iniciar los trabajos y colocar las piezas en el lugar que les corresponde.

Los que se encuentran dentro de la figura de color verde se utilizan para desplazar dentro del modelo a los armadores a la pieza en la que les toca trabajar, simulando un tiempo de proceso en función de la soldadura que se esté realizando.

Dentro de la figura de color azul se representan los trabajos de soldadura, tanto por la cara superior de la pieza como la inferior.

Finalmente, el proceso de inspección de las piezas fabricadas en esta zona, se encuentra representado en el Process Flow de la Figura 44:

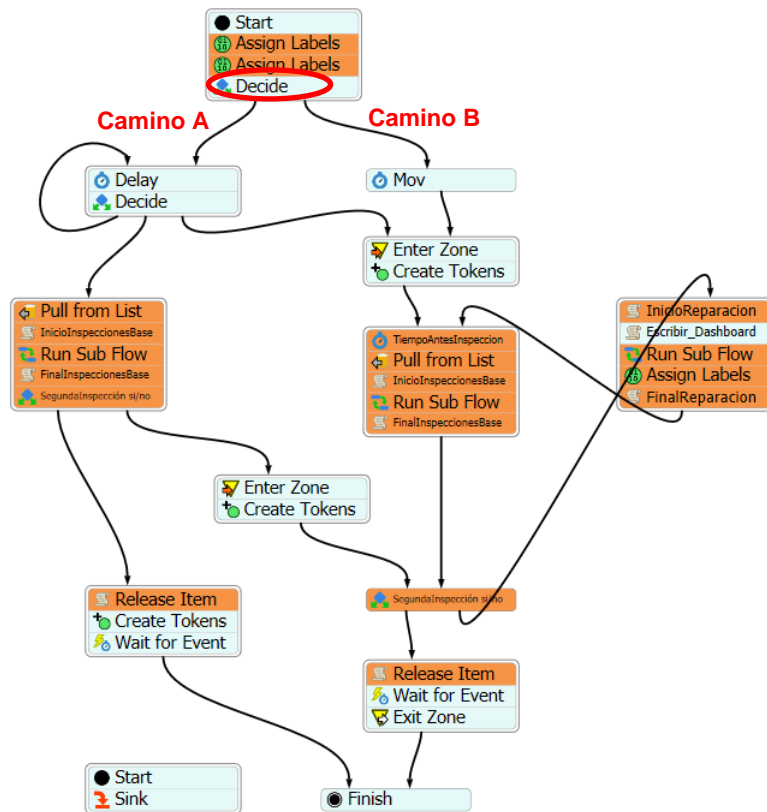


Figura 44: Proceso de inspección en la zona de arco sumergido.

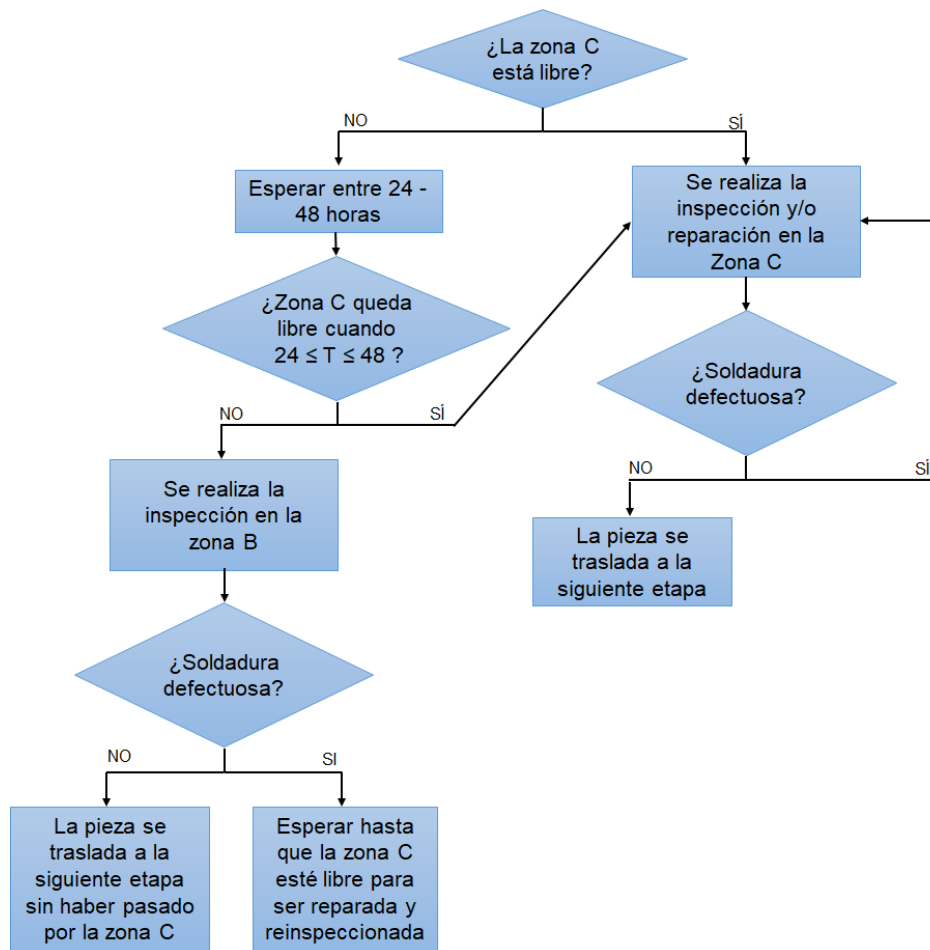
Los trabajos de inspección en esta zona pueden seguir principalmente dos caminos, identificados en la figura en color rojo: A o B.

El bloque *Decide* redondeado en la figura comprueba si la zona C está libre para transportar la pieza. En caso afirmativo, se toma el camino B, por lo que la pieza es transportada a la zona C para realizar los trabajos de inspección y/o reparación. En caso negativo, es decir, que la zona C esté ocupada, se toma el camino A, en el cual los bloques *Delay* y *Decide* representan un bucle en el que se esperará, como máximo, el tiempo mínimo de espera para poder realizar la inspección. Si durante este tiempo la zona C queda libre, se transportará la pieza hasta esta zona; si la zona C permanece ocupada, se comenzará a realizar la inspección en la zona B.

En el camino A, a su vez, pueden ocurrir dos situaciones:

- En la zona B, la pieza ha sido inspeccionada y la soldadura se encuentra libre de defectos, por lo que la pieza puede continuar su proceso de fabricación pasando a la siguiente etapa, sin haber pasado por la zona C. Esta situación es la más probable ya que el nivel de defectología de las soldaduras que se realizan en la zona de arco sumergido es muy bajo.
- En la zona B, la pieza ha sido inspeccionada con resultado negativo; la soldadura presenta algún tipo de defecto y necesita ser reparada. La pieza pues, tendrá que esperar a que la zona de reparaciones (zona C) quede libre. Una vez que esto pase, la pieza se transportará a esta zona donde tendrá que ser reparada e inspeccionada de nuevo.

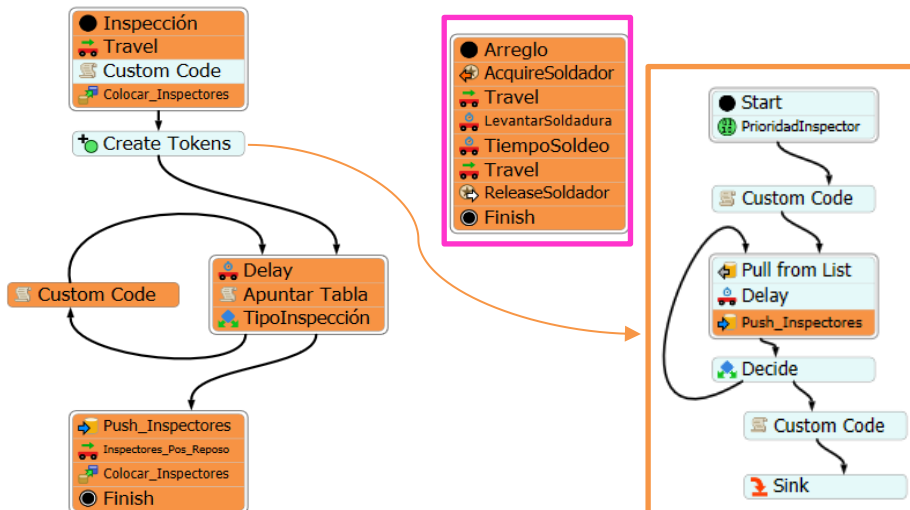
Para mayor comprensión de la secuencia que se sigue para realizar los trabajos de inspección en la zona de arco sumergido cuando la pieza finaliza el soldeo en la zona B se ha elaborado el flujograma de la Figura 45:



**Figura 45: Resumen secuencia trabajos al finalr el soldeo en la zona B.**

Para determinar si la soldadura presenta algún tipo de defecto, se ha utilizado un histórico de datos obtenidos de un proyecto real de fabricación de jackets al que hace referencia el presente proyecto. Los datos se han analizado en el apartado 4.4.

Para que en el Process Flow se recojan estos datos, se deriva cada uno de los caminos a un Subprocess Flow. El bloque *Run Sub Flow* deriva al Process Flow representado en la Figura 46:



**Figura 46: Orden de emisión de informes y reparaciones.**

En este Process Flow, primeramente, se desplazan a los inspectores a la zona de inspección. Seguidamente, el bloque *Create Tokens* genera una orden de emisión de informe (bloques situados dentro del recuadro de color naranja), los cuáles serán realizados por los inspectores durante periodos en los que no tengan inspecciones pendientes, dando prioridad al inspector que no esté realizando trabajo de inspección. A continuación, se calcula el porcentaje de defecto según el tipo de inspección realizada, partiendo del cálculo que se ha indicado en el párrafo anterior, se recoge esta información en el modelo y, finalmente, se libera a los inspectores para que puedan continuar su trabajo, ya sea realizando otro trabajo de inspección o en el cumplimiento de informes.

Los bloques que se encuentran dentro del rectángulo de color rosa, representan las reparaciones de las soldaduras defectuosas. El proceso de reparación sería el indicado en el apartado 3.7, teniendo en cuenta que se tendrá que desplazar un soldador a la zona de trabajo y luego liberarlos para que continúe con el resto de tareas.

