



# ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO INDUSTRIAL

Título del proyecto:

OPTIMIZACIÓN DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE  
UN AEROGENERADOR MEDIANTE EL DISEÑO DE  
TAREAS DE SU FUERZA DE TRABAJO

Jorge Gállego Pérez de Larraya

Javier Faulín Fajardo

Pamplona, Septiembre 2014



# ÍNDICE

Introducción .....	5
<b>Parte I</b>	
<hr/>	
<b>Capítulo 1      Mantenimiento industrial .....</b>	<b>8</b>
1    La evolución del mantenimiento industrial .....	8
2    El concepto de Mantenimiento .....	12
3    Otros conceptos asociados al Mantenimiento .....	13
4    Objetivos del Mantenimiento .....	21
5    Tipos de Mantenimiento .....	22
6    Mantenimiento Correctivo .....	23
7    Mantenimiento Preventivo .....	24
8    Mantenimiento Predictivo .....	30
9    Nuevas técnicas de Mantenimiento: RCM y TPM .....	33
10    El Mantenimiento desde una perspectiva económica .....	37
<b>Capítulo 2      Los Aero generadores .....</b>	<b>39</b>
1    La energía eólica .....	39
2    La energía eólica en la actualidad .....	44
3    Características de la energía eólica .....	48
4    ¿Cómo sacar más provecho al viento? .....	53
5    ¿Cómo funciona un aerogenerador? .....	54
6    Descripción de un aerogenerador .....	58
7    Breve descripción de la implantación de un parque eólico .....	66
8    Organización del negocio eólico .....	68
9    Coste del uso de la energía eólica .....	68
10    Costes y ciclo de vida de un Parque Eólico .....	73
<b>Capítulo 3      El Mantenimiento en los aerogeneradores .....</b>	<b>74</b>
1    Mantenimiento y aerogeneradores .....	74
2    Características del mantenimiento de parques eólicos .....	76
3    Objetivos de la «Operación y Mantenimiento» en un Parque Eólico .....	76
4    Niveles de actividades de mantenimiento .....	77
5    Indicadores clave para el mantenimiento .....	78
6    Origen de averías .....	82

7	Tipos de averías.....	83
8	Distribución de fallos por subsistemas y componentes.....	84
9	Frecuencia y tiempo de paradas por fallo.....	84
10	Organización de las labores de mantenimiento.....	85
11	Estructura organizativa del mantenimiento.....	88
12	Tipos de mantenimiento en las instalaciones eólicas.....	89
13	Mantenimiento preventivo.....	91
14	Mantenimiento correctivo.....	95
15	Mantenimiento predictivo.....	96
16	Modificaciones de diseño.....	101
17	Ventajas y desventajas de los tipos de mantenimiento.....	103
18	Ejemplos de mantenimiento en aerogeneradores.....	104
<b>Parte II</b>		
<hr/>		
<b>Capítulo 4</b>	<b>Descripción del problema.....</b>	<b>110</b>
1	Descripción del problema.....	110
2	Condiciones del problema.....	114
3	Datos de partida.....	119
4	Resumen de las restricciones del problema.....	120
5	Objetivo del PFC.....	121
6	Metodología de resolución.....	122
7	Técnicas de Monte Carlo.....	128
<b>Capítulo 5</b>	<b>Programa.....</b>	<b>129</b>
1	Resolución.....	129
2	Pseudocódigo.....	136
3	Afinación del programa.....	143
4	Proceso de afinación.....	144
5	Resultados de la afinación.....	145
<b>Capítulo 6</b>	<b>Resultados y Conclusiones.....</b>	<b>149</b>
1	Resultados.....	149
2	Solución.....	150
3	Conclusiones.....	152
Bibliografía.....		154
Índice de figuras.....		156
<b>Parte III</b>		
<hr/>		
Código fuente del programa.....		159
CD-rom.....		263

*“Mire vuestra merced que aquellos que allí se parecen no son gigantes, sino molinos de viento, y lo que en ellos parecen brazos son las aspas que, volteadas del viento, hacen andar la piedra del molino”*

Miguel de Cervantes, Don Quijote de la Mancha.

## Introducción

Siempre que paso al lado de cualquier molino llego a la extraña conclusión de que es un milagro que la pobreza de nuestros sentidos no pase desapercibida. Sobre todo cuando estas máquinas inmensas se elevan decenas de metros sobre el suelo.

Hace mucho tiempo el ingenio humano hizo un pacto con la Naturaleza para moler el grano sin esfuerzo y este fue el resultado: la aventura de una tecnología que se remonta, en muchos casos, al siglo XVI, y desemboca hasta nuestros días con los modernos parques eólicos.

Molinos o gigantes, este trabajo está dedicado a los pilares del verdadero auge de la generación eólica, los aerogeneradores, su tecnología y el mantenimiento que los condiciona.

En la primera parte se aborda el mundo del mantenimiento industrial, el recorrido histórico trazado por estos ingenios y se describe su funcionamiento y particularidades. El objetivo no es comprender el fundamento teórico, sino ofrecer una perspectiva diferente a la que se puede encontrar en la abundante bibliografía.

En la segunda parte se describe el problema protagonista de este proyecto final de carrera situado en el contexto del mantenimiento preventivo: el planteamiento inicial del problema propuesto y las restricciones consideradas, la metodología de resolución adoptada, los resultados obtenidos y las conclusiones.

Nadie duda de la singularidad de estas construcciones, basta estirar los ojos hacia donde está colgado el sol para comprender que aspectos como la ubicación

geográfica, los accesos, las condiciones climatológicas, los trabajos realizados en altura, la preparación y la alta autonomía que requieren los operarios, etc., ponen de manifiesto cómo la planificación de las distintas labores de mantenimiento es uno de los puntos más complicados en la actividad de mantenimiento de un parque eólico.

De ahí el interés personal depositado en este proyecto final de carrera cuyo desarrollo, a pesar de la dificultad que planteaba y los difíciles momentos que siempre acompañan, sin duda ha merecido la pena.

Y es que Sancho Panza nos dio la mejor definición de estas obras que dan vida al paisaje español, pero fue Don Quijote quien las empapó de poesía al compararlas con gigantes de brazos largos.

Sin embargo, los molinos de viento no son sólo algo interesante por las emociones estéticas que se experimentan al contemplarlos, por los comentarios de tipo ensayísticos a que se prestan, sino porque su invención, multiplicación y perfeccionamiento constituyeron ayer y hoy un capítulo importante en la historia de la técnica.

*Hamburgo - Barcelona - Pamplona  
Septiembre de 2014  
Jorge Gállego*

## Parte I

# Capítulo 1 MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

## 1 La evolución del mantenimiento industrial

Con la llegada del siglo XX nace el mantenimiento industrial tal como hoy en día lo conocemos. Sin embargo es preciso pensar y admitir que su origen está ligado a la aparición de las primeras máquinas que el hombre utilizó, y que junto al uso de las primitivas herramientas coexistía una clase de cuidados que buscaban mantener sus características originales e incluso mejorar su desempeño.

A finales del siglo XVIII y comienzos del XIX, durante la revolución industrial, las tareas de reparación de las máquinas entraron a formar parte del proceso de producción de la industria. Es lo que se denominó el *mantenimiento correctivo*.

Las profundas transformaciones económicas que comenzaban a producirse en la sociedad, la búsqueda del beneficio económico como un objetivo de la producción y la aparición de la competitividad entre las principales industrias, hizo plantearse la necesidad de una reducción de los costes de producción. Este abaratamiento pasaba inevitablemente por lograr el aprovechamiento máximo de los equipos de producción y, en consecuencia, obligaba a realizar un mantenimiento de los mismos.

La mayoría de las referencias bibliográficas que hay sobre el mantenimiento afirman que son tres las etapas por las que evolucionó a lo largo del pasado siglo XX.

El mantenimiento organizado se aplicó por primera vez en las fundiciones de los Estados Unidos, en submarinos y aviones militares durante la Primera Guerra Mundial. Más tarde se introdujeron las primeras técnicas de verificación mecánica en granjas agrícolas y en los transportes, y se empezó a pensar en lo importante que era reparar antes de que se produjera el desgaste o la rotura para evitar así interrupciones en el proceso de producción. De este modo se sentaron las bases de lo que más adelante iba a ser el mantenimiento preventivo.

En la Segunda Guerra Mundial y durante la posguerra el mantenimiento experimentó un desarrollo muy importante impulsado por las aplicaciones militares, principalmente los programas de *mantenimiento preventivo* que se llevaron a cabo en la Armada y en la Fuerza Aérea de los Estados Unidos. Estos programas consistían en:

- La inspección de los aviones antes de cada vuelo y el reemplazo periódico de ciertos componentes después de un número determinado de horas de vuelo.
- La sistematización del cálculo de probabilidades aplicado a la cuantificación de la fiabilidad de componentes, con el fin de mejorar la fiabilidad del conjunto.
- El uso de equipos redundantes para disminuir las tasas de fallo de algunos procesos de producción.
- La aplicación de técnicas de ensayo y análisis de los parámetros funcionales de las máquinas que mostraban indicios acerca de su estado, lo que permitía su reparación o el reemplazo según condición, consiguiendo con ello disminuir la probabilidad de fallo de las máquinas.

En este contexto se definió por primera vez el objetivo de la disponibilidad en la operación de los medios de producción (barcos, aviones y ferrocarriles) con los costes más bajos. Así, comenzaron a distinguirse dos líneas de trabajo bien definidas dentro del mantenimiento industrial:

1. Técnicas de análisis de fiabilidad de los equipos
2. Técnicas de verificación mecánica.

Dentro de la primera línea destaca la planificación y el control del mantenimiento. Y es que fue de gran utilidad disponer de enormes cantidades de información estadística que reflejaba la evolución histórica de las máquinas y sus averías. De este modo se describieron diversos métodos para optimizar el mantenimiento. Por ejemplo, fue en esta etapa –durante la Segunda Generación– cuando despegaron los sistemas de *mantenimiento preventivo* basados en revisiones periódicas de los equipos, sistemas e instalaciones, incorporando las reparaciones programadas en caso de fallo.

La rivalidad industrial que reinó desde entonces hasta finales de los años 70, con la incorporación de los fabricantes orientales al mundo competitivo occidental, desencadenó una continua búsqueda de mejores resultados.

Referido a la segunda línea fue muy importante el desarrollo que experimentaron las técnicas predictivas. J. S. Shore recogió las manifestaciones vibratorias producidas por los defectos más frecuentes de la maquinaria rotativa que, todavía hoy en día, constituyen la base fundamental del mantenimiento predictivo que se aplica en un gran sector de la industria.

Hasta la década de los 80 el mantenimiento –de Segunda Generación– se había optimizado en cuanto a la frecuencia y la efectividad de las revisiones periódicas. Sin embargo, los indicadores más importantes, que eran la fiabilidad, la disponibilidad y los costes, se habían estabilizado alcanzando una cima. En esta situación la mejora de cualquiera de los indicadores provocaba el empeoramiento del resto. Por ejemplo, si se minimizaban los costes reduciendo el consumo de materias primas, la disponibilidad y/o mantenimiento se veían reducidos. Por otro lado, si se aspiraba a aumentar la disponibilidad reduciendo las paradas por revisión, la fiabilidad iba a empeorar. Y por último, si se quería mejorar la fiabilidad con un mayor estudio y análisis de las averías más frecuentes o complejas, o mediante reformas en los equipos o instalaciones, la disponibilidad también se iba a ver perjudicada.

Al alcanzar esta cima se empezó a hablar del mantenimiento de Tercera Generación. Un mantenimiento que fundamentaba sus objetivos en los tres ya expuestos –la fiabilidad, la disponibilidad y los costes– pero que abordaba otros objetivos complementarios ignorados por las anteriores etapas del mantenimiento. Por ejemplo, en las dos últimas décadas del siglo pasado la seguridad pasó a ser una prioridad. Aparecieron normativas, reglamentos, leyes, órdenes, etc. La calidad en los servicios de mantenimiento fue adquiriendo mayor importancia. La protección del medio ambiente pasó igualmente a ocupar un puesto clave en cualquier actividad de mantenimiento. Además, el análisis detallado de los costes del ciclo de vida, básico para conocer la duración de las máquinas, fue vital para las decisiones de compra de nuevos equipos.

La filosofía y las técnicas del mantenimiento de esta etapa –Tercera Generación– incorporaron nuevos métodos para intervenir en los equipos sólo cuando era necesario, evitando las acciones preventivas y rutinarias a menos que éstas tuvieran una eficacia y rentabilidad contrastadas. Así es como nacieron los *mantenimientos según condición* y los *mantenimientos predictivos*, destinados a intervenir en la máquina antes de que se produjera un fallo o un grave deterioro gracias al análisis de la evolución de variables más significativas que diagnosticaban el estado de la máquina.

En esta etapa se hizo necesario valorar aspectos como la fiabilidad y la mantenibilidad en el diseño de los equipos e instalaciones, planteándose una reingeniería de los procesos de mantenimiento. Así es como aparecieron los análisis de riesgo, de causa y efecto. Es decir, si el fallo de un equipo no suponía ningún riesgo o dicho riesgo era mínimo y asumible, quizás era más rentable dejar que fallara. Además, no sólo había que analizar la avería, sino que había que ver y buscar sus causas dentro de un escenario de operación determinado. Si las causas eran diferentes, las acciones que había que emprender debían ser diferentes.

A partir de la década de los 80 surgieron nuevas variables a tener en cuenta: la contratación externa de actividades de mantenimiento para reducir costes y aumentar la flexibilidad. Esta clase de contratación fue considerada entonces –y los es hoy– una línea de mejora para todo sector o empresa. De ahí, su importancia. Así mismo creció el papel de los grupos de trabajo, ya fueran grupos de calidad, grupos de mejora, etc., que profundizaban en la iniciativa y en la innovación involucrando a los equipos técnicos y directivos, provocando un cambio en las relaciones humanas de los departamentos de mantenimiento. El desarrollo de aparatos robotizados, autómatas programables y otros equipos de tecnología punta iba a exigir contar con un personal de mantenimiento más cualificado.

Todas estas etapas que describen la compleja evolución del mantenimiento industrial desde el *mantenimiento correctivo*, con el que se atendían las averías, hasta el *mantenimiento preventivo sistemático*, con sus intervenciones programadas, así como el desarrollo del *mantenimiento condicional o predictivo* en función del estado de los equipos, ha sido revisado a lo largo de las últimas décadas. La progresión no ha

terminado y por eso hoy asistimos a una mutación, todavía en curso, hacia la cuarta generación del mantenimiento industrial.

Como conclusión –sin entrar más a fondo en la etapa que vivimos actualmente– hay que destacar la necesidad de integrar todos los nuevos conceptos de mantenimiento que en las últimas décadas se han ido planteando la mayoría de las veces de manera aislada. Por ello, los actuales conceptos aunque no nuevos de RCM –*Reliability Centered Maintenance* o *Mantenimiento centrado en la fiabilidad*– y de TPM –*Total Productive Maintenance* o *Mantenimiento total de la productividad*– no deben verse como técnicas únicas y excluyentes, válidas por sí solas.

Es obvio que la importancia del mantenimiento crece a medida que los equipos se hacen más sofisticados y complejos. En consecuencia, el mantenimiento no sólo adquiere importancia por ser un medio para optimizar la disponibilidad de los equipos sino, además, por la creciente demanda de las empresas que buscan conservar su eficacia en un mundo global y competitivo.

## 2 El concepto de Mantenimiento

La palabra «mantenimiento», del latín *manutener* (de *manu*, mano y de *tenere*, tener) tiene su origen en el vocabulario militar y designaba la acción de mantener operativas y listas para el combate las unidades más experimentadas, gracias a los complementos materiales de los soldados. La idea elemental era que mantener es dominar. Centrándonos más en el concepto actual, la aparición del término en la industria sucedió hacia 1950 en los Estados Unidos.

Aunque son muchas las normativas que afectan al mantenimiento y cada día son más las directivas europeas que se trasladan y traducen al marco legislativo español aportando un mar de definiciones, el mantenimiento es, en el sentido estricto del término, –según la norma EN 13306:2002– una “*combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y de gestión durante el ciclo de vida de un elemento, destinadas a conservarlo o devolverlo a un estado en el cual puede desarrollar una función requerida*”.

Otra definición importante la aporta la Asociación Francesa de Normalización –AFNOR– quien define el mantenimiento como un “*conjunto de actividades destinadas a mantener o restablecer un bien a un estado o a unas condiciones dadas de seguridad en el*

*funcionamiento, para cumplir con una función requerida. Estas actividades suponen una combinación de prácticas técnicas, administrativas y de gestión”.*

A la vista de las definiciones anteriores, el objetivo fundamental del mantenimiento y de toda su organización es el de lograr con el mínimo coste posible y la máxima seguridad para el personal y las instalaciones, y el máximo respeto para el medio ambiente, el mayor tiempo de funcionamiento correcto y eficiente de los activos –equipos e instalaciones– mantenidos.

En el contexto empresarial, la función de mantenimiento es una de las tres funciones técnicas de la industria y tiende a separarse de la producción, que sigue siendo el objetivo evidente y prioritario de una empresa. Sin embargo constituye una ayuda fundamental a la producción.

Desde un punto de vista más amplio, el mantenimiento es una disciplina con la que, antes o después, se relacionan todas las demás disciplinas involucradas en el proceso de producción. Esta interrelación hace que la función de mantenimiento constituya uno de los pilares fundamentales que condiciona la eficiencia de cualquier industria moderna. ¿Por qué? Porque el resto de disciplinas involucradas dependen en mayor o menor medida del mantenimiento; de tal forma que cualquier intento de producción sin mantenimiento resulta nefasto aunque el resto de tareas se realicen con gran perfección.

Los sistemas de producción están compuestos por una serie de dispositivos y de personas que se relacionan de alguna manera entre sí para lograr como resultado unos determinados bienes y servicios. Estos sistemas requieren hoy en día unos altos niveles de eficacia para ser competitivos. Es decir, deben mantener una determinada capacidad, durante un determinado periodo de tiempo, en el que se programa su funcionamiento. Además, han de ser eficientes para poder garantizar la eficacia requerida utilizando un nivel adecuado de recursos.

### **3 Otros conceptos asociados al Mantenimiento**

Retomando la última idea del mantenimiento industrial, cualquier persona es consciente de que, independientemente del diseño de un sistema productivo, de la tecnología empleada o de los materiales usados en su fabricación, a lo largo de su

funcionamiento se producirán ciertos cambios irreversibles. Estos cambios son, por ejemplo, la consecuencia de procesos tales como la corrosión, la abrasión, la acumulación de deformaciones, la distorsión, los sobrecalentamientos, la fatiga, la difusión de un material, etc. A menudo estos procesos de deterioro se superponen interactuando unos con otros y causando un cambio en el sistema, con lo cual cambiarán las características de actuación del sistema surgiendo incidentes denominados fallos. Y lo más importante, los fallos pueden llegar a impedir la eficacia del sistema de producción y, en la mayoría de los casos, disminuyen su eficiencia.

### 3.1 ¿Qué se entiende por fallo?

Si echamos la vista atrás y nos fijamos en las definiciones que nos aportan las dos normas anteriormente citadas, vemos que en ningún momento se habla de fallo en sí mismo, sino de “cumplir” o “poder desarrollar”. Es decir, se trata del cumplimiento o incumplimiento de una función requerida.

Entonces, ¿qué se entiende por fallo? Un fallo es el cese de la capacidad de un elemento –toda parte, componente, subsistema, unidad funcional, equipo o sistema que pueda considerarse de manera individual– para realizar una función requerida. Dicho de otro modo, un fallo es un suceso, un evento, un hecho que provoca o bien la pérdida de capacidad para realizar las funciones requeridas, o bien la pérdida de capacidad para satisfacer los requisitos especificados. Por tanto, tras el fallo el elemento se encuentra en estado de avería. Fallo es el puente, el paso de un estado a otro, la transición del sistema desde su estado satisfactorio a un nuevo estado insatisfactorio, conocido como estado de fallo.

### 3.2 ¿Qué causa el fallo y por qué?

Si pensamos en la capacidad de un elemento para cumplir unas determinadas especificaciones requeridas, todos los sistemas creados por el hombre pueden encontrarse en uno de los dos posibles estados: estado de funcionamiento (o estado satisfactorio) y estado de fallo.

Siempre que un fallo tiene lugar existe el mecanismo, el hecho, la causa que lo hace posible, el cómo se ha producido esa pérdida de capacidad del elemento. El cómo

–que será un proceso físico, químico o de otro tipo que conduce al fallo– se denomina modo de fallo del elemento.

Además de conocer el cómo se produce el fallo del elemento, es necesario averiguar por qué ha tenido lugar. Es decir, encontrar la razón que ha conducido al fallo o causa de fallo. Las causas del fallo serán circunstancias que lo provocan. Existen fallos de diseño, fallos de fabricación, fallos de instalación, fallos por mal uso, fallos por mal manejo y fallos que son el resultado de un mantenimiento incorrecto o inadecuado.

Para que un sistema recupere la capacidad de realizar una función es necesario realizar unas tareas específicas –tareas de mantenimiento– porque se entiende que después de haber fallado se puede recuperar la capacidad del sistema para realizar una función requerida.

### **3.3 Un ejemplo relacionado**

Como repaso a los conceptos anteriores fijémonos en un ejemplo que describe el contexto de este Proyecto Fin de Carrera. Los molinos de viento o aerogeneradores integran tecnologías conceptualmente sencillas pero sometidas a la variabilidad del viento tanto en intensidad, turbulencia, dirección o componente vertical. Además, los equipos principales se encuentran a elevadas alturas y, en algunos casos, son de difícil acceso. Por otro lado, los aerogeneradores deben mantener un elevado nivel de disponibilidad durante periodos de tiempo que, hoy en día, superan los veinte años. Como es de imaginar, los molinos de viento, como cualquier equipo o instalación necesitan mantenimiento y los componentes que los integran están sometidos a acciones que los deterioran en el tiempo, lo cual modificará en cierta medida su funcionamiento y, con ello, el del propio molino de viento. Considerando este escenario, en las palas de un molino de viento pueden descubrirse fisuras y fallar éstas en su función de aprovechar la energía cinética del viento. El cómo se ha producido el fallo –el modo de fallo– es atribuible a la fatiga de los materiales, es decir, al desarrollo de tensiones variables en los materiales compuestos. Ahora bien, por qué se produce la variación de tensiones, la causa que

motivó el fallo, podría no estar clara. Se podrían dar, en este caso, distintas explicaciones.

### 3.4 Tipos de fallos

Existe un gran número de averías capaces de reducir el rendimiento de los equipos y procesos industriales. Todos ellos se pueden clasificar siguiendo criterios: según su naturaleza física, (mecánicas, eléctricas, hidráulicas, etc.), según su gravedad, según la parte del proceso o del equipo al que afecten, etc.

Como se puede comprobar en el ejemplo, no es fácil averiguar las causas de determinados modos de fallo. Es necesaria experiencia y, en muchos casos, un buen número de recursos y horas de investigación para acercarse al origen, evolución y posibles causas, ya que todo método de diagnóstico se va a basar en dicha información.

Los elementos tendrán fallos primarios cuando la causa directa o indirecta no es un fallo en otro elemento. Por ejemplo, el desgaste del borde de ataque de las palas se podría explicar por un fenómeno tribológico al estar la pala sometida a la abrasión y adhesión de partículas procedentes del aire.

Los fallos secundarios son aquellos cuya causa directa o indirecta sí es un fallo de un elemento. Obsérvese, también, que puede ser un subsistema completo el que falle con motivo de algún tipo de desajuste existente entre los elementos que lo componen. Puede suceder esto incluso en el caso de que todos los elementos del subsistema se encuentren en buenas condiciones de funcionamiento, lo que pone de manifiesto el carácter sistemático de los procesos productivos.

Con todo lo expuesto, es fundamental que exista la capacidad de clasificación de los distintos modos de fallo de los elementos que componen las instalaciones a mantener, sin que por ello exista discriminación entre sus posibles causas. Podremos asociarlos a funciones de distribución de probabilidades. De este modo será posible hacer una clasificación de los fallos de acuerdo con la naturaleza de esta función de distribución.

De modo general, se podría hacer la siguiente agrupación:

- *Fallos por desgaste*: fallo cuya probabilidad de que ocurra aumenta con el tiempo de operación, con el número de operaciones realizadas por el dispositivo o con los esfuerzos aplicados:
  - Régimen de funcionamiento
  - Régimen de Mantenimiento
  - Condiciones tribológicas
  - Propiedades de los materiales
  - Medio de trabajo
- *Fallos repentinos*: fallo que no puede preverse por examen o monitorización previos. Es decir, su probabilidad de que ocurra es prácticamente constante en el tiempo de operación o de calendario.
  - Condiciones ambientales
  - Malas especificaciones o utilización inadecuada
  - Mantenimiento inadecuado
  - Control de proceso ineficaz
  - Ciclos de carga

Hay que tener claro que todos los fallos no son iguales. Más allá de que sean similares, cada fallo puede tener efectos muy diferentes. Determinar las consecuencias de cada fallo orientará las respuestas del mantenimiento para resolver cada problema específico. Estas respuestas podrían ser de prevención, predicción, rediseño, sustitución periódica, no mantenimiento, etc. Obviamente, aquellos fallos críticos que son capaces de producir heridas a personas, capaces de dañar el medio ambiente o producir daños materiales significativos, serán los que necesiten una mayor atención.

### 3.5 Capacidad y Disponibilidad

Ya hemos apuntado anteriormente que todos los sistemas creados por el hombre pueden encontrarse en dos posibles estados, el estado de funcionamiento –estado de disponibilidad– y el estado de fallo –estado de indisponibilidad–.

Cuando hay un cese en el suministro de los medios externos necesarios para el funcionamiento de un equipo, éste se encuentra entonces en un estado de incapacidad externa, o de inaptitud para cumplir una función requerida. Por otro lado, puede encontrarse en un estado de incapacidad interna debido a una avería o durante el mantenimiento. El estado de incapacidad interna coincide por tanto con el estado de indisponibilidad del equipo.

Atendiendo al párrafo anterior, el estado de avería –o simplemente avería– se caracteriza por la inaptitud de un elemento para realizar la función requerida, excluida la inaptitud debida al mantenimiento preventivo u otras acciones programadas, o a una falta de medios exteriores.

Además, cuando un equipo se encuentra disponible, puede hallarse en los siguientes estados:

- *Estado de funcionamiento*: cuando un elemento o equipo realiza la función requerida.
- *Estado de espera*: también llamado estado de reserva, que es un estado de disponibilidad no operativo durante el tiempo requerido, es decir, durante un intervalo de tiempo durante el cual el usuario demanda que el elemento se encuentre en condición de desarrollar su función requerida.
- *Estado de inactividad*: también llamado libre de servicio o de reposo, que es un estado de disponibilidad y de no funcionamiento durante un tiempo no requerido.

Este concepto de disponibilidad es importante si se pretende tener un sistema de producción eficaz. ¿Por qué? Porque la eficacia de un sistema productivo dependerá de su capacidad y de su disponibilidad.

La capacidad de un sistema productivo es su aptitud, esto es, su suficiencia o idoneidad para responder a una demanda de servicio de unas determinadas

características cuantitativas. Mientras que la disponibilidad del sistema de producción es la aptitud del mismo para estar en situación de realizar una función requerida en condiciones dadas en un instante determinado, o durante un intervalo de tiempo dado. Para lograr esa disponibilidad en el conjunto de los elementos de un equipo o una instalación será necesario poner al servicio de la misma una serie de recursos convenientemente gestionados para obtener el máximo de ellos a unos costes razonables.

La disponibilidad de un elemento no implica necesariamente que esté funcionando, sino que se encuentre en condiciones de funcionar. Una medida práctica de la disponibilidad de un elemento como parámetro de referencia es la definida por la relación entre tiempo de operación (tiempo real de funcionamiento correcto produciendo) y el tiempo total que se necesita que funcione (tiempo durante el que se hubiese querido producir).

### **3.6 Fiabilidad, Mantenibilidad y Logística de Mantenimiento**

En un sistema productivo, la seguridad de funcionamiento expresa un concepto general que engloba al conjunto de propiedades utilizadas para describir la disponibilidad y los factores que la condicionan. ¿Qué factores son éstos? Se trata de la fiabilidad, la mantenibilidad y la logística de mantenimiento. En cada uno de estos tres factores incide el mantenimiento.

En primer lugar, la fiabilidad es la aptitud de un elemento para cumplir con una función requerida en sus condiciones normales de utilización y mantenimiento, durante un periodo de tiempo determinado. En consecuencia, si estas condiciones cambian, la fiabilidad también cambiará. Esto significa que sin un adecuado mantenimiento, las previsiones de fiabilidad de los equipos no se cumplen.

La fiabilidad concierne no sólo a quienes la conciben y la realizan sino también a los responsables de mantenimiento por los siguientes motivos:

- *La selección bien ponderada de nuevos equipos;*
- *La definición de la política de mantenimiento que se aplicará;*
- *En caso de necesidad, la mejora de la disponibilidad de los equipos.*

En segundo lugar, ¿cuánto debería durar una tarea de mantenimiento? Esta pregunta está directamente relacionada con el estado de fallo –estado de indisponibilidad– de un sistema. En la mayoría de los casos no es fácil obtener una respuesta porque la principal preocupación de los diseñadores, hasta no hace mucho, era el logro de la funcionabilidad ignorando los aspectos de la recuperación. Actualmente esta situación ha ido cambiando gradualmente hasta aparecer la ingeniería de mantenibilidad: una disciplina científica que estudia la complejidad, los factores y los recursos relacionados con las actividades que debe realizar el usuario para mantener la funcionabilidad de un producto, y que elabora métodos para su cuantificación, evaluación, predicción y mejora.

La importancia de la ingeniería de mantenibilidad está creciendo rápidamente debido a su considerable contribución a la reducción del coste de mantenimiento de un producto durante su uso. Al mismo tiempo, el análisis de mantenibilidad proporciona una potente herramienta a los ingenieros para la descripción cuantitativa de la capacidad de su producto de ser recuperado para el servicio, mediante la realización de tareas de Mantenimiento.

El segundo factor que condiciona la disponibilidad es la mantenibilidad, que no es otra cosa que la capacidad que presenta un equipo determinado para el mantenimiento. De una manera más precisa, la mantenibilidad es la aptitud de un elemento, en unas condiciones dadas de utilización, para ser mantenido o restituido a un estado en el que pueda realizar una función requerida, siempre y cuando su mantenimiento se lleve a cabo en condiciones dadas, y utilizando procedimientos y medios establecidos.

En tercer lugar está la logística de mantenimiento. Mientras que la fiabilidad y la mantenibilidad hacen referencia a aptitudes propias de elementos o sistemas, la logística de mantenimiento tiene que ver con aspectos organizativos. Es decir, es la aptitud de una organización de mantenimiento, en unas condiciones dadas, para proporcionar sobre demanda los medios necesarios para mantener un elemento conforme a una política de mantenimiento dada.

Como conclusión, estas tres definiciones de los factores nos muestran cómo el mantenimiento condiciona la eficacia de los sistemas productivos y debe

considerarse por tanto como un aspecto estratégico, crucial para la obtención de una ventaja competitiva de la empresa, de los productos y servicios por ella ofrecidos.

#### 4 Objetivos del Mantenimiento

Los objetivos primarios del mantenimiento son la consecución de un número determinado de horas disponibles de funcionamiento de la planta, instalación, máquina o equipo en condiciones de calidad de fabricación o servicio exigible con el mínimo costo y el máximo de seguridad para el personal que utiliza y mantiene las instalaciones para la maquinaria, con un mínimo consumo energético, y mínimo deterioro ambiental.

Los objetivos derivados del mantenimiento son una buena gestión de la mano de obra, así como de la prevención y de los materiales.

En otras palabras, estos objetivos se pueden sintetizar en los siguientes puntos:

- *Evitar, reducir, y en su caso, reparar los fallos sobre los bienes.*
- *Disminuir la gravedad de los fallos que no se lleguen a evitar.*
- *Evitar detenciones inútiles o paros de máquinas.*
- *Evitar accidentes.*
- *Evitar incidentes y aumentar la seguridad para las personas.*
- *Conservar los bienes productivos en condiciones seguras y preestablecidas de operación.*
- *Reducir costes.*
- *Alcanzar o prolongar la vida útil de los bienes.*

## 5 Tipos de Mantenimiento

Actualmente existen variados sistemas para acometer el servicio de mantenimiento de las instalaciones en operación. No obstante, hay que destacar que no resulta fácil clasificar los tipos de mantenimiento. Existe una enorme confusión en cuanto a los términos y nombres de las actividades de mantenimiento. Por ello, volviendo a las dos normas citadas anteriormente, hay que decir que ambas aluden de forma explícita a los tipos de mantenimiento. Sin embargo, ambas discrepan parcialmente.

Según la norma *AFNOR NFX 60-010*:

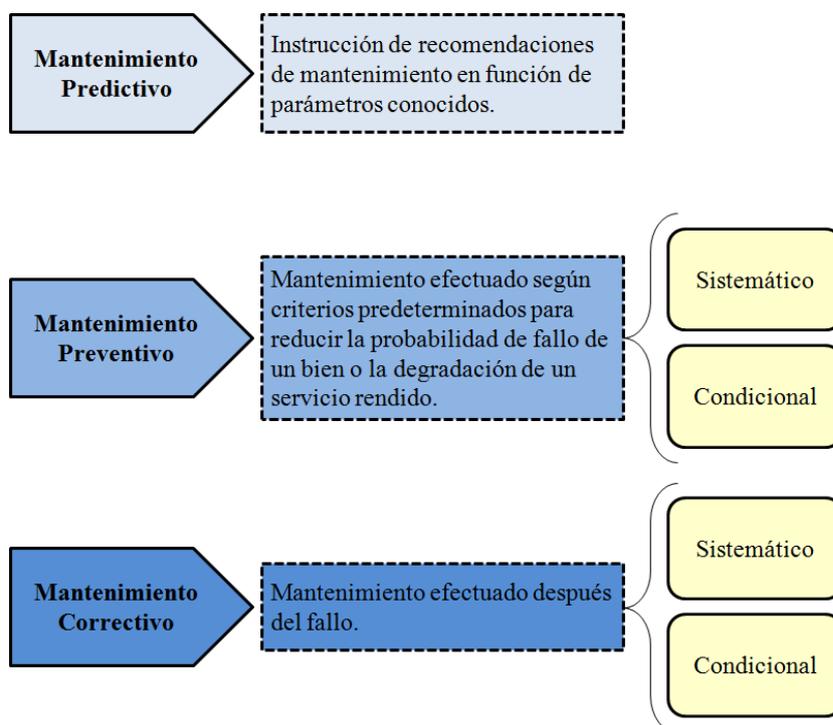


Figura 1 Tipos de Mantenimiento según la norma AFNOR NFX 60-010.

Según la norma *EN-13460*:

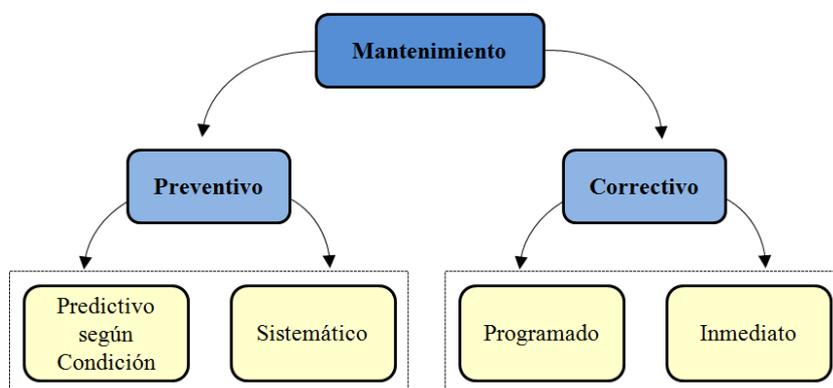


Figura 2 Tipos de Mantenimiento según la norma EN-13460.

## 6 Mantenimiento Correctivo

En este tipo de mantenimiento, también llamado mantenimiento «a rotura», sólo se interviene en los equipos cuando el fallo ya se ha producido. Se trata de una actitud pasiva frente a la evolución del estado de los equipos esperando la avería o el fallo. Este tipo de mantenimiento se practica en una gran cantidad de industrias y está plenamente justificado en aquellos casos en los que existe un bajo coste de los componentes afectados.

Cuando el fallo de los equipos no supone la interrupción de la producción, las reparaciones pueden ser llevadas a cabo sin perjuicio de ésta. En estos casos, el coste derivado de la aparición de un fallo imprevisto en el equipo es, sin lugar a dudas, inferior a la inversión necesaria para poner en práctica otro tipo de mantenimiento más complejo. De ahí, que exista un elevado porcentaje de equipos en los que se realiza exclusivamente este tipo de mantenimiento.

El mantenimiento correctivo no requiere ninguna planificación sistemática y puede conjugarse con un mantenimiento básico (limpieza y engrases generalmente) y con una cierta previsión de los elementos de repuesto, especialmente aquellos que sistemáticamente deben ser sustituidos. Sin embargo, adoptar esta forma de mantenimiento supone asumir algunos inconvenientes, por ejemplo:

- *Trastornos en la producción, que pueden ir desde ligeras pérdidas de tiempo hasta la parada de la producción.*
- *Las averías, por ser imprevistas, suelen ser graves para el equipo, con lo que su reparación puede ser costosa.*
- *Las averías son siempre, en mayor o menor medida, inoportunas, por lo que la reparación de los equipos averiados puede llevar más tiempo del previsto, por falta de personal o por falta de los repuestos necesarios.*
- *Por tratarse de averías inesperadas, el fallo podría venir acompañado de algún siniestro con consecuencias negativas para la seguridad del personal, de las instalaciones o del medio ambiente.*

Antes de abordar el mantenimiento preventivo hay que advertir de que por mucha prevención que haya siempre habrá un amplio porcentaje de correctivo. Aún en el

caso ideal de que fuera técnicamente posible establecer una sistemática preventiva que evitara totalmente el correctivo, podemos afirmar con seguridad que tal posibilidad no sería posible.

Sin embargo, no todo el correctivo es consecuencia de problemas que pueden haber provocado el paro del equipo. El mantenimiento correctivo también contempla la detección de anomalías que no exigen una atención inmediata. Se trata del denominado correctivo planificable. Este mantenimiento, en cierto modo, puede ser el primer eslabón de la prevención.