Es importante señalar que, en la zona de arco sumergido, no se puede modificar la estrategia de inspección, es decir, es obligatorio realizar la inspección después de haber ejecutado las primeras soldaduras asociadas a las bases y a las tapas ya que, de esta manera, se puede detectar si hay algún problema, por ejemplo, de calibración de los equipos de soldadura, o incluso una elección errónea del consumible, un precalentamiento de soldadura incorrecto, etc.

En la zona de arco sumergido se inspeccionarían las siguientes soldaduras:

**Tabla 37: Soldaduras a inspeccionar en la zona de arco sumergido.**

Zona de Arco Sumergido
W0013
W0038
W0010
W0036
W0007
W0033

### 5.4.2 Taller de fabricación de brazos. Zona de ensamblaje de los brazos

Una vez que se han ensamblado las bases de cada brazo de la pieza de transición, éstas pasan a la zona de almacenaje intermedio, donde permanecerán el tiempo necesario hasta que quede libre una mesa en la zona de ensamblaje. En Figura 47, en la mesa de la izquierda se colocarán las partes de arriba y la de la derecha las partes de abajo de la TP.

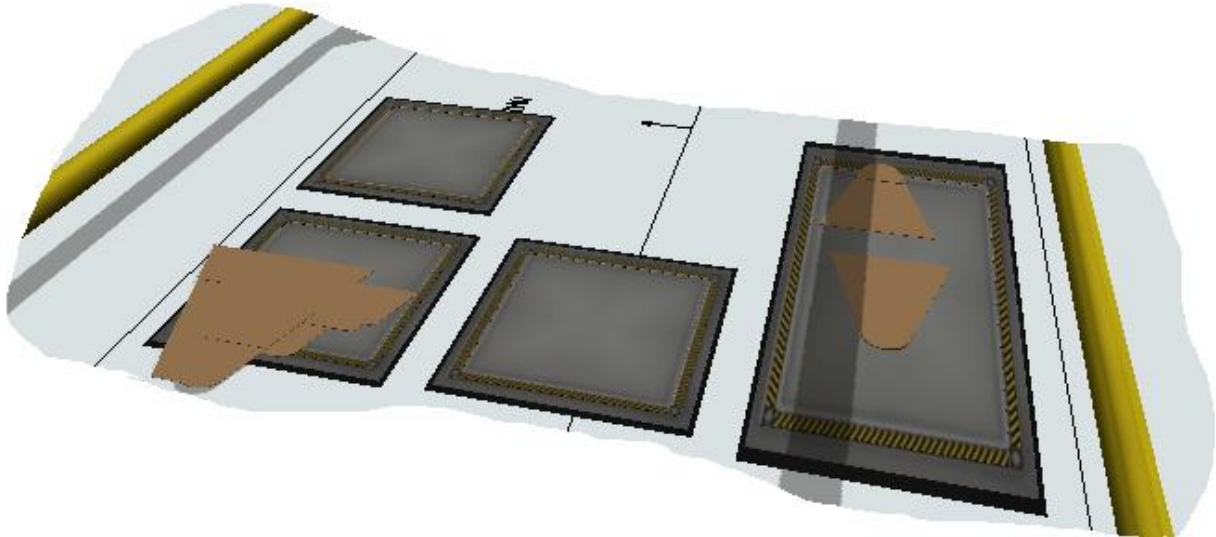


Figura 47: Modelo en FlexSim zona de almacenaje intermedio.

Cuando la pieza pasa a la zona de ensamblaje de brazos, Figura 48, se sueldan las soldaduras asociadas a al resto de piezas restantes para la formación completa del brazo. En esta zona tenemos 8 celdas de trabajo, un brazo en cada una de ellas.

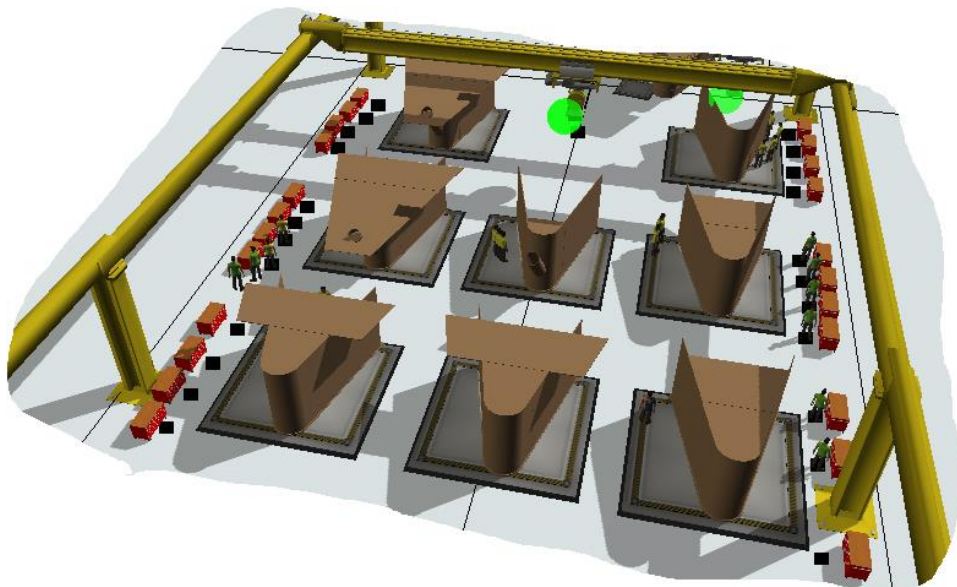


Figura 48: Modelo en FlexSim zona de ensamblaje de brazos.

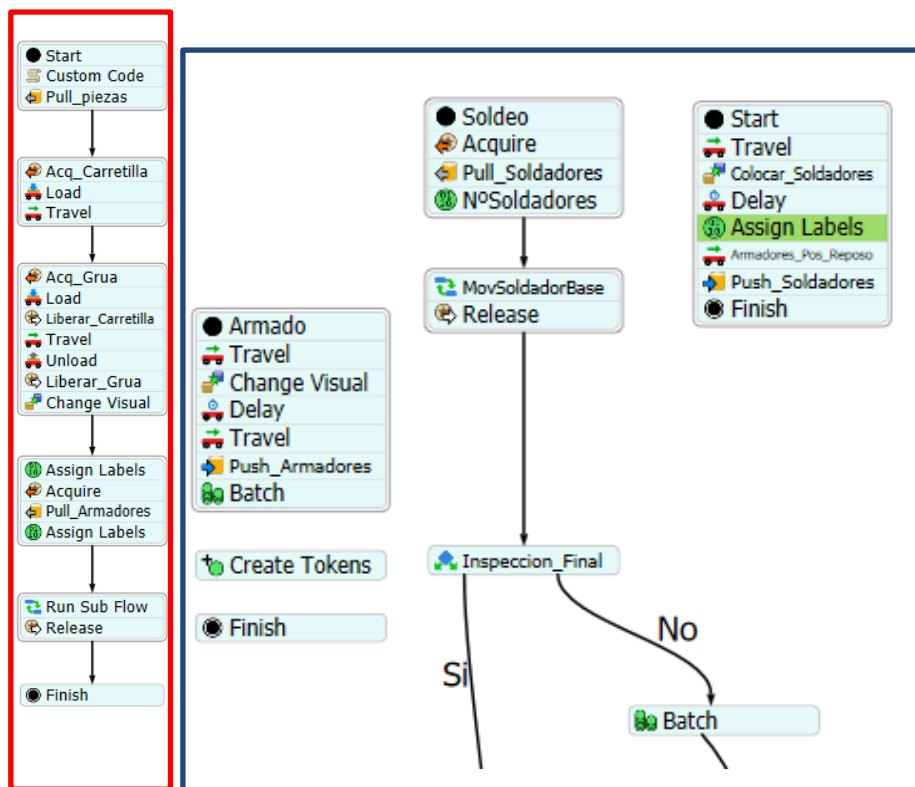
La primera chapa que llega al taller de ensamblaje de brazos totalmente inspeccionada es la base del brazo C. A continuación, se le suelda la chapa curva que une los laterales, el refuerzo interior y uno de las chapas laterales. Seguidamente, llega al taller la base del brazo B siguiendo el mismo orden de fabricación del brazo y, por último, la base del brazo A. Las

chapas que conforman cada brazo se van ensamblando y soldando en el orden establecido en la Tabla 38:

**Tabla 38: Orden de fabricación de brazos.**

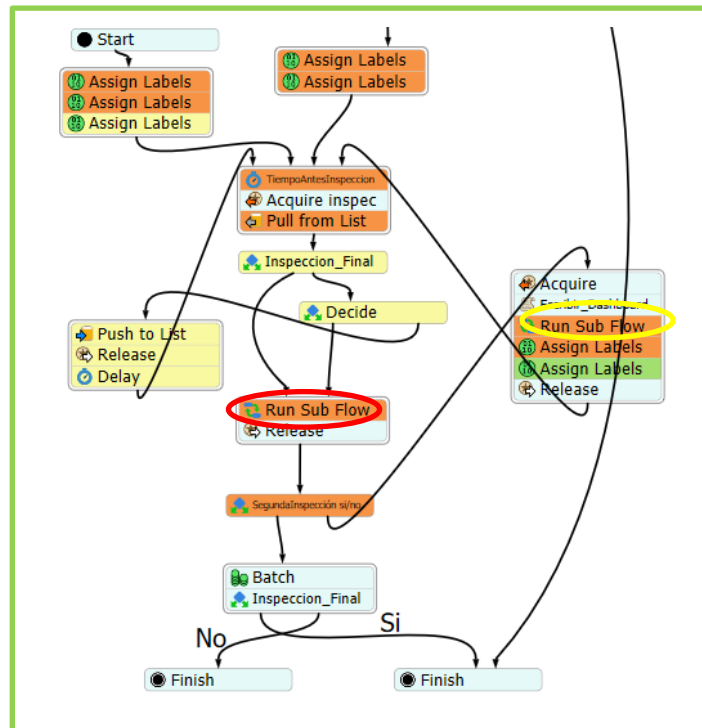
Orden de fabricación de brazos	
1	Soldadura base con chapa curva exterior
2	Soldadura refuerzo interior
3	Soldadura laterales
4	Soldadura tapa

Para representar los trabajos realizados en la zona de ensamblaje de brazos en el modelo se ha desarrollado el *Process Flow* de la Figura 49