## 7 Mantenimiento Preventivo

Lo que distingue el correctivo del preventivo es la aleatoriedad con que se presenta. Las anomalías que no producen paro o un riesgo inmediato de causarlo pueden ser atendidas de forma programada.

La norma AFNOR dice: *“El mantenimiento sistemático es aquel mantenimiento preventivo efectuado de acuerdo con un plan establecido, según el tiempo o el número de unidades fabricadas”*.

Es decir, es aquel mantenimiento predefinido en base a un plan que establece intervenciones periódicas y sistemáticas según el tiempo, según las horas de vuelo, según las horas de trabajo, etc.

El mantenimiento periódico tiene su fundamento en la conocida curva de la bañera, como la mostrada en la siguiente figura.

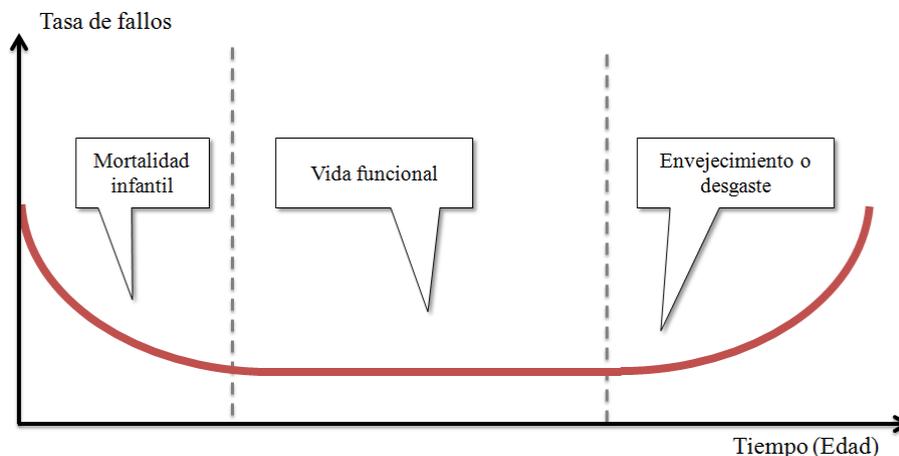


Figura 3 Curva de la bañera.

En el eje de ordenadas se suele representar la probabilidad de fallo o el número de averías, y en el eje de abscisas la edad, entendiéndose por edad el parámetro de medida que se elija.

La idea de la curva de la bañera es que la función de riesgo (la probabilidad de fallo o el número de averías) para un sistema evoluciona como se muestra en la figura. En concreto, al principio de la vida del sistema, la fase de puesta en operación se caracteriza por una tasa relativamente alta de averías superior a la considerada normal durante su explotación como consecuencia de un fenómeno de «mortalidad infantil», quizá debido a una fabricación defectuosa. La tasa de riesgo decrece a medida que va pasando el rodaje inicial. De un modo parecido, al final de la vida del sistema, aparece un aumento paulatino de averías que históricamente se han asimilado a «desgaste», deterioros por fatiga, envejecimiento mecánico, etc., de modo que aumenta la tasa de riesgo. En el intervalo transcurrido entre estos dos comportamientos, el sistema exhibe un riesgo bajo y aproximadamente constante. Este intervalo se denomina frecuentemente como la «vida funcional» del sistema.

Desgraciadamente esta curva de bañera –y más concretamente en la parte final de aumento paulatino de fallos con la edad– era fiable hace dos, tres o cuatro décadas. Hoy en día no es así, por lo que cuando un determinado sistema empieza a fallar según esta zona de la “bañera”, se demuestra que en la mayoría de los casos las actuaciones posibles de mejora deben encaminarse a intervenciones modificativas sobre el mismo y no preventivas.

En teoría, la última parte de la curva indica el momento de llevar a cabo la revisión preventiva sistemática del sistema para volver a posicionarlo en una situación correspondiente a las averías de la vida útil.

Con ello, hay que subrayar la necesidad de que el responsable de mantenimiento sea absolutamente riguroso a la hora de definir las periodicidades de los mantenimientos preventivos. Para ello deberá tener en cuenta las recomendaciones del fabricante, su propia experiencia de aprendizaje adquirida durante el funcionamiento del sistema y durante la reparación de averías, y la explotación de la fiabilidad realizada a través del estudio del histórico del sistema, del análisis

previsional de la fiabilidad y de la optimización de los niveles preventivo-correctivo, para encontrar una zona de admisibilidad de resultados-costes.

A continuación se van a explicar, en mayor o menor medida, varios sistemas de mantenimiento preventivo –abarcando los preventivos clásicos y los predictivos según condición– que se pueden aplicar de acuerdo a las necesidades de cada empresa o planta de producción en particular.

1. *Inspección de zona*
2. *Inspección preventiva*
3. *Revisión periódica*
4. *Sustitución cíclica*
5. *Mantenimiento de modificaciones*
6. *Inspección predictiva*
7. *Inspección detectiva*

## 7.1 Inspección de Zona

Es el sistema más simple y económico. La inspección de zona establece un programa de visitas a los equipos, con la frecuencia que cada grupo de ellos requiere. Esto dependerá de la importancia de cada equipo con respecto a los efectos que el paro del mismo puede tener para la producción y la seguridad de los empleados. Este tipo de mantenimiento preventivo se utiliza en equipos e instalaciones que asumen menor responsabilidad. Sin embargo, hay que equipos que sí la asumen pero que pueden tutelarse perfectamente con este sencillo sistema.

## 7.2 Inspección Preventiva

La inspección preventiva consiste en la realización de visitas cíclicas a los equipos incluidos en el programa de inspecciones. Se define como la parte del mantenimiento preventivo que puede realizarse sobre los equipos de producción sin que deban ser parados para su observación, ya que se estima que puede hacerse un diagnóstico suficientemente preciso sobre su estado, en marcha. Además, en algunos casos es imprescindible que los equipos estén funcionando para poder hacer este diagnóstico.

La inspección preventiva es aplicable a todos los equipos que demuestran una determinada conflictividad. Requiere la confección de fichas de inspección en las que se especifican los puntos de inspección y el tipo de variable que debe tenerse en cuenta. La inspección preventiva, como se ha dicho, no requiere parar el equipo para que pueda ser efectuada.

Se utilizan dos sistemas de Inspección Preventiva:

- *La Inspección Preventiva clásica*
- *La Inspección Predictiva o “Según Condición”, que se tratará más adelante.*

El criterio más importante, entre otros, que avala la inspección preventiva es el hecho de que al no precisar el paro de los equipos excepto en casos extraordinarios, no hay que considerar el “coste de paro” de los mismos que, con frecuencia, es mucho más importante que el de la acción directa. En definitiva, si está bien planeada, la inspección preventiva es un sistema económico para la empresa porque no afecta a la disponibilidad de los equipos.

### 7.3 Revisión Preventiva

Esta actividad del mantenimiento preventivo es similar a la anterior pero exige el paro del equipo para poder ser efectuada ya que se estima que no puede hacerse un diagnóstico fiable sobre su estado sin este requisito.

La revisión preventiva –al igual que la inspección periódica– consiste en la realización de visitas cíclicas a los equipos incluidos en el programa de revisiones para comprobar el estado concreto de unos determinados órganos ocultos previamente seleccionados, con el objetivo de considerar el estado global del equipo con respecto al servicio que presta.

También puede considerarse necesario realizar una revisión preventiva –con paro– después de una serie de inspecciones con el fin de realizar, en un plazo más dilatado, un análisis más a fondo.

Un criterio que avala la revisión preventiva es el hecho de garantizar el estado de un equipo o instalación que no puede ser establecido sin acceder a órganos que exigen, para poder hacerlo, el paro de otros equipos, pero que, debido a la importancia que tiene su disponibilidad y las pérdidas asociadas a una parada intempestiva, se prefiere pararlo con una frecuencia predeterminada para evitarlo y asegurar con la debida fiabilidad esta necesaria disponibilidad.

### 7.4 Sustitución Cíclica

Conociendo, por diversos medios que van desde recomendaciones del fabricante de los equipos hasta la propia experiencia, la duración más probable de ciertos elementos con la suficiente confiabilidad, se procede al cambio de este elemento con una frecuencia determinada, medida a través de la variable que se considere más oportuna: tiempo calendario, horas de funcionamiento, piezas producidas por la máquina, kilómetros recorridos, etc.

Este sistema se basa en la sustitución de unos determinados elementos cuyo fallo puede producir un paro del equipo o instalación que afecte de manera importante a la seguridad o a la economía de la empresa, por otros nuevos con una frecuencia predeterminada.

De su propia definición se deduce la recomendación de su aplicación prioritaria sobre los componentes de los equipos importantes y cuyo deterioro pone en grave riesgo su disponibilidad.

Sin embargo su aplicación no es fácil ya que deberían hacerse complejos estudios de fiabilidad para los componentes y esta cuestión, sin entrar en detalles, reviste muchas situaciones que evitan este tipo de mantenimiento.

Entonces, ¿cuándo sí se puede llevar a cabo esta sistemática preventiva? Un punto a considerar es el valor de la relación entre costes directos e indirectos derivados de la indisponibilidad del equipo, y el coste de la sustitución.

Para intentar gestionar este tipo de preventivo existen dos sistemas. Uno se podría denominar científico y otro experimental, basado en una información histórica fiable y lo más completa posible.

Brevemente, el sistema científico se basa en la *ley de Weibull* y permite representar el modelo en forma de una recta con una cierta inclinación –parámetro de forma  $\beta$  del comportamiento del elemento objeto del estudio–. El gráfico queda configurado de tal forma que se obtienen unos valores – $\alpha$ – que dan la media del tiempo de buen funcionamiento –MTBF– a través de una recta que muestra la tendencia de los fallos acumulados del elemento en el tiempo.

La *ley de Weibull* es la más recomendable ya que proporciona suficientes buenos resultados en la mayoría de los casos.

Por otro lado, y sin entrar a detallarlo, es importante saber que el sistema experimental basado en los históricos debe apoyarse en una información verídica, fiable y exhaustiva para que tenga suficiente probabilidad de éxito.

## **7.5 Mantenimiento de Modificaciones o Reforma**

Es un mantenimiento de consecuencia. Es posible que un equipo conflictivo no precise de una acción preventiva, sino de una modificación de los elementos causantes de esta conflictividad, consecuencia de la información recogida a través de la aplicación de algún sistema de prevención. Se trata en este caso de aumentar la fiabilidad de este equipo.

## 8 Mantenimiento Predictivo

El mantenimiento predictivo debe entenderse como aquella metodología que basa las intervenciones –en la máquina o instalación sobre la que se aplica– en la evolución de una determinada variable que sea realmente identificadora de su funcionamiento y fácil de medir.

Esta definición indica que la gran diferencia entre este tipo de mantenimiento y el sistemático, como ya se ha mostrado en la figura, es que este último planifica intervenciones de forma constante y con base a una periodicidad concreta, un número de kilómetros, unas horas de funcionamiento, etc., pero siempre las mismas, y el predictivo no define ninguna periodicidad concreta, sino que aconseja el lanzamiento de una orden de trabajo preventiva cuando la variable medida comienza a encontrarse en una zona de peligrosidad funcional de la máquina, y, lógicamente, siempre antes de que se produzca el fallo catastrófico.

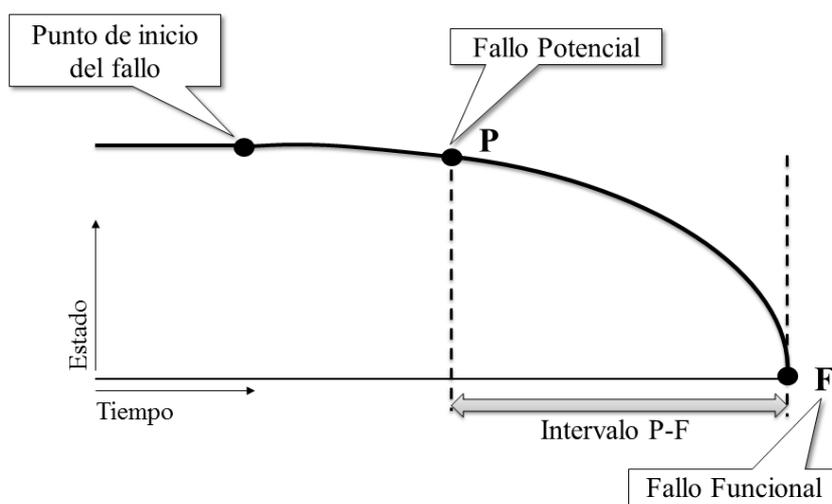


Figura 4 Evolución del fallo.

Muchos autores han intentado explicar este tipo de mantenimiento predictivo con la anterior curva P-F en la que simbolizan cómo la variable medida va evidenciando un determinado nivel de deterioro de la máquina a partir del punto P para que, antes de que ésta falle –en el punto F–, se produzca la intervención.

El mantenimiento predictivo es difícil de implantar porque antes debe localizarse la variable identificadora y, después, correlacionar los niveles de aceptación o rechazo de dicha variable con estados reales de las máquinas fáciles de medir.

La realidad es que el mantenimiento predictivo es una de las pocas alternativas frente a la rutina de los mantenimientos periódicos establecidos. Además, antes de aplicar cualquier tipo de mantenimiento preventivo rutinario o sistemático, sobre todo por rentabilidad y eficacia, hay que analizar si el mismo se puede sustituir por un mantenimiento condicional –o predictivo–.

A continuación se presenta de manera resumida una tabla con las principales técnicas que se utilizan en este mantenimiento predictivo.

*Tabla 1 Técnicas de Mantenimiento predictivo.*

Variable identificadora a medir	Técnica de diagnóstico	Tipo de instalación o equipo
<b>Vibraciones</b>	-Medición de vibraciones -Impulsos de choque -Análisis de frecuencias	- Maquinaria rotativa
<b>Viscosidad, partículas y degradación de lubricantes</b>	- Monitorización de color - Oxidación - Análisis espectro-químicos	- Reductoras, cajas de cambio, motores térmicos, compresores...
<b>Temperatura</b>	- Termografías - Pintura térmica - Adhesivos de bandas	- Sistemas mecánicos, térmicos, eléctricos y electrónicos.
<b>Valor óhmico y capacidad</b>	- Medidas de resistencia - Ondas de choque - Corrientes de absorción, conducción y reabsorción	- Motores eléctricos
<b>Fugas</b>	- Detectores de ultrasonidos - Gases halógenos - Líquidos coloreados - Detectores de grietas	- Depósitos y tuberías
<b>Grietas</b>	- Fluido magnético - Resistencia eléctrica - Corrientes inducidas - Ondas ultrasónicas - Ondas de radiación	- Estructuras metálicas y equipos estáticos
<b>Ruidos</b>	- Esteloscopio - Radioscopio	- Maquinaria rotativa
<b>Corrosión</b>	- Ultrasonidos - Detector de gas - Magnetoscopio - Radioscopio	- Depósitos, tuberías, cráteres, calderas, etc.
<b>Obstrucciones</b>	- Radioscopio - Indicador de presión	- Tuberías, válvulas, depósitos, racores, etc.
<b>Deformaciones, doblados</b>	- Escalas - Indicadores de nivel	- Tuberías.

Como conclusión, se detallan brevemente dos sistemas enmarcados dentro del mantenimiento predictivo:

### **8.1 Inspección Predictiva**

El conocimiento del estado del equipamiento no es consecuencia de una revisión del mismo, sino de un diagnóstico derivado de unos síntomas que han sido detectados a través de la utilización de aparatos a menudo sofisticados que miden el estado de una variable o de una serie de ellas, para las cuales se han establecido unos límites de aceptación que, al ser rebasados, indican la necesidad de intervención.

El sistema predictivo implica la introducción de la inspección sistemática como función esencial, no sólo de la maquinaria y de los equipos en general, sino de los órganos individuales de dichos equipos con sus características específicas y su vida propia.

### **8.2 Inspección Detectiva**

Tiene como objetivo esencial la comprobación del estado de las protecciones y seguridades de las instalaciones y equipamiento, con especial énfasis en la consideración de la importancia que puedan tener eventuales cadenas de fallos ocultos entre los sistemas de control y maniobra de los equipos y de sus elementos de seguridad, y la consideración de si es posible que una cadena de pequeños fallos de este tipo pueda tener graves consecuencias.

## 9 Nuevas técnicas de Mantenimiento: RCM y TPM

Como ya se ha dicho anteriormente, la numerosa bibliografía existente induce muchas veces a errores y a confusión.

Por ello, es importante comprender que no es lo mismo una técnica organizativa, como puede ser el RCM o TPM, que un mantenimiento predictivo, que es una “mantecnología” o una metodología tecnológica a utilizar como herramienta.

Por aclarar esta última idea: el RCM es una técnica que nos ayuda a replantear todo el mantenimiento con base en la fiabilidad o análisis de fallos, y utiliza la tecnología de mantenimiento llamada predictiva. Así mismo, el TPM es otra técnica organizativa basada en transferir al área de producción de una empresa gran parte –o todas– las actividades de mantenimiento, pero no es una metodología tecnológica propiamente dicha.

Estas técnicas organizativas no son la panacea. Es necesario desmitificarlas porque los mantenimientos deben basarse en la integración de técnicas, no en la exclusividad de las mismas.

A continuación se describirán brevemente ambas técnicas organizativas.

### 9.1 RCM - Mantenimiento Centrado en Fiabilidad

Es una de las técnicas organizativas más actuales para aplicar en mantenimiento y mejorar significativamente sus. Se basa en la búsqueda de mejora de resultados basándose en las siguientes premisas:

- *Analizar con una metodología rigurosa y auditable cada tipo de fallo o avería de la forma más estricta y profunda, estudiando el modo y forma en que se producen dichos fallos y como éstos se traducen en costes y repercusiones.*
- *La productividad global de Departamento de Mantenimiento debe mejorarse mediante una forma de trabajo más avanzada, proactiva y planificada.*
- *Tras el trabajo de estudio y definición de táctica es necesario (o muy conveniente) una auditoría imparcial antes de su implantación real.*
- *Se debe contar con el apoyo activo y cooperación del personal de mantenimiento, el de operación o producción, el personal técnico o de ingeniería y el administrativo.*

En resumen, el RCM es un proceso o técnica organizativa para determinar cuáles son las operaciones que debemos hacer para que un equipo o sistema continúe desempeñando las funciones deseadas en su contexto operacional y cuando ellas sean rentables para la empresa.

Para llevar adelante el análisis correspondiente se deben tener muy claras y analizadas las siguientes preguntas:

- *¿Cuáles son las funciones del equipo o sistema?*
- *¿De qué forma puede fallar?*
- *¿Qué puede causar que falle?*
- *¿Qué sucede realmente cuando falla?*
- *¿Qué ocurre si se produce el fallo y qué repercusiones reales (disponibilidad, costes, accidentes, etc.) tiene?*
- *¿Qué se puede hacer para prevenir los fallos?*
- *¿Es rentable prevenir dichos fallos?*
- *¿Qué se debe hacer si no se puede prevenir el fallo?*

Las tres últimas preguntas permiten llevar a cabo el análisis coste-beneficio. En la siguiente tabla se muestra, de modo simplificado, las estrategias de mantenimiento que siempre debe tener en cuenta el grupo como resumen de sus análisis y propuestas.



Figura 5 Estrategias de Mantenimiento.

A continuación se presentan los pasos que hay que dar para la selección de tareas, así como aquellos tipos y sistemas de nuestra planta por los que empezar a aplicar el RCM:

- *Fase 0: Definición de objetivos de la empresa.*
- *Fase 1: Formación de grupos de trabajo.*
- *Fase 2: Elaborar programa de actuación, selección de sistemas, equipo o área prioritaria.*
- *Fase 3: Determinar la meta según objetivos empresariales o de negocio.*
- *Fase 4: Analizar fallos funcionales simples, múltiples y ocultos.*
- *Fase 5: Determinar modos de fallo y analizar causas y efectos (matriz de decisión).*
- *Fase 6: Seleccionar tácticas de mantenimientos factibles, eficaces y rentables.*
- *Fase 7: Auditar el programa definido y el proyecto realizado.*
- *Fase 8: Implantar tácticas definidas.*
- *Fase 9: Optimizar el proceso.*
- *Fase 10: Pasar a siguiente sistema según Fase 2.*

La complejidad del análisis de fallos muestra que es conveniente empezar por una determinada área, sistema o equipo relevante, cuyos fallos o cuyo actual mantenimiento tengan importantes repercusiones para la empresa.

## 9.2 TPM - Mantenimiento en Producción

En este apartado hay que reiterar de nuevo que el TPM, al igual que el RCM, debe considerarse como una herramienta y una filosofía que aporta ventajas cuando se incorpora en una empresa, pero no puede ni debe basarse todo un plan de mantenimiento en él. Es necesario realizar un plan integrado que, entre otras técnicas organizativas, incorpore la del TPM o Mantenimiento Productivo Total.

El Mantenimiento Preventivo, como ya se dijo anteriormente y como ahora lo conocemos, se introdujo a partir de 1950. Fue General Electric quienes defendieron la aplicación de lo que denominaron Mantenimiento de Fábrica, aunque el TPM, tal y como ahora se defiende y concibe, tiene sus orígenes en Japón y comenzó a implantarse en ese país a comienzos de los años sesenta.

Esta técnica organizativa se desarrolló sobre todo en la industria del automóvil, implementándose en empresas como Toyota, Nissan y Mazda.

El TPM es un sistema de gestión de mantenimiento que se basa, entre otros fundamentos, en implantar el mantenimiento autónomo, que es llevado a cabo por

los propios operarios de producción, lo que implica la responsabilidad compartida de todos los empleados, sobre todo los técnicos y operarios de planta. Para ello, es necesaria la existencia o creación de una cultura propia que sea estimulante y motivadora, de forma que se fomente el trabajo en equipo, la motivación y coordinación entre las áreas de producción y mantenimiento.

Una de las bases del TPM son los principios de “*las Cinco S*”:

1. *Seiri: Organización y clasificación*
2. *Seiton: Orden*
3. *Seiso: Limpieza e inspección*
4. *Seiketsu: Estandarización o normalización*
5. *Shitsuke: Cumplimiento de objetivos*

Sin entrar en detalle, algunas de las importantes ventajas y mejoras que se pueden obtener de una adecuada implantación de esta técnica organizativa son:

- *Reducción del número de averías de equipo*
- *Reducción del tiempo de espera y preparación de los equipos de trabajo*
- *Aumento del control de herramientas y equipos*
- *Conservación del medio ambiente y ahorro de energía*
- *Mayor formación y experiencia de los recursos humanos*

Las metas y objetivos que deben marcarse en una implantación de TPM son las siguientes:

1. *Mejorar significativamente la eficiencia del conjunto de la empresa y la productividad del personal global de producción y mantenimiento.*
2. *Implantar un sentimiento de propiedad de los operarios de producción sobre sus equipos y sistemas, a través de un programa de formación y, especialmente, de implicación con la nueva técnica.*
3. *Promover la mejora continua a través de grupos de trabajo que inculquen la idea de unión y coordinación entre producción, ingeniería y mantenimiento.*

## 10 El Mantenimiento desde una perspectiva económica

Como se puede imaginar, la función de mantenimiento dentro de las empresas ha experimentado una creciente importancia ante el desarrollo de las instalaciones cada vez más complejas, ya sean automatizadas o robotizadas.

En las industrias con un elevado índice de automatización el personal de mantenimiento puede representar con frecuencia un índice cercano al 40% del total de la plantilla.

Sin embargo, el coste directo de la puesta en marcha del mantenimiento sólo constituye uno más de los factores económicos a tener en cuenta por las empresas, mientras que los costes indirectos, es decir, los derivados de la falta de disponibilidad o del deterioro de las funciones de los equipos, sí representan un factor económico de primer orden en ellas.

Por tanto, el coste de mantenimiento, evidentemente, determina la repercusión del mantenimiento en la producción.

Se debe prestar una calidad de servicio máxima para obtener una disponibilidad máxima, pero el coste de mantenimiento no debe ser superior al coste de paradas de la producción. El punto óptimo, como se puede observar en la figura, corresponde al valor mínimo de la *curva de Coste Total*, al que corresponde la máxima disponibilidad o valor óptimo del rendimiento operacional de un sistema de producción con un coste por intervenciones de mantenimiento igual a los costes de las paradas de producción.

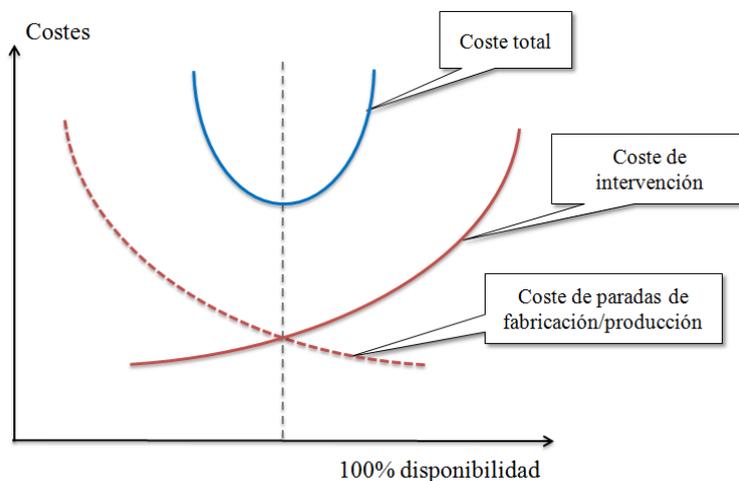


Figura 6 Curva de costes de mantenimiento.

Aun cuando se respeten todas las proporciones, estos costes indirectos, derivados de la falta de disponibilidad, constituyen a menudo la parte sumergida del iceberg, puesto que no suelen ser objeto de una partida contable tal como se aplica a los costes directos.

A modo de ejemplo, brevemente, los costes indirectos pueden estar constituidos por:

- *Las repercusiones económicas por la pérdida de producción por paro, falta de disponibilidad o deterioro de la función, y de los costes de la falta de calidad que pudieran derivarse.*
- *Las eventuales penalizaciones por retrasos en la entrega.*
- *Los costes de las medidas tomadas en su momento para paliar los fallos de los equipos productivos: horas suplementarias, peticiones de ayuda al exterior, etc.*
- *En algunas ocasiones, los fallos de los equipos pueden entrañar la destrucción completa de la instalación o del propio equipo. Así mismo, los fallos en los equipos podrían poner en riesgo la seguridad de las personas.*

En resumen, la función de mantenimiento presenta una importancia capital desde una perspectiva económica, en lo que concierne al control de sus costes directos y a los costes atribuibles a la falta de disponibilidad o del deterioro de la función de los equipos. Y desde la perspectiva de la seguridad de las personas, de los bienes y del medio ambiente.

## Capítulo 2 LOS AEROGENERADORES

### 1 La energía eólica

La energía eólica se define como la energía cinética del viento. La tierra recibe una gran cantidad de energía procedente del Sol. Esta energía, en lugares favorables, puede ser del orden de 2.000 Kwh/m<sup>2</sup> anuales. Se estima que entre el uno y el dos por ciento de la energía total que la tierra recibe del sol se convierte en viento.

El calentamiento desigual de la superficie de la tierra produce zonas de altas y bajas presiones. Este desequilibrio da lugar a desplazamientos del aire que envuelve la tierra, dando así lugar al viento. La potencia total de los vientos de la tierra alcanza un valor capaz de dar una potencia de 10<sup>e11</sup> Gwh.

Es evidente que en la antigüedad no se conocían estos datos, pero intuitivamente eran conocedores del gran potencial de esta energía. Así la historia nos muestra que ya existían artilugios y molinos de viento en la antigua Persia, Irak, Egipto y China.

La primera referencia histórica de que se dispone sobre el aprovechamiento del viento son unos molinos de eje vertical que figuran en obras geográficas del siglo V a. de C. Los citan en el Sijistán, situado entre lo que hoy en día es Irán y Afganistán, donde sopla un viento muy constante llamado de los 120 días.

Otras referencias históricas destacan que, hacia el siglo II a. de C. Herón de Alejandría construyó a un molino de viento para proporcionar aire a su órgano y, en el 1.700 a. de C. una máquina eólica que se utilizaba para bombear agua en Alejandría.

Hacia el siglo VII aparecieron en Europa, procedentes del este, grandes molinos de eje horizontal con cuatro palas. Su fabricación en gran número, en particular por los holandeses, les hizo alcanzar una gran firmeza, pese a que, debido a las dimensiones de sus palas distaban mucho de alcanzar el máximo de potencia. Necesitaban una regulación de la orientación de tela. Siempre sucede esto en los

molinos de eje horizontal que han de hacer siempre frente al viento. Estos molinos eran muy adecuados para vientos del orden de 5 m/s (20 Km/h).

Es a partir de los siglos XII-XIII cuando empieza a generalizarse el uso de los molinos de viento para la elevación del agua y la molienda del grano, los más antiguos aparecieron en Turquía, en Irán y en Afganistán.

A principios del siglo XII Europa se llenó a su vez de molinos, sobre todo en Bélgica y en los Países Bajos. Los molinos de Holanda tienen cuatro aspas de lona, mientras que los de Baleares y Portugal tienen seis, y los de Grecia doce. Los molinos con gran número de palas determinan velocidades de rotación relativamente bajas y un funcionamiento útil a partir de velocidades del viento del orden de 2 m/s.

Aunque la evolución en la historia de los molinos de viento transcurre de forma continua, a finales de la Edad Media las innovaciones y aplicaciones de las máquinas eólicas se produce con mayor rapidez. Entre la segunda mitad de los siglos XVIII y la segunda mitad del XIX, los molinos de viento europeos alcanzan su más alto nivel de perfeccionamiento, dentro de las limitaciones de la tecnología artesanal.

El desarrollo de los molinos de viento se interrumpe con la revolución industrial y la utilización masiva del vapor, la electricidad y los combustibles fósiles como fuentes de energía motriz. Es, sin embargo, en la segunda mitad del siglo XIX cuando tiene lugar uno de los más importantes avances en la tecnología del aprovechamiento del viento, con la aparición del popular "*Molino multipala tipo americano*", utilizado para bombeo de agua prácticamente en todo el mundo, y cuyas características habrían de sentar las bases para el diseño de los molinos generadores eólicos.

Fue entre las guerras mundiales cuando aparecieron, como consecuencia de los progresos técnicos de las hélices de aviación, y con ellas los proyectos de grandes aerogeneradores de dos o tres palas.

Los aerogeneradores de eje vertical derivan todos ellos del inventado en 1925 por el Ingeniero Francés Darrieus, patentado en los Estados Unidos y luego caído en un

olvido casi total. Su estudio volvió a iniciarse en Canadá en 1973, y en Estados Unidos a partir de 1975.

El bajo precio del petróleo determinó entonces la suspensión total de los grandes proyectos en todo el mundo. Pero en los años 70, coincidiendo con la primera crisis del petróleo, se inicia una nueva etapa en el aprovechamiento de la energía del viento. Las aplicaciones de las modernas tecnologías, y en especial de las desarrolladas para aviación, dio como resultado la aparición de una nueva generación de máquinas eólicas perfeccionadas, y que permitían su explotación, bajo criterios de rentabilidad económica, en zonas de potencial eólico elevado.

A principios de los años 70, los norteamericanos, enfrentados al aumento de los problemas de abastecimiento de energía iniciaron un amplio programa para explotar la energía eólica. En aquel momento se estimaba, en efecto, que esa energía renovable podría, aparte de sus aplicaciones tradicionales, proporcionar KWh a las redes eléctricas a un precio igual o inferior al de las centrales térmicas. Se hizo realidad pronto con la puesta en servicio de grandes aerogeneradores que producían potencias eléctricas comprendidas entre 2 y 5 MW.

Los primeros grandes aerogeneradores aparecieron en los Estados Unidos, donde en 1941 había ya una eólica cuya hélice pesaba siete toneladas y tenía un diámetro de 53 metros. Desde 1973 y bajo la responsabilidad de la NASA los Estados Unidos reanudaron la construcción de eólicas gigantes. Las dos más grandes midieron 61 y 91 metros de diámetro, y funcionaron desde 1978 en Boone (Ohio) y en Barstow (California), produciendo entre 2 y 2.5 MW de electricidad.

A lo largo del siglo XX, las aplicaciones basadas en el aprovechamiento del viento fueron declinando, a medida que se hacía más popular el uso del petróleo. Sin embargo, la crisis energética inició de nuevo un período en el campo del aprovechamiento eólico, elaborándose innumerables programas de estudio que centraron su interés en dos grandes aspectos:

- Elaboración de mapas eólicos y localización de emplazamientos.
- Cálculo, diseño y construcción de plantas de gran potencia.

Paralelamente se crearon incentivos para motivar la iniciativa privada a fabricar y comercializar pequeñas máquinas que permitan cubrir las necesidades de explotaciones agrícolas o industriales situadas en zonas apartadas.

Fue a partir de 1981 cuando realmente comenzó el verdadero auge de la generación eólica. Aquel año aumentó la rentabilidad de la energía eólica debido al incremento en el rendimiento conseguido gracias a la innovación tecnológica, a la experiencia de los fabricantes y de los promotores, que aprendieron a seleccionar emplazamientos mejores. Algo muy importante a destacar es que el mantenimiento se acomodó a los periodos de escaso viento.

En la actualidad, el incremento en los niveles de contaminación atmosférica y la preocupación por el cambio climático, debido en gran parte a la producción de energía a partir de los combustibles fósiles, está provocando una demanda de reducción de las emisiones medioambientales. Esta realidad, junto con la histórica crisis del petróleo –en 1973–, ha provocado en las últimas décadas un gran desarrollo de las energías renovables y, en especial, de la energía eólica.

La Unión Europea asumió el reto de la renovación de su estructura energética optando por un modelo que, garantizando la cobertura de sus necesidades energéticas, resultara menos agresivo con el medio ambiente.

La estrategia del gobierno español se resumía en el Plan de Fomento de las Energías Renovables. Este plan fue elaborado con el propósito de reforzar los objetivos de la política energética, que son la garantía de seguridad y calidad del suministro eléctrico y el respeto al medio ambiente, con el principal objetivo de dar cumplimiento a los compromisos de España en el Protocolo de Kyoto.

Además del Plan de Fomento de las Energías Renovables, la mayoría de las comunidades autónomas tienen programas con objetivos específicos.

La Directiva 2009/28/CE del Parlamento europeo y del Consejo, de 23 de abril, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, establece la elaboración por parte de cada Estado de un Plan de Acción Nacional en materia de Energías Renovables (PANER) para conseguir los objetivos nacionales fijados en la propia Directiva.

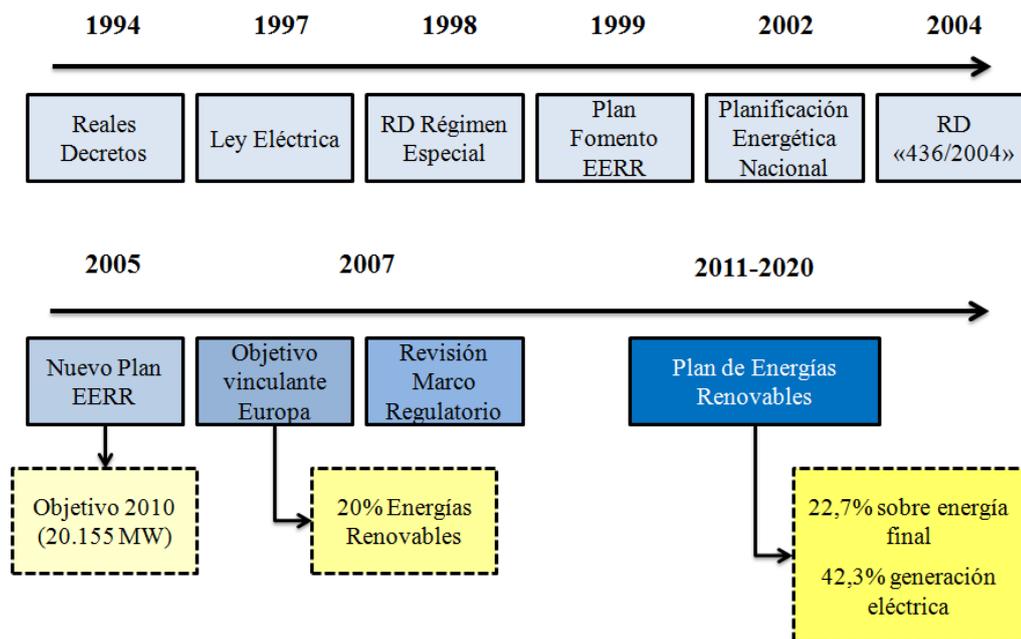


Figura 7 Evolución de los planes legislativos y normativos de las Energías Renovables.

Para España, estos objetivos se concretan en que las energías renovables representen un 20% del consumo final bruto de energía, con un porcentaje en el transporte del 10%, en el año 2020.

En una primera estimación, la aportación de las energías renovables al consumo final bruto de energía sería del 22,7% en 2020 (frente a un objetivo para España del 20%), equivalente a unos excedentes de energía renovable de aproximadamente de 2,7 millones de toneladas equivalentes de petróleo (tep).

La eólica fue en 2013, por primera vez, la tecnología que más contribuyó a la cobertura de la demanda, con un 21,1%. A ello, hay que añadir que las energías renovables, favorecidas dicho año por la elevada hidraulicidad de los primeros meses, cubrieron el 42,4% de la demanda eléctrica del 2013, casi 11 puntos más que en 2012.

## 2 La energía eólica en la actualidad

A lo largo del año 2013 se instalaron en todo el mundo 35,289 GW, siendo la potencia acumulada hasta finales de ese año de 318 GW. En Europa cinco países incrementaron su capacidad eólica instalada en más de 500 MW: Alemania (3.238 MW), Reino Unido (1.883 MW), Polonia (894 MW), Suecia (724 MW) y Rumanía (695 MW). A pesar de que España continua siendo el segundo mercado más importante a nivel europeo por detrás de Alemania, en términos acumulativos, sólo instaló 175 MW en 2013 hasta alcanzar los 22,900 GW de capacidad. La potencia acumulada en todo el mundo a finales de 2013 era de 318 GW con un aumento de potencia instalada del 11% respecto al año 2012.

Todos los aerogeneradores instalados a finales del año 2013 en la Unión Europea han estado generando, anualmente, 257 TWh. Esta cifra supone el 8% del consumo global de electricidad en Europa, que ronda los 3.280 TWh.

En cuanto a la capacidad instalada a nivel mundial, China se ha convertido en la primera potencia (28,7% con 91.412 MW) y Estados Unidos ocupa el número dos (19,2% con 61.091 MW) afianzando ambos su despegue en la industria eólica mundial. Alemania ocupa el tercer lugar (10,8% con 34.250 MW), y España (11,5%) le sigue en cuarta posición con casi 23.000 MW (7,2%) de capacidad instalada.

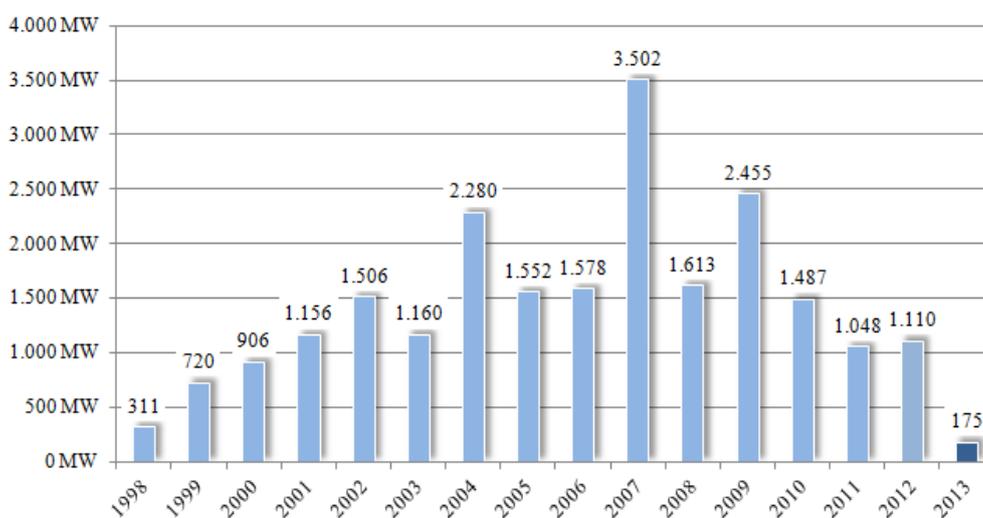


Figura 8 Incremento anual de la Potencia eólica instalada en España.

La siguiente tabla muestra la potencia eólica instalada en España por Comunidad Autónoma. Según estos datos Castilla y León posee la mayor potencia eólica instalada, seguida por Castilla La Mancha y Galicia. Navarra ocupa el octavo lugar por detrás de la Comunidad Valenciana, con una potencia acumulada de 1.004 MW al cierre del 2013 (cuando a finales de 2009 la potencia acumulada ascendía a 962 MW).

Tabla 2 Potencia eólica en España en 2013

CCAA	Potencia Instalada (2009)	Potencia Instalada (2013)	Potencia Acumulada (2013)	% sobre Total	Nº Parques
Castilla y León	548,68	49,40	5.560	24,22%	241
Castilla La Mancha	284,00	-	3.806	16,58%	139
Galicia	91,05	74,50	3.338	14,54%	153
Andalucía	1077,46	2,65	3.314	14,43%	158
Aragón	4,50	4,50	1.893	8,25%	87
Cataluña	105,10	9,0	1.268	5,52%	46
Comunidad Valenciana	289,75	-	1.189	5,18%	38
Navarra	3,00	24,00	1.004	4,37%	49
Asturias	51,65	6,0	581	2,26%	21
La Rioja	-	-	447	1,95%	14
Murcia	-	-	262	1,14%	14
Canarias	4,25	5,00	165	0,72%	55
País Vasco	-	-	153	0,67%	7
Cantabria	-	-	38,3	0,17%	4
Baleares	-	-	3,68	0,02%	46
<b>Total</b>	<b>2.459,44</b>	<b>175,05</b>			<b>1.072</b>

Por sociedades promotoras, la que más potencia instaló en 2013 fue Enel Green Power (con 88,27 MW), seguida por Acciona Energía y EDPR.

Tabla 3 Potencia eólica instalada por Promotores.

Promotor	Potencia Instalada 2013 (MW)	Potencia acumulada (enero 2014)	% sobre total acumulado
IBERDROLA	-	5.513	24,01%
ACCIONA ENERGÍA	39	4.268	18,59%
EDPRENOVABLES	13,23	2.099	9,14%
ENEL GREEN POWER ESPAÑA	88,27	1.492	6,50%
GAS NATURAL FENOSAREN.	-	968	4,22%
EOLIA RENOVABLES	-	513	2,23%
EyRA	-	512	2,23%
VAPAT	-	471	2,05%
RWE Innogy Aersa	-	442	1,93%
OLIVENTO	-	421	1,83%
ENERFÍN	-	421	1,74%
E.ON RENOVABLES	-	381	1,66%
BORA WIND ENERGY MNGT.	-	330	1,44%
MEDWIND	-	247	1,07%
RENOVALIA RESERVE	-	246	1,07%
MOLINOS DELEBRO	-	234	1,02%
GECAL	-	231	1,01%
GAMESA ENERGÍA	9,50	220	0,96%
IBEREÓLICA	-	194	0,85%
EÓLICA DE NAVARRA	-	164	0,71%
ALDESA ENERGÍAS RENOV.	-	164	0,71%
FERSA	-	149	0,65%
ELECDEY	-	140	0,61%
OTROS	25,05	3.159	13,76%
<b>TOTAL (MW)</b>	<b>175,05</b>	<b>22.959</b>	<b>100%</b>

Respecto a los fabricantes, Gamesa, fue el que más potencia instaló, con 85,50 MW, seguido de Acciona Wind Power, con 70,50 MW.

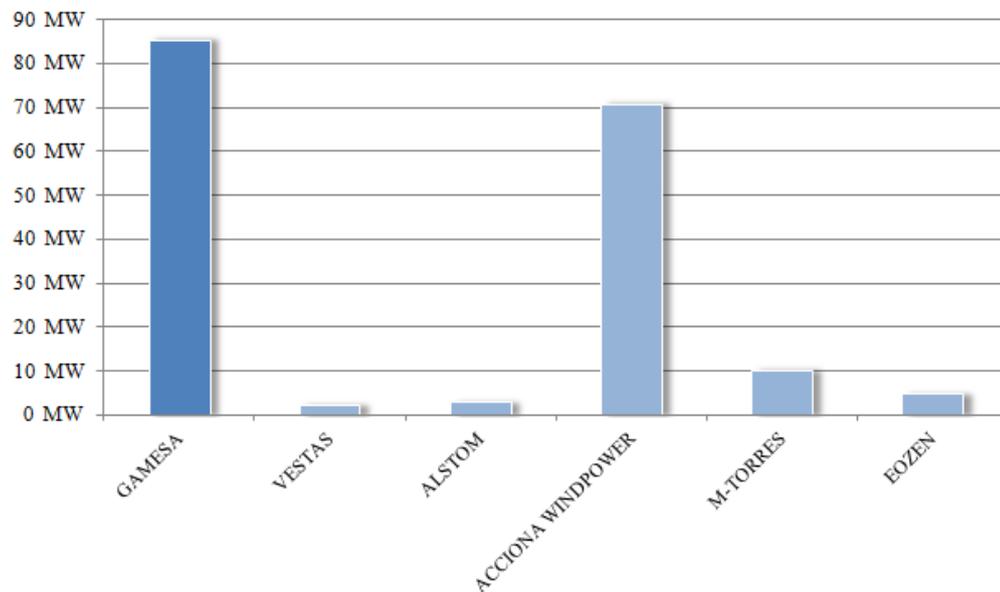


Figura 9 Potencia instalada por fabricantes a finales de 2013

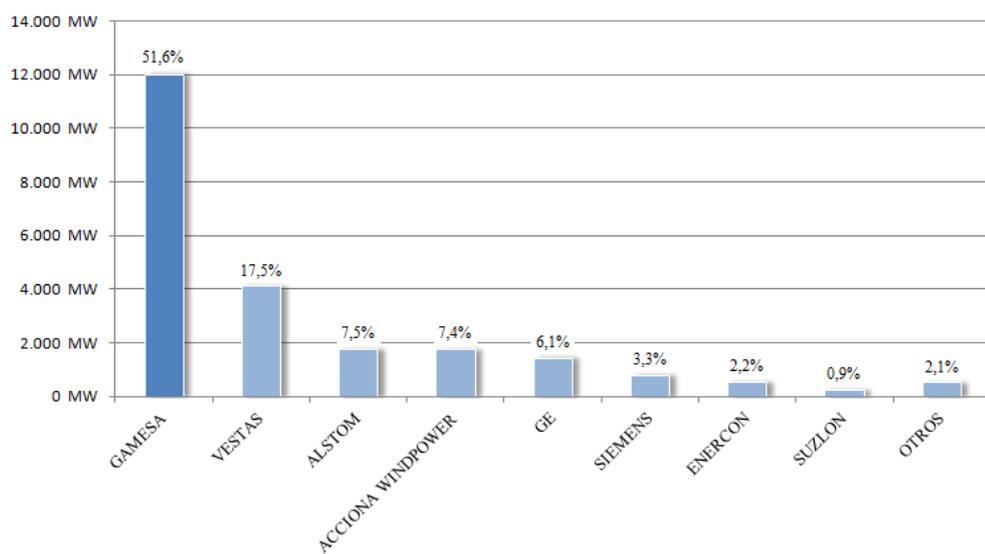


Figura 10 Potencia acumulada por fabricantes a finales de 2013

### 3 Características de la energía eólica

Las características que presenta la energía eólica se pueden agrupar por un lado en aquellas que aportan ventajas a su utilización y por otro lado en aquellas que representan inconvenientes.

#### 3.1 Ventajas

La energía eólica no contamina, es inagotable y frena el agotamiento de combustibles fósiles, contribuyendo a evitar el controvertido cambio climático ya que no existe proceso de combustión ni transformación térmica de ningún tipo. Es una tecnología de aprovechamiento totalmente madura y puesta a punto.

España es un país con una enorme dependencia energética de fuentes externas debido a la inexistencia de yacimientos petrolíferos y/o de gas natural en su territorio. Solamente existen yacimientos de carbón, pero de baja calidad. Por tanto, las energías renovables suponen una solución para evitar esta dependencia.

La energía eólica no produce emisiones que generen gases de efecto invernadero. La generación eólica sólo produce emisión de CO<sub>2</sub> durante su construcción. Además, no presenta incidencia sobre las características fisicoquímicas del suelo ya que no produce ningún contaminante que incida sobre él.

Por otro lado, evita el impacto originado por el transporte de combustible. Reduce el tráfico marítimo y terrestre cerca de las centrales, suprime el riesgo de accidentes tales como los vertidos de crudo, residuos nucleares, etc., y evita la instalación de canalizaciones a las refinerías o a las centrales de gas, etc.

Puede instalarse en zonas desérticas, en laderas áridas, etc., pudiendo convivir con otros usos del suelo, por ejemplo prados para uso ganadero o cultivos bajos como maíz, trigo, etc.

La energía eólica se obtiene de forma mecánica y es directamente utilizable. Su transformación tiene un rendimiento excelente ya que no depende de relaciones termodinámicas ni del rendimiento de Carnot.

Tabla 4 Comparación del impacto ambiental (T/GWh)

Fuente de Energía	CO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	Partículas	CO	Hidrocarburos	Residuos nucleares	TOTAL
<b>Carbón</b>	1.058,2	2,986	2,971	1,626	0,267	0,102	-	1.066
<b>Gas Natural</b>	824	0,251	0,336	1,176	TR	TR	-	825,8
<b>Nuclear</b>	8,6	0,034	0,029	0,003	0,018	0,001	3,641	12,3
<b>Fotovoltaica</b>	5,9	0,008	0,023	0,017	0,003	0,002	-	5,9
<b>Biomasa</b>	0	0,614	0,154	0,512	11,361	0,768	-	13,4
<b>Geotérmica</b>	56,8	TR	TR	TR	TR	TR	-	56,8
<b>Eólica</b>	<b>7,4</b>	<b>TR</b>	<b>TR</b>	<b>TR</b>	<b>TR</b>	<b>TR</b>	-	<b>7,4</b>
<b>Solar térmica</b>	3,6	TR	TR	TR	TR	TR	-	3,6
<b>Hidráulica</b>	6,6	TR	TR	TR	TR	TR	-	6,6

### 3.2 Desventajas

No hay duda de que la energía eólica produce un impacto visual inevitable ya que precisa de unos emplazamientos que normalmente resultan ser los que más evidencian la presencia de las máquinas. La implantación de Parques Eólicos a gran escala está claro que produce una alteración importante sobre el paisaje.

Normalmente los Parques Eólicos se localizan en áreas de montaña, por lo que su instalación puede afectar a recursos naturales con un alto valor paisajístico, entre otros.

Las acciones del proyecto de construcción de un Parque Eólico que generan un mayor impacto son las infraestructuras necesarias para la instalación y posterior funcionamiento del parque: Accesos, Plataforma de montaje, cimentación de los aerogeneradores, red de media tensión. Sin embargo, en la mayoría de los casos el acceso principal lo constituyen carreteras ya existentes y los accesos interiores a las líneas de aerogeneradores se construyen aprovechando el trazado de pistas forestales.

Otro inconveniente lo produce el ruido, producido tanto mecánica como aerodinámicamente por la rotación de las palas. Este ruido depende tanto de la calidad de los mecanizados y tratamientos superficiales como de los materiales que constituyen las palas. Normalmente el nivel de este ruido es bajo, produciéndose a decenas de metros de altura –y por tanto muy mitigado–. Hoy en

día, los aerogeneradores modernos incluyen sistemas de control que regulan la velocidad de las palas para así limitar y disminuir al máximo la generación de ruido aerodinámico.

Uno de los impactos más significativos es el que afecta a la fauna. En este sentido, las aves son las más afectadas por el riesgo de colisión con las palas, torres, tendidos eléctricos, etc.

Frente a esto, la instalación de un Parque Eólico está precedida por un estudio de impacto ambiental que debe ser aprobado por las autoridades correspondientes con el objetivo de obligar al promotor de la instalación a tomar las medidas necesarias para minimizar los posibles impactos negativos que puedan producirse.

Desde el punto de vista eléctrico, los operadores del sistema de los diferentes países con implantación de generación eólica han adaptado sus normas de conexión para adaptarse a esta nueva forma de generación. Uno de los principales asuntos tratados en estas normas es el comportamiento de los parques eólicos durante los huecos de tensión.

Cuando ocurre una falta en el sistema, la tensión en el punto de falta cae prácticamente a cero voltios, y el flujo de corriente hacia la falta hace que la tensión disminuya a lo largo de la red. Este efecto es el que comúnmente se denomina hueco de tensión.

Cuando tenía lugar un hueco de tensión y los aerogeneradores no tenían la capacidad de continuar suministrando potencia durante el hueco de tensión, éstos se desconectaban. En la actualidad la normativa de conexión de parques eólicos a la red eléctrica incorpora el requisito de “Continuidad de suministro de los parques eólicos durante los huecos de tensión”. Este requisito es especialmente importante debido al incremento de la potencia eólica instalada, ya que la pérdida de esta potencia durante un hueco de tensión provocaría inestabilidad en el sistema eléctrico.

Los parques eólicos se agrupan en zonas en las que existen buenas condiciones de viento. Esto hace que se produzca una gran cantidad de potencia en zonas donde el consumo local es escaso, por lo que el exceso de energía debe ser evacuado a

través de la red de transporte. La falta de redes de evacuación adecuadamente dimensionadas y capaces de admitir los niveles de energía eléctrica producida por los parques eólicos constituye uno de los problemas que más negativamente afectan a la implantación de parques eólicos.

En cuanto al impacto de la generación eólica en la operación del sistema, de forma resumida presenta las siguientes características:

- *Dificultad en su previsión.*
- *No está sujeta a programación: se necesita programar reserva suficiente.*
- *Provoca fluctuaciones de potencia debido a la propia naturaleza de su fuente energética.*

Los últimos avances en previsión del viento han mejorado notablemente la situación, aunque el problema, en menor medida, sigue existiendo.

Los parques eólicos están distribuidos a lo largo de toda la superficie, compensando, en parte, la baja producción de unos parques por falta de viento con la alta producción en las zonas de viento, aunque durante muchos días la producción eólica es prácticamente inexistente.

Por otro lado, el aire, al ser un fluido de pequeño peso específico, implica fabricar máquinas grandes y, en consecuencia, caras. A finales de 2013, había 20.253 aerogeneradores en el país. Manteniendo la tendencia de los últimos años, el tamaño medio de los aerogeneradores ha aumentado situándose cerca de los 2,6 MW de media de potencia unitaria.

Por ejemplo, el diámetro medio del rotor de estos nuevos aerogeneradores terrestres mide 95 metros y el buje se eleva hasta una altura de 117 metros. En el caso de los aerogeneradores ubicados en el mar, el tamaño medio se sitúa en torno a los 5 MW de potencia unitaria, con un diámetro medio de rotor de 126 metros y una altura estimada de 90 metros.

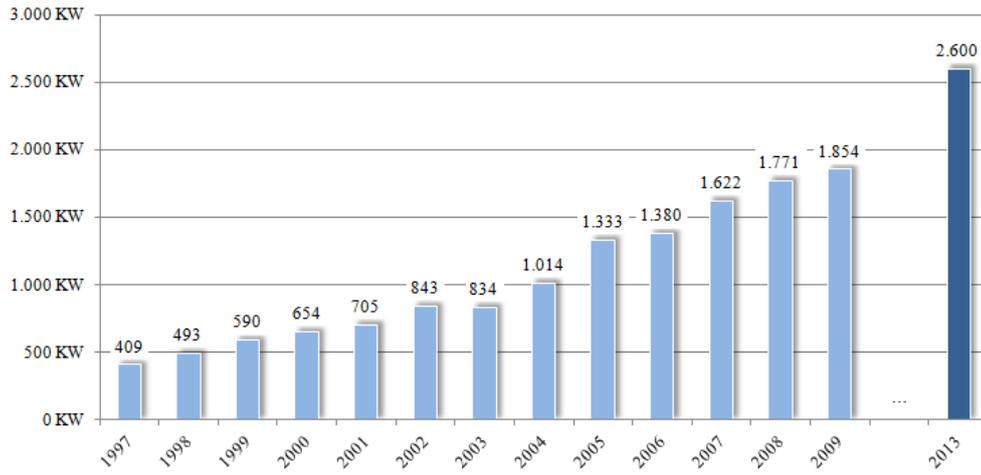


Figura 11 Evolución anual de la potencia media del aerogenerador 1997-2013.

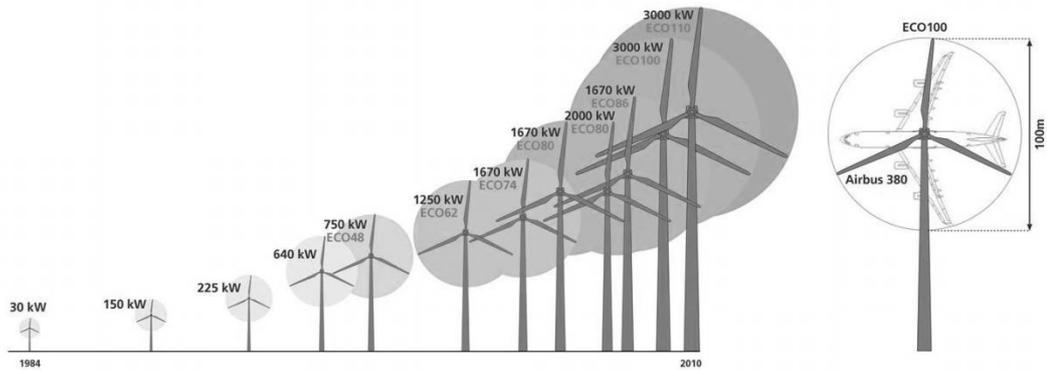


Figura 12 Evolución del tamaño constructivo de los aerogeneradores.

## 4 ¿Cómo sacar más provecho al viento?

2013 ha sido un año de máximos para la eólica, al menos en lo que a generación se refiere. Los parques eólicos aportaron un 16% de la producción eléctrica del 2013, pero en momentos aislados alcanzaron el 54%. Pero ¿cómo se puede sacar más provecho a esta tecnología?

- *Interconexión con Francia:* La interconexión con Francia permitiría disponer de más parques eólicos. Esta interconexión es clave para que la electricidad que en momentos determinados no puede ser absorbida en la Península pueda ser vendida
- *Reducir pérdidas:* muy excepcionalmente, la red no tiene capacidad suficiente para absorber la electricidad. El año pasado, la pérdida de producción eólica por incapacidad de evacuación a Francia fue del 0,6%. Pero si no se produjera esa interconexión (prevista para el 2014) las pérdidas serían del 3%.
- *Recarga nocturna:* La electricidad de origen eólico se genera muy frecuentemente de noche, cuando apenas hay demanda interna. Por eso, una de las opciones para aprovechar esa energía es utilizarla en la recarga nocturna de los vehículos eléctricos, que constituyen un parque modesto. Esta es la esperanza del sector para aplanar la desequilibrada curva de consumo actual.
- *Bombeos hidráulicos:* otra opción es aprovechar la energía eólica excedentaria nocturna en el bombeo de agua desde la cota más baja a la más alta, y de día se turbinaría de arriba abajo. Así, habría una ganancia doble: la electricidad se consumiría de noche, cuando es más barata, y se generaría de día, cuando está mejor retribuida. Pero se necesitan embalses de este tipo.
- *Mejorar la predicción:* España es una referencia mundial por la gestión que hace Red Eléctrica de los molinos de viento. Continuamente está mejorando la predicción de las condiciones del viento, algo necesario para programar la disponibilidad de este recurso ante la demanda prevista y planificar el uso de otras energías de respaldo (embalses, ciclo combinado) si falla el viento. Almacenar esta energía en pilas de combustibles es otro reto futuro.

## 5 ¿Cómo funciona un aerogenerador?

Para iniciar el funcionamiento de estas máquinas, y con él la producción de energía eléctrica, existe un sistema de control en el aerogenerador que analiza los datos de velocidad y dirección del viento. Como es sabido, estos datos son recogidos por el anemómetro y la veleta situados ambos en la zona trasera del techo de la góndola. De esta manera, el sistema de control envía la señal con los datos a un armario eléctrico situado en el interior de la góndola. Este armario se encargará de activar eléctricamente las motorreductoras del sistema de orientación *-sistema Yaw-*. Estas motorreductoras están engranadas con los dientes de una corona firmemente unida a la torre en su parte más alta. Al encenderse, hacen girar la góndola posicionándola a barlovento, que es la dirección desde la que llega el viento.

En esta situación, el aire es obligado a fluir por las caras de las palas generando una diferencia de presiones y dando origen a una fuerza resultante que actúa sobre el perfil de las palas. Si descomponemos esta fuerza en dos direcciones, encontramos la fuerza de sustentación, perpendicular al viento, que produce el movimiento rotatorio de las mismas. Esta fuerza de sustentación de las palas está regulada por otro sistema, el de cambio de paso *-sistema Pitch-*. Hay una particularidad, y es que este sistema puede ser independiente en cada pala y se encarga así de que cada una de ellas gire en torno a su eje longitudinal para ajustar su posición angular.

Las variaciones del ángulo de paso de las palas se consiguen gracias a un sistema hidráulico escondido dentro de la góndola, y permite a las palas un abanico de rotación que suele ir, aproximadamente, desde  $-5^{\circ}$  a  $90^{\circ}$ . Por supuesto, la rotación se realiza a través de un rodamiento que está escondido entre la pala y el buje, es el llamado rodamiento de pala.

Algo importante que hay que tener en cuenta es que las palas también sirven de freno aerodinámico cuando el ángulo de paso se acerca a  $90^{\circ}$ . Es lo que se denomina la posición de bandera.

Para que un aerogenerador se ponga en marcha es necesario un valor mínimo de velocidad del viento para vencer los rozamientos y comenzar así a producir trabajo

útil. A este valor mínimo se le denomina velocidad de conexión –comprendida entre los 3 m/s y 5 m/s–. Sin esta velocidad no es posible arrancar un aerogenerador.

Para comprender mejor el sistema de cambio de paso, a continuación se detalla brevemente su funcionamiento:

- *Cuando la velocidad del viento es inferior a la nominal, el ángulo de paso seleccionado será aquel que maximice la potencia eléctrica obtenida para cada velocidad del viento.*
- *Cuando la velocidad del viento es superior a la nominal, el ángulo de paso será aquel que proporcione la potencia nominal de la máquina. Por aclarar este término, entendemos por potencia nominal la máxima que se puede entregar a la red eléctrica.*

El sistema de control, del que ya hemos hablado, permite que el aerogenerador funcione a velocidad variable maximizando en todo momento la potencia producida y minimizando las cargas mecánicas y el ruido.

Resumiendo lo explicado hasta ahora: el viento sopla e incide sobre las palas. Éstas giran transmitiendo el movimiento que provoca el viento sobre el rotor hasta la multiplicadora, a través de lo que se conoce como tren de potencia o eje principal. Este eje principal está unido al buje y a la entrada del eje de baja velocidad de la multiplicadora.

En esta situación, mediante un acoplamiento, la multiplicadora va a transmitir la potencia del eje principal al generador. Así mismo, en la salida del eje de alta velocidad de la multiplicadora existe un freno de disco que se activa también hidráulicamente y cuyo uso principal es impedir el inicio de giro una vez que se ha detenido el aerogenerador.

Como ya se ha dicho, hay todo un sistema hidráulico que gestiona numerosos elementos. ¿Qué es lo que hace este sistema hidráulico? Proporciona aceite bajo presión a todos los sistemas citados: el sistema de giro o de orientación, el sistema de cambio de paso y el freno de disco del eje de la multiplicadora, entre otros.

Si imaginamos ahora el eje de alta velocidad de la multiplicadora, lo siguiente que tenemos que considerar es el generador, es decir, el elemento eléctrico principal del aerogenerador. El generador es el encargado de convertir la potencia mecánica del

viento, transmitida desde las palas a través del eje principal, en potencia eléctrica que se suministrará a la red.

En el caso de los aerogeneradores, la velocidad variable del viento hace que el caudal que incide en las palas, atravesando su área de barrido, sea diferente en cada instante. Por ello, el rotor del generador variará con la variación de la velocidad de viento. Esto es muy importante tenerlo en cuenta porque justifica el que se emplee un generador asíncrono. En este tipo de generadores, la frecuencia angular de la onda generada y la frecuencia angular de la velocidad de giro del rotor del generador son diferentes. La primera de ellas tiene que ser equivalente a la frecuencia de la red –para garantizar la estabilidad–, mientras que la segunda vendrá impuesta, de forma general, por la velocidad del viento.

Las generadores –o máquinas de inducción– más utilizados hoy en día son doblemente alimentados. Este sistema doblemente alimentado está formado por un generador asíncrono en donde tanto el rotor como el estator están conectados a la red. El estator se conecta directamente y el rotor se conecta a un convertidor de frecuencia –a través de la electrónica de potencia–. A su vez, este convertidor está conectado también a la red. Si entrar en los detalles, este esquema consigue que para la red de distribución eléctrica el aerogenerador se comporte como un generador síncrono eliminando así el problema de que el caudal de viento no es constante, lo cual permite estabilizar la red, facilita la conexión de muchos aerogeneradores, elimina bancos de condensadores para compensar la potencia reactiva y otros problemas.

En todo este apartado juegan un papel fundamental los armarios eléctricos, donde se encuentra el sistema de control de potencia –CCU–. Este controla la potencia activa y reactiva con el convertidor de frecuencia, el cual está conectado, como ya se al dicho, al rotor del generador.

Los armarios eléctricos, fundamentales en un aerogenerador, tienen como funciones principales:

- *Controlar la potencia generada (activa y reactiva)*

- *Vigilar el funcionamiento de todos los equipos y controlar el funcionamiento del aerogenerador.*
- *Alimentar los distintos equipos eléctricos.*
- *Proteger contra las faltas eléctricas.*
- *Permitir la operación de la máquina a través de pantallas táctiles.*

Todas estas funciones se reparten en armarios eléctricos cuyos nombres nos dan una idea de su localización en el aerogenerador: el armario *Top*, el *Ground* y el *Hub*.

¿Qué viene después del generador? Después del generador aparece otro elemento muy importante: el transformador. La función del transformador es adecuar el nivel de tensión de generación al nivel de la red de media tensión para poder transmitir toda la potencia generada o consumida por el aerogenerador. El transformador eleva la generación de baja tensión (690V) hasta el valor correspondiente de media tensión (20-30kV). Luego será la subestación del parque la encargada de inyectarla a la red eléctrica para su distribución.

Entre el transformador de BT/MT existe el denominado sistema de celdas de media tensión, ubicado a veces en la plataforma inferior de la torre, junto a la entrada.

La misión de las celdas de media tensión es la de proteger al aerogenerador ante posibles faltas de energía en el mismo, especialmente los cables de media tensión y al transformador de potencia y, a la vez, conectar al aerogenerador con la subestación eléctrica de distribución para evacuar así la energía producida.

## 6 Descripción de un aerogenerador

Hoy en día los aerogeneradores son del tipo de rotor tripala -tres palas- orientada ésta en la dirección que llega el viento. Las potencias nominales que producen comprenden un abanico muy amplio que va, en el caso del fabricante Gamesa, desde los 850 KW hasta los 2 MW, existiendo ya prototipos a punto de ser comercializados que superan los 4,5 MW.

A continuación se realizará una descripción de los principales componentes de un aerogenerador.

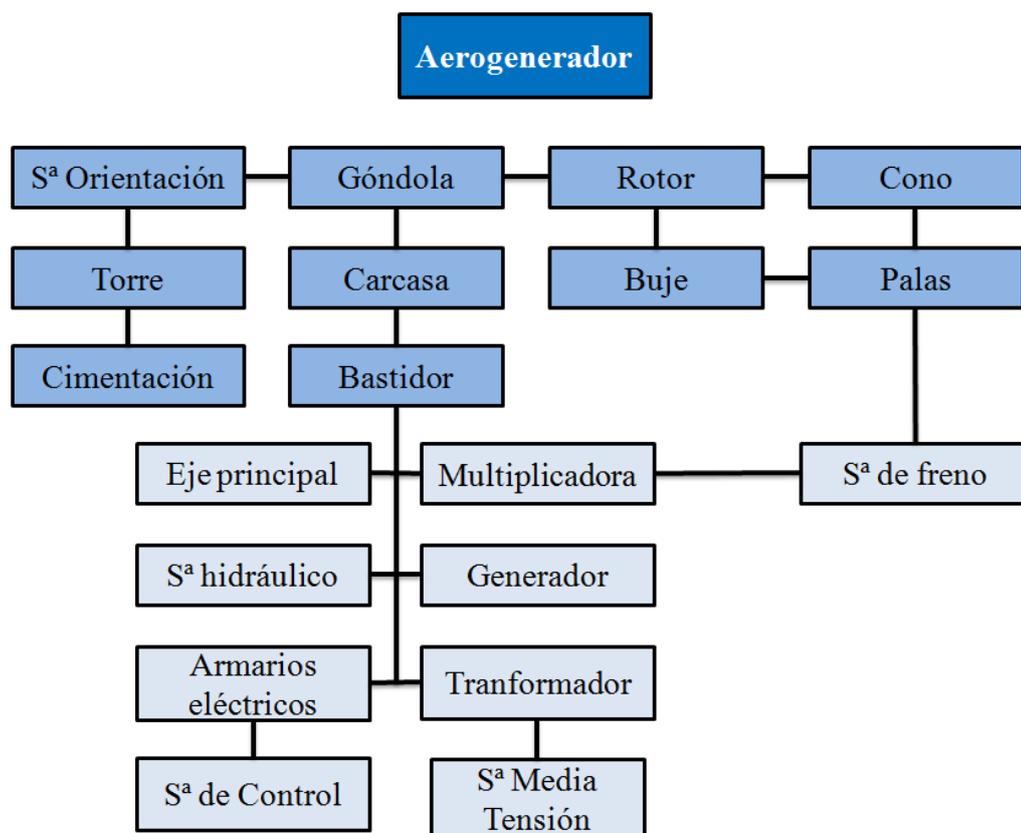


Figura 13 Principales sistemas y componentes de un aerogenerador.

## 6.1 La góndola y sus componentes

### 6.1.1 Carcasa

La carcasa es la cubierta que protege los componentes del aerogenerador que se encuentran en la góndola frente a las condiciones ambientales externas. Su estructura está realizada de un material compuesto de resina con refuerzo de fibra de vidrio.

En el interior de la carcasa existe el suficiente espacio para realizar las operaciones de mantenimiento del aerogenerador. La carcasa puede tener en algunos casos trampillas que dan acceso a la góndola. Además puede contar con claraboyas en el techo que proporcionan luz solar por el día, ventilación adicional y acceso al exterior, donde se encuentran los instrumentos de medida de viento y el pararrayos.

Los componentes internos que son giratorios están debidamente protegidos para garantizar la seguridad del personal de mantenimiento.

### 6.1.2 Bastidor

Toda góndola dispone normalmente de un bastidor cuya función es soportar adecuadamente los elementos de la góndola y transmitir las cargas mecánicas hasta la torre.

### 6.1.3 Eje principal

La transmisión del par motor que provoca el viento sobre el rotor hasta la multiplicadora se realiza a través del eje principal. El eje se une al buje y está apoyado sobre dos rodamientos.

El eje normalmente está fabricado en acero forjado y tiene un orificio central longitudinal que aloja las mangueras hidráulicas y los cables de control del sistema de cambio de paso *-sistema Pitch-* de las palas.

El apoyo del eje principal sobre dos rodamientos conlleva importantes ventajas estructurales. Todos los esfuerzos provenientes del rotor son transmitidos al bastidor delantero excepto el par de torsión, el cual se aprovecha en el generador para producir la energía eléctrica. De esta forma, se asegura que la multiplicadora

únicamente transmita dicho par y que las solicitaciones por flexión, axiales y cortantes vayan directamente al bastidor.

#### **6.1.4 Multiplicadora**

Transmite la potencia del eje principal al generador. La multiplicadora se compone de tres etapas combinadas, una planetaria y dos de ejes paralelos. Los dientes están diseñados para obtener una máxima eficiencia junto con un bajo nivel de emisión de ruido y vibraciones. Como resultado de la relación de multiplicación, parte del par de entrada es absorbido por los brazos de reacción. Estos brazos de reacción soportan y fijan la multiplicadora al bastidor.

La multiplicadora tiene un sistema de lubricación principal con un sistema de filtrado asociado a su eje de alta velocidad. Existe un equipo secundario eléctrico de filtrado que permite un grado de limpieza del aceite, disminuyendo así el número de averías y además, tiene en algunos casos un circuito extra de refrigeración.

Algo muy importante es que los componentes y parámetros de funcionamiento de la multiplicadora suelen estar monitorizados mediante sensores tanto del sistema de control como del sistema de mantenimiento predictivo.

#### **6.1.5 Sistema de orientación**

El sistema de orientación, como ya se ha dicho en la descripción del funcionamiento, permite el giro de la góndola alrededor del eje de la torre. Suele estar constituido por un número determinado de motores accionados eléctricamente por el sistema de control del aerogenerador de acuerdo con la información recibida de los anemómetros y veletas colocados en el techo de la góndola. Los motores del sistema de orientación hacen girar los piñones del sistema de giro, los cuales engranan con los dientes de la corona de orientación montada en la parte superior de la torre produciendo el giro relativo entre la góndola y la torre.

Mediante un cojinete de fricción se consigue un par de retención suficiente para controlar el giro de orientación. Además, existe un freno hidráulico que proporciona un mayor par de retención para posicionar y fijar el aerogenerador. La

actuación conjunta de ambos sistemas evita fatigas y posibles daños en el engranaje asegurando la orientación de una manera estable y controlada.

La corona de orientación está dividida en sectores para asegurar una mayor facilidad en caso de reparación debido a posibles daños locales en los dientes.

#### **6.1.6 Sistema de freno**

El freno principal del aerogenerador es del tipo aerodinámico por puesta en bandera de las palas –orientadas éstas  $90^\circ$  para ofrecer la menor resistencia posible al viento–. Al ser el sistema de cambio de paso –*sistema Pitch*– independiente para cada una de las palas, se cuenta con un sistema adicional de seguridad.

El freno mecánico está compuesto por un freno de disco, activado por el sistema hidráulico y ubicado en el eje de alta velocidad de la multiplicadora. Este freno mecánico se utiliza únicamente como freno de aparcamiento o en caso de emergencia.

#### **6.1.7 Sistema hidráulico**

El sistema hidráulico proporciona aceite presurizado a los actuadores independientes del cambio de paso –*sistema Pitch*–, al freno mecánico del eje de alta velocidad y al sistema de freno del sistema de orientación –*sistema Yaw*–. Incorpora un sistema que asegura el nivel de presión y el caudal de aceite necesarios en caso de ausencia de corriente para activar el sistema de cambio de paso de las palas, el freno de disco y el freno del sistema de orientación llevando así al aerogenerador a un modo seguro.

#### **6.1.8 Generador**

Los generadores, en su mayoría actualmente, son del tipo asíncrono doblemente alimentado con cuatro polos, rotor bobinado y anillos rozantes. Este tipo de generador es altamente eficiente y está refrigerado por un intercambiador aire-aire. El sistema de control permite trabajar con velocidad variable mediante el control de la frecuencia de las intensidades del rotor.

Las características y funcionalidades que introduce este tipo de generador son:

- *Comportamiento síncrono frente a la red*

- *Funcionamiento óptimo para cualquier velocidad de viento maximizando la producción y minimizando cargas y ruido gracias a la operación en velocidad variable.*
- *Control de la potencia activa y reactiva mediante el control de la amplitud y la fase de las corrientes del rotor.*
- *Suave conexión y desconexión a la red eléctrica.*

Además, el generador está protegido frente a cortocircuitos y sobrecargas. Por otro lado, la temperatura se monitoriza de manera continua mediante sondas en diferentes puntos del mismo.

### **6.1.9 Transformador**

Se trata de transformadores especialmente diseñados para aplicaciones eólicas. Son del tipo trifásico, encapsulados de resina seca o de silicona.

Actualmente, en los aerogeneradores más modernos el transformador está situado en la parte trasera de la góndola en un compartimento separado por una pared metálica que lo aísla térmica y eléctricamente del resto de componentes de la góndola. Sin embargo, en función del fabricante esta disposición puede variar. Esta situación del transformador en la góndola evita pérdidas eléctricas debido a la reducida longitud de los cables de baja tensión y reduce el impacto visual.