**Figura 49: Trabajos realizados en la zona de ensamblaje de brazos.**

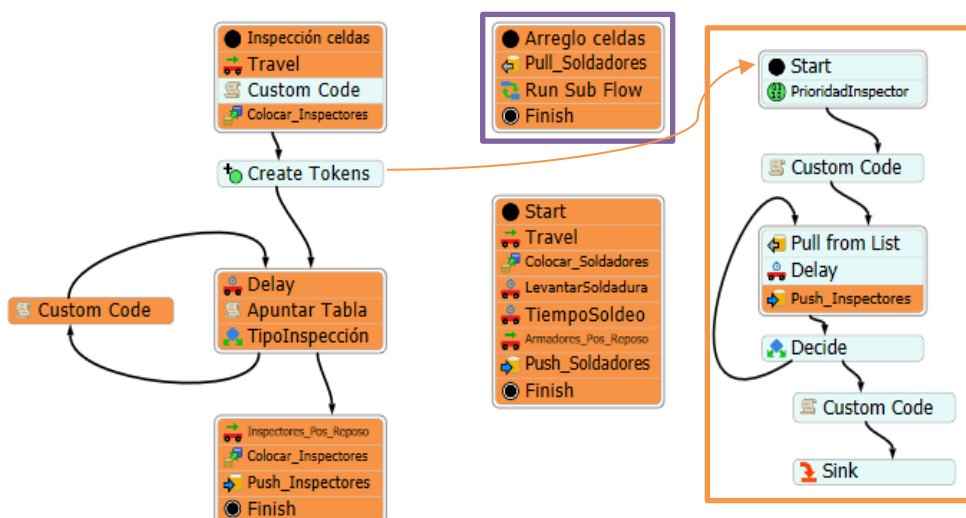




**Figura 50: Realización de inspecciones en la zona de ensamblaje de brazos.**

En la Figura 49, Los bloques que se encuentran dentro del rectángulo de color rojo se utiliza para traer las piezas desde la zona de almacenaje intermedio. El bloque *Run Sub Flow* que se encuentra dentro de esta figura deriva al *Process Flow* que se encuentra dentro de la figura de color azul, el cual se utiliza para el proceso de armado y soldeo de las chapas, recurriendo a los soldadores y armadores disponibles para llevar a cabo el trabajo en cada caso.

Finalmente, en la Figura 50, los bloques que se encuentran dentro del rectángulo de color verde realizan la inspección de cada soldadura. El bloque *Run Sub Flow* remarcado en color rojo, deriva al *Process Flow* representado en la Figura 51. Si se produjese un defecto en la soldadura, habría que repararla, por lo que el *Run Sub Flow* remarcado en color amarillo, derivaría al conjunto de bloques dentro del rectángulo de color malva en la Figura 51.



**Figura 51: Reparaciones en la zona de fabricación de brazos.**

El funcionamiento del *Process Flow* tiene la misma función que el que se utiliza para el taller de fabricación de brazos, y es desplazar a los inspectores a la zona de inspección, crear órdenes de emisión de informes, recoger la información del modelo y realizar las posibles reparaciones que surjan durante el proceso del soldeo.

En la zona de ensamblaje de brazos, al contrario que en la zona de arco sumergido, sí que es posible la modificación de la estrategia de inspección, de hecho, puede ser recomendable, ya que mucha de las veces sucede que entre todos los trabajadores (armadores, soldadores y técnicos de inspección) se “molestan” entre sí. Sería interesante pues, crear una nueva estrategia de inspección en esta zona para evitar este problema.

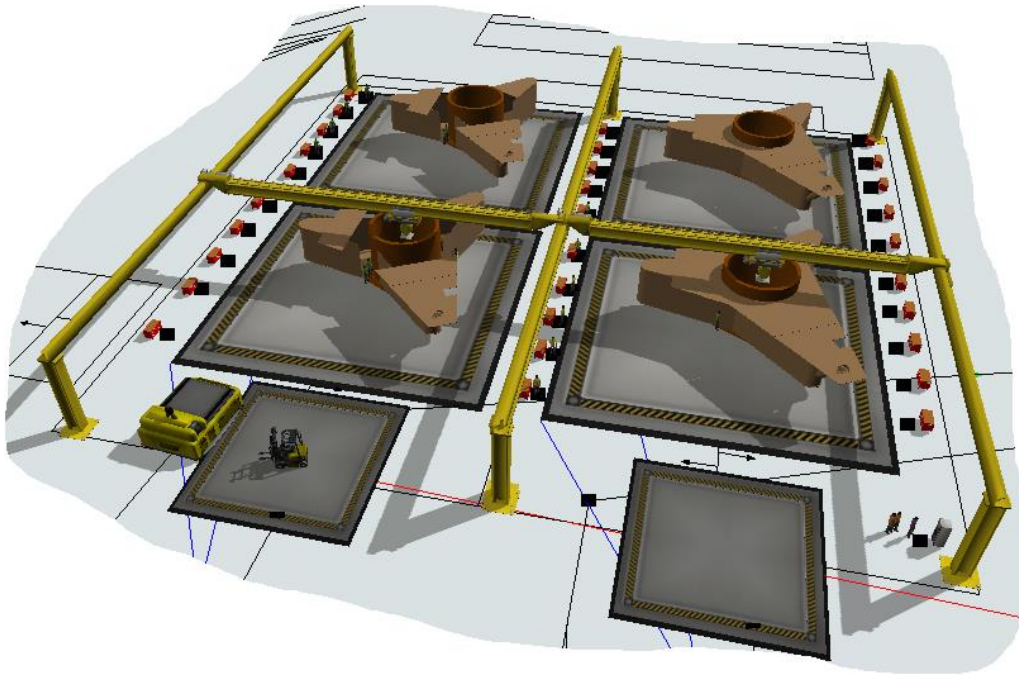
En la zona de ensamblaje de brazos se inspeccionarán las soldaduras indicadas en la Tabla 39:

**Tabla 39: Soldaduras inspeccionadas en la zona de ensamblaje de brazos.**

ZONA DE ENSAMBLAJE DE BRAZOS		
W0023	W0022	W0021
W0026	W0028	W0027
W0045.11	W0025	W0024
W0029	W0045.6	W0045.1
W0030.10	W0030.6	W0030.2
W0045.10	W0045.5	W0045.15
W0045.12	W0045.7	W0045.2
W0030.11	W0030.7	W0030.3
W0046.10	W0046.5	W0046.2
W0046.11	W0046.6	W0046.1
W0046.12	W0046.7	W0046.15

#### **5.4.3 Taller de ensamblaje de TPs.**

Una vez el brazo ya conformado sale del taller de fabricación de brazos, se transportan mediante carretilla hacia el taller de ensamblaje de TPs donde estará dispuesto el cilindro central preparado para ser ensamblado a éstos. Este taller cuenta con 4 celdas de ensamblaje, 2 celdas por cada línea, por lo que se pueden fabricar 4 TPs al mismo tiempo, Figura 52.



**Figura 52: Modelos en FlexSim taller ensamble de TPs.**

En cuanto al proceso de colocar las piezas, armado y soldeo, inspecciones e informes, los *Process Flow* que se desarrollaron para desenvolver estas funciones sería similar al del taller de ensamble de brazos.

En esta etapa también se podría modificar la estrategia de inspección, igualmente recomendable.

En el taller de ensamble de TPs se inspeccionan las soldaduras indicadas en la Tabla 40:

**Tabla 40: Soldaduras inspeccionadas en la zona de ensamble de TPs.**

ZONA DE ENSAMBLAJE DE TPs		
W0011	W0045.3	W0030.9
W0014	W0031.2	W0031.5
W0030.12	W0039	W0046.9
W0008	W0037	W0045.4
W0045.13	W0035	W0030.5
W0031.6	W0034	W0031.3
W0030.8	W0046.13	W0046.4
W0045.8	W0046.8	W0045.14
W0031.4	W0046.3	W0030.1
W0030.4	W0045.9	W0031.1
W0046.14	-	-



## 6 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN.

A la hora de realizar la simulación de un proceso real de fabricación de piezas de transición se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones en cuanto al proceso de inspección, con el objetivo de que los resultados sean lo más fieles posibles a la realidad:

- Hay 2 turnos por jornada de trabajo; en cada turno, trabajan 2 inspectores; es decir, en una jornada de trabajo tendremos en total a cuatro técnicos de inspección.
- En cuanto al orden de llamada de cada inspector, tiene prioridad el que no esté realizando ningún trabajo de inspección en ese instante. Ningún inspector está “parado” en ningún momento ya que, en el momento en que finalice los trabajos de inspección, se le asigna la tarea de cumplimentado de informes.
- El porcentaje de fallo supuesto para cada una de las soldaduras es una media de un estudio de 20 muestras realizado sobre datos históricos de un proyecto similar el cual se ha representado en la Tabla 30: Porcentaje de fallo para cada soldadura dependiendo del tipo de END y explicada en el apartado 4.4.
- El modelo de simulación calcula el porcentaje de fallo con una distribución uniforme (0,100), considerando que la soldadura es defectuosa si el valor de la distribución es inferior al mínimo porcentaje de fallo permitido.
- Los resultados obtenidos por el modelo de simulación son la media y la desviación obtenida al realizar 100 repeticiones de cada escenario.
- El tiempo de espera para realizar una inspección después de cada soldadura es de 48 horas.

Por otra parte, ya que se ha trabajado con datos de un proyecto real, se han considerado los siguientes parámetros coincidiendo también con datos reales:

- Inicio de la simulación: 10/03/2017.
- Inicio de la fabricación de brazos: 10/04/2017.
- Jornada laboral de 16 horas/día (dos turnos de ocho horas).
- Comienzo de un nuevo brazo cada cinco días laborales (90 horas).

Finalmente, las tablas Tabla 41 y Tabla 42 nos indican las fechas de llegada y cantidad de los cilindros desde Avilés y el acero necesario para la fabricación de las piezas de transición.

**Tabla 41: Llegada de los cilindros centrales desde Avilés.**

Batch	Qty	Fecha
Batch_1	4	05/05/17
Batch_2	8	01/06/17
Batch_3	10	14/07/17
Batch_4	10	20/09/17
Batch_5	10	01/12/17

**Tabla 42: Llegada del acero para la fabricación de las TPs.**

Batch	Qty	Fecha
Batch_1	10	05/05/17
Batch_2	10	01/06/17
Batch_3	10	14/07/17
Batch_4	12	20/09/17

## 6.1 Escenario 1: Análisis del proceso de fabricación de TPs con los tiempos teóricos de inspección.

Para poder simular el proceso de fabricación de TPs, junto con el proceso de inspección de las mismas, se han utilizado unas ratios en h/mm tanto para representar los trabajos de soldeo como los trabajos de inspección. Dichas ratios se muestran en la Tabla 43.