En el caso del tipo seco, el riesgo de incendio es mínimo. Además, el transformador incluye todas las protecciones necesarias para evitar daños como detectores de arco y fusibles de protección.

### **6.1.10 Armarios eléctricos de control y de potencia**

Se trata de un conjunto de armarios repartidos por el aerogenerador y la torre.

- *Armario Top:* es el controlador de la góndola y está ubicado, lógicamente, en la góndola. A su vez, se divide en tres partes:
  - *Sección de control:* se encarga de las tareas propias del gobierno de la góndola.
  - *Convertidor de frecuencia:* se encarga del control de potencia y de gestionar la conexión y desconexión del generador de la red.

- *Sección de embarrados y protecciones: aquí se encuentra la salida de la potencia producida con las protecciones eléctricas necesarias.*
- *Armario Ground:* situado en la base de la torre, junto a la entrada. Desde el mismo se pueden revisar parámetros de la operación del aerogenerador, detener y arrancar la máquina, realizar test de los diferentes subsistemas, etc.
- *Armario Hub:* es el controlador del buje y está situado en el rotor. Se encarga principalmente de la activación del sistema de cambio de paso –*sistema Pitch*– de las palas.

### 6.1.11 Sistema de control

Las funciones del aerogenerador están controladas por un sistema de control con los siguientes subsistemas.

- *Sistema de regulación:* se encarga de seleccionar los valores adecuados de velocidad de giro del aerogenerador, del ángulo de paso de las palas, y de potencia. Éstas se modifican en cada instante dependiendo de la velocidad de viento que llega a la máquina, garantizando así una operación segura y fiable en cualquier condición de viento existente. Las principales ventajas del sistema de regulación son:
  - *Maximización de la producción de energía.*
  - *Limitación de las cargas mecánicas*
  - *Reducción del ruido aerodinámico.*
  - *Alta calidad de energía.*
- *Regulación del pitch:* a velocidades de viento por encima de la nominal, el sistema de control y el sistema de cambio de paso mantienen la potencia en su valor nominal. Con velocidades de viento por debajo de la nominal, el sistema de cambio de paso variable y de control optimizan la producción de energía seleccionando la combinación óptima de revoluciones y ángulo de paso.
- *Regulación de potencia:* el sistema de regulación de potencia o CPU trata de asegurar que las revoluciones por minuto y el par motor del aerogenerador siempre suministren una potencia eléctrica estable a la red.

El conjunto formado por el generador y el convertidor de frecuencia es equiparable al de un generador síncrono con lo que se asegura un óptimo acoplamiento a la red eléctrica con suaves procesos de conexión y desconexión. Además, este sistema conjunto es capaz de trabajar con velocidad variable para optimizar su funcionamiento y maximizar la potencia generada para cada velocidad de viento. También permite gestionar la potencia reactiva evacuada.

- *Sistema de supervisión:* se encarga de verificar continuamente el estado de los diferentes sensores, así como el de los parámetros internos:
  - *Condiciones ambientales: velocidad y dirección del viento o  $T^a$  ambiente.*
  - *Parámetros internos: temperaturas, niveles y presiones de aceite, vibraciones, enrollamiento del cable de media tensión, etc.*
  - *Estado del rotor: velocidad de rotación.*
  - *Posición de las palas –pitch–.*
  - *Situación de la red: generación de energía activa y reactiva, tensión, corrientes y frecuencia.*

### 6.1.12 Rotor

El rotor de los aerogeneradores está constituido por tres palas unidas a un buje mediante los rodamientos de pala. Los diámetros de rotor de los diferentes modelos abarcan, actualmente, desde los 80 m hasta los 90 m.

### 6.1.13 Palas

Las palas de los aerogeneradores normalmente están fabricadas de un material compuesto y con refuerzo de fibra de vidrio o de carbono, que proporciona la rigidez necesaria sin aumentar el peso de la pala. Existen diferentes modelos de pala fabricadas con fibra de vidrio o fibra de carbono exclusivamente, o con una combinación de ambas.

El diseño de las palas muestra el cambio de paso a lo largo de la envergadura completa de la misma, maximizando así la producción energética y reduciendo las cargas y el ruido emitido.

Las palas disponen de un sistema de protección contra-rayos cuya misión es conducir el rayo desde el receptor hasta la raíz de pala donde es transmitido a la máquina para ser descargado a tierra.

Por otro lado, van equipadas con los conductos necesarios para evitar la retención de agua en su interior, lo que podría ser causa de desequilibrios o daños estructurales al impactar un rayo, por ejemplo.

#### **6.1.14 Buje**

El buje está fabricado en fundición nodular y se une a los tres rodamientos de pala y al eje principal mediante uniones atornilladas. Posee una abertura en la parte frontal que permite el acceso al interior para realizar las inspecciones y el mantenimiento tanto del sistema de cambio de paso así como del par de apriete de los tornillos de las palas.

#### **6.1.15 Cono**

El cono protege el buje y los rodamientos de pala de las inclemencias atmosféricas. El cono se atornilla a la parte frontal del buje y está diseñado para permitir el acceso al buje para realizar las labores de mantenimiento.

#### **6.1.16 Torre**

Las torres de los aerogeneradores suelen ser tubos de acero de forma tronco-cónica. Está dividida en tres, cuatro o cinco tramos dependiendo de la altura de torre. La torre se trata superficialmente con pintura de protección especial anti-corrosión. Actualmente, existen prototipos de torres fabricadas en hormigón.

#### **6.1.17 Cimentación**

Las cimentaciones estándar son del tipo losa de hormigón armado con acero. Normalmente su cálculo se basa en las cargas del aerogenerador y considerando un terreno estándar.

Para cada emplazamiento, es necesario revisar las características del terreno junto con los datos de viento para elegir la cimentación más adecuada.

## 7 Breve descripción de la implantación de un parque eólico

A continuación se resumen brevemente los pasos a llevar a cabo en la creación de un parque eólico.

### 1. *Propuesta de proyecto para la viabilidad de un Parque Eólico:*

- *Estudios de viento:* suelen tener una duración de un año y con estos estudios se pretende saber qué tipo de viento existe en la zona, lo que permite decidir qué tipo de turbina o aerogenerador es la más adecuada. Los elementos a tener en cuenta son la longitud de pala, el diámetro del rotor, etc.
- *Coste sobre el precio total del Parque:* se realizará una estimación sobre el precio que va a suponer la creación de dicho parque.

2. *Realización de la obra civil:* se tiene que delimitar los caminos junto con las cimentaciones de cada uno de los aerogeneradores que se van a montar y la subestación desde donde se vigilarán las turbinas. La subestación servirá de almacén de repuestos, residuos de grasa que se cambian en los mantenimientos preventivos, además de ser el centro de trabajo del personal de mantenimiento en la mayoría de los casos.

3. *Montaje de los aerogeneradores:* Tras haber finalizado la obra civil, se comienza a montar las turbinas. Se ensamblarán los distintos tramos que conforman la torre junto con la góndola o cabeza del molino, y además se cablearán todos los elementos internos de la turbina.

4. *Precomisión:* se trata de la verificación del correcto cableado entre la subestación y la turbina. Esto es esencial para que a la hora de energizar el parque no se originen cortocircuitos ni faltas eléctricas.

5. *Puesta en marcha:* una vez energizado el parque, es la hora de realiza un test de chequeo que verifique el buen funcionamiento del aerogenerador. Con esto lo que se persigue es lo siguiente:

- *Que todos los sistemas funcionen correctamente y que no haya nada mal cableado.*
- *Comprobar que existe una buena comunicación con, por ejemplo, el Centro de Control de Energías Renovables –CECOER– en el caso de Acciona Energía. En este caso, se tiene que ver la turbina desde el centro de control en Pamplona, el cual se encarga de supervisar y si existe algún tipo de problema avisa al personal de*

*mantenimiento. En el caso de Gamesa, este también dispone de su centro de control en Pamplona desde donde se vigila el correcto funcionamiento general del parque, se vigilan las incidencias, se establecen las órdenes de trabajo de los empleados y se avisa de las emergencias al personal lo que permite actuar sobre el mismo de forma inmediata en caso de que sea necesario. Además, en caso de que la alarma salte, Pamplona puede apagar la máquina e intentar reanudarla antes de avisar al personal de la planta.*

- *Asimismo, se comprueban las protecciones eléctricas y mecánicas para asegurarse que la turbina es capaz de auto-protegerse en caso de aparición de un problema.*
- 6. Firma del CAP:** es el certificado de aceptación provisional, es decir, el periodo en el que las turbinas tiene que estar funcionando sin que se genere una alarma. Si se supera con éxito esta prueba, el parque entra en garantía y pasa a ser propiedad.
- 7. Mantenimiento:** Tras la prueba del CAP el parque entra en garantía, como ya se ha dicho, y es gestionado por el personal de mantenimiento, los cuales se dividirán en tres grupos:
- *Correctivos: se encargan de realizar las labores correctoras en las turbinas.*
  - *Preventivos: dependiendo de si las turbinas tienen 6, 12 o 24 meses, se realizarán los correspondientes mantenimientos preventivos.*
  - *Guardias: durante las horas no laborables, se destina una pareja de operarios de mantenimiento que asistirá al parque siempre que aparezca una incidencia.*

## 8 Organización del negocio eólico

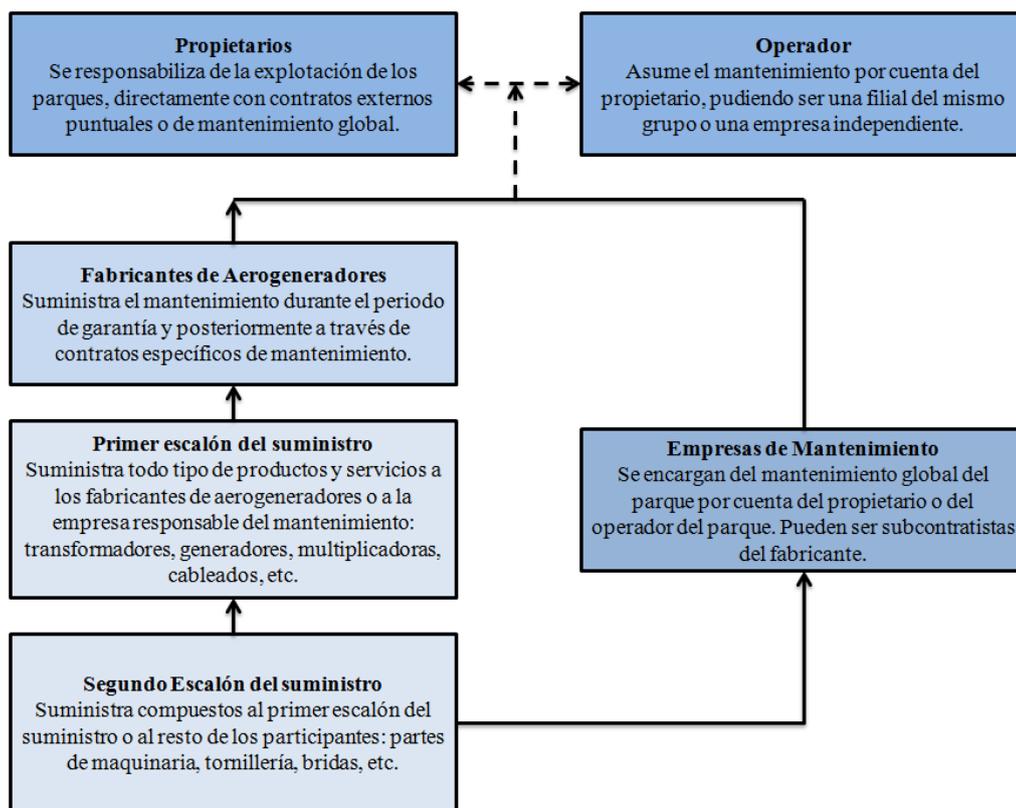


Figura 14 Organización del negocio eólico.

## 9 Coste del uso de la energía eólica

El coste de cada kWh obtenido mediante un sistema eólico depende del coste de la instalación, la cual debe amortizarse a lo largo de la vida; del coste de explotación; y de la energía producida, que depende en gran medida de la velocidad del viento en el emplazamiento.

### 9.1 Coste de la instalación

El coste de la instalación depende del coste de los siguientes elementos: aerogeneradores, obra civil (accesos, cimentaciones, edificaciones), sistema eléctrico (líneas eléctricas, transformadores, sistema de control), e ingeniería y dirección.

En los últimos años se ha incrementado de forma apreciable el tamaño de los aerogeneradores lo que ha llevado aparejado la disminución del coste de la unidad de potencia instalada. En el caso de los países de mayor potencia instalada en

Europa (Alemania, España y Dinamarca) el coste del kW instalado puede estimarse entre 1.000 y 1.200 euros.

En lo que respecta al coste de los distintos componentes que integran un aerogenerador pueden indicarse los porcentajes estimativos reflejados en la siguiente figura:

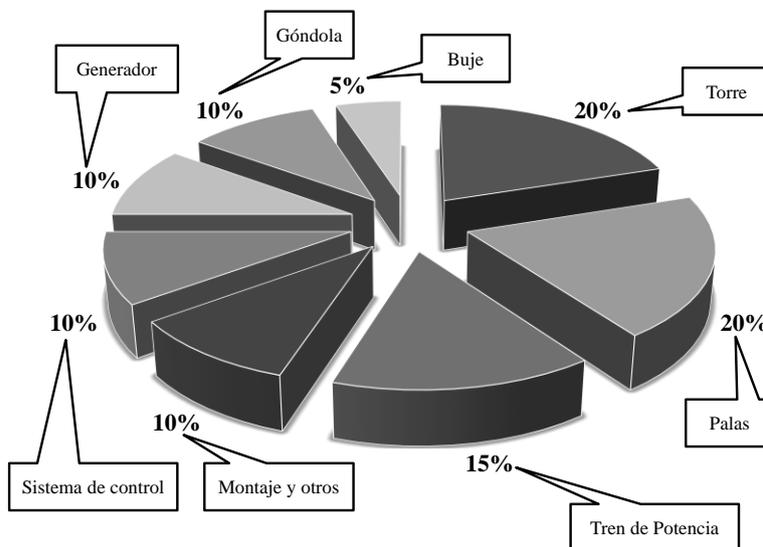


Figura 15 Distribución de los costes de los componentes.

La inversión necesaria para llevar a cabo una instalación eólica conectada a la red puede estimarse descompuesta en cuatro grandes partidas, como se aprecia en la figura:

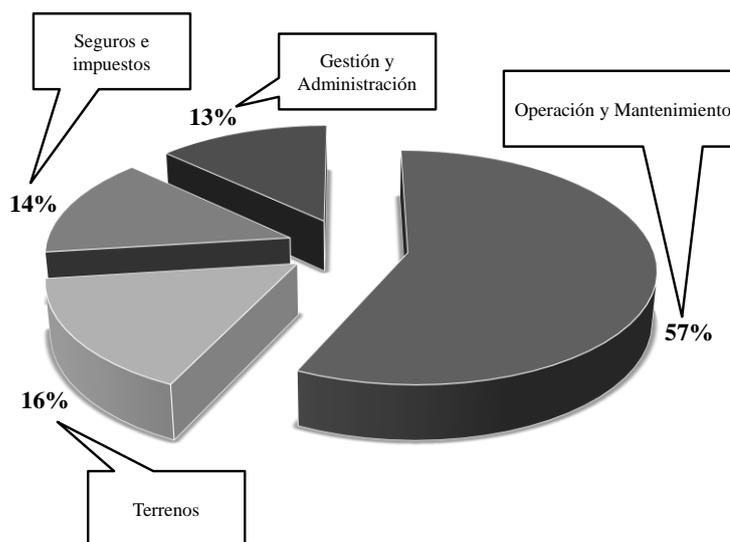


Figura 16 Distribución de los costes de inversión.

Los porcentajes estimados de los costes de explotación se reflejan a continuación:

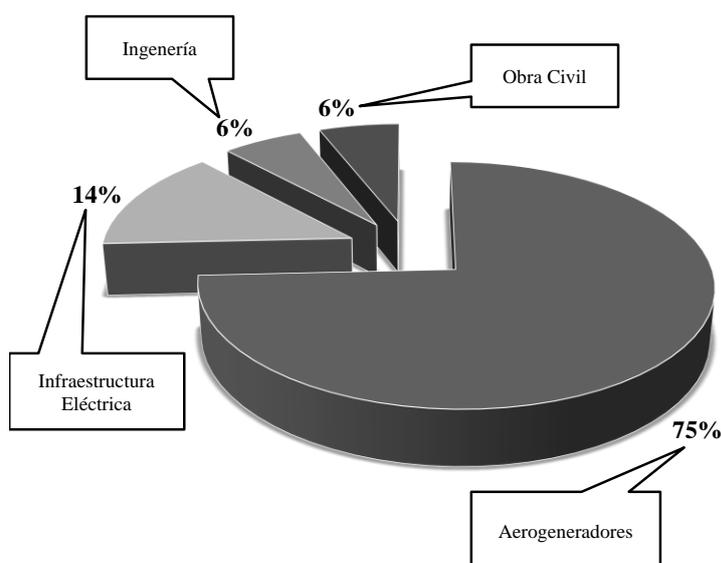


Figura 17 Distribución de los costes de explotación.

Para los parques de potencia media instalados en España los costes de explotación pueden estimarse alrededor del 3,3% de la inversión. Estos costes se desglosan en costes por alquiler de terrenos, costes de operación y mantenimiento (personal, repuesto y consumible), costes de gestión y administración y costes de seguros e impuestos.

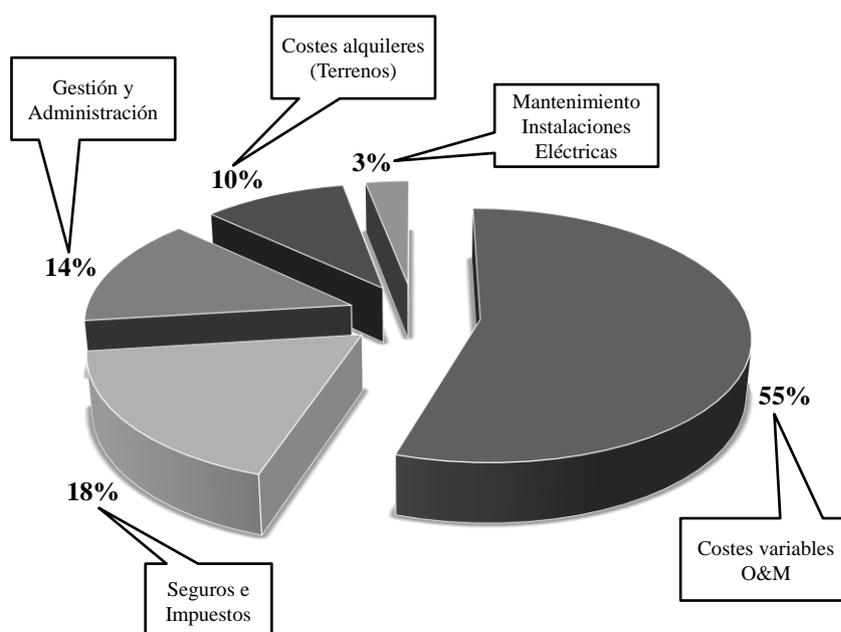


Figura 18 Distribución de los costes de instalación y explotación de un parque eólico.

Los costes de generación están ligados al tamaño de la instalación y, fundamentalmente, a las características del viento del emplazamiento.

Si trasladamos este análisis a los incipientes parques eólicos marítimos, los costes de la energía producida en estos casos dependen del recurso eólico, de la distancia a la costa y la profundidad del agua.

El desarrollo que han tenido los parques offshore en los últimos años y las perspectivas que presentan en un futuro cercano en varios países ha dependido de las reducciones de los costes de las cimentaciones y la transmisión de potencia, el incremento de los tamaños de los aerogeneradores y la mayor productividad en relación con las turbinas en tierra.

## 9.2 Costes de explotación

Como explotación se entienden las actividades ligadas a mantener en funcionamiento el parque eólico en las condiciones óptimas de disponibilidad y flujos económicos. Agrupo dos grandes tareas:

- *Operación y Mantenimiento*
- *Gestión administrativa: cobros, pagos de servicios, impuestos y cánones, etc.*

En 2007, de acuerdo con los datos obtenidos por la AEE (Asociación Empresarial Eólica), los costes variables de operación y mantenimiento se encontraban en el entorno de los 10,21 €/MWh.

Entro los costes fijos de explotación considerados en dicho análisis, se encontraban los siguientes, aproximándose a los 20.000 €/MW instalado/año:

- *Alquileres de terrenos*
- *Mantenimiento de instalaciones eléctricas*
- *Seguros e impuestos*
- *Costes fijos de gestión y administración*
- *Otros costes, etc.*

El inicio de explotación de un Parque Eólico se enfrenta a un coste operativo base de 20,51 €/MWh, lo que suponía en el 2007 un 20% del valor máximo que podía recibirse de la venta del producto.

Tabla 5 Coste de explotación de un parque eólico en 2007.

Concepto de Coste	Valor estimado para 2007
Coste variable O&M	<b>10,21 €/MWh</b>
Otros costes de explotación	<b>8,40 €/MWh</b>
Costes de alquileres	4.102 €/MW/año
Mantenimiento de instalaciones eléctricas	1.158 €/MW/año
Seguros e impuestos	7.684 €/MW/año
Gestión y administración	5.911 €/MW/año
Número de horas equivalentes en 2007	2.245
Coste Medio Total de Explotación (2007)	<b>18,61 €/MWh</b>
Costes anuales (2% de la facturación total)	4.256 €/MW/año
Coste Medio Total de Explotación (2007) con cánones	<b>20,51 €/MWh</b>

## 10 Costes y ciclo de vida de un Parque Eólico

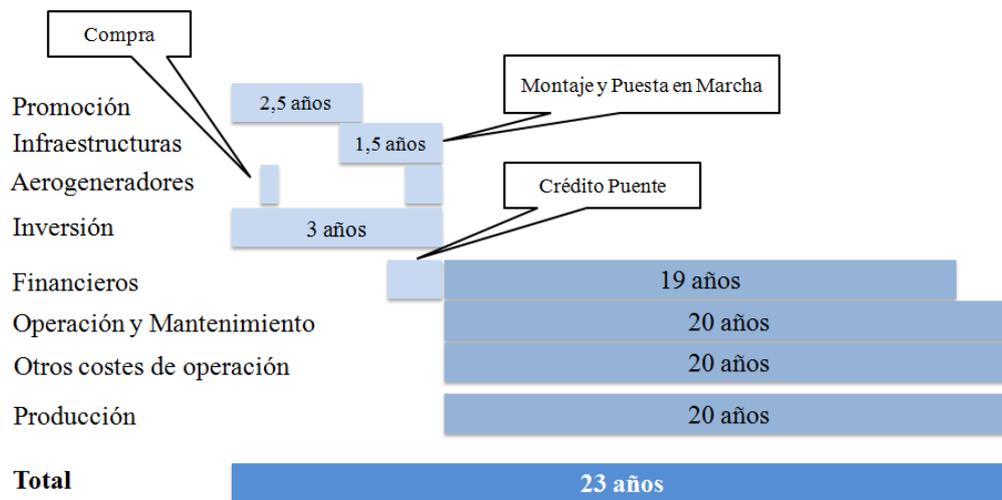


Figura 19 Ciclo de vida de un parque eólico.

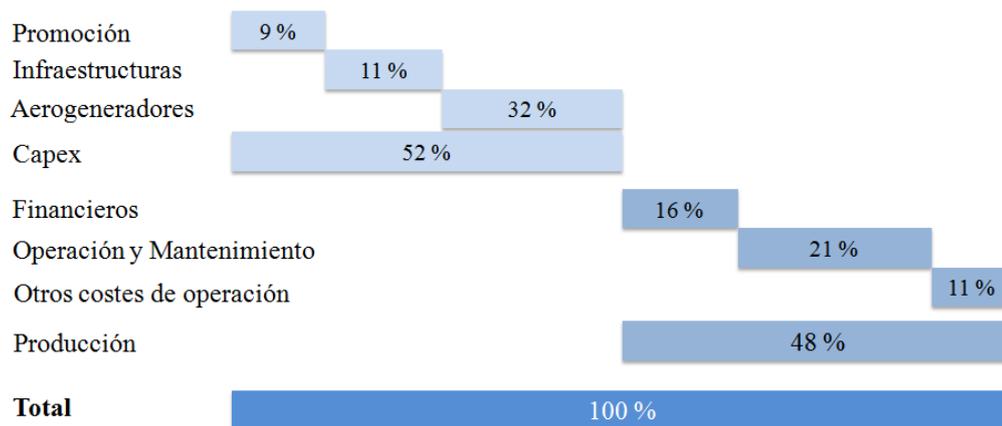


Figura 20 Costes en el ciclo de vida de un parque eólico.

## Capítulo 3

### EL MANTENIMIENTO EN LOS AEROGENERADORES

#### 1 Mantenimiento y aerogeneradores

Los aerogeneradores, como cualquier otro equipo diseñado para producir energía eléctrica, necesitan un mantenimiento orientado a minimizar el número de horas que permanecen fuera de servicio a causa de fallos, averías o paradas para su revisión.

Los componentes que los integran están sometidos a acciones que los deterioran en el tiempo, y precisamente con el mantenimiento se pretende restaurar sus características a un estado similar al inicial para que no sea vea mermada la funcionalidad del propio aerogenerador.

Por la propia naturaleza de un parque eólico y las máquinas que forman su instalación, la actividad de mantenimiento se ha visto favorecida en varios frentes desde la llegada de la electrónica a este tipo de instalaciones, y en general a la industria.

Por un lado, la electrónica ha facilitado la labor de revisión de los aerogeneradores así como la realización de los ajustes necesarios para su correcto funcionamiento.

Por otro lado, el avance tecnológico alcanzado en los equipos de inspección y control está permitiendo conocer la situación real de las máquinas mediante controles periódicos o continuos de las mismas, obteniendo así parámetros que una vez analizados dan un diagnóstico sobre la máquina analizada. Los parámetros más habituales, como se verá al avanzar en el presente capítulo, son las vibraciones y los análisis de aceite, pero hay otros como las termografías, los ruidos, los ultrasonidos, etc., igualmente importantes.

El mantenimiento de aerogeneradores ha conseguido otra avance importante con la implantación de los sistemas informáticos de gestión del mantenimiento, los llamados GMAO, que han permitido recoger, tratar y analizar muchísima cantidad

de información, pudiendo extraer todo tipo de informes y efectuar los más variados análisis de la evolución histórica de los elementos de una instalación.

Estos cambios tecnológicos derivados del desarrollo de la electrónica, de los equipos de inspección y control, y de los sistemas informáticos de gestión de mantenimiento ha traído, a su vez, una evolución en las capacidades técnicas de los operarios de mantenimiento que se han visto obligados a mejorar su formación para poder continuar con el correcto ejercicio de su labor.

A pesar de todo ello no hay que olvidar que las labores de mantenimiento de un parque eólico se basan, fundamentalmente, en el seguimiento periódico del funcionamiento de los aerogeneradores y de las causas que provocan sus paradas, ya sea mediante la presencia física del operador tras la detección de una avería, mediante revisiones periódicas o bien haciendo uso de sistemas de telecontrol o telemando, con el objetivo global de conseguir, como ya se ha dicho, la mayor disponibilidad posible.

Por tanto, para el desarrollo de estas actividades y en función del tamaño de la instalación, en muchos casos es necesaria la presencia de personal fijo encargado del seguimiento y la revisión de los equipos que componen un aerogenerador.

## 2 Características del mantenimiento de parques eólicos

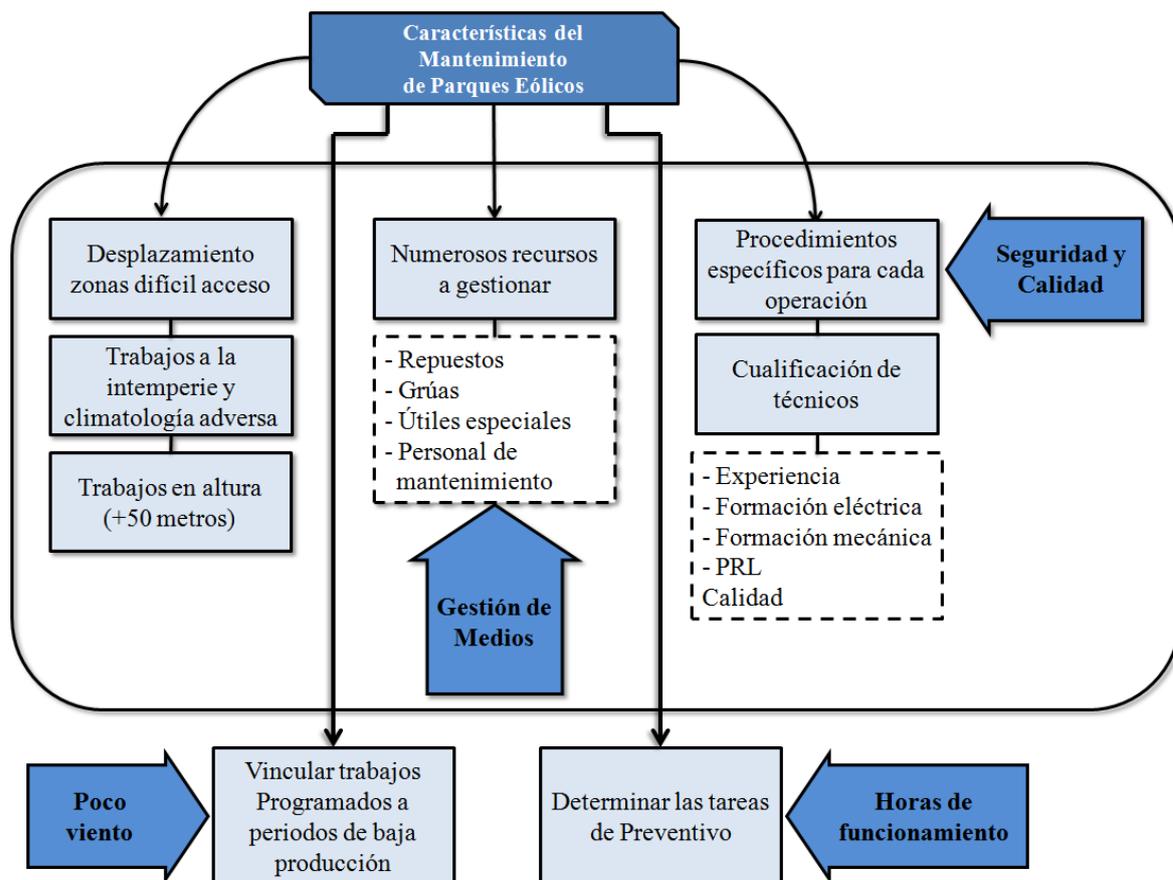


Figura 21 Características del mantenimiento de parques eólicos.

## 3 Objetivos de la «Operación y Mantenimiento» en un Parque Eólico

Los objetivos globales del área comúnmente denominada «Operación y Mantenimiento» de un Parque Eólico se pueden clasificar en los siguientes:

- Maximizar la cuenta de resultados en la vida útil de los parques, es decir: máxima energía eléctrica y mínimo coste.
- Minimizar los riesgos del proyecto.
- Asegurar el funcionamiento en condiciones de seguridad para las personas e instalaciones.
- Control permanente de los recursos de mantenimiento.

## 4 Niveles de actividades de mantenimiento

Un aspecto muy importante es la clasificación de los niveles de las actividades de mantenimiento en función de la importancia de la avería y de los periodos de indisponibilidad a los que pueda dar lugar. Así, los niveles de actividad de mantenimiento se pueden clasificar en:

- **Sucesos poco importantes:** se consideran eventualidades sin importancia excesiva en la máquina o en la infraestructura eléctrica que pueden provocar la parada de uno o varios aerogeneradores. En este caso puede ser necesaria la intervención de un operario, únicamente para verificar el correcto estado del sistema.
- **Revisiones periódicas:** se trata, como ya se ha dicho, de actividades asociadas al mantenimiento preventivo de los aerogeneradores y suponen en muchos casos una parada del aerogenerador.
- **Averías graves:** ciertas averías pueden dar lugar a paradas de larga duración del aerogenerador, en este caso es importante realizar por parte del servicio técnico de operación y mantenimiento una correcta detección, diagnóstico y reparación de los equipos fuera de servicio hasta lograr la nueva puesta en marcha de la máquina. Estas labores estarían dentro del mantenimiento correctivo.
- **Destrucción de componentes:** aunque la probabilidad de que un componente se destruya completamente por fallo de los sistemas de seguridad o condiciones meteorológicas extremas es muy reducida no debe despreciarse.

## 5 Indicadores clave para el mantenimiento

El parámetro que permite determinar el buen desempeño de las labores de mantenimiento en los procesos de mantenimiento industriales y en los estudios de fiabilidad de maquinaria es el conocido como tiempo medio entre fallos –MTBF–. Este parámetro se define como el cociente entre las horas del periodo analizado y el número de fallos detectados en un componente en ese intervalo de tiempo (donde  $N_F$  es el número de fallos en el periodo analizado  $T$ )

$$MTBF = \frac{T}{N_F}$$

Este parámetro permite determinar los componentes más sensibles al fallo y analizar la efectividad del diagnóstico y reparación del componente tras la aparición de la avería. Asimismo, el estudio del tiempo medio entre fallos –MTBF– en función de la importancia de la avería y el tipo de componente aporta información sobre la prioridad de las actividades de mantenimiento correctivo.

En el ámbito de la operación de parques eólicos es interesante diferenciar entre tiempo medio entre fallos total del parque,  $MTBF_T$ , y el asociado a las máquinas afectadas,  $MTBF_{MA}$ .

El MTBF total del parque se define como el tiempo medio de aparición de un mismo error en cualquier aerogenerador de la planta y se calcula como sigue, donde  $N_A$  es el número de aerogeneradores del parque

$$MTBF_T = \frac{T \cdot (N_A)_{total}}{N_F}$$

El MTBF correspondiente a las máquinas afectadas,  $MTBF_{MA}$ , será el mismo cociente exceptuando que el número de aerogeneradores  $N_A$  corresponderá al número de máquinas en las que se ha detectado el fallo

$$MTBF_{MA} = \frac{T \cdot (N_A)_{fallo}}{N_F}$$

El análisis de ambos factores aporta mucha información a las tareas de mantenimiento. Un  $MTBF_T$  reducido es un indicador claro de la aparición de un problema en el componente analizado, sin embargo es muy adecuado saber el

grado de concentración de la avería en las máquinas, esta información la aporta el MTBFMA. Si el error del componente es de carácter general puede ser incluso necesario su reposición en todas las máquinas (*retrofit* o mejora de diseño), si por el contrario la concentración de la avería se centra en pocas máquinas las acciones a tomar no son tan drásticas y se puede explicar por problemas puntuales en el montaje o la puesta en marcha de la máquina.

Finalmente es necesario conocer la penalización sufrida en el decremento de la disponibilidad asociada a la avería del componente. Este decremento de disponibilidad se calcula como el cociente entre el número de horas de parada de la turbina por erro en el componente con respecto a las horas del periodo:

$$\Delta D = \frac{T_{\text{AVERÍA}}}{T}$$

### 5.1 Cronología de averías

Continuando con la idea de los indicadores, uno muy importante relacionado con el funcionamiento de las labores de mantenimiento es el análisis de la cronología de las averías que mantienen una máquina fuera de servicio. Es muy importante analizar los tiempos desde que se produce la avería hasta que se detecta y finalmente se subsana.

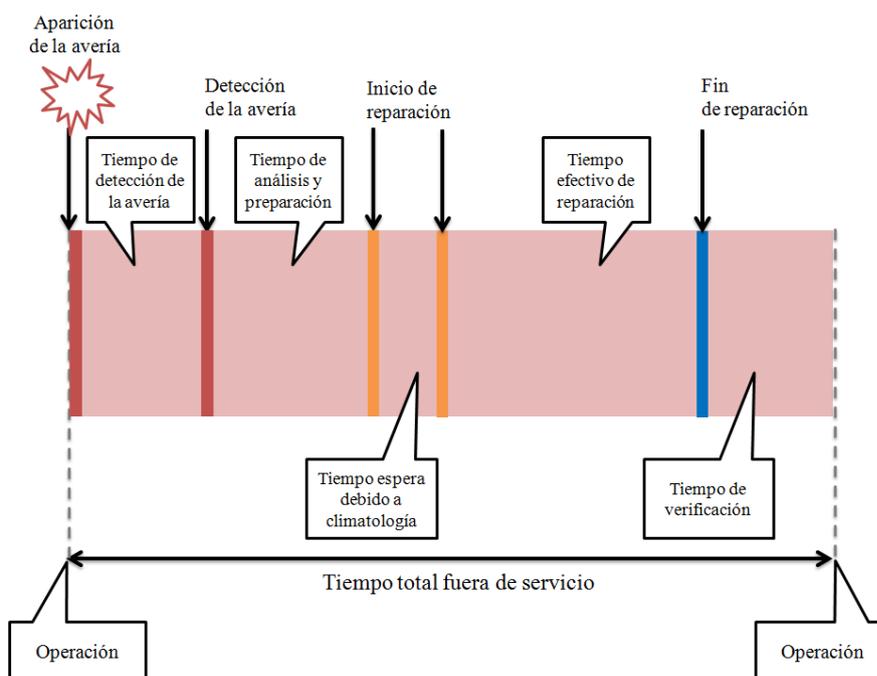


Figura 22 Tiempos asociados a la cronología de una avería.

Si la disponibilidad de un aerogenerador es superior al 98% –algo habitual hoy en día– normalmente se prevé una media de ocho días al año en los cuales el aerogenerador estará fuera de servicio. Se estima que cuatro de esos días se dedicarán a mantenimiento preventivo y correctivo y el resto corresponden al tiempo que se utiliza en detectar la posible avería, llegada del equipo de mantenimiento u obtención de materiales y piezas de repuestos.

En lo relativo a la fiabilidad, se persigue un incremento de un 20% de MTBF (Tiempo Medio Entre Fallos) en los aerogeneradores marinos y un 10% para los terrestres. Asimismo el Tiempo Medio de Reparación se pretende reducirlo en un 50% en el primer grupo y un 20% en el segundo. Con todo esto la consecuencia sobre la disponibilidad pasará de un 85-90% actual en los marinos a un 97-98%, y de un 97-98% actual en los terrestres al 98-99%.