**Tabla 43: Ratios utilizadas por el modelo de simulación**

	Zona de arco sumergido	Zona de ensamblaje de Brazos	Taller de ensamblaje de las TPs
Ratio de armado [h/mm]	0,0007	0,0031	0,0031
Ratio de soldeo [h/mm]	0,0016	0,0104	0,015
Ratio de inspección visual [h/mm]	0,0001	0,0001	0,0001
Ratio de inspección MT/PT [h/mm]	0,0001667	0,0001667	0,0001667
Ratio de inspección UT [h/mm]	0,0005	0,0005	0,0005

Con la Tabla 43 y la Tabla 30, el modelo de simulación obtiene los tiempos medios de armado, soldeo e inspección para cada soldadura. Con estos tiempos medios, el modelo representa el tiempo de trabajo con una distribución lognormal, donde la desviación típica que será el tiempo medio dividido entre 100.

Al mismo tiempo, para el primer caso del escenario 1 se ha considerado que todas las inspecciones se realizan de forma paralela al proceso de fabricación, tanto en el taller de maquinaria como en el de ensamblaje de TPs, sin que esta forma de trabajar incremente los tiempos de inspección debido a las interferencias entre los inspectores y el resto de trabajadores.

Con los supuestos mencionados hasta el momento, y centrando el análisis en el taller de maquinaria, que incluye la zona de arco sumergido y la zona de fabricación de brazos se han obtenido los resultados de la Tabla 44.

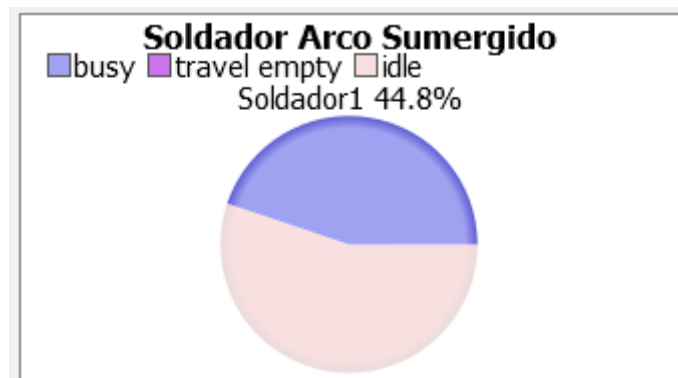
**Tabla 44: Resultados del escenario 1. Trabajos de inspección realizados en paralelo con los trabajos de armado y soldeo.**

	VALOR MEDIO	+ -	UDS.
Comienzo de los trabajos en la zona de arco sumergido	31	0	Días laborales
Final de los trabajos en la zona de arco sumergido	375	8	Días laborales
% de ocupación de la zona A en la mesa de arco sumergido	95	1	%
% de ocupación de la zona B en la mesa de arco sumergido	94	1	%

<b>% de ocupación de la zona C en la mesa de arco sumergido</b>	92	2	%
<b>Total de soldaduras defectuosas en la zona de arco sumergido</b>	13	3	Uds
<b>Comienzo de los trabajos en las estaciones de ensamblaje de brazos</b>	36	1	Días laborales
<b>Final de los trabajos en las estaciones de ensamblaje de brazo</b>	391	14	Días laborales
<b>Total de soldaduras defectuosas en la zona de ensamblaje de brazos</b>	95	18	Uds

Al mismo tiempo, el modelo de simulación muestra las gráficas de ocupación de los armadores, soldadores e inspectores, Figura 53, Figura 54, Figura 55, Figura 56, así como la gráfica de evolución de los informes pendientes de realización y la evolución de las reparaciones a lo largo del proyecto, Figura 57, Figura 58.

En la zona de arco sumergido como se puede ver en la Figura 53, un solo soldador con dedicación exclusiva para los trabajos de soldeo realizados en dicha zona es más que suficiente, pudiendo incluso ser el encargado de realizar las reparaciones necesarias en las soldaduras realizadas mediante arco sumergido. A pesar de que la gráfica de ocupación para este soldador es baja, se ha decidido colocar una persona exclusiva para el trabajo de soldeo mediante arco sumergido, en mayor medida porque la especificación del soldador de arco sumergido es diferente a los requerimientos necesarios para un soldador en la zona de ensamblaje de brazos, además de la importancia de no tener esperas en la zona de arco sumergido, ya que en esta zona se realiza la pieza inicial y final de cada una de las brazos, por lo que es una de las etapas más importantes del proceso.



**Figura 53: Utilización soldador de arco sumergido**

En cuanto a los armadores que están trabajando en el taller de maquinaria, como se ve en la Figura 54, se ha estimado que podrá haber un máximo de ocho armadores, pero para este escenario la utilización de cuatro armadores es suficiente para realizar los trabajos de armado necesarios en el taller de maquinaria. Otra característica importante que queda reflejada en la Figura 54, es la realización de los trabajos de armado en parejas, por ese motivo la utilización de los armadores 1 y 2 es prácticamente igual, al igual que sucede con la utilización de los armadores 3 y 4.

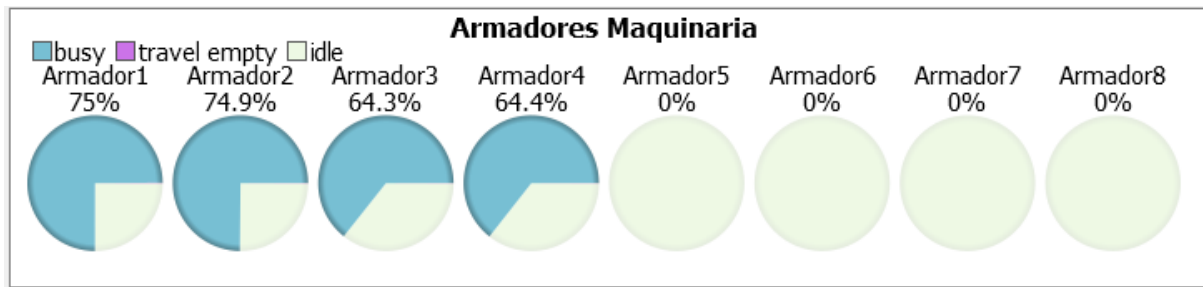


Figura 54: Utilización de los armadores del taller de maquinaria

De igual forma que los armadores, los soldadores que trabajan en el ensamblaje de los brazos, cuya utilización se representa en la Figura 55, también lo hacen por parejas. En este caso, se ha considerado un máximo de 16 soldadores por turno, pero para este escenario es suficiente la utilización de 10 soldadores, ya que a pesar de aumentar una pareja más de soldadores los datos de finalización del proyecto apenas varían (menos de 50 horas de media), y por el contrario, la utilización de los soldadores se ve claramente reducida, llegando a tener parejas de soldadores con una utilización de entorno a un 60%

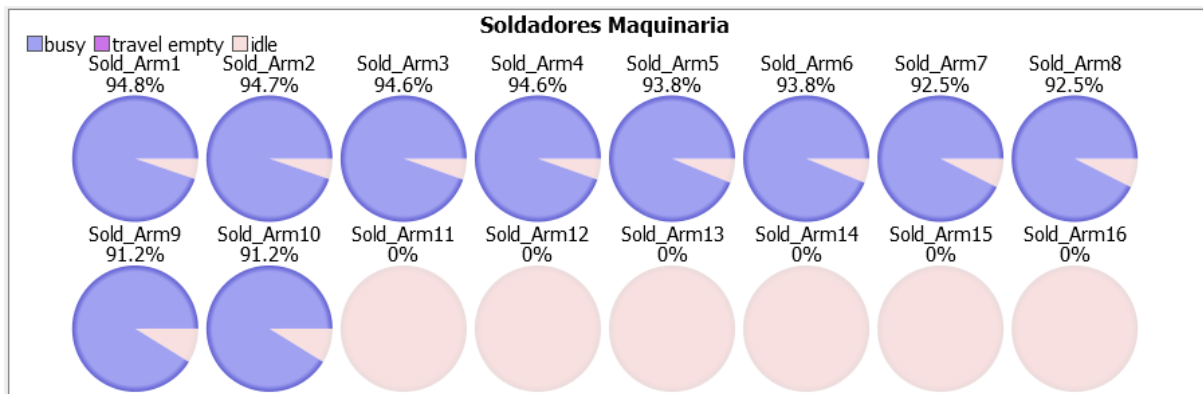


Figura 55: Utilización de los soldadores de ensamblaje de brazos con tiempo de espera antes de la inspección de 48 horas

Para la parte de inspección, que es en la que más vamos a centrar los resultados de este trabajo fin de máster, se ha considerado la utilización de un máximo de cinco inspectores por turno de trabajo, Figura 56. Para este primer escenario la utilización de 2 inspectores por turno es suficiente para cubrir los trabajos de inspección y también para que entre los dos sean capaces de tener al día los informes de inspección, que como se puede ver en la Figura 57, solo se alcanza un máximo de 12 informes pendientes de forma puntual, por lo que se puede considerar que de esta forma los informes están en línea con el proceso de inspección.

En este punto es importante hacer hincapié en que se ha considerado una estrategia de reparto de trabajo para los inspectores según el número de inspecciones que hayan realizado hasta el momento, por lo que, si los 2 inspectores están libres y en ese momento se requiere una inspección, el técnico que hasta el momento haya realizado menos inspecciones será el que acuda a realizar el trabajo. Por otra parte, cada técnico debe realizar los informes de las inspecciones que haya realizado, por lo que el modelo no permite que el reparto de trabajo de realización de informes se haga de forma diferente al reparto de inspecciones.



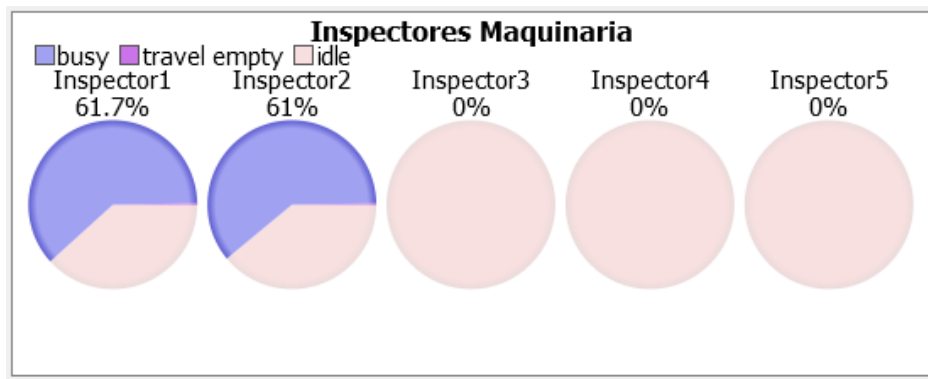


Figura 56: Utilización de los inspectores del taller de maquinaria

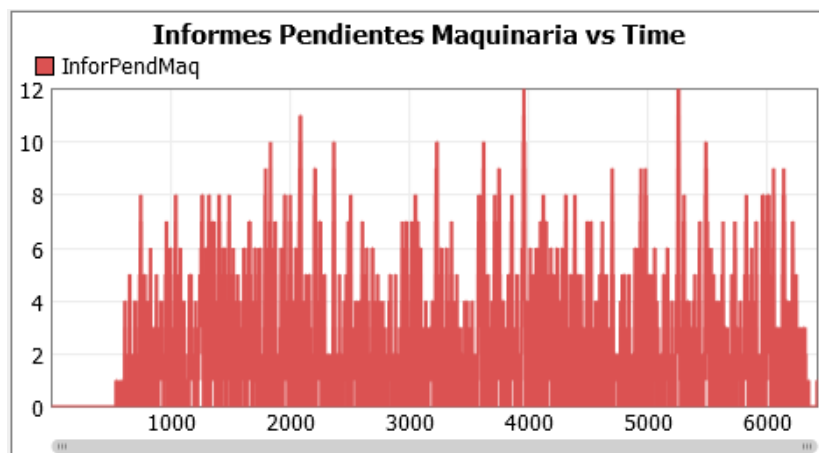


Figura 57: Evolución de los informes pendientes de entrega en función del avance del proyecto

Tiene también importancia ver la evolución acumulada de las reparaciones necesarias en el taller de maquinaria, Figura 58. En dicha gráfica es posible observar como es mucho más frecuente la aparición de fallos que necesiten reparación en la zona de ensamblaje de brazos, ya que en esta zona el proceso de soldeo se realiza de forma manual, mientras que el soldeo de arco sumergido se realiza de forma automática, con la consecuente reducción en la probabilidad de fallo en la soldadura.

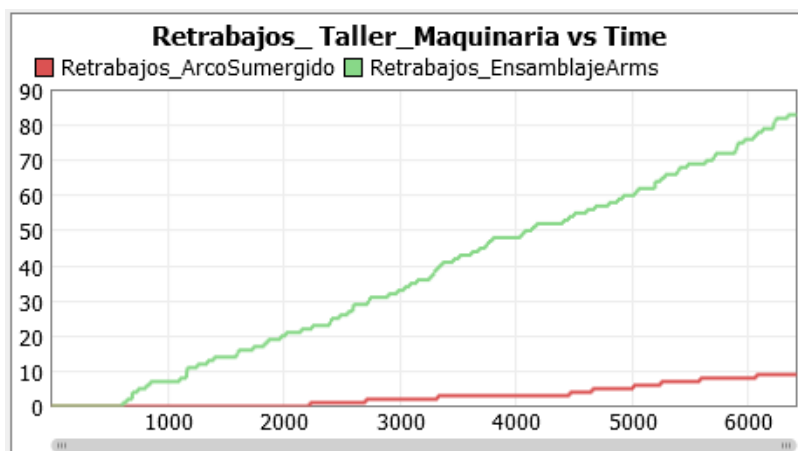


Figura 58: Gráfica acumulada de reparaciones en el taller de maquinaria en función del avance del proyecto

Resulta también muy interesante ver la evolución del proyecto si se reduce el número de inspectores a un solo inspector por turno. Ya que de esta forma el resultado final en cuanto a tiempo de proceso no es significativo, solo se tiene una variación de entre 15 y 20 días para la finalización del proyecto, pero la evolución de los informes pendientes de entrega y la ocupación de los inspectores, Figura 59 y Figura 60 respectivamente varía de forma substancial, llegando incluso a multiplicar por 100 el número de informes pendientes de entrega.

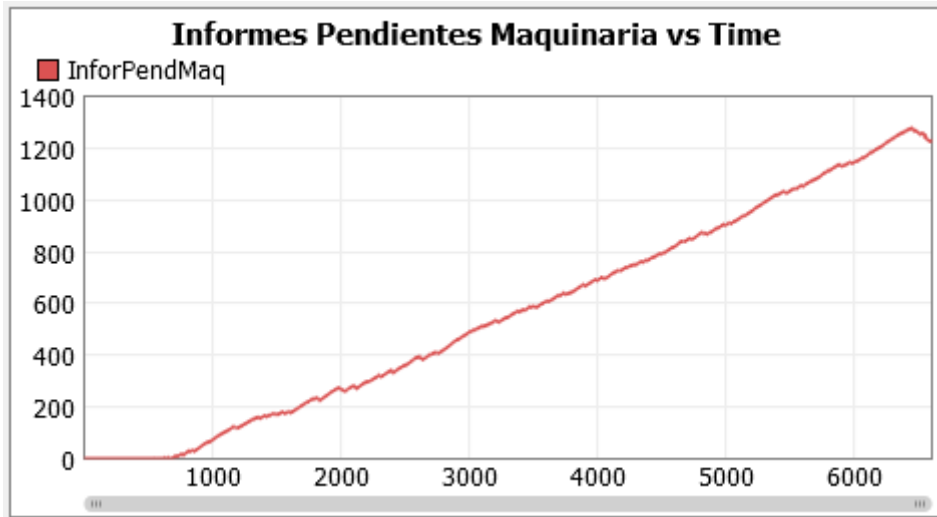


Figura 59: Evolución de los informes pendientes de entrega en función del avance del proyecto con un solo inspector

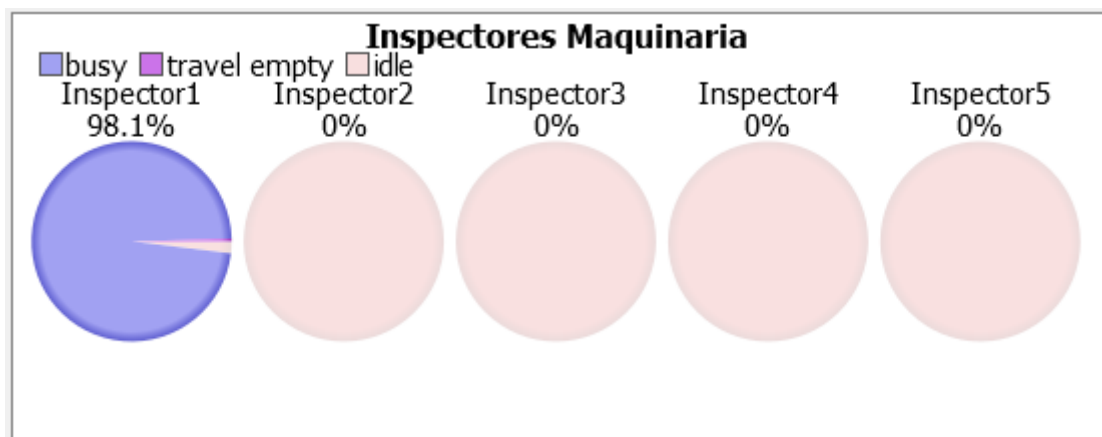


Figura 60: Utilización de los inspectores del taller de maquinaria con un solo inspector

Estos cambios tan significativos en la evolución de los informes de entrega son debidos a que el modelo está preparado para dar prioridad a las tareas de inspección frente a las tareas de oficina, con el objetivo de que el trabajo de inspección impacte lo menos posible en el desarrollo del proyecto.

Por último, en este escenario se va a comprobar el efecto que tiene sobre el proyecto realizar las inspecciones correspondientes a la zona de ensamblaje de brazos al finalizar la fabricación. De esta forma todas las inspecciones correspondientes al ensamblaje de brazos se pueden hacer seguidas, y sin que los operarios que trabajan armando y soldando la pieza entorpezcan el proceso de inspección.

Con respecto a las inspecciones realizadas en la zona de arco sumergido, dichas inspecciones se realizarán igual que en el caso anterior, ya que si se dejan para inspeccionar

cuando el brazo esté terminado se hace muy complicado el acceso a la soldadura realizada mediante arco sumergido, y lo que es peor, en caso de tener que reparar dicha soldadura no habría acceso para volver a colocar la máquina, por lo que sería necesario desmontar la pieza del resto del conjunto y llevarla a reparar a la estación donde se encuentra la máquina de arco sumergido.

Con este nuevo supuesto los resultados que se obtienen de la simulación se representan en la Tabla 45. En los cuales se puede apreciar un pequeño incremento del tiempo final de la fabricación con respecto a la estrategia anterior.

Este incremento en el tiempo final es debido a que en el primer caso no se estaban penalizando los trabajos de diferentes equipos en paralelo, y en este segundo caso al eliminar los trabajos en paralelo se incrementa levemente el tiempo final de la fabricación

**Tabla 45: Resultados del escenario 1. Trabajos de inspección realizados al final de la fabricación**

	<b>VALOR MEDIO</b>	<b>+ -</b>	<b>UDS.</b>
<b>Comienzo de los trabajos en la zona de arco sumergido</b>	31	0	Días laborales
<b>Final de los trabajos en la zona de arco sumergido</b>	387	6	Días laborales
<b>% de ocupación de la zona A en la mesa de arco sumergido</b>	95	1	%
<b>% de ocupación de la zona B en la mesa de arco sumergido</b>	94	1	%
<b>% de ocupación de la zona C en la mesa de arco sumergido</b>	92	2	%
<b>Total de soldaduras defectuosas en la zona de arco sumergido</b>	13	3	Uds
<b>Comienzo de los trabajos en las estaciones de ensamblaje de brazos</b>	36	1	Días laborales
<b>Final de los trabajos en las estaciones de ensamblaje de brazo</b>	407	12	Días laborales
<b>Total de soldaduras defectuosas en la zona de ensamblaje de brazos</b>	95	18	Uds

En cuanto a la utilización de los operarios, el resultado para este segundo caso es muy similar al primero, siendo suficiente la utilización de un solo soldador para arco sumergido, cuatro armadores, 10 soldadores y 2 inspectores por cada turno.

Lo más significativo es la evolución de los informes pendientes de entrega, Figura 61, que para este caso llega a alcanzar los 36 informes pendientes frente a los 12 del caso anterior, siendo lo más habitual tener entre 10 y 15 informes pendientes de entrega.