## 5.2 Evolución de las averías

Los aerogeneradores son máquinas formadas por componentes. Éstos están constituidos con una serie de materiales y además están sometidos a una serie de solicitaciones en el tiempo, lo que provoca el deterioro de los mismos, llegando a modificar en cierta medida su funcionamiento y con ello el del propio aerogenerador.

Mientras estas modificaciones del funcionamiento sean tolerables, se puede decir que no hay una avería. Pero alcanzado cierto estado de deterioro donde el funcionamiento se sale de lo especificado o esperado, llegamos a la avería.

La siguiente figura muestra de manera básica la evolución de las averías:

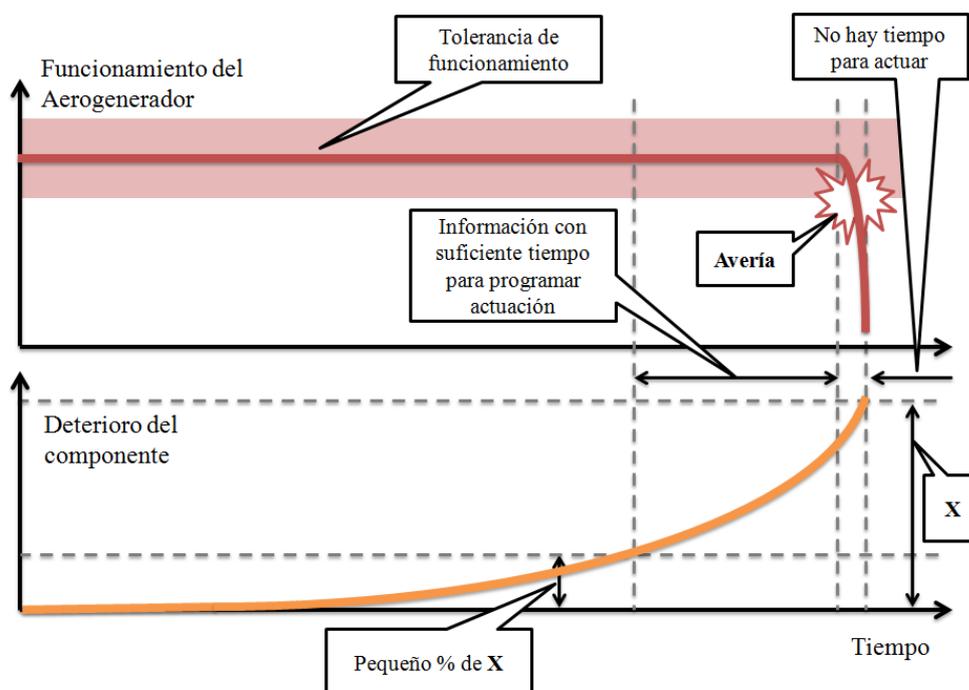


Figura 23 Evolución de las averías en un aerogenerador.

De algún modo, lo que la gráfica muestra es que el deterioro en el tiempo de las características de un componente X, lo llevará en un determinado momento a un funcionamiento fuera de las especificaciones, o fuera de su tolerancia de funcionamiento, dando lugar a la avería.

## 6 Origen de averías

El origen de las averías en los aerogeneradores se puede clasificar en los siguientes puntos:

- *Problemas mecánicos: 40 % de los casos.*
- *Caída de rayos: 20 % de los casos.*
- *Incendio: 7 % de los casos.*
- *Rachas de viento: 4 % de los casos.*
- *Otros: 28,5 % de los casos.*

Las averías mecánicas más habituales, como se verá más adelante, se producen en engranajes y cojinetes, por rotura o desgaste. Todo esto se produce debido a defectos del material, fatiga, uso de aceite indebido, altas temperaturas del aceite, vibraciones, sobrecarga, etc.

Los rayos tienden a caer en el punto más alto, por esta razón, los aerogeneradores son un blanco natural, debido tanto a su altura como a su ubicación elevada. Cuando impacta un rayo, se crea un arco eléctrico que se extiende desde el punto de contacto a través de otros componentes conductores que pueden alcanzar una temperatura de hasta 30.000 °C. El resultado es una expansión explosiva del aire contenido en el plástico que compone la pala, provocando grietas y derretimiento.

Se ha comprobado que en algunos parques eólicos, los generadores registran hasta diez impactos de rayos en cada pala por año, eventos que habitualmente no generan daños debido a los modernos sistemas de protección para interceptar y transmitir el rayo de manera eficaz y segura hacia las otras partes del sistema de protección del aerogenerador. Estos sistemas tienen una eficacia aproximada del 95% de los rayos, el 5% restante sigue causando problemas.

Los incendios pueden ser tanto por rayos como por sobrecalentamiento de cojinetes, fallos en el sistema de lubricación –un generador cuenta con entre 200 y 400 litros de aceite de lubricación en su interior–, cortocircuitos y, especialmente, por chispas durante los trabajos de mantenimiento. La posibilidad de combatir un incendio en lo alto del aerogenerador es muy limitada, motivo por el cual los incendios normalmente concluyen con la destrucción total de la góndola.

## 7 Tipos de averías

Los tipos de averías que pueden tener lugar en un aerogenerador se pueden clasificar como sigue:

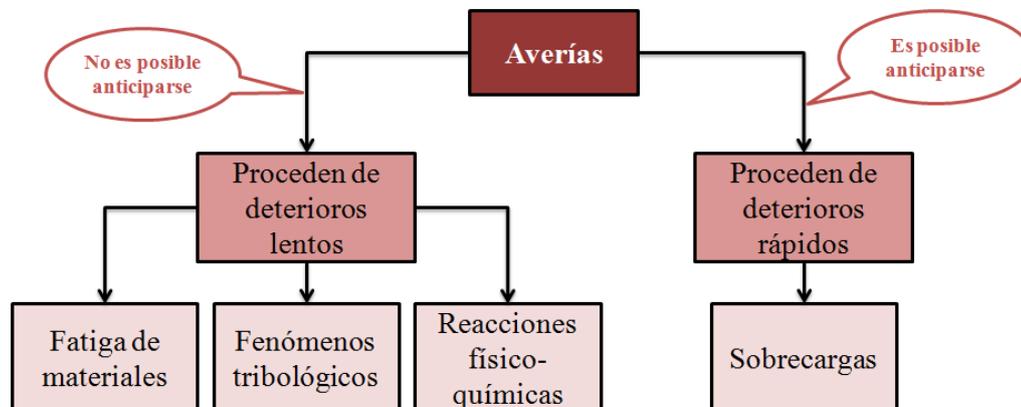


Figura 24 Tipología de averías en aerogeneradores.

- **Fatiga de materiales:** se trata del desarrollo de fisuras por tensiones variables en materiales metálicos y compuestos –composites–. Dentro de este grupo podemos hablar de grietas en las palas, en la torre, en el bastidor, etc.; daños por compresión o impacto, denominado pitting, en engranajes y rodamientos; fisuras de flexión en raíz de dientes; fisuras de fatiga en ejes, uniones atornilladas, etc.
- **Fenómenos tribológicos:** provocado por cuerpos con movimiento relativo entre sí y sometidos a presión (abrasión, adhesión, desgaste, etc.) Dentro de este grupo cabe destacar el desgaste de engranajes y rodamientos; el de las placas deslizantes del sistema de orientación y el desgaste del borde de ataque de las palas, entre otros.
- **Reacciones físico-químicas:** se trata de la corrosión de materiales, así como del deterioro de polímeros por la radiación ultravioleta, el hidrógeno y el ozono. Estas reacciones traen como consecuencia la corrosión de partes metálicas no protegidas, el deterioro de los latiguillos hidráulicos y las cubiertas de cables, así como de las juntas de goma, entre otros.: se trata de roturas por sollicitaciones mecánicas como pandeos, obturaciones, etc. Pueden provocar la rotura brusca de palas, ejes, tornillería, etc.; además

puede dar lugar al pandeo de la torre y de las propias palas; el gripado de los ejes así como el bloqueo del circuito hidráulico.

## 8 Distribución de fallos por subsistemas y componentes

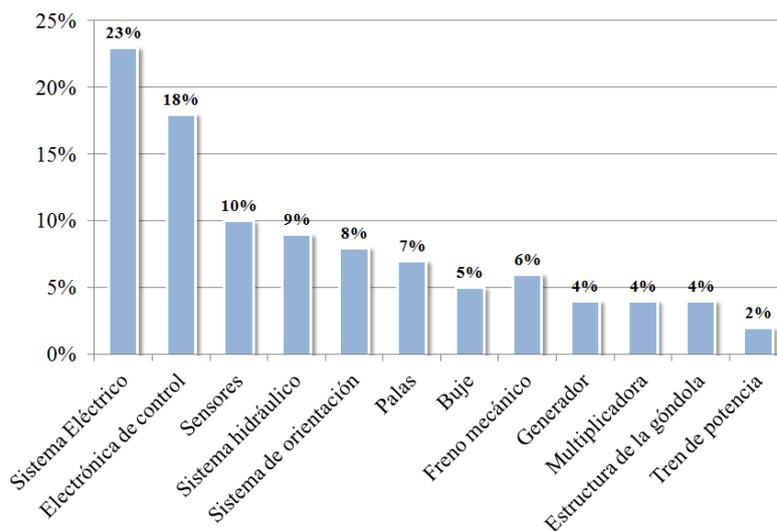


Figura 25 Distribución y porcentaje de fallos en un aerogenerador.

## 9 Frecuencia y tiempo de paradas por fallo

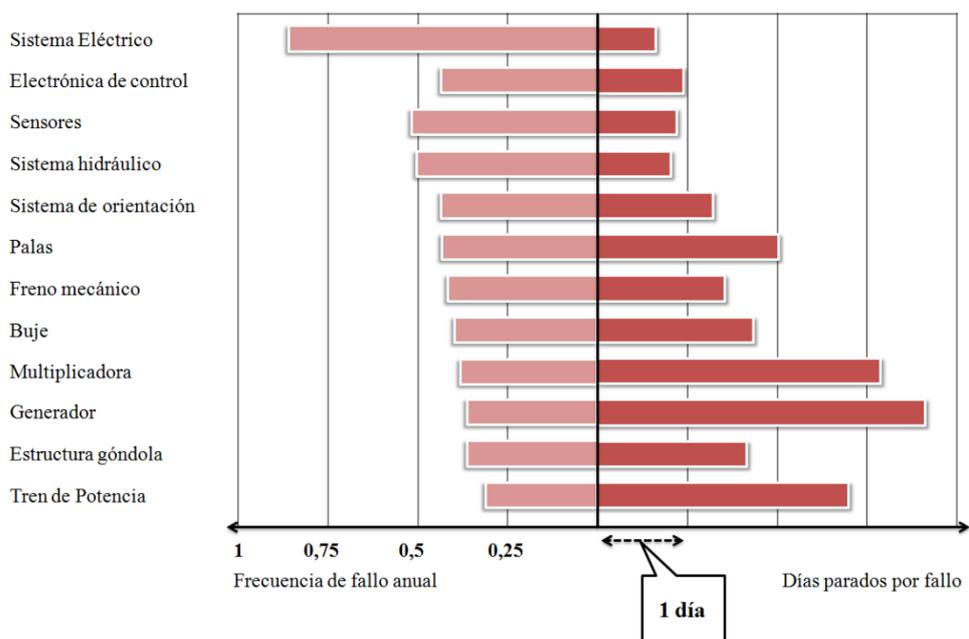


Figura 26 Frecuencia y tiempo de paradas por fallo en un aerogenerador.

## 10 Organización de las labores de mantenimiento

Es el punto más complicado en la actividad de mantenimiento de un parque eólico. Lo es, porque en muchas circunstancias se depende de situaciones que no se pueden prever. Es posible tener planificada la intervención, gestionados los recursos necesarios y puestos a disposición para ejecutar las tareas y, a causa de unas condiciones climatológicas, por dificultades de acceso o exigencias de la producción, no poderlo hacer.

Por todo ello, la organización de las labores de mantenimiento se debe realizar según las posibilidades de previsión. El mantenimiento preventivo es, como ya se ha visto, una actividad completamente programada que incluye entre otros aspectos:

- *Seguimiento del funcionamiento de la instalación.*
- *Análisis y resumen de la información recogida.*
- *Gestión de la instalación.*
- *Revisión de los sistemas de seguridad y componentes del parque eólico.*
- *Cambio de consumibles, etc.*

De todas estas tareas es conocida su frecuencia de ejecución y por lo tanto su influencia en los costes de explotación. En este punto es muy importante desglosar los costes de mantenimiento en fijos, debidos a desplazamientos, materiales, servicios, etc.

Una buena planificación del mantenimiento debe ir encaminada a optimizar los recursos disponibles y reducir al máximo las paradas de los aerogeneradores. Estos objetivos se cumplen gestionando convenientemente la información recibida del personal de mantenimiento y aprovechando la experiencia en la operación del parque eólico. En la figura de la siguiente página se representa un diagrama de gestión de la información generada en el proceso de mantenimiento de un parque eólico. El histórico de alarmas del parque y las observaciones del personal de la planta permiten establecer un diagnóstico del estado de los componentes que junto a los planes de mantenimiento preventivo y los resultados de las revisiones anteriores permiten planificar el calendario de intervenciones en el parque. El

resultado de los trabajos de mantenimiento ejecutados debe ser oportunamente documentado en una serie de informes técnicos y administrativos donde se recoja los valores de ajuste de los componentes revisados, cronogramas de averías, materiales utilizados, dedicación, servicios, etc. Toda esta información es importante realimentarla durante la fase de diagnóstico para el correcto funcionamiento del proceso.

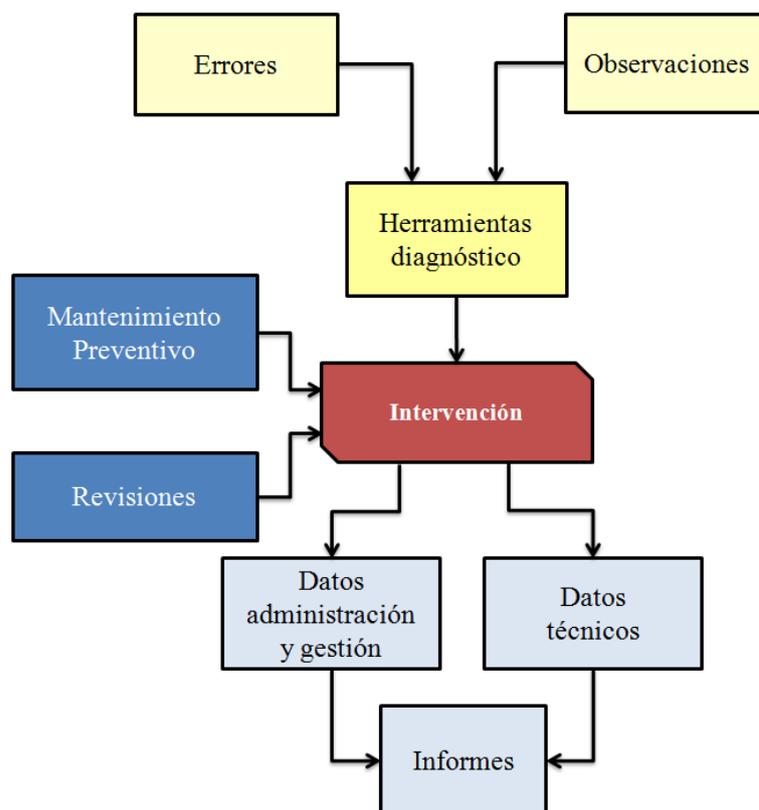


Figura 27 Gestión de la información durante el proceso de mantenimiento de un parque eólico.

Para el caso de mantenimiento correctivo, provocado por averías que requieren una actuación intensiva, es importante realizar un seguimiento lo más completo posible de la incidencia: detección de la avería, análisis, organización de la reparación, documentación, etc.

Finalmente, la implantación de un sistema de mantenimiento predictivo en función de la evolución cualitativa del estado de salud de los componentes que configura la planta puede hacer más efectivo la gestión de recursos y la optimización de la producción del parque eólico. Sin embargo, la puesta a punto de un plan de mantenimiento predictivo requiere de sistemas de telecontrol potentes y

herramientas de diagnóstico y detección de anomalías muy probados para garantizar el éxito del proceso.

En definitiva, la planificación de las tareas de mantenimiento es en todo caso muy aconsejable, si no imprescindible, para lograr unos beneficios añadidos.

Por un lado se mejoran los tiempos de ejecución de los trabajos, consiguiendo disminuir los retrasos ocasionados al no disponer de los recursos adecuados.

La calidad de los trabajos se verá directamente afectada si en la ejecución se ha dispuesto correctamente de todas las partidas necesarias y si el alcance del trabajo a desarrollar se ha delimitado correctamente.

Por último, la correcta planificación permite una mayor disponibilidad de los recursos existentes en el parque, que pueden ser encauzados hacia otras actividades suplementarias

Un área muy importante, que va unida a la planificación de los trabajos, es la gestión de los almacenes que van a facilitar los materiales necesarios para la realización de los trabajos. El estudio previo de los repuestos necesarios para los distintos equipos, los materiales que se van a utilizar en cada tipo de revisión, los plazos de suministro, en definitiva, todo lo asociado a almacén, permitirá realizar una planificación más detallada. De esta forma se evitan todos los tiempos que frecuentemente se asocian a esperas de materiales.

Como conclusión, hay que destacar que para que la planificación se pueda llevar a cabo y no sufra desviaciones en el momento de la ejecución de los trabajos, entre operación y mantenimiento debe existir una perfecta y fluida comunicación.

## 11 Estructura organizativa del mantenimiento

A continuación se representa un diagrama que refleja el esquema operativo del mantenimiento de un parque eólico:

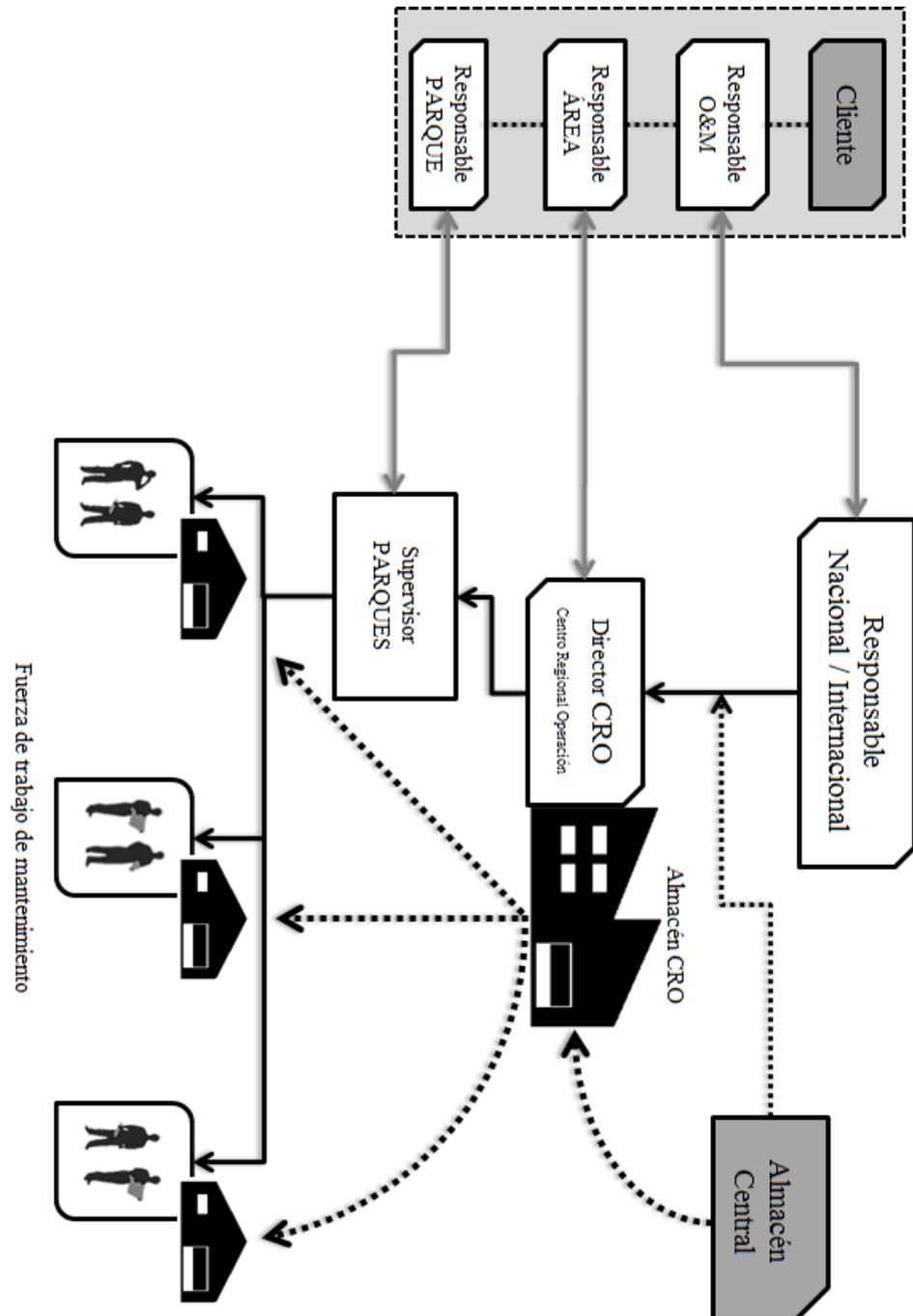


Figura 28 Operación del mantenimiento de un parque eólico.

## 12 Tipos de mantenimiento en las instalaciones eólicas

Una vez finalizada la obra de un parque eólico, se inicia la explotación del mismo. En ese momento, la disponibilidad y rendimiento de los aerogeneradores se convierten en los dos factores más importantes, y ambos dependen de un adecuado mantenimiento.

Hasta la actualidad, en mayor o menor medida, se han aplicado planes de tipo periódico basados principalmente en las acciones y períodos de mantenimiento recomendados por los fabricantes.

El principal inconveniente es que suele fijarse para toda la vida de funcionamiento de un aerogenerador, sin tener en cuenta los condicionantes de trabajo que soporta dicha máquina, como las climatológicas y de viento, los trabajos en altura y de riesgo elevado, los desplazamientos difíciles, los repuestos de gran peso y dimensiones, los esfuerzos soportados por sus distintos componentes o el número de horas que el aerogenerador está trabajando.

Dentro de una instalación eólica, en los aerogeneradores y la subestación eléctrica se encuentran los siguientes tipos de mantenimiento: preventivos, pequeños correctivos, grandes correctivos y modificaciones o mejoras de diseño.

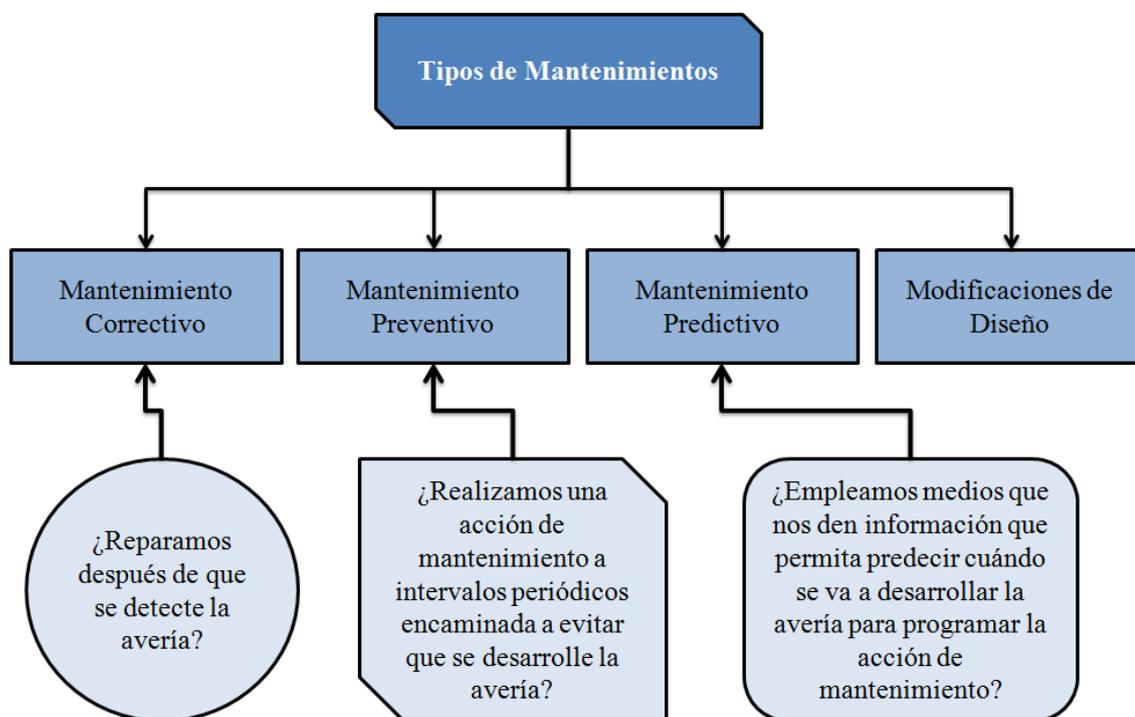


Figura 29 Tipos de mantenimiento en un parque eólico.



Figura 30 Aplicación de los tipos de mantenimiento en un parque eólico.

Cada uno de estos tipos de mantenimiento se realizará en cualquiera de las dos partes en que se divide la instalación eólica:

- **Parte mecánica:** la constituyen todos los componentes del aerogenerador, rotor, góndola, generador, multiplicadora, palas, etc.
- **Parte eléctrica:** la forman los componentes de la Subestación eléctrica, las líneas de alta, los centros de transformación y el sistema de celdas de media tensión presentes en el aerogenerador, así como un sistema de control que automáticamente selecciona la condición óptima y que incluye los armarios eléctricos Top y Ground.

### 12.1 Adecuación de los tipos de mantenimiento

- El **Mantenimiento Correctivo** es adecuado en sistemas cuya avería no entraña grandes costes de parada ni de reparación. Sin embargo, este no es el caso de los aerogeneradores.
- El **Mantenimiento Preventivo** es adecuado en sistemas cuya avería entraña significativos costes de parada y/o de reparación; con la condición de que estos sistemas trabajen de forma uniforme en el tiempo, es decir, a régimen constante.
- El **Mantenimiento Predictivo**, por sus características, se muestra como el más adecuado para los aerogeneradores.

### 13 Mantenimiento preventivo

En el caso de una instalación eólica, se programan unas intervenciones periódicas para la realización de unos trabajos de acuerdo a la situación clásica del preventivo. Las intervenciones están programadas para realizarse cada cierto tiempo, repitiéndose cíclicamente. Como es lógico, el contenido de cada intervención varía de una frecuencia a otra, siendo más exhaustivo cuando mayor es el intervalo definido.

Uno de los principales problemas que afronta este tipo de mantenimiento hasta el momento, es que existe una gran divergencia a la hora de realizar un mantenimiento preventivo. Además, la duración de las tareas de mantenimiento varía según los Parques Eólicos, entre otras razones. Esta problemática se aprecia claramente cuando, por ejemplo, no se realizan ciertas tareas que sí aparecen en el las listas de chequeo por motivos económicos u otras dificultades. Tampoco existe una uniformidad en las tareas que se realizan, ni existe una documentación donde se explique qué orden llevar para realizar un mantenimiento en concreto. Hoy en día, lo normal es que se utilice el orden de las tareas tal y como vienen especificadas en las listas de chequeo.

De hecho, al tener maquinas con distintas configuraciones, existen variaciones entre los mantenimiento. Por tanto, para detectar estas variaciones es necesaria una estandarización, entre otros objetivos.

Dejando de lado esta problemática hay que destacar que en general, en los preventivos, para el correcto mantenimiento del aerogenerador, se definen inspecciones periódicas de acuerdo a un calendario:

Durante los dos primeros años desde la puesta en marcha del aerogenerador:

- *Revisión a los 3 meses*
- *Revisión a los 6 meses*
- *Revisión a los 12 meses*
- *Revisión a los 18 meses*
- *Revisión a los 24 meses*

A partir de los dos primeros años de la puesta en marcha

- *Revisiones semestrales*

La realización de estos mantenimientos preventivos tiene una duración variable dependiendo del tipo de revisión y del tipo de aerogenerador. Además, exige disponer de todos los recursos previamente. Para ser realizado de manera eficiente no requiere desmontar ningún componente o equipo principal de la instalación.

En la parte eléctrica, aparte de las revisiones anuales realizadas por el personal cualificado, hay que tener en cuenta las inspecciones reglamentarias que deben pasarse cada tres años.

La particularidad a la hora de preparar un plan de mantenimiento preventivo para un parque eólico es la inexistencia de históricos de equipos sobre los que basarse. Ello supone, indudablemente, recurrir a recomendaciones, procedimientos e instrucciones de fabricantes y tecnólogo de los equipos, experiencia en instalaciones similares, así como al conocimiento que pueden aportar los técnicos.

Con el transcurso de los años, ese histórico ya puede ir creciendo y permite que se puedan ir revisando los planes de mantenimiento originales, y que se puedan realizar los típicos análisis propios del departamento de mantenimiento, a la vez que conducen a modificaciones de algún equipo que haya sido históricamente conflictivo.

Además, la evolución del tratamiento informático que se da a toda la información que genera una actividad como el mantenimiento, supone un respaldo muy fuerte en las posibilidades de comunicación, al tener este tipo de instalaciones una dispersión muy grande de emplazamientos.

En definitiva, el mantenimiento preventivo incluye todas las acciones periódicas que recomienda el fabricante para mejorar el funcionamiento de los equipos mecánicos, eléctricos o hidráulicos que componen el aerogenerador.

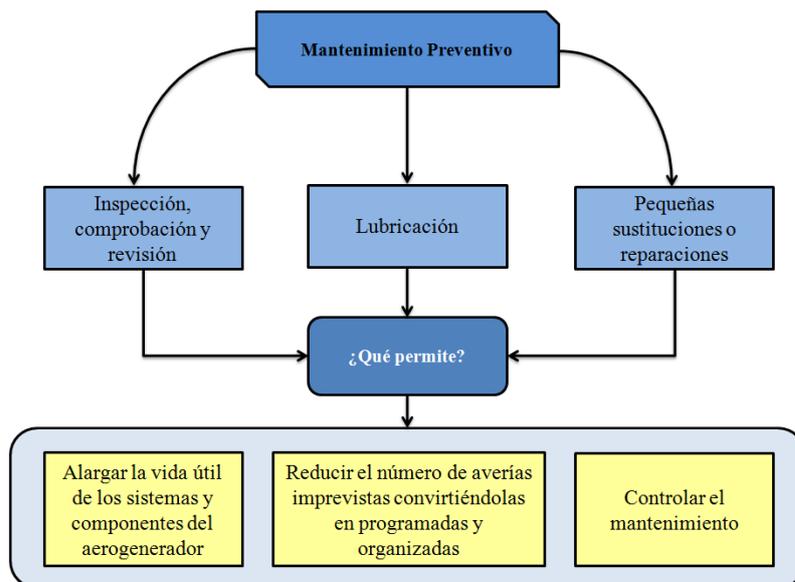


Figura 31 Esquema del mantenimiento preventivo en un aerogenerador.

En general, el mantenimiento preventivo se basa en la técnica organizativa del RCM –Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad–, un proceso que realiza el análisis sistemático, objetivo y documentado para desarrollar un plan de mantenimiento. El RCM analiza cada sistema y sus fallos, clasificando los efectos de cada fallo de acuerdo al impacto en la operación del aerogenerador, el coste y la seguridad.

El RCM dirige los esfuerzos del mantenimiento a conservar los equipos y la función que realizan, en condiciones suficientes, aunque no sean las óptimas.

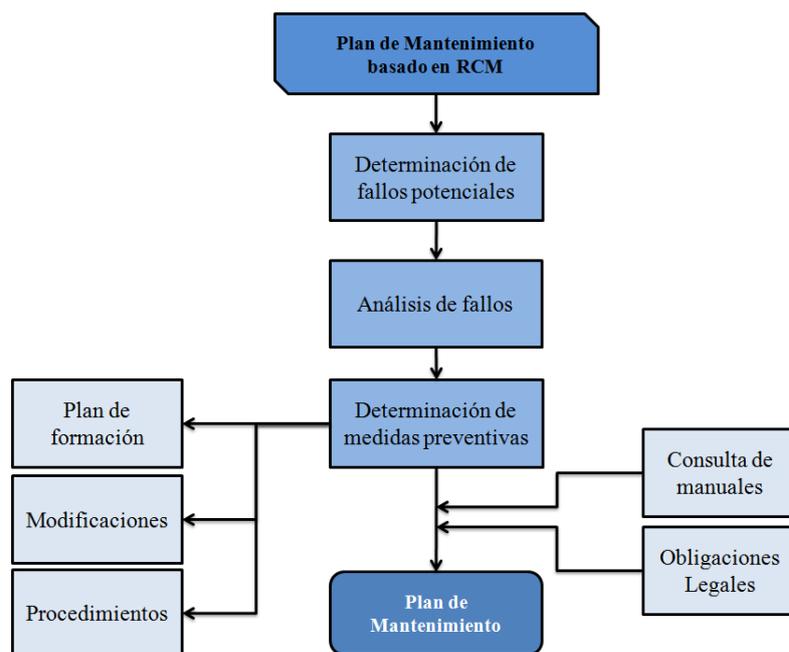


Figura 32 Plan de mantenimiento preventivo basado en RCM.

Antes de detallar algunos ejemplos de operaciones de mantenimiento preventivo que se indicarán más adelante conforme avanza el capítulo, dentro del mantenimiento preventivo se pueden encontrar las siguientes tareas:

- a) Detección de fisuras o grietas en el buje o palas.*
- b) Revisión de uniones atornilladas o del tensionado de los pares de apriete.*
- c) Lubricación de cojinetes, soportes y rodamientos.*
- d) Inspección auditiva del sistema de orientación.*
- e) Test de aceite de la caja multiplicadora.*
- f) Revisión de los niveles del sistema hidráulico, etc.*

## 14 Mantenimiento correctivo

### 14.1 Pequeños correctivos

Hace referencia a intervenciones de los equipos de mantenimiento no programadas o de emergencia. El alcance de las reparaciones del mantenimiento correctivo incluye la reparación o sustitución de la totalidad o parte de los equipos defectuosos.

Los pequeños correctivos agrupan pequeñas averías y cambios de componentes pequeños.

La realización de estas operaciones de pequeños correctivos no precisa mucho tiempo, habitualmente, para su detección y solución. En la medida de lo posible, es conveniente utilizar el mismo equipo existente de forma estable para el mantenimiento de la instalación.

En el supuesto de necesitar material debe asegurarse su acopio previamente a la realización de los trabajos, aunque lo habitual es, en base a los datos históricos, disponer en los emplazamientos de un stock mínimo de los repuestos y consumibles habituales para este tipo de intervenciones.

### 14.2 Grandes correctivos

Se incluyen principalmente los siguientes trabajos:

- a) *Cambio de pala*
- b) *Cambio de rotor*
- c) *Cambio de rodamiento de pala*
- d) *Cambio de generador*
- e) *Cambio de transformador*
- f) *Cambio de multiplicadora*
- g) *Cambio de góndola*
- h) *Cambio de tramo de la torre*

Las operaciones de grandes correctivos requieren más tiempo para su ejecución y una programación muy detallada, al estar supeditados a más recursos tanto

humanos como materiales. No se puede acometer con el personal habitual de mantenimiento de la instalación porque, entre otras razones, precisan del movimiento de cargas pesadas con grúas de gran tonelaje en zonas de reducido tamaño y difícil acceso, así como el control de las cargas a gran altura y el depositado de los sistemas involucrados con gran precisión.

Los grandes correctivos suponen la realización de una planificación entre los distintos actores existentes en un parque eólico: promotor (cliente), y empresa de mantenimiento (contratista), la cual a su vez debe mover a terceros (grúas, repuestos, otras empresas especializadas, etc.). En estas operaciones es importante el factor climatológico y predicción de viento. Hoy en día, existen suficientes herramientas de predicción para programar estos trabajos de la mejor y más eficiente manera posible, herramientas también útiles para otros trabajos de preventivo, modificaciones de diseño, etc.

## **15 Mantenimiento predictivo**

Los servicios que plantea la nueva filosofía de mantenimiento predictivo en los parques, se compone de varios tipos de inspección y estudio que se complementan y consiguen evitar los graves problemas que, hasta no hace mucho, se producían en los aerogeneradores.

Tanto en la parte mecánica como en la eléctrica, se utilizan técnicas de predictivo que dan un apoyo al mantenimiento de la instalación y permiten adelantarse a posibles averías.

Estas técnicas de mantenimiento predictivo permiten la detección precoz de fallos y averías de los sistemas que componen el aerogenerador mediante su monitorización y diagnóstico continuo. El uso de este tipo de mantenimiento no se usa aún de forma generalizada en la mayoría de parques eólicos, como ya se ha dicho en la introducción, sin embargo presenta una serie de ventajas:

- *Reducción de los costos de reparación y/o sustitución producidos por una avería.*
- *Aumento de la disponibilidad o vida útil de las máquinas.*

- *Planificación más selectiva de las labores de mantenimiento, adaptándose mejor a la vida del equipo que una estrategia de mantenimiento preventivo en el cual se realizan paradas o sustituciones de equipos tanto si son necesarias como si no.*
- *Protección de los equipos industriales más efectiva al tener en cuenta el estado de salud de los componentes para así poder evitar el fallo de los mismos. Esto permite optimizar la inversión realizada en el mantenimiento.*

Una de las innovaciones tecnológicas más importantes en este tipo de mantenimiento es la monitorización, ya que monitorizar un aerogenerador permite recibir medidas de forma continua y automática, a través de sistemas de adquisición de datos de sensores instalados en el aerogenerador, y de la información recibida de los sensores de control de la máquina.

El desarrollo de la monitorización permite:

- *Detectar anomalías de forma inmediata, en el centro de control o diagnóstico.*
- *Recoger datos en situaciones de climatología extrema.*
- *Registrar la evolución del comportamiento según las influencias externas de la máquina.*
- *Identificar los defectos a tiempo de ser reparados.*
- *Minimizar acciones de mantenimiento innecesarias en el parque.*
- *Eliminar sustituciones de emergencia o fallos catastróficos.*
- *Conseguir una vida larga y efectiva, así como aumentar la disponibilidad del parque.*

Dentro de los trabajos relacionados con el mantenimiento predictivo cobran especial interés los métodos de inspección, entre los que se utilizan:

- |  |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>a) <i>Análisis de aceites.</i></li> <li>b) <i>Capturas de termografías.</i></li> <li>c) <i>Análisis de vibraciones, etc.</i></li> </ul> |
|--|

Los análisis de vibraciones se aplican ampliamente en la industria de las máquinas rotativas y permiten, previo estudio detallado de los espectros y niveles de vibración, determinar el estado y vida de los rodamientos.