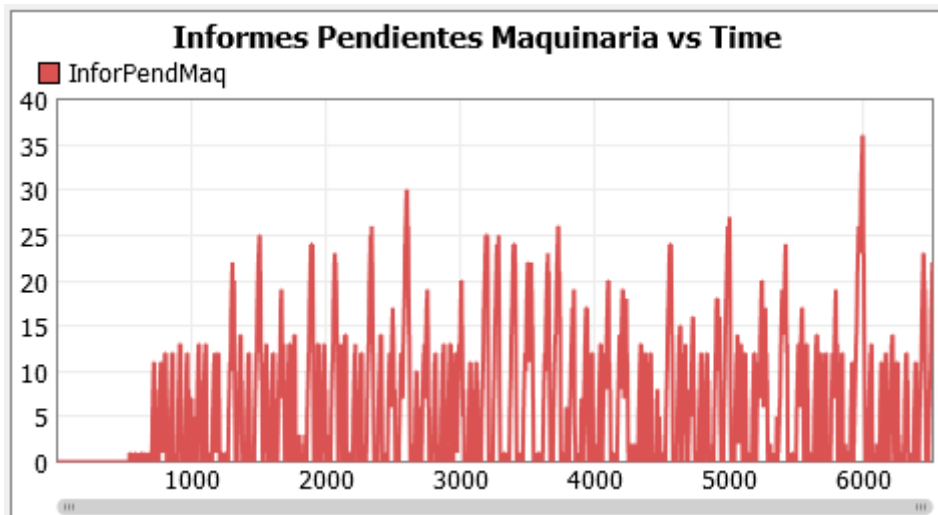


Figura 61: Evolución de los informes pendientes de entrega en función del avance del proyecto para el caso dos del escenario 1

En resumen, si aplicamos los tiempos teóricos de trabajo para el armado, soldeo e inspección, lo más eficiente es realizar la inspección en paralelo con el resto de los trabajos, siempre y cuando sea posible a nivel de espacio dentro de la zona de trabajo.

## 6.2 Escenario 2. Análisis del proceso de fabricación de TPs en el proyecto real de fabricación

En este segundo escenario, a diferencia del escenario anterior se ha tenido en cuenta el impacto que provoca el hecho de que soldadores, armadores e inspectores se entorpezcan mutuamente en una zona de trabajo. Esto se consigue mediante un parámetro que añade un 20% más al tiempo de inspección en cada soldadura, dato que ha sido estimado en relación a las entrevistas personales que han mantenido con los expertos en materia de inspección.

Este 20% de incremento en el tiempo de inspección solo afecta al primer caso estudiado en el escenario 1, ya que es el único caso en que los inspectores y el resto de trabajadores comparten la misma estación de trabajo.

Para este escenario los resultados que se han obtenido se representan en la Tabla 46, en los que se puede apreciar un incremento en los tiempos de fabricación con respecto a los dos casos del escenario anterior.

Tabla 46: Resultados del escenario 2. Trabajos de inspección realizados al final de la fabricación

	VALOR MEDIO	+ -	UDS.
Comienzo de los trabajos en la zona de arco sumergido	31	0	Días laborales
Final de los trabajos en la zona de arco sumergido	390	11	Días laborales
% de ocupación de la zona A en la mesa de arco sumergido	94	1	%
% de ocupación de la zona B en la mesa de arco sumergido	92	1	%
% de ocupación de la zona C en la mesa de arco sumergido	90	2	%

<b>Total de soldaduras defectuosas en la zona de arco sumergido</b>	13	3	Uds
<b>Comienzo de los trabajos en las estaciones de ensamblaje de brazos</b>	36	1	Días laborales
<b>Final de los trabajos en las estaciones de ensamblaje de brazo</b>	410	16	Días laborales
<b>Total de soldaduras defectuosas en la zona de ensamblaje de brazos</b>	95	18	Uds

Al igual que en el escenario 1, la mejor combinación de recursos humanos se encuentra con la utilización de un soldador para la zona de arco sumergido, cuatro armadores para todo el taller de maquinaria y diez soldadores para el ensamblaje de los brazos.

A continuación, se muestra un cuadro resumen de los tres casos que se han planteado en los escenarios 1 y 2 Tabla 47. Dicha comparación deja de manifiesto la gran influencia que tiene en el proyecto tener en cuenta el incremento de los tiempos de trabajo debidos a las interferencias de diferentes equipos de trabajo en la misma zona, ya que debido a ese factor el caso de trabajo de inspección en paralelo con el resto de la fabricación pasa de ser el caso más favorable a ser la estrategia más desfavorable de inspección.

**Tabla 47: Comparación entre los casos de estudio de los escenarios 1 y 2**

	<b>Valor medio de finalización del ensamblaje de Brazos [días]</b>
<b>Escenario 1 [Caso 1]</b>	375
<b>Escenario 1 [Caso 2]</b>	407
<b>Escenario 2</b>	410

Además de por el modelo de simulación, la estrategia de inspección al final de la fabricación ha sido recomendada por la totalidad de los expertos en materia de inspección con los que se ha tenido la oportunidad de mantener reuniones. De hecho, es la estrategia que se intente implementar en la mayoría de proyectos, siempre que todas las uniones a inspeccionar sean accesibles al final del proceso de fabricación.

### **6.3 Escenario 3. Reducción del tiempo de espera antes de la inspección de 48 a 24 horas**

Por último, en el escenario 3 se va a analizar la evolución del proceso de fabricación de los brazos si el tiempo de espera antes de inspeccionar las soldaduras se reduce de 48 a 24 horas. En este caso se ha utilizado la estrategia de inspección al final de la fabricación, ya que como se ha expuesto en los escenarios anteriores es la que da mejores resultados, y también la más aceptada por los expertos en inspección que se han consultado.

Dicho factor de espera se acuerda durante la fase de negociación del contrato, y en mayor medida es debido al tipo de acero que se usa en la fabricación.

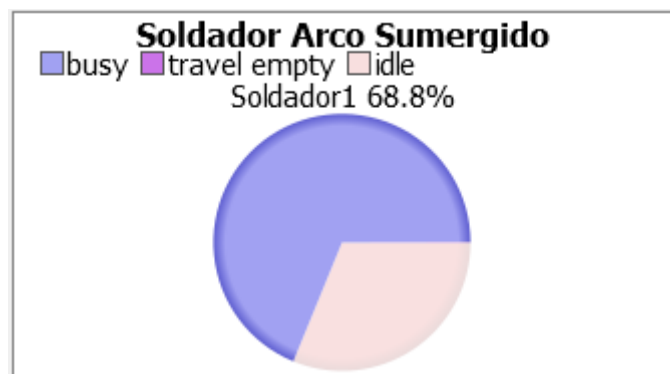
En este caso es muy interesante ver los resultados de la simulación ante esta reducción del tiempo de espera antes de inspección, ya que no solo varía el tiempo final de fabricación, sino que obliga el modelo a calcular de nuevo la combinación óptima de recursos que permite utilizar de forma eficiente las instalaciones disponibles.

Los resultados de este escenario se representan en Tabla 48, en la que es posible apreciar una reducción considerable del tiempo de finalización de la fabricación de entorno a un 35% con respecto al caso más favorable de los dos escenarios anteriores.

**Tabla 48: Resultados del Escenario 3. Inspección al final de la fabricación**

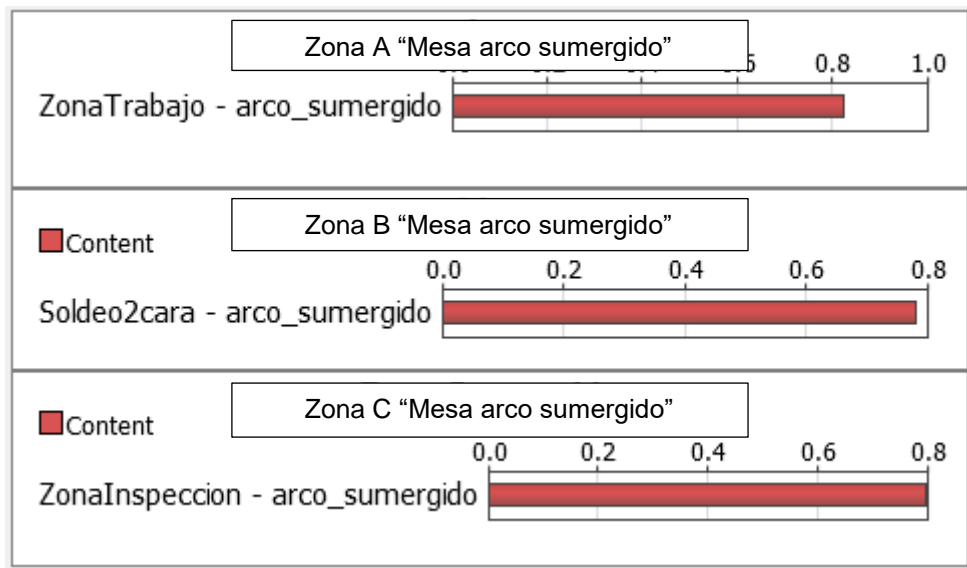
	<b>VALOR MEDIO</b>	<b>+ -</b>	<b>UDS.</b>
<b>Comienzo de los trabajos en la zona de arco sumergido</b>	31	0	Días laborales
<b>Final de los trabajos en la zona de arco sumergido</b>	260	4	Días laborales
<b>% de ocupación de la zona A en la mesa de arco sumergido</b>	82	3	%
<b>% de ocupación de la zona B en la mesa de arco sumergido</b>	68	5	%
<b>% de ocupación de la zona C en la mesa de arco sumergido</b>	80	2	%
<b>Total de soldaduras defectuosas en la zona de arco sumergido</b>	13	3	Uds
<b>Comienzo de los trabajos en las estaciones de ensamblaje de brazos</b>	32	1	Días laborales
<b>Final de los trabajos en las estaciones de ensamblaje de brazo</b>	277	8	Días laborales
<b>Total de soldaduras defectuosas en la zona de ensamblaje de brazos</b>	95	18	Uds

Al mismo tiempo, la mayor influencia de la reducción en el tiempo de espera antes de la inspección se ve en las gráficas de utilización del personal, sin ir más lejos, la utilización del soldador con dedicación exclusiva a la zona de arco sumergido ve incrementada su productividad desde el 45 al 69 %, Figura 62. Lo que hace mucho más razonable la justificación de un solo operario dedicado a las labores de soldeo y reparación necesarias en la zona de trabajo con arco sumergido.