El principal inconveniente del mantenimiento predictivo es que requiere un tratamiento intensivo de la información recibida de cada aerogenerador y un sistema eficaz de detección de anomalías y diagnóstico de componentes. El volumen de información necesaria para realizar un mantenimiento predictivo en un parque eólico con 30 ó 40 máquinas supone disponer de un sistema de telecontrol o telemando muy potente, adaptado a las necesidades de este tipo de mantenimiento, lo que puede encarecer sensiblemente el precio de una instalación.

Mediante el correcto uso de este tipo de mantenimiento, se pueden modificar los alcances de las gamas de preventivo, consiguiendo una optimización del mismo, así como adelantarse a averías menores o mayores, evitando los trastornos propios de pérdidas de disponibilidad, producción, etc.

Hasta el momento, en la mayoría de Parques Eólicos se ha venido aplicando el mantenimiento preventivo y correctivo cuando no ha quedado más remedio, ya que los costes de los medios necesarios para realizar el mantenimiento predictivo han sido altos –muchos aerogeneradores– en relación a los riesgos que cubrían –aerogeneradores de potencia pequeña-media– y además provenían de otras industrias y no estaban adaptados a las particularidades de la eólica –fiabilidad no demostrada–.

Sin embargo, actualmente estos medios son más fiables y cubren a menor coste –parques de menos aerogeneradores– unos riesgos de mayor valor –aerogeneradores de gran potencia–.

Por ello, el escenario actual favorece la implantación del mantenimiento predictivo. Esta situación favorecedora será aún más acusada y obligará a implantar sistemas de mantenimiento predictivo en los futuros parques eólicos offshore donde los costes de mantenimiento se estiman el doble que en parques de tierra, dadas las dificultades de intervención en los aerogeneradores por su lejanía a la costa (varias decenas de kilómetros y algunos proyectos a cientos de kilómetros), a los largos periodos (varias semanas) de acceso prohibido por causa de temporales meteorológicos, a la escasez de medios disponibles (plataformas de mantenimiento offshore, equivalentes a grandes rúas de tierra).

En definitiva, el mantenimiento convencional de tipo periódico debería reemplazarse, como ya se está haciendo, por el predictivo, acorde con el desarrollo tecnológico tan veloz de las turbinas.

El siguiente diagrama muestra de manera esquemática el fundamento del mantenimiento predictivo:

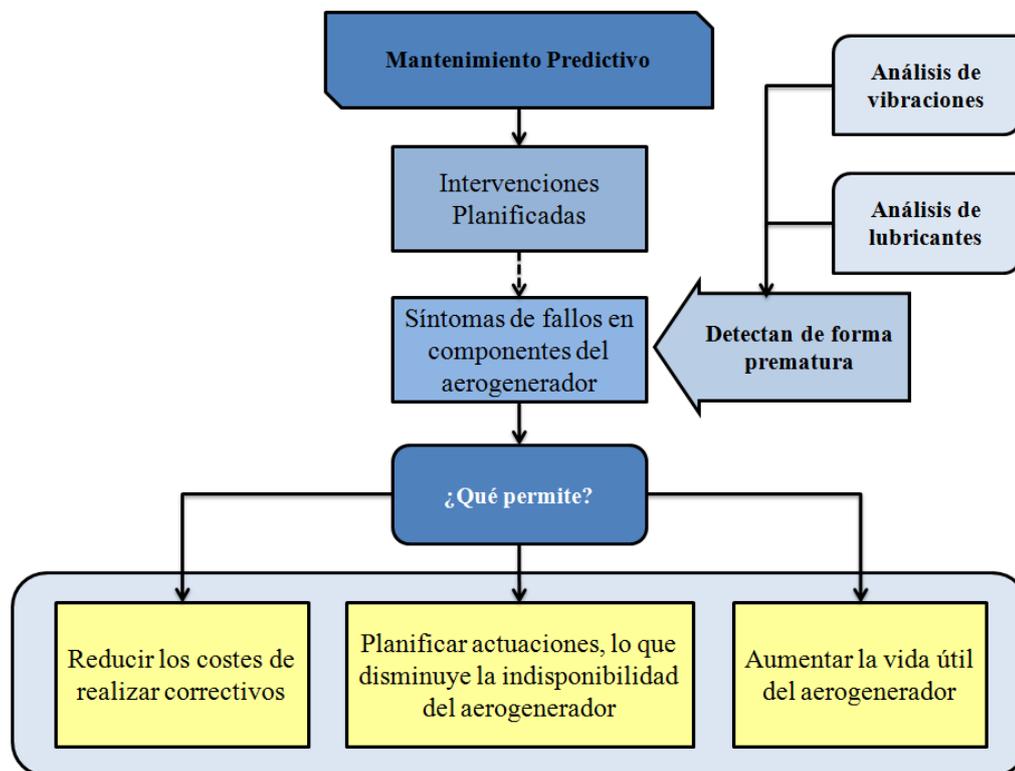


Figura 33 Esquema del mantenimiento predictivo en un aerogenerador.

### 15.1 Sistemas de mantenimiento predictivo

Como ejemplo, hay que destacar el sistema de mantenimiento predictivo desarrollado por Gamesa, denominado SMP, basado en el análisis de vibraciones.

La función de este sistema SMP es la detección prematura de fallos o deterioros en los componentes principales del aerogenerador.

Una de las ventajas del SMP es que aprovecha las infraestructuras de los parques eólicos y reduce la necesidad de dedicar otros recursos al análisis de la información gracias a su monitorización condicionada y a su capacidad de procesamiento.

Habitualmente este tipo de sistema está integrado en la góndola del aerogenerador y cuenta con la capacidad para procesar datos y generar las alarmas relativas al

estado de los componentes mecánicos críticos del aerogenerador, siendo capaz transmitirlas a través de la red de comunicaciones del parque eólico, a un sistema de control.

Las partes principales de este tipo de sistemas son:

1. *Unidad de monitorización y procesado de datos: equipo que se instala en el armario de control de la góndola y que recoge las señales enviadas desde los sensores, para procesarlas posteriormente.*
2. *Acelerómetros: sensores instalados en los componentes críticos del aerogenerador que permiten medir el movimiento y las vibraciones a las que están sometidos.*

La localización de los acelerómetros puede darse fundamentalmente en los siguientes componentes:

- *Multiplicadora*
- *Generador*

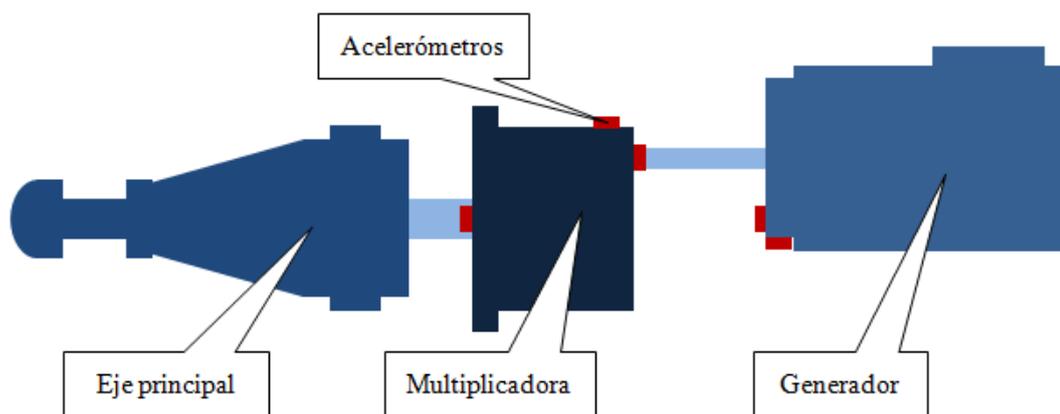


Figura 34 Ubicación de los acelerómetros en un aerogenerador.

El análisis de vibraciones se complementa con el uso de otras tecnologías como son el análisis de aceite o las termografías, y el manejo de otros datos como velocidad de viento o producciones.

## 16 Modificaciones de diseño

También conocido por el término de retrofit, se refiere a cualquier modificación efectuada en la máquina que altere su diseño original para corregir una deficiencia o mejorar sus prestaciones en cuanto a rendimiento.

En general, el retrofit abarca todo un proceso que tiene su origen en el seguimiento constante de los Parques Eólicos donde se puede observar, detectar y planear frecuentemente posibles mejoras en los componentes, en la seguridad o en el medio ambiente, de modo que luego se estudian, se analiza la factibilidad y en su caso se desarrollan. Una vez finalizadas el último paso correspondería a la implantación en los aerogeneradores y parques.

La carga de personal y de otros recursos depende de la complejidad del retrofit. Se puede realizar sólo con un pequeño equipo de personas, sin más recursos que su propia herramienta o teniendo que recurrir a un equipo amplio de personas, además de otros recursos adicionales.

Normalmente, una vez definido un retrofit, reflejadas las operaciones a realizar en una instrucción técnica, se identifica un equipo de personas, se les instruye en la realización de ese retrofit y se les asignan los recursos para su ejecución.

La realización de un retrofit supone hacerlo sobre todo un conjunto de máquinas que poseen las mismas características y componentes, uno de los cuales se pretende modificar. Por ello, es habitual constituir equipos encargados de efectuar el mismo retrofit en todas las máquinas que lo requieran.

Los aspectos clave del retrofit o Modificaciones de diseño son:

- *Ahorro de costes*
- *Mejora de productividad*
- *Adecuación a una nueva normativa*
- *Seguridad*
- *Medioambiente*

El alcance de este tipo de modificaciones suele comprender todo un conjunto de aerogeneradores así como a las distintas tecnologías de cada modelo, y todos los emplazamientos nacionales e internacionales.

El tiempo de implantación es un factor importante que debe ser analizado con detenimiento antes de presentarlo como una Modificación de Diseño a los clientes, intentando minimizar en lo posible la parada del aerogenerador.

Un ejemplo de este tipo de mantenimiento es el aplicado por Gamesa en sus aerogeneradores G47, G5X, G8X, G9X, etc., los cuales incluyen las siguientes modificaciones de diseño:

- a) **Implantación del Crowbar Activo:** se trata de una importante mejora que permite mantener el aerogenerador conectado a la red durante un hueco de tensión contribuyendo de este modo a la calidad y continuidad del sistema.
- b) **Limitador de Par:** es un mecanismo de protección del tren de potencia que se instala conjuntamente con el Crowbar Activo.
- c) **Seguridad:** son mejoras en los sistemas de seguridad para las personas mediante la implantación de señalizaciones para riesgos eléctricos, de atrapamiento, etc., así como la instalación de emergencias exteriores para caso de accidentes y la instalación de sistemas especiales de extinción de fuego.

## 17 Ventajas y desventajas de los tipos de mantenimiento

	Ventajas	Inconvenientes
<b>Mantenimiento Correctivo</b>	- En ocasiones (pequeños correctivos) es simple, no necesita de medios avanzados ni de personal cualificado.	- Riesgo de grandes tiempos de parada. - Riesgo de grandes daños colaterales.
<b>Mantenimiento Preventivo</b>	- Requiere de una pequeña inversión para establecer el modelo de intervención. Después es simple y no requiere ni medios avanzados ni personal cualificado.	- Riesgo de intervenciones muy frecuentes, con alto coste. - Riesgo de intervenciones muy tardías, con desarrollo completo de averías y por tanto con iguales inconvenientes que el mantenimiento correctivo
<b>Mantenimiento Predictivo</b>	- Permite predecir con suficiente antelación cuándo se va a producir la avería de manera que se puede programar la intervención, con bajos costes de medios y cortos tiempos de parada. Ofrece escasos daños colaterales.	- Complejidad media-alta. Requiere de medios avanzados y personal cualificado, que sí mismo suponen un alto coste.

Tabla 6 Ventajas e inconvenientes de cada tipo de mantenimiento.

## 18 Ejemplos de mantenimiento en aerogeneradores

### 18.1 Mantenimiento Correctivo: sustitución del generador

Como ya se ha visto anteriormente, el mantenimiento correctivo comprende las tareas de sustitución de sistemas o componentes que, por diversos motivos, hayan dejado de ser funcionales, pudiendo llegar incluso a sustituir el sistema completo si el fallo producido afecta de forma general.

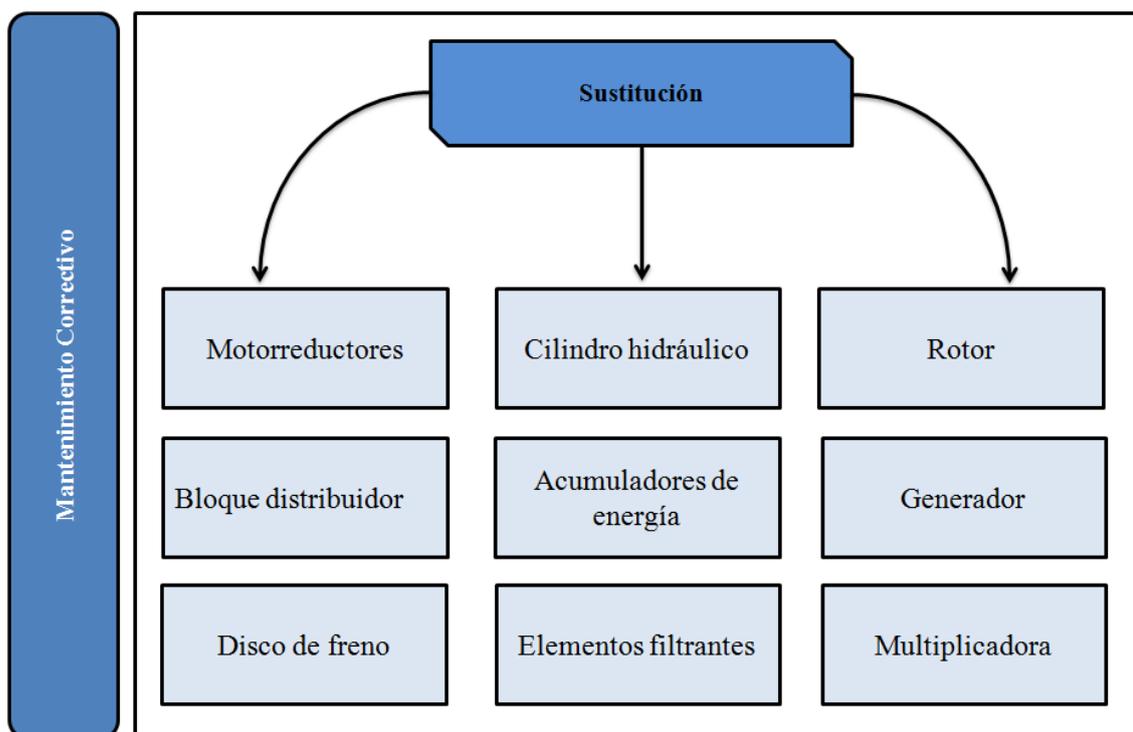


Figura 35 Ejemplos de mantenimiento correctivo en un aerogenerador.

A continuación se ilustra brevemente y de modo esquemático el caso representativo de uno de los procedimientos más complejos: el mantenimiento de gran correctivo para la sustitución del generador.

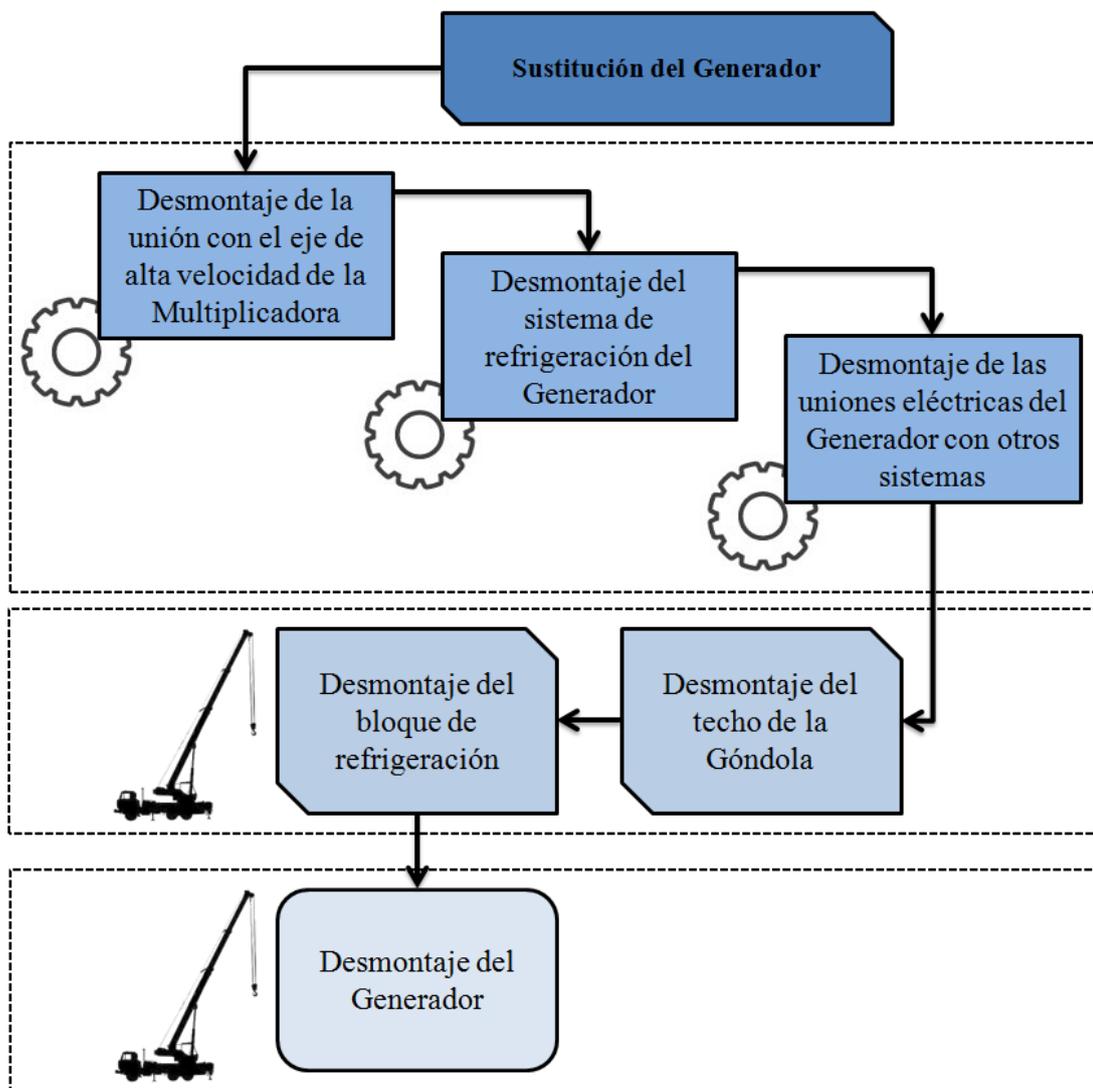


Figura 36 Ejemplo de gran correctivo: sustitución del generador.

## 18.2 Mantenimiento predictivo: la multiplicadora

El Mantenimiento predictivo de la multiplicadora se basa en recoger los datos de las vibraciones registrados por sensores, así como muestras de aceite para posteriormente analizar los resultados y decidir si es necesaria o no alguna acción correctiva.

El análisis de las vibraciones que se producen en la multiplicadora puede dar información sobre posibles fallos en sus engranajes internos y rodamientos. Dicho análisis se consigue mediante sensores de movimiento (acelerómetros) que convierten las vibraciones de la multiplicadora en señales eléctricas. Posteriormente estos datos se recogen procediendo a su análisis periódico con el fin de detectar y anticiparse a los posibles fallos. En caso de resultados negativos, detectándose anomalías, se procedería con acciones correctivas.

Por otro lado, a través del análisis detallado del aceite de lubricación se pueden detectar problemas concretos de la multiplicadora. Al igual que con la técnica anterior, en este caso se realiza periódicamente la extracción de muestras de aceite y tras su análisis, se puede conocer el buen o mal estado del aceite o el deterioro de elementos internos de la multiplicadora. Si los resultados no son positivos también se programaría una acción correctiva.

## 18.3 Mantenimiento preventivo: el transformador

El Mantenimiento preventivo del transformador agrupa aquellas tareas que se realizan de forma periódica y cuyo objetivo es evitar fallos ocultos en el sistema. En este caso, algunas de las inspecciones más relevantes que los operarios deben llevar a cabo son:

- a) ***Inspección del cableado:*** es importante asegurar que no existen bornes, cables y conexiones en mal estado para garantizar el correcto funcionamiento. En caso contrario puede existir, entre otras consecuencias, un riesgo de descarga eléctrica para el personal de mantenimiento.
- b) ***Inspección del soporte de las bobinas de media tensión:*** es importante controlar que la distancia entre las mismas se mantiene. Si no existe una adecuada inspección pueden producirse vibraciones.

c) **Inspección del acceso al habitáculo:** habitualmente el transformador está aislado del resto de componentes por una pared de acceso restringido que lo aísla eléctrica y térmicamente. Por ello, es importante inspeccionar que el acceso a la zona del transformador esté bloqueado cuando éste está en funcionamiento. Una inspección incorrecta puede provocar que los enclavamientos de acceso de la puerta fallen durante el funcionamiento con el consiguiente riesgo eléctrico para el personal encargado del mantenimiento.

#### 18.4 Mantenimiento preventivo: otros ejemplos

A continuación se describen de manera básica otras tareas de mantenimiento preventivo en los sistemas que componen un aerogenerador mostrando las consecuencias que puede acarrear un deficiente mantenimiento.

- a) **Inspección de las uniones atornilladas:** si pensamos en el sistema hidráulico, la mayor parte de los componentes se fijan mediante uniones atornilladas. En este caso, las tareas de mantenimiento consisten en inspeccionar visualmente las propias uniones vigilando que no se hayan desplazado las marcas de las mismas –líneas dibujadas en los propios tornillos– o que no se haya producido alguna rotura, para asegurar el correcto funcionamiento. No comprobar a tiempo las uniones atornilladas puede provocar, entre otras consecuencias, el desgaste prematuro de los componentes contiguos, la rotura del componente afectado debido, por ejemplo, a la fatiga por el exceso de vibración, y hasta la detención del aerogenerador por daños graves como causa de la rotura de algún componente vital.
- b) **Comprobación de las válvulas de emergencia:** cuando se presiona alguno de los pulsadores de emergencia dispuestos en lugares estratégicos del aerogenerador, las palas modifican su ángulo de paso hasta colocarse en la posición de bandera (90°) ofreciendo así la menor resistencia posible al aire. Todo esto es posible gracias a unas válvulas de emergencia ubicadas en el sistema de cambio de paso del aerogenerador. Por ello, la tarea de mantenimiento consiste en comprobar el correcto funcionamiento de dichas válvulas de emergencia y, en caso de detectarse fallos de funcionamiento, se debe decidir la acción o acciones correctivas correspondientes.

- c) **Comprobación de la tensión y la presión de las celdas de Media Tensión:** se trata de comprobar en las celdas de Media Tensión, situadas normalmente en la parte inferior de la torre junto a la entrada, que los indicadores de presencia de tensión –a través de lámparas led– están iluminados, y que el manómetro de presión funciona correctamente (en el caso de las celdas de media tensión con atmósfera protectora). Una señalización incorrecta de las lámparas LED durante la operación del aerogenerador supone alguna avería con el consiguiente peligro. Por otro lado, una indicación errónea de la presión, ya sea por un fallo de lectura o una fuga, puede provocar el disparo de las protecciones de la celda así como la parada del aerogenerador.
- d) **Inspección de fugas y estado de las mangueras y tuberías:** la multiplicadora tiene un sistema de refrigeración que es fundamental para su correcto funcionamiento. Por ello, es importante asegurar que no existan fugas en las mangueras y las tuberías para garantizar la correcta refrigeración. No inspeccionarlas puede producir daños en la multiplicadora, disminución del nivel de aceite, el disparo de una alarma y hasta la parada del aerogenerador, como en muchos de los ejemplos anteriores.

## Parte II

## Capítulo 4 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

### 1 Descripción del problema

Hay una serie de tareas de mantenimiento preventivo a realizar en un aerogenerador. La realización de estas labores de mantenimiento implica un tiempo de ejecución. Por otro lado existen cambios de condición en la operación del aerogenerador que llevan un tiempo, así como otros tiempos para el transporte de herramientas y útiles, la adopción de medidas de prevención, el desplazamiento de los operarios, etc.

*Todas las operaciones consideradas en este problema son de mantenimiento preventivo. En una situación real, de algunas operaciones de preventivo cuelgan acciones correctivas. Sin embargo estas no se contemplan en el problema.*

Cuatro operarios –dos parejas de mantenimiento– componen la fuerza de trabajo. La primera pareja llega a la plataforma inferior del aerogenerador en la base de la torre, junto a la entrada. Esta será la «zona inicial» predefinida.

A llegar a la «zona inicial» el «primer operario» realiza una tarea de mantenimiento concreta. Por ejemplo: comprobar que se realizan correctamente las distintas maniobras de conexión y desconexión de la celda de media tensión.

Mientras el «primer operario» realiza aquella labor de mantenimiento, el «segundo operario» trabaja en otra tarea. Por ejemplo: comprobar el correcto funcionamiento del manómetro de la celda de media tensión. Así, es fácil comprender que el operario que antes finalice su labor estará disponible para comenzar una nueva tarea.

La dinámica del problema consiste en buscar tareas e ir asignándolas –una a una– a los distintos operarios de tal modo que, al final, el flujo de tareas realizado por la fuerza de trabajo sea óptima en términos de tiempo y cumpliendo siempre una serie de condiciones que se detallan en los siguientes apartados del capítulo. En

definitiva, hay que asignar cada tarea –de manera sucesiva al operario que menor carga de trabajo tenga acumulada– con el objetivo de minimizar todo tiempo improductivo para lograr un flujo óptimo.

La primera pareja de mantenimiento trabaja siete horas y media de modo continuo. La segunda pareja de mantenimiento trabaja el mismo número de horas pero comienza media hora más tarde que la primera. Por ello, en los primeros y últimos treinta minutos de la jornada laboral hay en el aerogenerador una pareja de mantenimiento.

La realización de las labores de mantenimiento queda determinada, entre otras condiciones, por el número de operarios que se necesitan. Hay tareas que requieren un operario y hay otras tareas que sólo pueden ser realizadas por dos operarios. En la actualidad no se realizan labores de mantenimiento con tres o más operarios.

La ventana de tiempo de la jornada laboral y la restricción en el número de operarios necesarios para cada tarea determina la necesidad de buscar una metodología para lograr que, dado el caso, un operario espere a otro para realizar una tarea en común. Es decir, una metodología que busca la sincronización cuando es necesario. La consecuencia que se deriva es la aparición de otra restricción a tener en cuenta: el tiempo de espera.

Ya se ha citado al inicio del presente capítulo que son tres las condiciones de operación del aerogenerador. A modo de síntesis: que el aerogenerador se encuentre bajo la «condición X» significa que la máquina debe estar bajo «condición X» para poder realizar aquellas labores de mantenimiento que requieran dicha condición. El cambio de la «condición X» a la «condición Z» supone un tiempo muy importante a considerar. Para entenderlo mejor: si un «operario A» ha terminado de trabajar y, en ese instante, el «operario B» contempla la posibilidad de realizar una nueva tarea, si ésta requiere una condición de operación del aerogenerador diferente a la actual, el «operario B» debe valorar el denominado «tiempo de cambio de condición». Es decir, todos los operarios deben esperar, dado el caso, a que el aerogenerador cambie de condición cuando la nueva tarea así lo requiere. Sólo después del cambio de condición el «operario B» estará en condiciones de realizar la tarea de mantenimiento asignada.

Es lógico comprender que el tiempo de cambio de condición es un tiempo improductivo que hay que minimizar. Lo ideal es realizar todas aquellas tareas que requieren una misma condición de operación, de manera consecutiva, ahorrando así el tiempo de cambio.

*Uno de los objetivos es minimizar el tiempo improductivo debido a cambios de condición en la operación del aerogenerador.*

El aerogenerador se divide en diferentes «zonas» y en cada «zona» hay que realizar un número diferente de tareas. La «zona» es la ubicación del elemento, componente o sistema sobre el que hay que realizar la tarea de mantenimiento. Por tanto, parece lógico pensar que el movimiento de los operarios desde la plataforma inferior en la base de la torre hasta la góndola, a través de las escaleras o el ascensor, supone un tiempo. Dicho tiempo está registrado en una matriz denominada «matriz de desplazamientos» que incluye, entre otros, el tiempo para que los operarios se cambian de traje, para aplicar las medidas de prevención, de calidad, y para el acopio y transporte de útiles y herramientas, etc.

*Se llama «zona» a cada una de las partes del aerogenerador en las que hay que realizar tareas de mantenimiento.*

Durante la realización de las labores de mantenimiento ningún operario puede esperar más de tres (3) minutos entre la ejecución de una nueva tarea y su precedente.

En este sentido pueden darse varios casos. Por ejemplo, en un momento dado al «operario C» le conviene, en principio, realizar una tarea que necesita dos personas por encontrarse en la «zona» de dicha tarea. El tiempo máximo que puede esperar el «operario C» son tres (3) minutos. En ese margen de tiempo un «operario D» que estaba ocioso contempla la posibilidad de realizar la misma tarea, pero el «operario C» sabe que debe esperar 4 minutos hasta que el «operario D» llegue hasta él. ¿Esto

qué significa? Que se incumple la restricción del tiempo de espera y, como consecuencia, el «operario C» no puede realizar la tarea inicialmente observada. Añadida a esta restricción está el límite máximo de tiempo de espera para cada operario: treinta (30) minutos al finalizar la jornada laboral.

Esta descripción del problema y de todos los condicionantes a tener en cuenta conducen al objetivo fundamental: reducir el tiempo improductivo.

*El tiempo improductivo es de tres tipos:*

- 1. Tiempo de cambio de condición en la operación del aerogenerador.*
- 2. Tiempo de movimiento para desplazar a los operarios.*
- 3. Tiempos de espera de los operarios.*

## 2 Condiciones del problema

### 2.1 Planteamiento inicial

En el aerogenerador existen ciento cincuenta (150) tareas de mantenimiento preventivo que deben ser ejecutadas por una fuerza de trabajo de cuatro operarios. Para ello, el aerogenerador está delimitado por once (11) zonas de trabajo que comprenden el total de las 150 tareas de mantenimiento. Cada tarea de mantenimiento tiene asignado un tiempo de ejecución en minutos: es el tiempo que los operarios tardan en realizar cada una de las 150 labores de mantenimiento.

Si hacemos un paralelismo con el clásico problema de rutas de vehículos *Vehicle Routing Problem VRP*, el tiempo de ejecución de las tareas de mantenimiento es equivalente a la distancia entre nodos o destinos a visitar.

### 2.2 Cambio de condición de operación

#### a) Modos de funcionamiento

Normalmente los aerogeneradores tienen tres (3) modos de funcionamiento. El primero de ellos es el modo *normal*, donde la máquina está funcionando habitualmente. Para la presencia del personal de mantenimiento está el modo *servicio*, donde se ofrece información al operario que en modo normal no estaría disponible. Además, desde el modo servicio se accede al modo *test* que ofrece herramientas para el mantenimiento y reparación del aerogenerador.

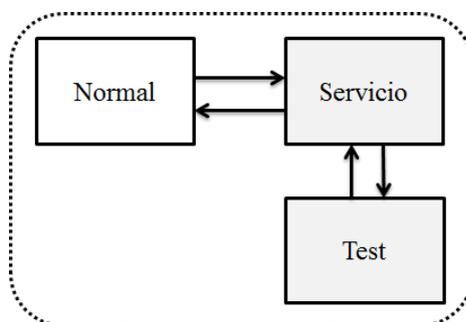


Figura 37 Modos de funcionamiento de un aerogenerador.

## b) Estados de operación

En los modos de funcionamiento *normal* y *servicio* el aerogenerador se puede encontrar en diferentes estados de operación: 1) Emergencia ; 2) Stop ; 3) Pausa y 4) Marcha.

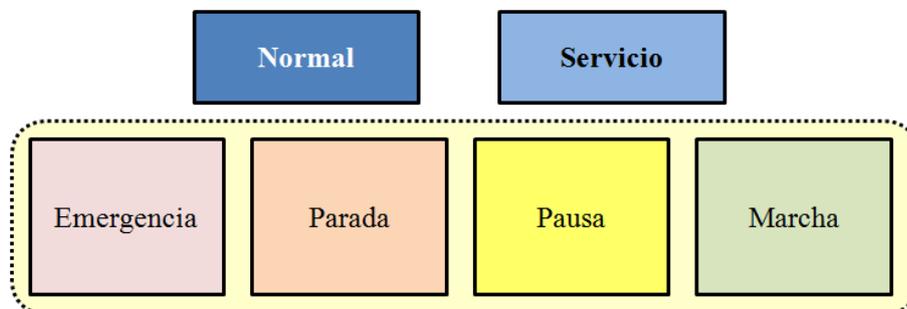


Figura 38 Estados de operación de un aerogenerador.

Este diseño con estados y modos se establece por razones de seguridad para el personal de mantenimiento. Cada estado de operación tiene definidos los sistemas y componentes del aerogenerador que se encuentran operativos de tal forma que, conociendo el estado de operación de la máquina, el personal de mantenimiento siempre sabe qué sistemas o componentes del aerogenerador están activos.

En este proyecto final de carrera se consideran cuatro estados de operación. El primero de ellos es la condición libre (0) pero hay tres condiciones más (I, II y III). La realización de las labores de mantenimiento se lleva a cabo bajo cualquiera de estas tres condiciones de operación además de la condición libre.

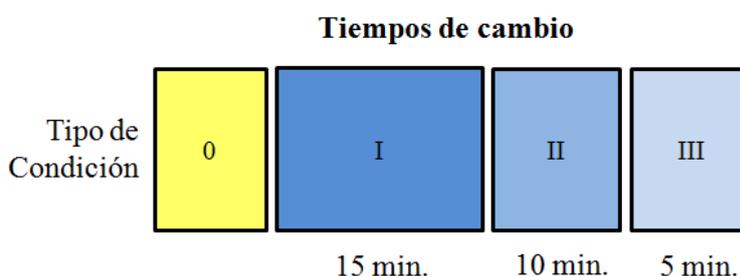


Figura 39 Tiempo de cambio entre las condiciones de operación del aerogenerador.

El cambio de condición en la operación de un aerogenerador supone un tiempo improductivo que hay que minimizar. Un cambio de estado de operación puede ser

debido a la solicitud del operario de mantenimiento cuando va a realizar una tarea de mantenimiento, o por decisiones del controlador programable (PLC) del aerogenerador.

En el caso del personal de mantenimiento, la decisión del cambio de condición puede realizarse desde la pantalla táctil situada en uno de los armarios eléctricos o por el telemando de gestión del parque eólico.

Los cambios de condición indican que si el aerogenerador está bajo condición I de operación sólo se podrán visitar zonas del aerogenerador que estén bajo ese mismo supuesto o bajo condición libre (0). Los tiempos asignados a cada cambio condición de operación son los tiempos improductivos (en minutos) que se deben considerar al pasar una condición a otra o, por ejemplo, de una tarea a otra inmediatamente posterior pero que requiere una condición de operación del aerogenerador diferente.

La importancia de esta restricción es lógica. Por ejemplo, el aerogenerador nunca podrá estar bajo condición I y bajo condición II al mismo tiempo, sólo puede estar con una condición activa.

### 2.3 Desplazamiento de los operarios

Teniendo en cuenta que parte de los trabajos de mantenimiento se realizan en la góndola del aerogenerador, es necesario conocer el tiempo que tarda un operario en desplazarse entre cada una de las zonas en que se divide el aerogenerador.

La góndola tiene un diseño modular que está pensado para facilitar el desplazamiento del personal de mantenimiento, el transporte, ensamblaje y el posterior mantenimiento de cada uno de los componentes y sistemas, entre otros.

La siguiente figura representa los tiempos de desplazamiento entre cada una de las once (11) zonas consideradas en el aerogenerador:

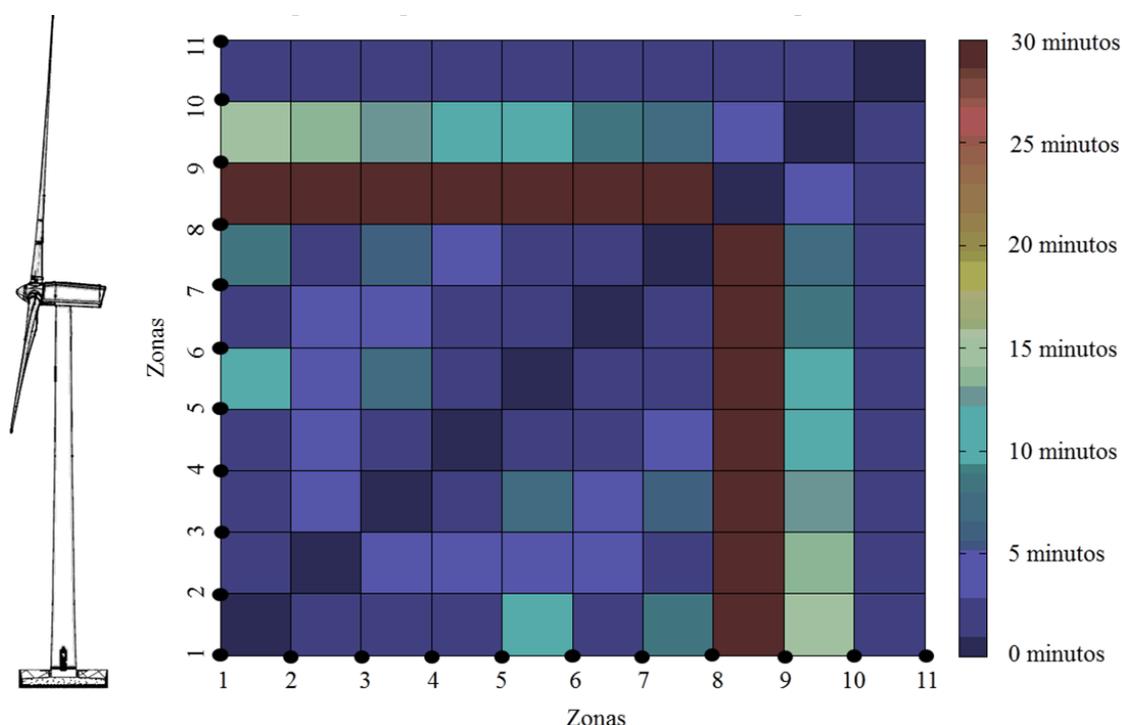


Figura 40 Matriz de desplazamientos entre las 11 zonas del aerogenerador.

El movimiento de los operarios está recogido dentro de la matriz de desplazamientos –tiempo en minutos– donde llamamos «zona» a cada una de las partes del molino en las que hay que realizar tareas de mantenimiento. En cada «zona» hay que ejecutar diferentes tareas. Por simplificación del problema, los tiempos de la matriz de desplazamientos incluyen, entre otros, los tiempos de cambio de traje, aplicación de métodos preventivos, etc., tal y como se ha explicado en la descripción general del problema.

## 2.4 Jornada laboral de los operarios

La jornada laboral del personal de mantenimiento comienza cuando la primera pareja se desplaza hasta el emplazamiento del parque eólico y accede a la «zona inicial» del aerogenerador para llevar a cabo el mantenimiento preventivo. Podemos suponer que se trata de la plataforma inferior en la base de la torre, junto a la entrada.

La fuerza de trabajo supuesta en este Proyecto Final de Trabajo la forman dos parejas de mantenimiento. Por otro lado, la jornada laboral de cada pareja es una condición inicial determinante del planteamiento del problema para su posterior resolución.

A continuación se representa esquemáticamente la jornada laboral de cada pareja de mantenimiento:

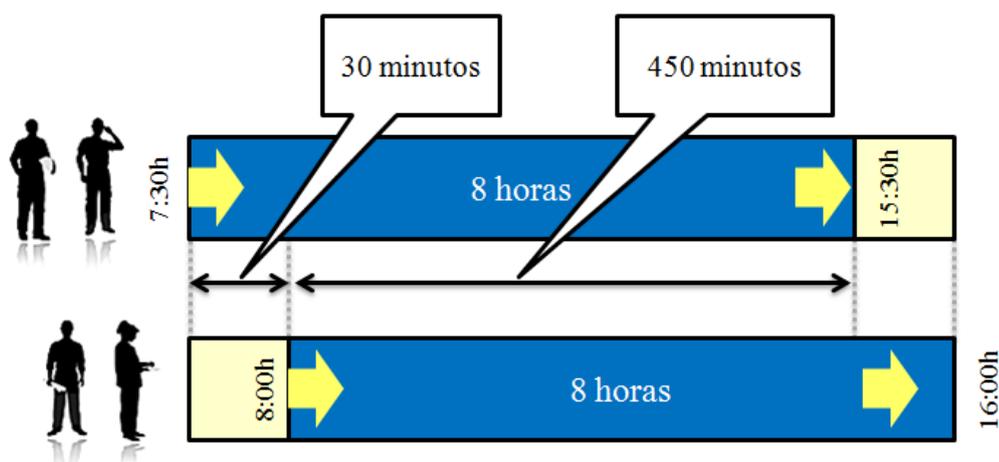


Figura 41 Jornada laboral de los 4 operarios.

Inicialmente acceden al aerogenerador dos operarios de mantenimiento. Transcurridos los primeros treinta (30) minutos la segunda pareja se incorpora a los trabajos y, a partir de ese instante, los cuatro operarios realizarán conjuntamente las labores de mantenimiento durante 450 minutos.

## 2.5 Tiempo de espera entre tareas

La realización de las tareas de mantenimiento obliga en algunos casos a que dos operarios trabajen de manera conjunta sobre un equipo, sistema o componente del aerogenerador. Por ello, es comprensible que haya espacios de tiempo en que uno o más operarios no realizan tarea alguna limitándose a esperar. Para minimizar el efecto de este tiempo ocioso sobre el tiempo total acumulado del mantenimiento preventivo del aerogenerador, se establece en el planteamiento inicial que ningún operario puede estar más de tres (3) minutos sin realizar labores de mantenimiento entre una tarea y su predecesora.

Otra condición añadida será la imposibilidad de superar los treinta (30) minutos máximos de tiempo ocioso en la jornada laboral de siete horas y media (7,5).

## 3 Datos de partida

- *Vector tiempos tarea:* contiene los 150 «tiempos de ejecución» de cada tarea.
- *Vector zonas tarea:* contiene la «zona» del aerogenerador en que tiene lugar cada tarea de mantenimiento.
- *Vector condición tareas:* contiene la «condición» de operación que requiere cada tarea de mantenimiento.
- *Vector operarios tareas:* contiene el «número de operarios» que se requieren para para realizar cada tarea de mantenimiento.
- *Ventana de tiempo:* contienen el inicio y final de la «jornada laboral» de cada operario.
- *Zona de inicio:* contiene la «zona inicial» donde comienza el mantenimiento preventivo

#### 4 Resumen de las restricciones del problema

- a) Hay predefinida una «zona inicial» donde los operarios comenzarán a trabajar.
- b) Las tareas sólo se pueden realizar dentro de la jornada laboral de los operarios.
- c) El tiempo de espera de los operarios no excederá los 3 minutos entre tareas.
- d) El tiempo total de espera máximo de cada operario no excederá los 30 minutos al finalizar la jornada laboral.
- e) Hay tareas que sólo requieren un operario y otras tareas que requieren dos.
  - 1 operario: 129 tareas.
  - 2 operarios: 21 tareas.
- a) Los aerogeneradores podrán estar bajo tres condiciones de operación (I, II y III), además de una condición de operación libre (0).
- b) Los operarios no pueden ejecutar tareas de manera simultánea bajo condiciones de operación diferentes si ninguna de éstas es de condición libre:
  - Condición I: 21 tareas que implican las zonas 4 y 5 del molino.
  - Condición II: 7 tareas que implican las zonas 1 y 6 del molino.
  - Condición III: 2 tareas que implican las zonas 10 y 11 del molino.
  - Condición libre (0): 119 tareas.
- a) El cambio en la condición de operación de un aerogenerador supone un tiempo improductivo que hay que considerar:
  - Condición de operación I: 10 minutos.
  - Condición de operación II: 15 minutos.
  - Condición de operación III: 5 minutos.

## 5 Objetivo del PFC

El objetivo de este Proyecto Final de Carrera se establece en términos de minimizar el tiempo improductivo transcurrido durante el recorrido de los operarios. En la práctica, la meta es, es en primer lugar, ahorrar el mayor tiempo posible al finalizar todas las labores de mantenimiento preventivo, constituidas por intervenciones periódicas que no requieren desmontar ningún componente o equipo principal del aerogenerador y, en segundo lugar, respetar las restricciones planteadas.

La resolución del problema se persigue creando un programa *-con el software Matlab-* que simula la realización del mantenimiento, planificando así el flujo de las ciento cincuenta (150) tareas.

Como se ha dicho anteriormente, el tiempo improductivo es de tres tipos:

- El tiempo de cambio de condición en la operación del aerogenerador.
- El tiempo de desplazamiento de los operarios.
- El tiempo de espera de los operarios.

**El objetivo es buscar la planificación óptima de tareas, en términos de ahorro, que minimiza el tiempo improductivo, esto es, el tiempo de movimiento de los operarios, el tiempo que esperan y el tiempo de cambio de condición en la operación del aerogenerador, cumpliendo una serie de restricciones.**

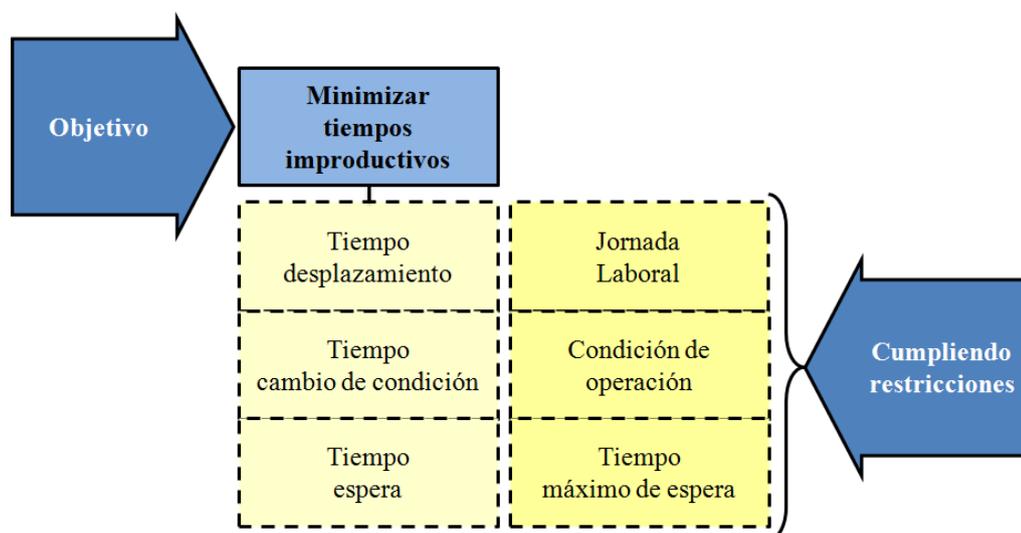


Figura 42 Objetivo del PFC

## 6 Metodología de resolución

Este apartado introduce la metodología empleada para optimizar y planificar el flujo de tareas de mantenimiento en un aerogenerador. Como se ha explicado, el mantenimiento preventivo se provee en once (11) zonas localizadas por todo el aerogenerador que demandan ciento cincuenta (150) tareas. Al ser necesaria una fuerza de trabajo de cuatro (4) operarios para realizar las labores de mantenimiento, este problema se puede modelar –en principio– como el clásico problema de rutas VRP (*Vehicule Routing Problem*).

La búsqueda de algoritmos que permitan solucionar problemas de rutas se ha convertido en una de las tendencias más trabajadas dentro del campo de la matemática aplicada. Sin embargo, para una gran parte de los problemas de optimización no se conoce ningún algoritmo de resolución polinómico, además, es poco probable que tales algoritmos existan. Esta situación ha provocado el desarrollo de algoritmos heurísticos para la solución de los problemas de rutas, dentro de los que se destaca los que hacen uso de la simulación, en particular las «técnicas de Monte Carlo».

Siguiendo dicha línea, la metodología adoptada para la resolución del problema descrito en este Proyecto Final de Carrera se basa en la aplicación de las «técnicas de Monte Carlo» siguiendo el «método de Fernández-García-Mayado-Sanchís».

A continuación se presenta de manera básica el clásico problema VRP y sus técnicas de resolución, introduciendo brevemente el «método de Fernández-García-Mayado-Sanchís» así como las «técnicas de Monte Carlo».

### 6.1 Introducción al Vehicule Routing Problem: VRP

El problema del transporte VRP es un nombre genérico aplicado a una clase de problemas ampliamente estudiados en los que debe determinarse un conjunto de rutas.

La definición más básica, y la más utilizada comúnmente para ilustrar las rutinas de solución de estos problemas, consiste en un conjunto uniforme de camiones, con una capacidad conocida, operando desde un almacén, y atendiendo a un grupo de clientes localizados en lugares fijos y con necesidades predeterminadas. Cada

cliente debe ser atendido con relación a la cantidad demandada, pero no hay límites sobre el tiempo de entrega y/o recogida. En general, las únicas restricciones que gobiernan la elección de las rutas de vehículos son:

- *No exceder la capacidad del camión.*
- *Cada cliente es visitado sólo una vez.*
- *Cada jornada empieza y finaliza en el almacén*

El objetivo del problema es atender y canalizar la demanda de los clientes minimizando la distancia recorrida por la flota de camiones.

El caso especial donde una única ruta es suficiente se da si no hay unidades físicas involucradas, o si la carga total está dentro de los límites de un camión, y eso es conocido como el «Problema del viajante» o TSP (*Travelling Salesman Problem*).

Una variante muy similar al VRP es el denominado VSP (*Vehicule Scheduling Problem*), un problema de diseño de rutas muy parecido al VRPTW (*Vehicule Routing Problem with Time Window*), pero con restricciones adicionales de tiempo, por ejemplo, una distribución uniforme de las entregas durante la planificación o visitando clientes en días predeterminados, entre otras.

## 6.2 Técnicas de resolución del VRP

Esta sección se justifica para describir algunos de los algoritmos tradicionales que resuelven el problema de rutas (VRP). A pesar de que existen métodos exactos, en esta sección sólo se introducen métodos heurísticos, de donde se obtiene la metodología utilizada en la resolución del problema descrito.

De entre los diferentes métodos que aparecen en la bibliografía que hay para la resolución del VRP, hay que fijarse en los siguientes:

### i) Método de inserción del vecino más cercano - NNI

Este método puede ser utilizado para construir algunas rutas añadiendo, sucesivamente, el punto más cercano de la red después del introducido en último lugar, y así sucesivamente hasta que el vehículo esté lleno.

### ii) Método de los ahorros - Clark and Wright

Este algoritmo asume un escenario de referencia en el que cada cliente es visitado por un único vehículo. En esta situación, el «método de los ahorros» propone que los clientes (i) y (j) deben ser suministrados por el mismo vehículo siempre que no se violen las restricciones de capacidad. El nuevo escenario, por lo tanto, consigue un ahorro en la distancia de reparto que se puede calcular de la siguiente manera:

$$S_{ij} = d_{1i} + d_{1j} - d_{ij}$$

Donde el nodo (1) es el almacén y los nodos (i) y (j) son cualquier par de nodos de la red. Por la propiedad de las distancias simétricas es obvio que  $S_{ij} = S_{ji}$  con  $1 \leq i, j \leq n$ . El algoritmo se ejecuta fácilmente: el nodo que presenta el mayor ahorro se introduce en la ruta en cuestión, teniendo en cuenta las restricciones más relevantes.

### iii) Método de Fernández-García-Mayado-Sanchís - Fernández de Córdoba

Estos autores aplicaron las «técnicas de Monte Carlo» al «método de inserción del vecino más cercano» para solucionar el CVRP. Aunque la mayoría de los métodos heurísticos (incluyendo los algoritmos antes mencionados) crean rutas introduciendo los mejores nodos siguiendo cada uno sus criterios fijos, el «método de Fernández-García-Mayado-Sanchís» diseña una función discreta de probabilidad para seleccionar los nodos candidatos a introducirse en la ruta en cuestión.

Los componentes aleatorios de la selección de nodos son esenciales en las «técnicas de Monte Carlo». Otra característica fundamental de este método es que la función de probabilidad se basa en las distancias entre los nodos: grandes distancias del nodo en cuestión (o nodo actual) a un nodo candidato implica un menor riesgo, es decir, menor probabilidad para agregar dicho nodo a la ruta en construcción. De ahí que, cuanto más lejos está un nodo, menos probabilidad tiene de ser seleccionado.

Este método hace uso de la siguiente fórmula para definir una probabilidad que ayude a elegir los nodos candidatos:

$$p_{i,j} = \frac{(1/d_{ij})^\alpha}{\sum (1/d_{ij})^\alpha} \quad \text{con } 1 \leq i, j, \leq n$$

La distribución de probabilidad  $p_{i,j}$  con  $1 \leq i, j \leq n$  define una matriz de probabilidades  $P=(p_{i,j})$ ,  $1 \leq i, j \leq n$ . que aporta dos índices (i) y (j) para cada iteración probabilística del algoritmo. El primero de los índices (i) nos dice dónde insertar el siguiente nodo, mientras que el segundo índice (j) nos dice qué nodo debería ser insertado. Entonces, la distribución de probabilidad de la matriz P almacena de forma simultánea la posición de inserción y el número de nodo.

*La probabilidad de cada nodo para ser añadido a una ruta es inversamente proporcional a su distancia desde el último nodo insertado.*

Por otra parte, el parámetro  $a$  ( $a \geq 0$ ), también conocido como peso o parámetro de ponderación, se utiliza para modificar la función discreta de probabilidad y así mejorar las soluciones óptimas.

### 6.3 Método de los ahorros frente al método de Fernández-García-Mayado-Sanchís

A continuación, se ilustra con un ejemplo el comportamiento del «método de los ahorros» frente al «método de Fernández-García-Mayado-Sanchís».

Un operario está ubicado en el nodo inicial (0) y se plantea la ruta a seguir si debe visitar los tres nodos (1), (2) y (3) del grafo. Aplicando el «método de los ahorros» de *Clark and Wright*, el ahorro máximo ( $S_{12}=0,492$ ) se logra entre el par de nodos (1) y (2), siendo casi el mismo valor que el ahorro obtenido ( $S_{23}=0,485$ ) entre los nodos (2) y (3).

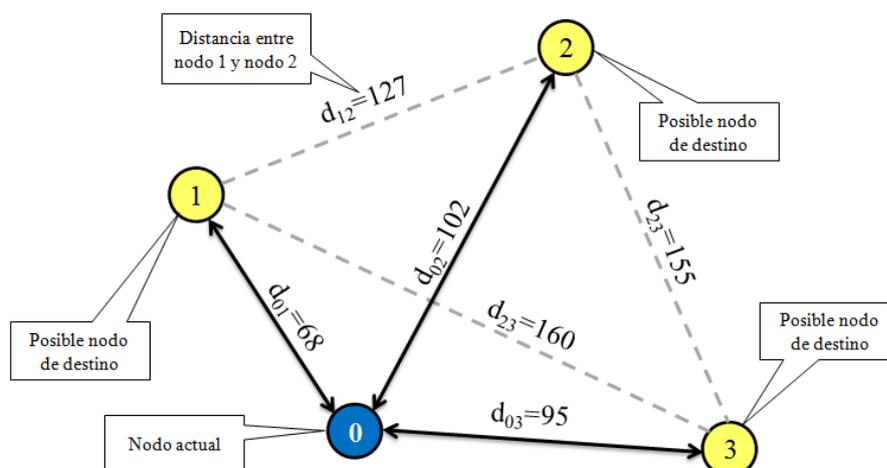


Figura 43 Ejemplo.

$$S_{1,2} = 65$$

$$S_{1,3} = 3$$

$$S_{2,3} = 64$$

Asignar probabilidades a los ahorros obtenidos con el «método de los ahorros» nos introduce a los fundamentos de las «técnicas de Monte Carlo». Estas consisten en aplicar probabilidades a las zonas (1), (2) y (3). La asignación –y ponderación– de estas probabilidades depende de la distancia de desplazamiento entre el nodo inicial (0) y los nodos destino.

¿Cuáles son las probabilidades relativas a los ahorros?

$$P(S_{1,2}) = 0,492$$

$$P(S_{1,3}) = 0,227$$

$$P(S_{2,3}) = 0,485$$

Aplicando el «método de Fernández-García-Mayado-Sanchís» con la fórmula antes planteada, se obtiene:

$$P_{1,2} = \frac{(1/d_{12})^\alpha}{(1/d_{12} + 1/d_{23} + 1/d_{13})^\alpha} = 0,3827$$

$$P_{1,3} = \frac{(1/d_{13})^\alpha}{(1/d_{12} + 1/d_{23} + 1/d_{13})^\alpha} = 0,3038$$

$$P_{2,3} = \frac{(1/d_{23})^\alpha}{(1/d_{12} + 1/d_{23} + 1/d_{13})^\alpha} = 0,313$$

$$\sum P_{i,j} = P_{1,2} + P_{1,3} + P_{2,3} = 1$$

Viendo los resultados se destaca que en el «método de los ahorros», cuanto mayor es el ahorro que ofrece un nodo, mayor probabilidad hay de seleccionar dicho nodo. Es decir, tanta más probabilidad cuanto más ahorro hay.

Sin embargo, el «método de Fernández-García-Mayado-Sanchís» asigna tanta más probabilidad cuanto más cerca está el nodo, para ello se sirve del inverso de las distancias:

$$P_{i,j} = \frac{(1/d_{ij})^\alpha}{\sum (1/d_{ij})^\alpha}$$

En definitiva, grandes distancias de un nodo respecto del nodo candidato, implica menos probabilidad de seleccionar ese nodo como candidato a la ruta.

## 7 Técnicas de Monte Carlo

El término «Monte Carlo» lo aplicaron por primera vez científicos que trabajaban en el desarrollo de armas nucleares en Los Álamos (1943-1946).

Los «técnicas de Monte Carlo» se han aplicado a problemas de rutas en un número limitado de casos. Por ejemplo, Buxey empleó las «técnicas de Monte Carlo» junto con el «método de los ahorros» para construir un procedimiento que resuelve el problema CVRP. *Fernández de Córdoba (1998)* las introdujo en los problemas de rutas para resolver el RPP (Problema del Cartero Rural) y después en el CVRP. La idea básica era simular un vehículo viajando al azar sobre los arcos del grafo, y que describía un recorrido saltando de un nodo a otro, dependiendo de ciertas probabilidades.

Al hilo de lo expuesto en el apartado anterior, la idea básica de las «técnicas de Monte Carlo» está en simular, dado el caso del proyecto final de carrera, operarios moviéndose aleatoriamente por un grafo que representa los distintos caminos dentro del aerogenerador, produciendo así un número determinado de rutas y escoger la mejor de ellas a través de varios criterios (tiempo de desplazamiento, tiempo de espera, tiempo de cambio de condición, entre otros). De este modo, obtenido un conjunto de soluciones, se aplicarán técnicas interactivas con el objetivo de guardar la solución más preferida.

*La clave de estos modelos es la definición de ciertas probabilidades que dependen de los recorridos diseñados.*

## Capítulo 5 PROGRAMA

### 1 Resolución

Mediante un algoritmo se genera una ruta para cada operario que minimiza el tiempo improductivo completando todas las tareas del mantenimiento preventivo en un aerogenerador. El programa tiene su fundamento en el algoritmo que *Fernández de Córdoba y col. (1998)* desarrollaron basándose en las técnicas de Monte Carlo.

El programa desarrollado construye rutas basándose en el concepto de ahorro proporcionado por *Clarke y Wright*, pero con una diferencia fundamental: en el «método de los ahorros» se introducía en la ruta en formación el nodo con mayor ahorro. En este proyecto la pretensión es otra: dar la oportunidad de ser introducidos en la ruta en formación a otros nodos con un ahorro menor. Es decir, crear rutas alternativas a las proporcionadas por el «método de los ahorros», evitando los óptimos locales con la esperanza de que algunas de estas rutas alternativas mejoren la solución, acercándola más al óptimo global.

Para conseguir crear estas rutas alternativas se ha hecho uso de las técnicas de Monte Carlo. Con estas técnicas se ha introducido la probabilidad en la elección de los nodos, de manera que no siempre se forman las mismas rutas ni la misma solución a un problema dado. Por el contrario, lo que se consigue como resultado de la aplicación de técnicas estadísticas es la obtención de un conjunto de soluciones alternativas, alguna de las cuales mejorará la solución proporcionada por el «método de los ahorros».

Debido a la naturaleza probabilística del método seguido, será necesario realizar un conjunto de iteraciones para, de esa forma, obtener un conjunto de soluciones suficientemente grande como para que alguna de ellas se acerquen un poco más a la solución óptima.

Para el problema planteado en este proyecto se decidió utilizar el «método de Fernández-García-Mayado-Sanchís» porque hay muchísimas tareas –150– a realizar y, computacionalmente hablando, es más estable.

La resolución del problema se resume de la siguiente manera:

Se simula que los operarios se desplazan por las zonas del aerogenerador atendiendo la demanda para realizar las labores de mantenimiento. Todos los operarios  $o=(1,2,3,4)$  comienzan su viaje número 1 con variables agrupadas en vectores. Para el caso del «tiempo» total acumulado por los operarios se ha creado el vector denominado  $pesos=(0,0,0,0)$  ; para las «condiciones» el vector denominado  $conds=(0,0,0,0)$  ; para los «tiempos de espera» el vector denominado  $tesp=(0,0,0,0)$  ; para las «penalizaciones» el vector denominado  $penals=(0,0,0,0)$  , etc. De este modo los operarios irán pasando aleatoriamente de una zona a otra, respetando las restricciones y atendiendo tareas en función de unas ciertas probabilidades.

Dada la extensión y complejidad del programa desarrollado con el software *Matlab*, en las próximas páginas se justifica y explica su desarrollo reescribiendo un pseudocódigo que muestra simplificados los pasos seguidos por el algoritmo y la solución adoptada frente a muchas circunstancias que suponen una violación de las restricciones del problema. Como anexo al presente proyecto final de carrera se incluye el código del programa impreso y en formato *cd-rom*.

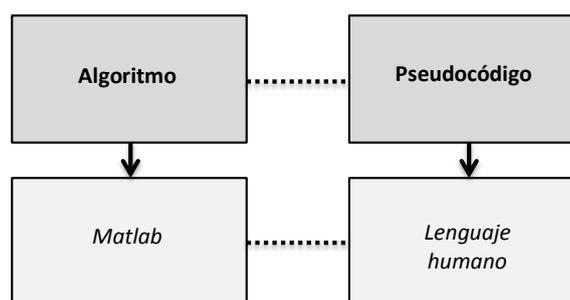


Figura 44 Pseudocódigo: descripción de algoritmos en un lenguaje humano simplificado.

La resolución del problema se inicia con dos operarios que son los primeros en acceder al parque eólico y, a continuación, se ubican en la zona inicial (que es la plataforma inferior del aerogenerador, junto a la entrada).

El análisis de los datos de partida junto a las restricciones planteadas en el anterior capítulo convergen en el siguiente planteamiento: las dos tareas de la zona inicial son de condición libre; cada una de estas tareas requiere un solo operario y el tiempo de desplazamiento en dicha zona es inexistente por encontrarse ambos operarios allí mismo. En este sentido, el «algoritmo de Fernández-García-Mayado-Sanchís» justifica realizar todas las labores de mantenimiento de la zona inicial sin contemplar la posibilidad de visitar otras zonas.

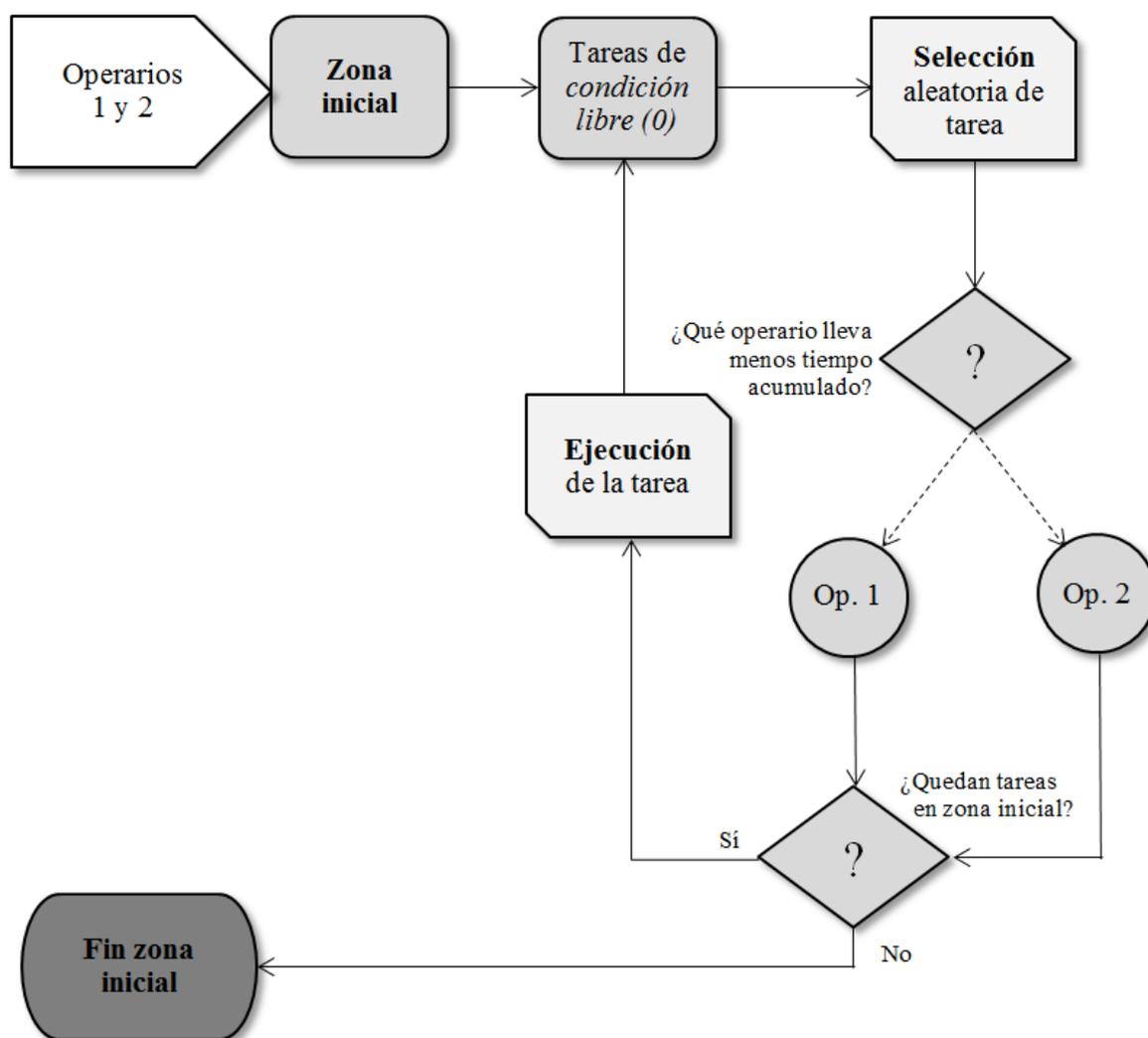


Figura 45 Esquema del bucle inicial de programa.

Completada la zona inicial se entra en el corazón del programa, formado por un bucle –en cuyo interior hay muchos otros– que debe recorrerse hasta que todas las tareas de mantenimiento preventivo hayan sido completadas por los cuatro operarios.

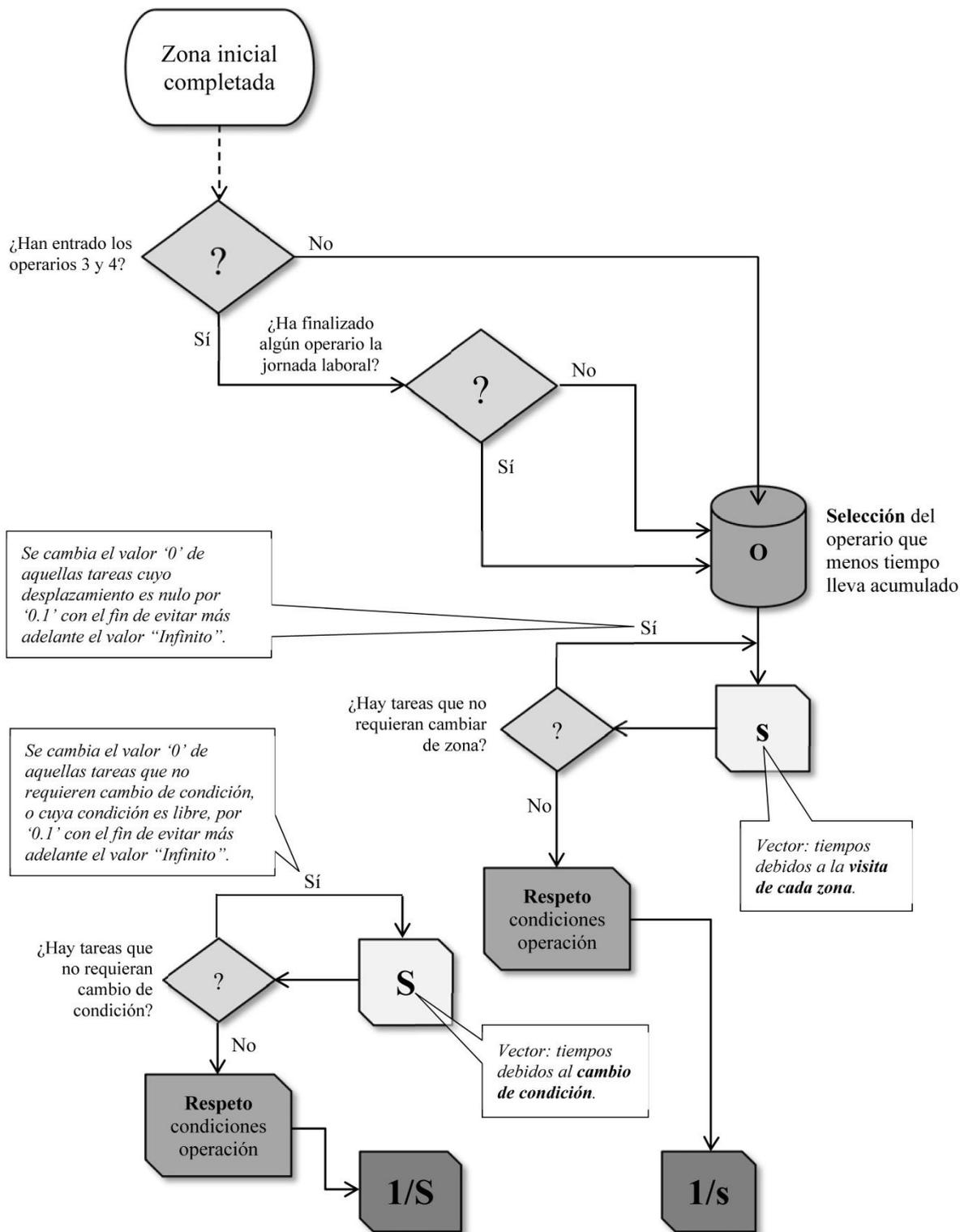


Figura 46 Pasos iniciales del bucle principal del programa.

En este instante se han calculado y almacenado dos vectores  $(1/s)$  y  $(1/S)$  que recogen –para cada tarea– el inverso del tiempo que debería asumir el operario seleccionado para “visitar la zona correspondiente a cada tarea”  $(1/s)$  y para “cambiar a la condición de operación requerida por cada tarea”  $(1/S)$ . Por otro lado estos dos vectores se adaptarán, eliminando tareas, hasta respetar la restricción de las condiciones de operación del aerogenerador.

```
% Calculo el vector 's' con los tiempos que incurrirá al visitar una zona u otra:
s=zeros(1,length(tt));
% Aquellas zonas cuyo 'td' valga cero lo cambio por 0.1 para que luego evite la probabilidad "Inf"
for c=1:length(tt)
    if td(zonas(o),zt(c))==0
        s(c)=0.1;
    else
        s(c)=td(zonas(o),zt(c));
    end
end
% Calculo el inverso del vector 's' de acuerdo al "método de Fernández-García-Mayado-Sanchis"
for c=1:length(tt)
    s(c)=s(c)^(-alfa);
end

for c=1:length(tt)
    if contt(c)==0
        s(c)=0;
    end
end
end
```

Figura 47 Código Matlab: determinación del vector  $1/s$

```
% Calculo el vector 'S' con los tiempos que incurrirá al cambiar de condición de operación:
S=zeros(1,length(tt));
ccm=cc;
% Aquellas tareas que no requieran cambio de condición o cuya condición sea libre lo cambio por 0.1 para evitar "Inf"
for c=1:length(tt)
    if (ct(c)==conds(o)) || (ct(c)==0)
        ccm(c)=0.1;
    end
end
% Calculo el inverso del vector 'S' de acuerdo al "método de Fernández-García-Mayado-Sanchis"
for c=1:length(tt)
    S(c)=(ccm(c))^(alfa);
end

ccm=cc;

for c=1:length(tt)
    if contt(c)==0
        S(c)=0;
    end
end
end
```

Figura 48 Código Matlab: determinación del vector  $1/S$

En definitiva, estos dos vectores recogen la probabilidad de cada tarea. El truco de *Matlab* es sumar ambos vectores e ir acumulando la probabilidad de una tarea más la probabilidad de la siguiente hasta obtener un vector de probabilidades acumuladas.

## 1.1 ¿Cómo se manejan las condiciones de operación del aerogenerador?

- Si la condición del «operario O» –el operario preseleccionado– es distinta de la «condición libre», significa que estará bajo «condición I, II o III». De ahí, se establece que el «operario O» sólo puede realizar aquellas tareas que requieren «condición libre» o la «condición actual». Por tanto: la probabilidad de ejecutar tareas cuya condición sea diferente de la libre y diferente de la actual –que corresponde a la del operario preseleccionado– se hace nula.
- Si la condición del «operario O» –el operario preseleccionado– es igual a la «condición libre», se obsevarán las condiciones del resto de operarios. Por tanto: si las condiciones del resto de operarios son distintas de la «condición libre», la probabilidad de ejecutar tareas cuya condición sea diferente de la libre y de la condición actual, se hace nula.

```

if length(find(operarios))<4 % Cuando hay menos de 4 operarios trabajando...
    if wc(n)~=0 % Tengo en cuenta que se RESPETEN las 'CONDICIONES DE OPERACIÓN' del aerogenerador:
        s(ct~=0 & ct~=wc(n))=0;
        S(ct~=0 & ct~=wc(n))=0;
    else
        for i=1:length(pes)
            if i~=n
                if wc(i)~=0
                    s(ct~=0 & ct~=wc(i))=0;
                    S(ct~=0 & ct~=wc(i))=0;
                end
            end
        end
    end
else % Cuando están los 4 operarios trabajando...
    if conds(o)~=0 % Tengo en cuenta que se RESPETEN las 'CONDICIONES DE OPERACIÓN' del aerogenerador:
        s(ct~=0 & ct~=conds(o))=0;
        S(ct~=0 & ct~=conds(o))=0;
    else
        for i=1:length(pesos)
            if i~=o
                if conds(i)~=0
                    s(ct~=0 & ct~=conds(i))=0;
                    S(ct~=0 & ct~=conds(i))=0;
                end
            end
        end
    end
end
end

P=S+S;

```

Figura 49 Código Matlab: respeto de las condiciones de operación del aerogenerador.