**Figura 62 Utilización soldador arco sumergido con tiempo de espera antes de la inspección de 24 horas**

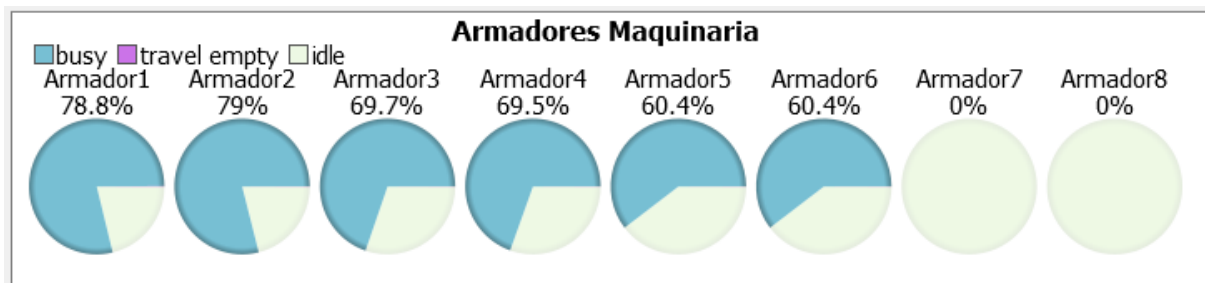
Es también interesante ver la evolución en la utilización de las diferentes zonas de trabajo en la mesa de arco sumergido, las cuales pasan de una utilización superior al 90% en los escenarios anteriores a tener una utilización de entorno al 80% para este último caso de estudio, Figura 63.



**Figura 63: Utilización en las zonas de la mesa de arco sumergido**

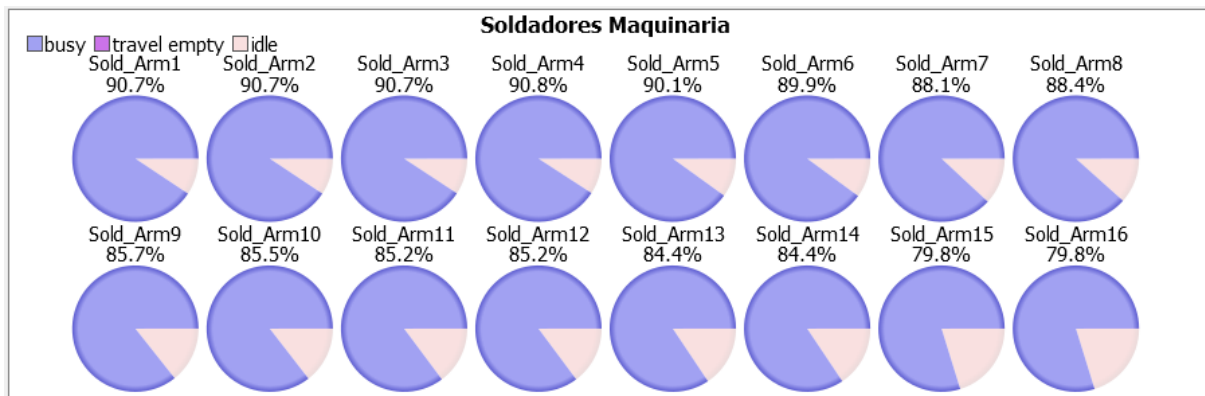
En cuanto a los armadores y soldadores que intervienen en el proceso, el modelo se ha utilizado para conseguir la mejor combinación de recursos dentro de los límites máximos impuestos.

De esta forma las gráficas de la Figura 64 y Figura 65 muestran que ha sido necesario aumentar el número de armadores de 4 a 6, y el número de soldadores de 10 a 16, consiguiendo una utilización medio de entorno al 70 % para el total de los armadores y de aproximadamente el 90% para el total de los soldadores que intervienen en el proceso de fabricación.



**Figura 64: Utilización de los armadores del taller de maquinaria**

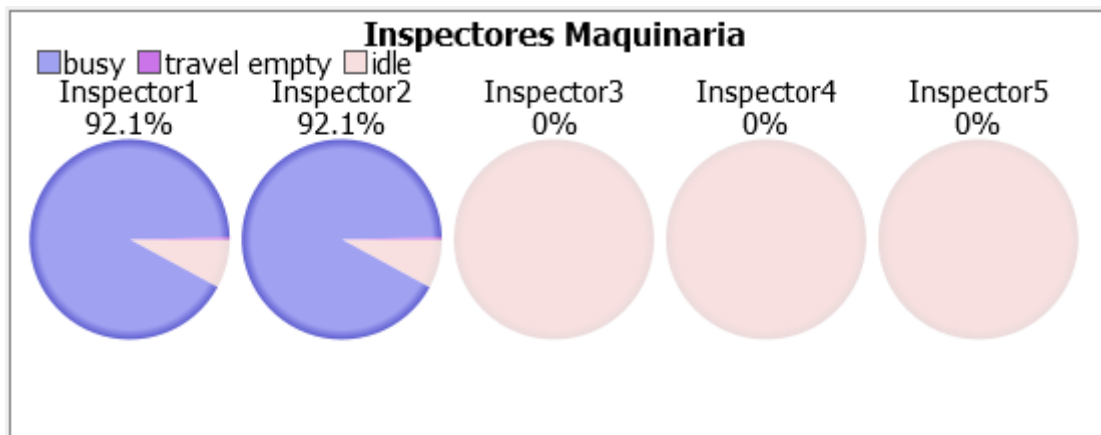
En las gráficas de la Figura 64 y Figura 65, se puede apreciar con facilidad que los primeros operarios tienen una utilización más alta que los últimos. Esto es debido a que se ha utilizado una estrategia de asignación de recursos que utiliza de forma prioritaria a los operarios con mayor experiencia en la empresa, que en este caso se ha asignado la experiencia según el número de trabajador.



**Figura 65: Utilización de los soldadores de ensamblaje de brazos con tiempo de espera antes de la inspección de 24 horas**

De forma contraria ocurre con los inspectores, que como se ha mencionado en los escenarios anteriores su criterio de utilización es según el número de inspecciones que se lleven hechas hasta el momento.

En la Figura 66 es posible apreciar que con esta reducción del tiempo de espera antes de la inspección se consigue un factor de utilización muy bueno para los inspectores, de entorno a un 30% superior a la utilización si hay que trabajar con una espera de 48 horas antes de la inspección.



**Figura 66: Utilización de los inspectores del taller de maquinaria con 2 inspectores**

Por otro lado, este aumento en la utilización de los inspectores hace que se tenga una mayor acumulación de informes pendientes de entrega, obteniendo un valor medio de aproximadamente 40 informes pendientes a lo largo de la vida del proyecto, con picos de entre 90 y 100 informes pendientes.



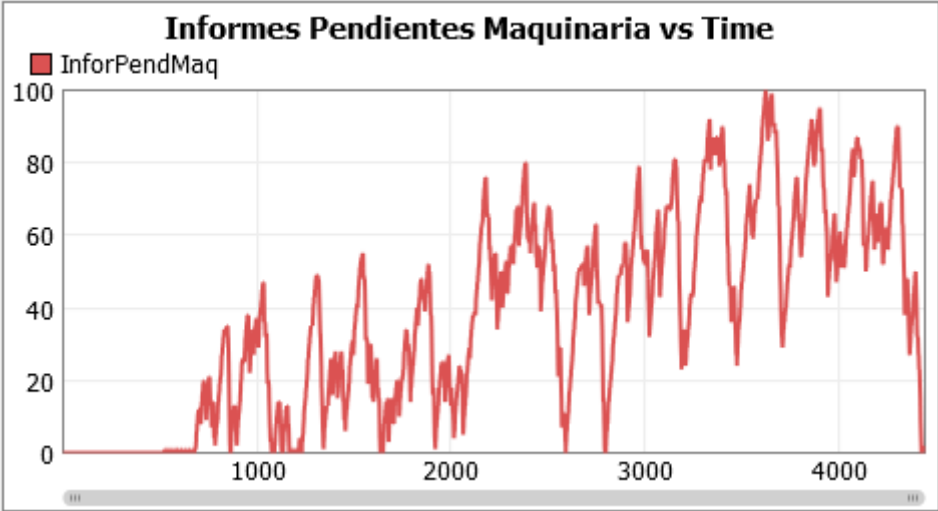


Figura 67: Evolución de los informes pendientes de entrega en función del avance del proyecto para el escenario 3.



## 7 CONCLUSIONES

El proceso de inspección de las soldaduras tanto en proyectos de eólica marina como en cualquier otro proceso desarrollado en un astillero toma muchas veces una importancia mayor a la que se puede apreciar en una primera instancia, ya que casi la totalidad de los proyectos que se desarrollan en los astilleros dependen de uniones hechas mediante soldadura, ya sea mediante soldadura robotizada o manual.

Por otra parte, las exigencias del mercado de la eólica offshore en cuanto a los procesos de soldadura es muy alta, requiriendo unos niveles de acabado para las uniones soldada muy altos. Esto es comprensible, teniendo en cuenta que se trata de estructuras que trabajarán bajo el agua de mar expuestas a agentes dañinos tales como la corrosión, el más significativo, impactos o colisiones de objetos, fenómenos meteorológicos e incluso fallos en ingeniería de diseño. Además, las tareas de reparación en este tipo de estructuras y, sobre todo, de soldaduras, es mucho más compleja; por ejemplo, no es lo mismo soldar e inspeccionar bajo el agua que en tierra firme.

Por estos motivos, en el presente trabajo fin de master se ha desarrollado un modelo de simulación de eventos discretos en 3D con el software FlexSim, que permite analizar el proceso de inspección de soldaduras en proyectos desarrollados en astilleros, y concretamente se ha particularizado el modelo de simulación para un proyecto de fabricación de piezas de transición, perteneciente a un proyecto real de fabricación de jackets.

Con el proceso de desarrollo del modelo, y la posterior etapa de análisis de escenarios con el modelo de simulación, las principales conclusiones que derivan de este proyecto son:

- Es fundamental definir correctamente en la fase contractual los requerimientos de calidad de las soldaduras, ya que en muchos de los proyectos que se han estudiado para la realización de este TFM y a través de las experiencias compartidas en las entrevistas personales con los expertos en materia de inspección, son muchos los proyectos que de forma contractual exigen un nivel de calidad para las uniones soldadas superior al que los expertos de calidad estiman necesarios para la finalidad del producto final que se está fabricando. Este factor conlleva a que los costes de inspección se eleven, a la vez que se eleva el porcentaje de defectos y en consecuencia el número de reparaciones necesarias.
- Es también de gran importancia en el proceso de inspección tener en cuenta el trabajo de oficina que debe realizar el inspector, ya que por lo que se ha podido comprobar con la realización de este trabajo la realización de los informes de certificación de las soldaduras ocupan gran parte del tiempo del inspector. Si este factor no se tiene en cuenta puede llevar al equipo de proyecto a dimensionar de forma ineficiente el equipo de inspección, lo que llevará al proyecto a acumular informes pendientes de entrega que deberán ser realizados al final del proyecto.
- La negociación del tiempo de espera antes de la inspección es también de gran importancia, ya que como se ha podido ver en el escenario 3, la reducción de un tiempo de espera de 48 a 24 horas afecta significativamente en los resultados del proyecto.
- Con respecto a la simulación de eventos discretos, es importante destacar la facilidad que ofrece este tipo de herramientas para analizar nuevos procesos de fabricación basando en datos históricos de proyectos similares. Permitiendo de esta forma detectar posibles cuellos de botella en la fabricación, así como, dimensionar de forma

eficiente los recursos humanos necesarios para realizar el proyecto de la forma más ajustado posible a contrato inicial. Particularmente, con el modelo de simulación desarrollado para este TFM se han obtenido, con respecto a los casos de estudio que se han presentado, las siguientes conclusiones:

- Evaluando el proceso de inspección de forma cuantitativa, la mejor estrategia de inspección para el proceso de fabricación de las TPs es inspeccionar toda la pieza a final de la fabricación, ya que de esta forma se reducen de forma considerable las visitas de los inspectores a los talleres (entorno al 80% de reducción en las visitas). Además, con esta estrategia se logra un mejor reparto del tiempo de los inspectores, es decir, el inspector logra tener continuidad tanto en sus trabajos de inspección como de realización de informes, y no tiene que realizar visitas puntuales al taller. Con la estrategia de inspección en paralelo con la simulación un mismo inspector llegaba a realizar en el mismo día inspecciones hasta en 3 brazos diferentes.
- La reducción del tiempo de espera antes de la inspección de 48 a 24 horas disminuye el tiempo total de fabricación entorno al 35%, con el condicionante de aumentar los armadores en 2 operadores y los soldadores en 6 operadores. En caso de no ser posible aumentar los recursos para las tareas de armado y soldeo el efecto de la reducción del tiempo de espera antes de la inspección se puede considerar despreciable, ya que solo se logra una reducción del tiempo final de fabricación de entre el 3 y 5%.
- Por último destacar la importancia de utilizar un software de eventos discretos en 3D, ya que, con la utilización de un software de simulación en 3D se obtienen grandes ventajas con respecto a la utilización de una versión de software 3D. Dichas ventajas se obtienen en mayor medida a la hora de validar los resultados obtenidos, y también a la hora de presentar el modelo de simulación a la gente experta en la materia, que gracias al componente 3D podrá detectar con facilidad los errores que se hayan podido cometer a la hora de diseñar el modelo.

Y para terminar, en base a todo lo expuesto en este TFM, ha quedado de manifiesto que la utilización de la simulación puede ser de gran ayuda para determinar las necesidades de un proyecto, tanto a nivel de instalaciones físicas como a nivel de recursos humanos. Haciendo posible la detección de las etapas del proyecto con mayor actividad, así como, poder hacer estimaciones de la cantidad de operaciones que deberá hacer cada operario, o encontrar la estrategia de reparto de trabajo que mejor se adapte a las necesidades del proyecto.

## 8 FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

Para finalizar este TFM se ha considerado de buena praxis la descripción de unas líneas futuras de trabajo que podrían ser de gran valor para completar este trabajo. Algunas de éstas ya se han comentado en el transcurso de la realización de este trabajo.

Principalmente, se considera que la línea de futuro con más interés es la integración de los módulos de inspecciones desarrollados en FlexSim en un modelo completo de fabricación de jackets, es decir, un modelo de simulación que además de contemplar la fabricación de la TP tenga también en cuenta la fabricación de las JUB, JLB y los piles, e incluso las etapas de inspección de la materia prima. De esta forma se podrían estudiar escenarios tales como:

- La contratación de una sola empresa para inspeccionar las soldaduras en todas las etapas de fabricación de la jacket.
- La contratación de varias empresas que se encargasen de forma independiente de las tareas de inspección de cada bloque de la jacket.
- La inspección de la totalidad de la materia prima, o la inspección por lotes de material.
- La posibilidad de detectar qué elementos, piezas o soldaduras tienen mayor posibilidad de defectos con el objetivo de encontrar una estrategia que los minimice.
- La posibilidad de introducir un nuevo equipamiento de inspección estudiando el impacto de éste en el proceso de fabricación.

Este último punto tiene especial relevancia para este apartado, ya que actualmente existe una técnica de ultrasonidos, denominada Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT) poco utilizada hasta ahora en estructuras offshore debido a que la normativa actual todavía no contempla la utilización de este equipo en este tipo de estructuras, aunque expertos en la materia manifiestan su aprobación a su utilización.

El funcionamiento es semejante a la de ultrasonidos, lo que varía únicamente es el palpador ya que, a diferencia del estándar, este modifica electrónicamente las características del palpador: ángulo, punto de salida del haz y/ diámetro del cristal. De esta manera, el palpador recogería la información de un mismo punto en los ángulos deseados, sin que el operador tenga que cambiar el ángulo del palpador manualmente. Esta técnica minimizaría los errores debidos a fallos en la medida.



**Figura 68: Tecnología Phased Array.**

## 9 BIBLIOGRAFÍA

- [1] EWEA, “Wind energy scenarios for 2030,” *Ewea*, no. August, pp. 1–8, 2015.
- [2] Wind Europe, “Offshore Wind in Europe Offshore Wind in Europe,” 2018.
- [3] R. Bogue, “M DT — so much more than quality control.”
- [4] L. J. Bond, “From NDT to Prognostics : Advanced Technologies For Improved Quality , Safety And Reliability.”
- [5] A. E. Journal, “Cost Analysis of Poor Quality Using a Software Simulation,” 2017.
- [6] J. P. Clark, R. Roth, and C. Schuh, “Cost of quality tradeoffs in manufacturing process and inspection strategy selection by Hadi Zaklouta in partial fulfillment of the requirements for the degree of Department of Materials Science and Engineering Certified by ..... ,” 2011.
- [7] H.-A. Crostack, M. Höfling, and J. Liangsiri, “Simulation in Quality Management – An Approach to Improve Inspection Planning,” *Acta Polytech.*, vol. 45, no. 3, 2005.
- [8] Curso de Ingeniero Internacional de Soldadura (IWE) – Asociación Española De Soldadura y Tecnologías de la Unión (CESOL), 2015
- [9] Documentación proyecto EA One., 2017-2018
- [10] Curso Introducción a la fabricación de estructuras offshore, 2017
- [11] Ferreño, JM., "Dimensionamiento dinámico de las estaciones de trabajo en una línea de fabricación de piezas de transición de jackets para un parque eólico marino", 2018.
- [12] Casadiego, R, "Guía del usuario para el modelamiento y análisis con el software FlexSim", 2012.

Páginas Web de consulta:

- [13] <http://www.irena.org/>
- [14] <http://gwec.net/>
- [15] <https://www.aeeolica.org/>
- [16] <http://orbit.dtu.dk/>
- [17] <https://windeurope.org/>
- [18] <https://insights.globalspec.com/>
- [19] <https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/>
- [20] <https://www.marinelink.com/>
- [21] <https://www.evwind.com/>
- [22] <https://umi.udc.es/>
- [23] <https://www.navantia.es/>
- [24] <https://www.talumis.com/>



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

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

---

*CUANTIFICACIÓN DEL IMPACTO DE LOS ÍNDICES  
DE DEFECTOLOGÍA EN PROYECTOS DE EÓLICA  
MARINA MEDIANTE DES*

---

**Máster en Ingeniería Industrial**

**Documento**

**PRESUPUESTO**





## 1 CAPÍTULOS PRESUPUESTO

### Capítulo I. Ingeniería.

UNIDADES		DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	TOTAL EUROS
350	Horas	Ingeniería de análisis y desarrollo del modelo de simulación 3D	50,00 €	17.500,00 €
5	Ud.	Traslados por vista al proyecto	25,00 €	125,00 €
<b>TOTAL CAPÍTULO 1</b>				<b>17.625,00 €</b>

### Capítulo II. Licencias del software.

UNIDADES		DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	TOTAL EUROS
1	Ud.	Windows 10 Profesional versión de 64 bits	145,00 €	145,00 €
1	Ud.	Microsoft Office 365 Personal	69,00 €	69,00 €
1	Ud.	FlexSim 2017	7500,00 €	7500,00 €
<b>TOTAL CAPÍTULO 2</b>				<b>7.714,00 €</b>

### Capítulo III. Equipamiento

UNIDADES		DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	TOTAL EUROS
1	Ud.	Ordenador PC portátil formado por CPU Intel Core i7 2,6GHz, con RAM de 8 Gb, pantalla LCD de 15,6", teclado y ratón	1.200,00 €	1.200,00 €
1	Ud.	Material de oficina	250,00 €	250,00 €
<b>TOTAL CAPÍTULO 3</b>				<b>1.450,00 €</b>

---

## 1.1 RESUMEN POR CAPÍTULOS

CAPÍTULO I	Ingeniería	17.625,00 €
CAPÍTULO II	Licencias del software	7.714,00 €
CAPÍTULO III	Equipamiento	1.450,00 €
	<b>IMPORTE DE EJECUCIÓN MATERIAL</b>	<b>26.789,00 €</b>
	13 % GASTOS GENERALES	3.482,57 €
	6 % BENEFICIO INDUSTRIAL	1.607,34 €
	<b>IMPORTE DE EJECUCIÓN</b>	<b>31.878,91 €</b>
	21% DE I.V.A.	6.694,58 €
	<b>IMPORTE DE CONTRATA</b>	<b>38.573,49 €</b>

El presupuesto total de contrata asciende a la cantidad de **38.573,49 € (TREINTA Y OCHO MIL QUINIENTOS SETENTA Y TRES CON CUARENTA Y NUEVE CÉNTIMOS)**.

Ferrol, septiembre 2018



**María Cristina Fernández Pernas**