El valor que se extrae de la matriz de sincronización, que es el tiempo entre operarios  $teop(o,i)$  será un "tiempo de espera" que hay que tener en cuenta:

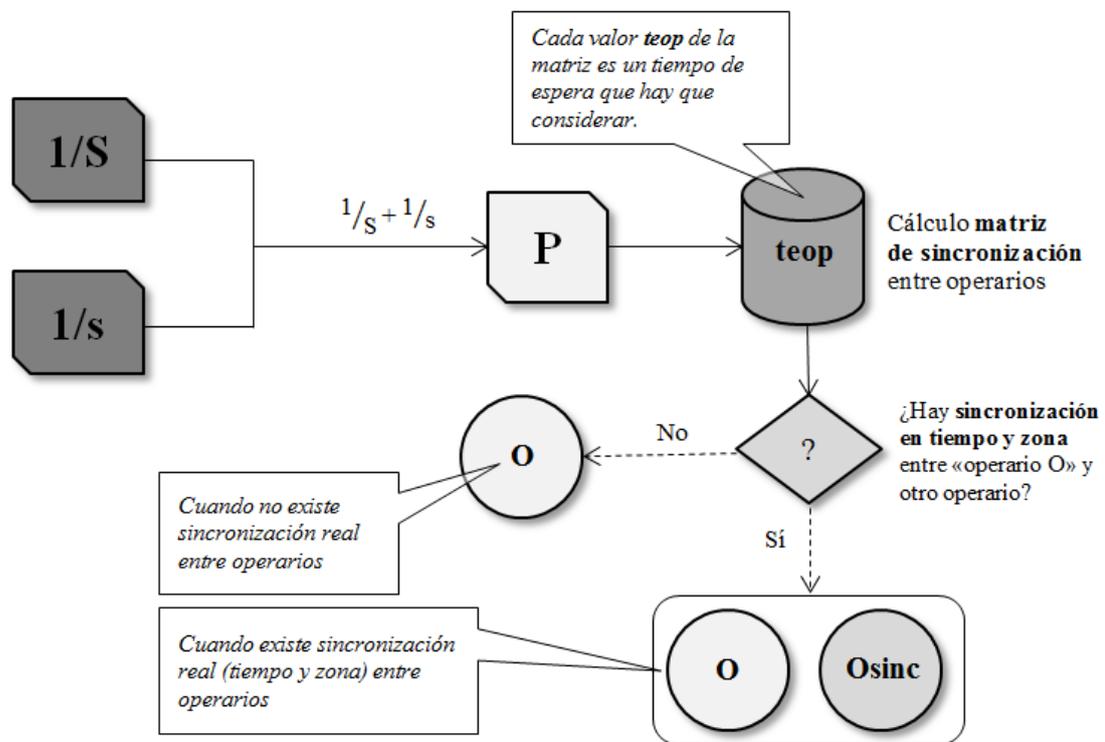


Figura 50 Esquema del análisis de la sincronización.

## 2 Pseudocódigo

### Si existe sincronización en tiempo y zona

El «tiempo entre operarios» **teop** es un «tiempo de espera» a considerar.

Se guardan las tareas que requieren 2 operarios de la zona actual del «operario O».

Al existir «sincronización real» el «operario OSINC» está en la misma zona que el «operario O».

Se recalcula el «vector de probabilidad P».

**Si suma (P) = 0, entonces no quedan tareas de 2 operarios en la zona del «operario O»:**

Se calcula de nuevo s y S.

Se respetan las «condiciones de operación» del aerogenerador.

Se recalcula de nuevo el vector de probabilidad P (*Nota:  $P=s+S$* ).

Se transforma P en un «vector de probabilidad acumulada».

Control de penalización:

**Si suma (P) = 0, entonces hay penalización porque se incumplen las condiciones de operación:**

$P1=0$  (*Nota: variable que servirá de puerta de entrada*)

Se penaliza sobre **tesp** para que los operarios estén «sincronizados en tiempo».

Se cambia la condición de la operación al estar los operarios «sincronizados en tiempo».

Control de finalización (*Nota: el bucle se omite porque se muestra más adelante*).

Se penaliza a los operarios (*Nota: la penalización se incluye en los tiempos de espera*).

Se calcula de nuevo s y S.

Se calcula de nuevo el vector de probabilidad P

$P1=P$  (*Nota: variable que servirá de puerta de entrada*)

**Control de finalización** (*Nota: cuando hay sincronización y cuando ha habido penalización*):

1º) Se guardan todas las tareas susceptibles de ejecutarse. (*Nota: en un vector*)

2º) Se discriminan las tareas que no pueda hacer el operario O.

3º) Se discriminan las tareas que no pueda hacer el operario OSINC.

4º) Se compara O y OSINC para discriminar las tareas que no puedan ejecutar conjuntamente.

5º) Se reconstruye el vector de probabilidad P.

**Si suma (P) = 0, ambos o alguno de los dos operarios debe volver a casa:**

Se manda al operario u operarios a casa: fin jornada laboral.

**Si suma (P) ≠ 0, entonces hay tareas que sí pueden ejecutar:**

Se calcula la tarea que van a ejecutar. (*Nota: se guarda en variable*)

Si la tarea requiere 1 operario:

Operario O realiza la tarea.

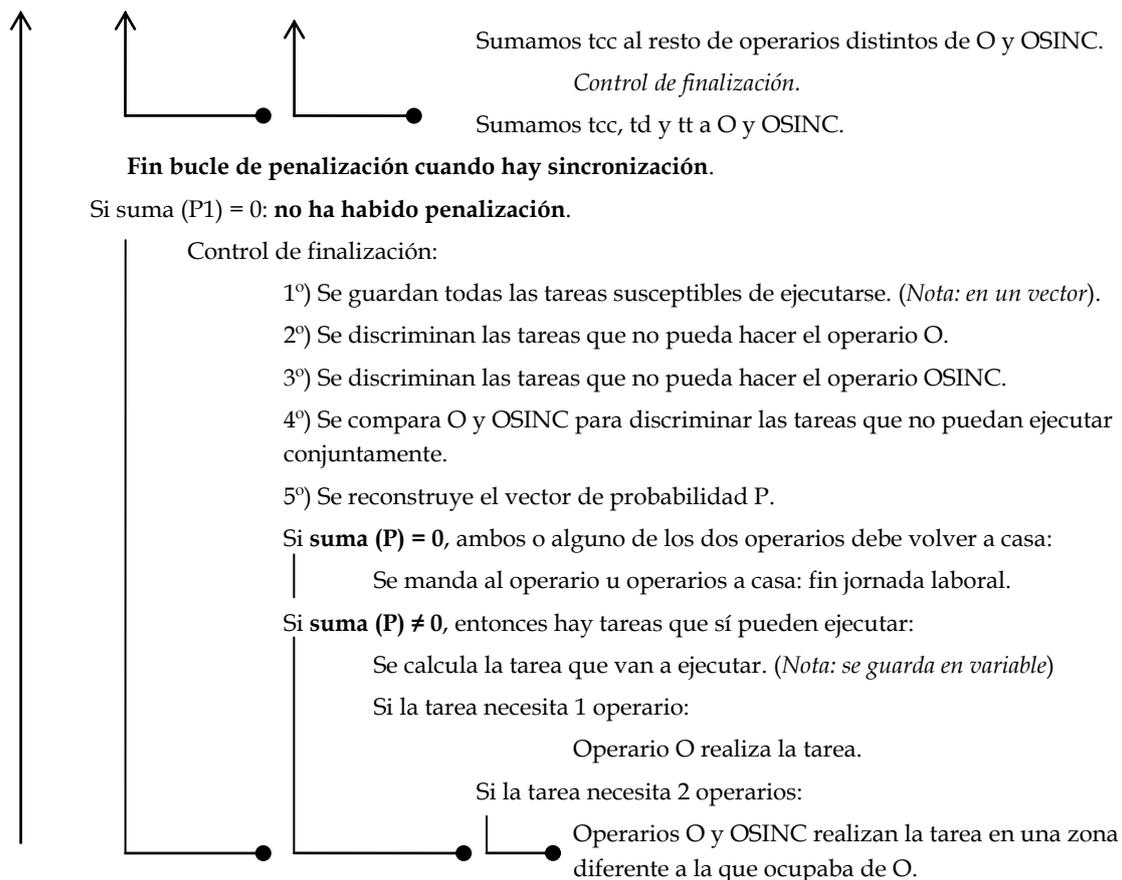
Se suma el tiempo de cambio de condición (tcc) a todo operario distinto de O.

Control de finalización.

Se suma el tcc, tiempo desplazamiento (td) y tiempo ejecución (tt) al operario O.

Si la tarea necesita 2 operarios:

Operarios O y OSINC realizan la tarea.



**Si suma (P) ≠ 0, entonces sí quedan tareas de 2 operarios en la zona del «operario O»:**

Control de finalización

- 1º) Se guardan todas las tareas susceptibles de ejecutarse.
- 2º) Se discriminan las tareas que no pueda hacer el operario O.
- 3º) Se discriminan las tareas que no pueda hacer el operario OSINC.
- 4º) Se compara O y OSINC para discriminar las tareas que no puedan ejecutar conjuntamente.
- 5º) Se reconstruye el vector de probabilidad P.

Si **suma (P) = 0**, ambos o alguno de los dos operarios debe volver a casa:

Si ambos operarios deben regresar a casa:

*¿Pueden realizar tareas ubicadas en zonas distintas a las que ocupan O/OSINC?*

Calculo de nuevo s y S.

Se respeten las condiciones de operación.

Se recalcula el vector de probabilidad P

$P2=P$  (Nota: servirá como variable de entrada)

Si **suma (P) = 0**, penalización cuando hay sincronización:

Se penaliza a los operarios.

Se calcula de nuevo s y S.

$P2 = s+S$ .

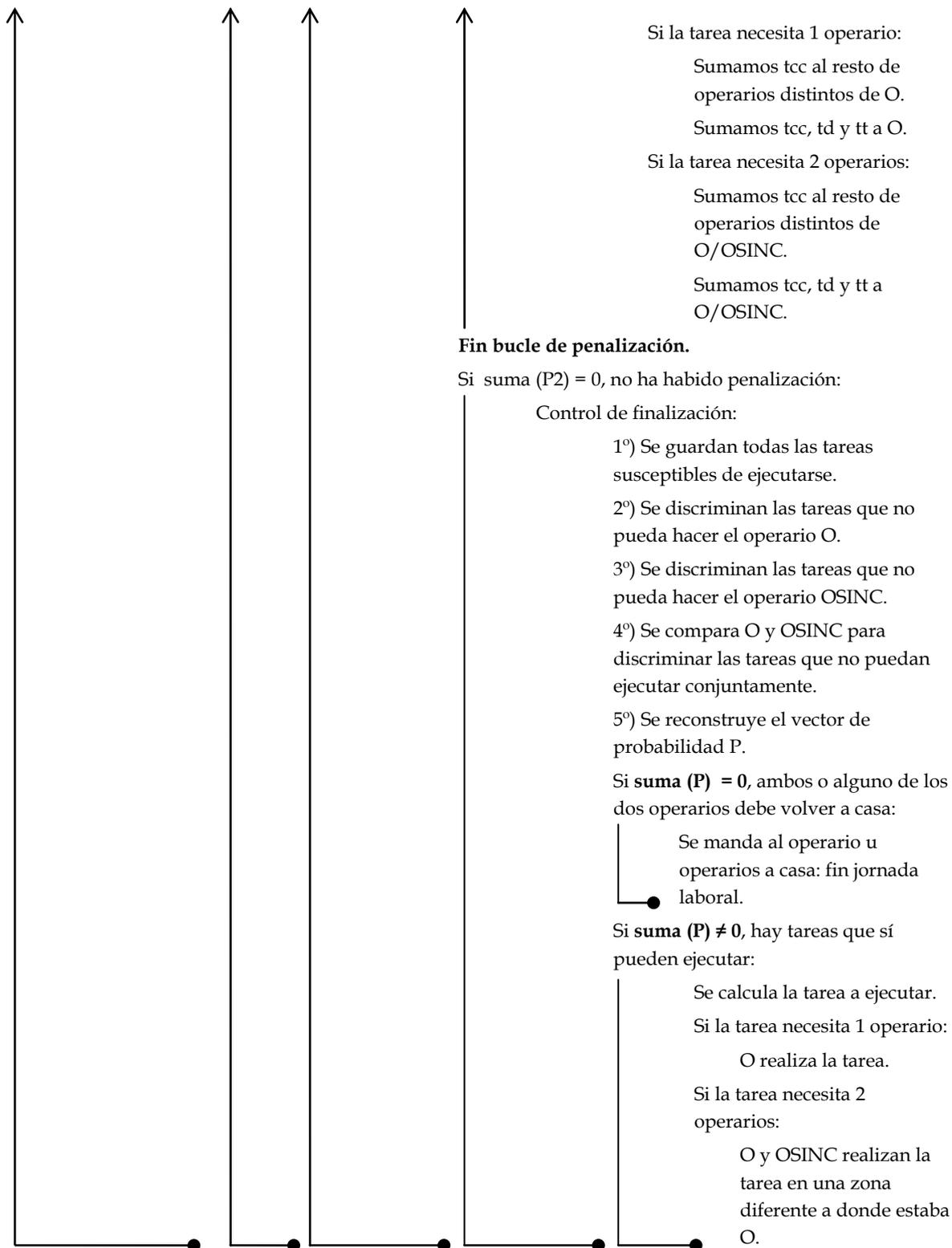
Se calcula la matriz de sincronización.

Si hay sincronización real:

Se mantiene operario O.

Se calcula OSINC.

Se calcula la tarea a ejecutar.



**Fin bucle.**

## No existe sincronización en tiempo y zona

Se recalcula  $s$  y  $S$ .

Se hace que la probabilidad de realizar tareas de 2 operarios sea nula.

Se recalculamos  $P=s+S$

Si **suma (P) = 0**, entonces hay penalización por incumplimiento de las restricciones de condición de operación:

Se penaliza a los operarios (*Nota: para poder cambiar de condición de operación*)

Control de finalización:

Si el tiempo de penalización "**penals**" sumado a los tiempos acumulados por los operarios hace que se exceda el tiempo de la jornada laboral:

Operario a casa: fin jornada laboral.

Se recalcula  $s$  y  $S$

Se recalcula  $P = s + S$

Se calcula la matriz de sincronización (*Nota: por si había sincronización en zona pero no en tiempo*).

OSINC=0

¿Hay ahora sincronización real entre operarios?

Si hay sincronización: se calcula  $O$  y OSINC.

Si no hay sincronización: se mantiene  $O$ .

Si quedan operarios trabajando:

Cuando **no hay sincronización después de la penalización**, OSINC=0:

La penalización implica haber sumado un tiempo a los operarios.

1º) Se reconstruye  $P$  para que guarde las tareas susceptibles de ejecutarse.

2º) Se discriminan aquellas tareas que por la restricción de la jornada laboral no pueda ejecutar.

3º) Control de finalización:

Si **suma (P) = 0**, operario  $O$  a casa: fin jornada laboral.

Si **suma (P) ≠ 0**, quedan tareas que sí puede realizar  $O$ :

Se calcula la tarea a realizar.

Si la tarea requiere 1 operario:

Se suma tcc al resto de operarios distintos de  $O$ .

Se suma tcc, td y tt a  $O$ .

Si la tarea requiere 2 operarios:

Si OSINC=0:

Si no quedan tareas de 1 operario:

Si quedan tareas de 2 operarios:

Se respetan las restricciones de cambio de condición.

Si queda operario en la zona de la tarea seleccionada: OSINC.



Si no queda operario en la zona de la tarea seleccionada: OSINC será el más cercano a la zona de la tarea seleccionada. Control de finalización. Se manda al operario O u OSINC a casa: fin jornada laboral. Después de desplazarlos: si los operarios no están sincronizados en tiempo, tendrán que esperar...

...Control final: una vez desplazados y después de esperar, ¿tienen tiempo para ejecutar la tarea de 2 operarios?:

Si el **desplazamiento no es factible**:

Ambos o a uno de los operarios regresan a casa: fin jornada laboral.

Se deshace la penalización/desplazamiento/espera.

Si el **desplazamiento sí es factible**:

O y OSINC realizan la tarea seleccionada

Sí quedan tareas de 1 operario:

Se selecciona tarea a realizar.

Operario O realiza la tarea.

Control de finalización.

Si **OSINC  $\neq 0$** :

O y OSINC realizan la tarea de 2 operarios.

Cuando **sí hay sincronización después de la penalización: OSINC  $\neq 0$** :

Control de finalización:

1º) Se guardan todas las tareas susceptibles de ejecutarse.

2º) Se discriminan las tareas que no pueda hacer el operario O.

3º) Se discriminan las tareas que no pueda hacer el operario OSINC.

4º) Se compara O y OSINC para discriminar las tareas que no puedan ejecutar conjuntamente.

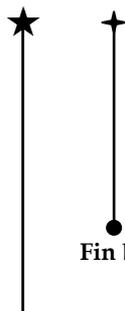
5º) Se reconstruye el vector de probabilidad P.

Si **suma (P) = 0**: ambos o alguno de los dos operarios debe volver a casa:

Se manda al operario u operarios a casa: fin jornada laboral.

Si **suma (P)  $\neq 0$** , hay tareas que sí pueden ejecutar:

Se calcula la tarea a ejecutar



Si la tarea necesita 1 operario: operario O realiza la tarea. (Nota: al ser una tarea de 1 operario, OSINC no la ejecuta pero sí que debe sumar el tiempo de cambio de condición. Por ello, si el hecho de continuar en su zona original le impide luego, por violar el tiempo de su jornada laboral, regresar a casa, lo enviaremos a la zona donde se ejecuta la tarea).

Si la tarea necesita 2 operarios: operarios O y OSINC realizan la tarea en una zona diferente a donde estaba O.

**Fin bucle penalización**

Si suma ( $P$ )  $\neq 0$ , no hay penalización y no hay sincronización:

Control de finalización:

- 1º) Se reconstruye  $P$  que guarda todas las tareas susceptibles de ejecutarse.
- 2º) Se discriminan aquellas tareas que por la restricción de la jornada laboral no pueda ejecutar.
- 3º) Se reconstruye el vector de probabilidad  $P$ .
- 4º) Control final:

Si **suma ( $P$ )  $\neq 0$** , se selecciona tarea: operario O realiza la tarea

Si **suma ( $P$ ) = 0**, operario O regresa a casa: fin jornada laboral.

**Fin bucle.**

La salida de este bucle sólo se produce cuando los operarios han finalizado la primera jornada laboral. A continuación, para completar todo el mantenimiento preventivo durante la segunda jornada laboral se procede de manera análoga resolviendo, respetando una vez más las restricciones iniciales del problema.

El programa finaliza cuando todas las tareas han sido completadas y los operarios han regresado a la zona inicial del problema.

Como ejemplo se muestra la salida gráfica del programa al finalizar el mantenimiento preventivo:

- *Número de iteraciones:* 500
- *Parámetro de peso o ponderación:* 3
- *Tiempo computacional:* 105.925027 segundos

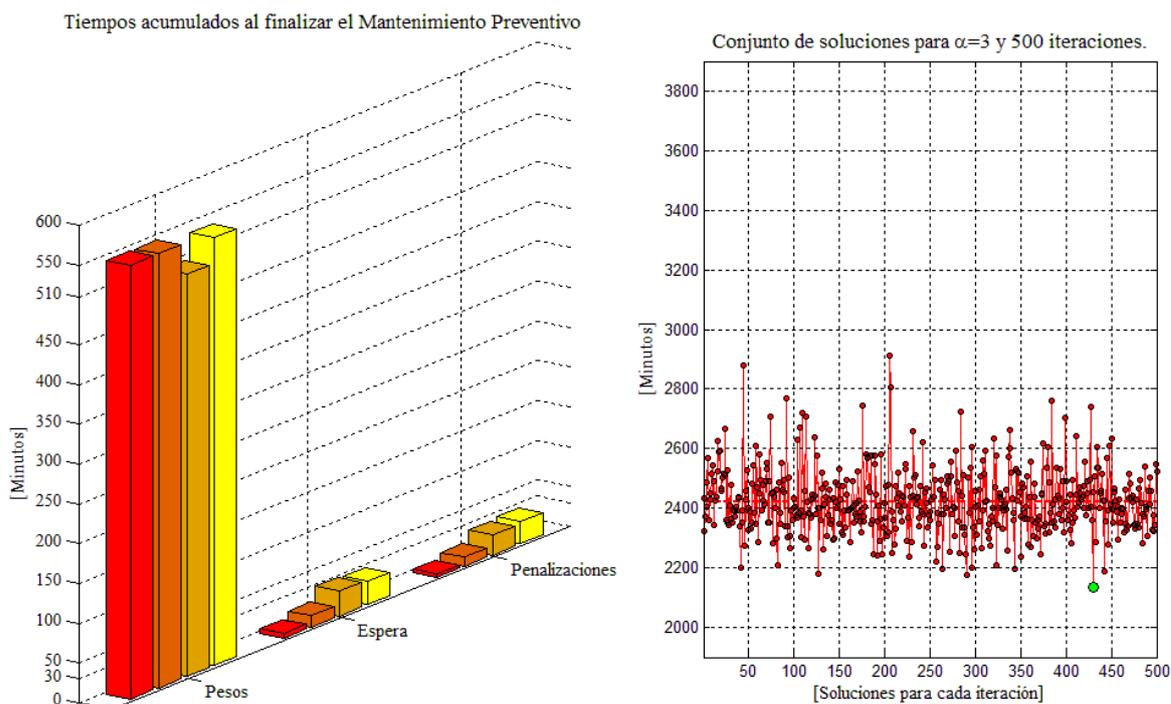


Figura 51 Salida del programa para 500 iteraciones y parámetro de ponderación 3.

### 3 Afinación del programa

Una característica fundamental del programa desarrollado es la aleatoriedad de las soluciones obtenidas. Si se revisa la metodología de resolución en que se basa en el algoritmo de «Fernández-García-Mayado-Sanchís», se puede afirmar que todas las soluciones obtenidas, además de ser solución, son diferentes.

Los componentes aleatorios de la selección de tareas son esenciales en las «técnicas de Monte Carlo». En el programa desarrollado la función de probabilidad se basa en los tiempos improductivos: grandes tiempos de desplazamiento entre una zona u otra, así como grandes tiempos de cambio de condición de una tarea a otra, implican una menor probabilidad para agregar dicha tarea a la ruta de tareas del operario correspondiente.

El programa desarrollado hace uso, como ya se ha explicado, de la siguiente fórmula para definir una función de probabilidad que ayude a elegir las tareas candidatas de mantenimiento:

$$p_i = s_i + S_i \quad \text{con } 1 \leq i \leq 150$$

$$P_i = \frac{(1/p_i)^a}{\sum (1/p_i)^a} \quad \text{con } 1 \leq i \leq 150$$

Donde  $a$  es el parámetro de ponderación que se utiliza para modificar la función de probabilidad y es crucial para el buen funcionamiento del método. La ponderación es una forma de separar o unir las diferentes probabilidades. En este proyecto se ha decidido separar una probabilidad de otra para evitar la aleatoriedad.

Por otro lado, si el programa se ejecuta diez veces: se obtendrán diez soluciones diferentes presentándose como solución óptima la mejor de todas ellas.

En consecuencia:

*Los siguientes parámetros se utilizan para mejorar las soluciones óptimas:*

- *a es el peso o parámetro de ponderación*
- *Ni es el número de iteraciones con las que se pretende obtener una solución lo suficientemente buena.*

### 4 Proceso de afinación

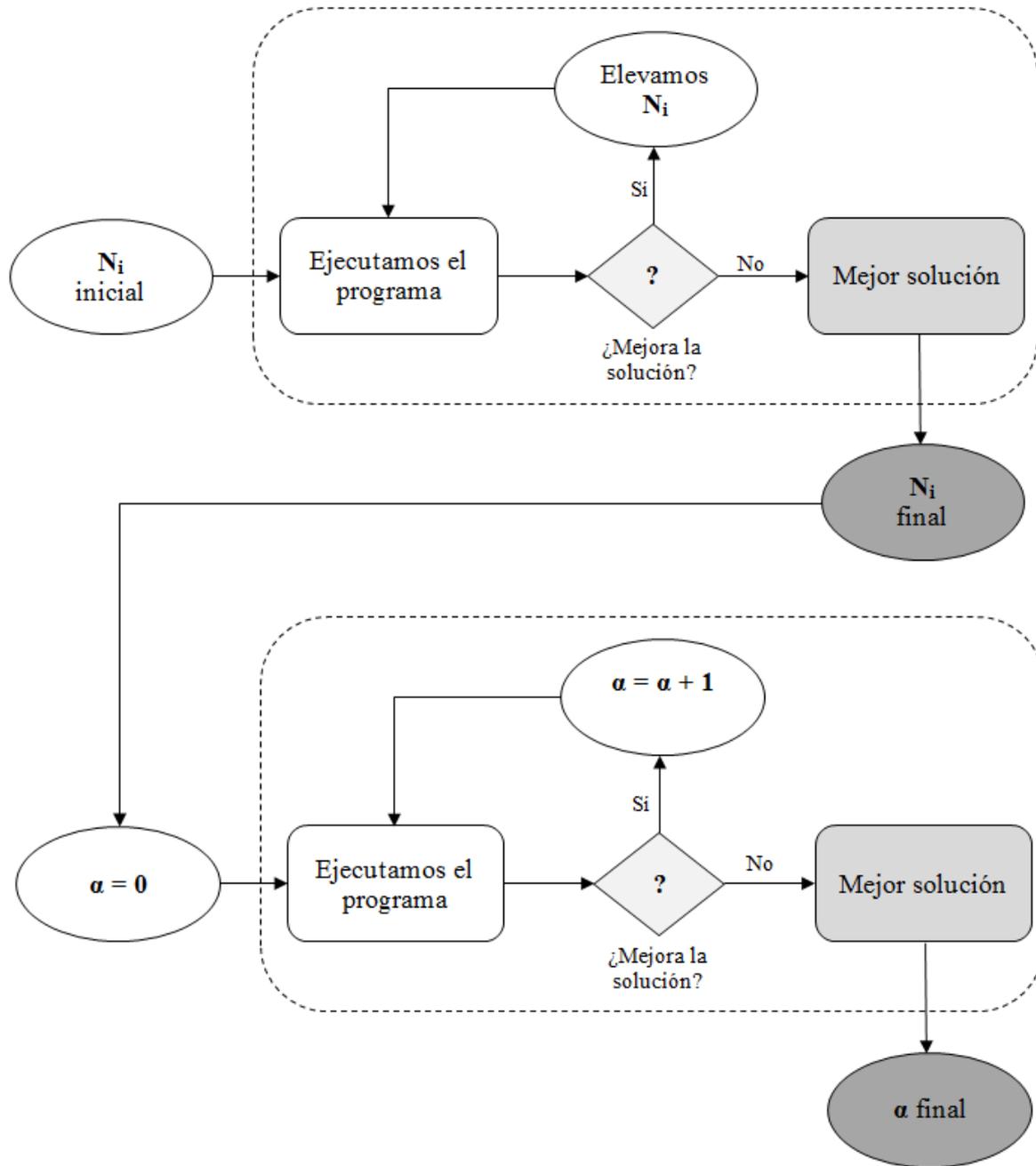


Figura 52 Proceso de afinación.

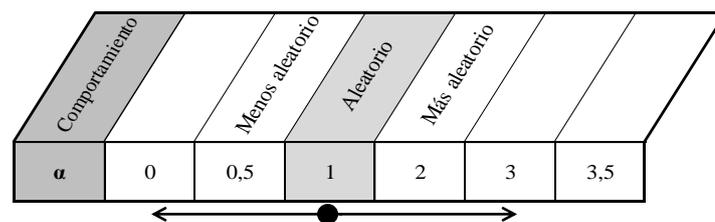


Figura 53 Comportamiento del parámetro de ponderación.

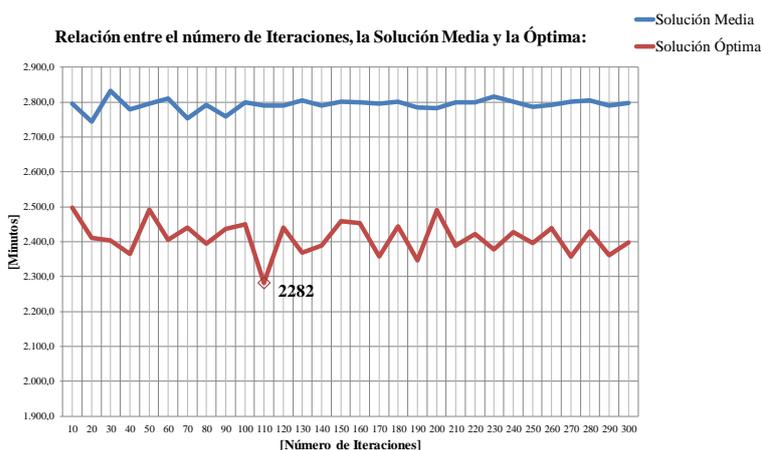
## 5 Resultados de la afinación

A continuación se presentan los resultados de las pruebas de afinación realizadas con el objeto de identificar el valor de los parámetros  $a$  (peso) y  $N_i$  (número de iteraciones).

La solución que aparece en las tablas corresponde a la suma de los tiempos empleados por los cuatro operarios en la realización de todo el mantenimiento preventivo. Por ejemplo: durante la prueba del programa para  $a=0$  y 110 iteraciones, la solución óptima obtenida es de 2282 minutos repartidos entre una fuerza de trabajo de cuatro operarios.

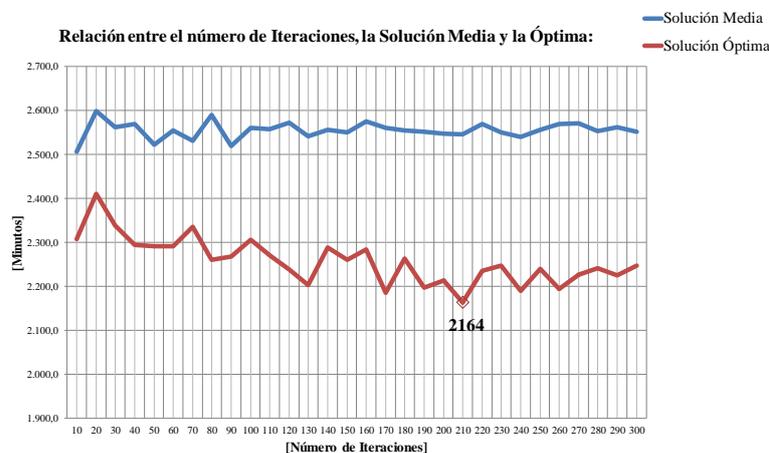
$\alpha=0$

Nº Iteraciones	Solución media	Solución óptima
10	2.796,0	2497
20	2.744,7	2411
30	2.832,5	2403
40	2.778,5	2364
50	2.796,3	2492
60	2.809,5	2406
70	2.753,6	2440
80	2.791,3	2394
90	2.759,4	2437
100	2.799,3	2450
110	2.790,5	2282
120	2.789,6	2441
130	2.804,0	2368
140	2.790,5	2388
150	2.800,8	2458
160	2.799,5	2454
170	2.795,2	2357
180	2.800,9	2444
190	2.783,7	2346
200	2.782,3	2490
210	2.800,1	2388
220	2.800,1	2422
230	2.816,7	2378
240	2.800,7	2428
250	2.787,2	2396
260	2.792,7	2438
270	2.801,8	2358
280	2.804,2	2430
290	2.789,5	2362
300	2.797,4	2398



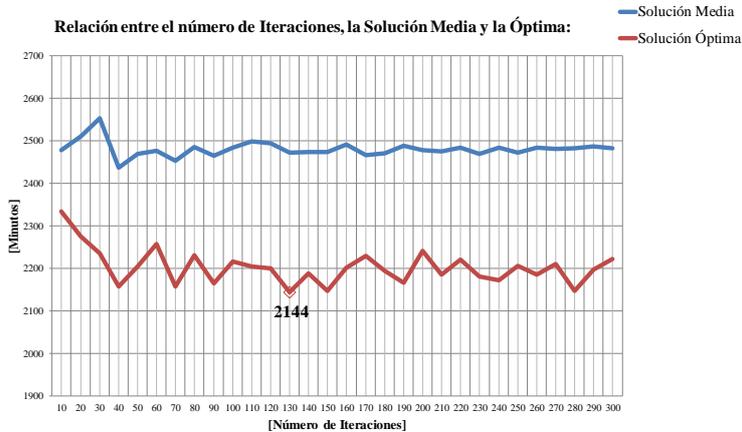
$\alpha=0,5$

Nº Iteraciones	Solución media	Solución óptima
10	2.505,9	2307
20	2.598,8	2410
30	2.562,5	2338
40	2.569,4	2294
50	2.523,1	2291
60	2.554,1	2292
70	2.530,7	2335
80	2.589,8	2261
90	2.519,2	2268
100	2.560,2	2306
110	2.557,1	2271
120	2.572,8	2238
130	2.540,9	2203
140	2.556,8	2289
150	2.550,3	2260
160	2.575,6	2284
170	2.560,1	2185
180	2.555,0	2264
190	2.551,2	2198
200	2.547,7	2214
210	2.545,7	2164
220	2.569,2	2236
230	2.550,0	2248
240	2.540,7	2190
250	2.556,9	2240
260	2.570,2	2195
270	2.570,3	2226
280	2.553,3	2242
290	2.561,8	2225
300	2.551,6	2247



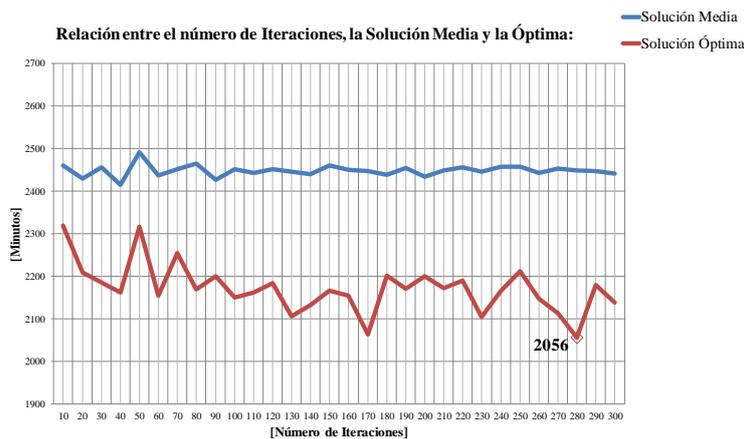
$\alpha=1$

Nº Iteraciones	Solución media	Solución óptima
10	2477,9	2334
20	2511,3	2276
30	2553,7	2236
40	2437,6	2157
50	2469,3	2205
60	2477,4	2258
70	2453,2	2158
80	2486	2231
90	2464,9	2165
100	2484,3	2216
110	2498,5	2204
120	2493,8	2200
130	2471,9	2144
140	2474,1	2188
150	2474,3	2148
160	2491,2	2202
170	2466,3	2239
180	2471,2	2195
190	2489,3	2166
200	2478,7	2242
210	2474,7	2185
220	2484,9	2221
230	2469,4	2181
240	2483,8	2172
250	2473	2206
260	2484,2	2186
270	2481,8	2210
280	2482,6	2147
290	2487	2198
300	2482,3	2223



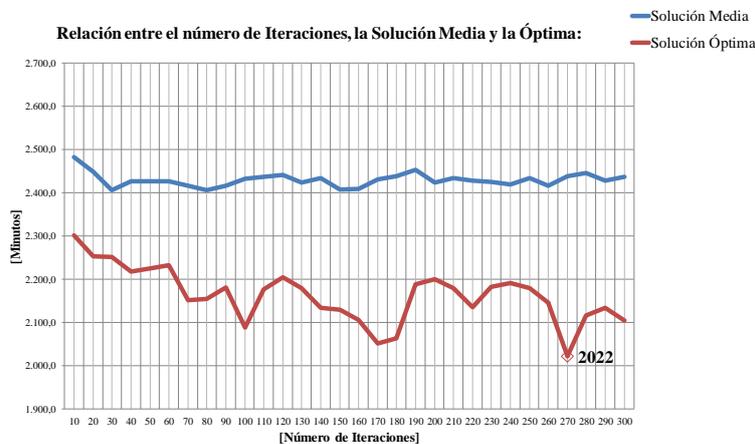
$\alpha=1,5$

Nº Iteraciones	Solución media	Solución óptima
10	2460,5	2320
20	2429,9	2209
30	2456,4	2185
40	2415,6	2162
50	2492,2	2316
60	2436,8	2155
70	2451,7	2255
80	2465,1	2170
90	2426,8	2200
100	2451,4	2150
110	2443,6	2162
120	2452,4	2184
130	2445,6	2106
140	2440,7	2132
150	2460,5	2167
160	2450	2154
170	2447,8	2063
180	2438,3	2202
190	2454,8	2171
200	2433,6	2200
210	2449	2172
220	2455,6	2190
230	2446,4	2105
240	2457,6	2166
250	2457,1	2212
260	2442,7	2148
270	2454	2114
280	2448,4	2056
290	2447,9	2180
300	2441,6	2138



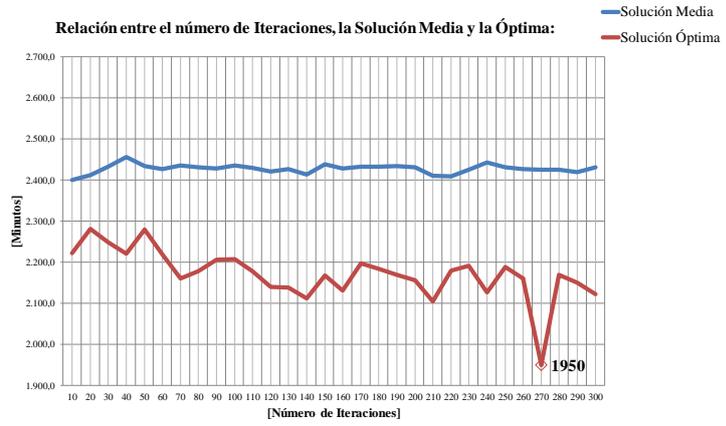
$\alpha=2$

Nº Iteraciones	Solución media	Solución óptima
10	2.482,2	2302
20	2.448,4	2253
30	2.406,7	2251
40	2.427,1	2218
50	2.426,9	2225
60	2.427,5	2233
70	2.416,6	2151
80	2.405,8	2154
90	2.415,9	2181
100	2.433,1	2089
110	2.436,8	2177
120	2.440,8	2205
130	2.423,4	2179
140	2.433,9	2134
150	2.407,6	2129
160	2.408,7	2106
170	2.431,3	2051
180	2.438,0	2063
190	2.452,7	2189
200	2.424,4	2200
210	2.434,5	2179
220	2.427,9	2136
230	2.426,0	2182
240	2.418,8	2192
250	2.434,3	2179
260	2.416,0	2146
270	2.439,3	2022
280	2.445,8	2116
290	2.428,7	2134
300	2.436,6	2105



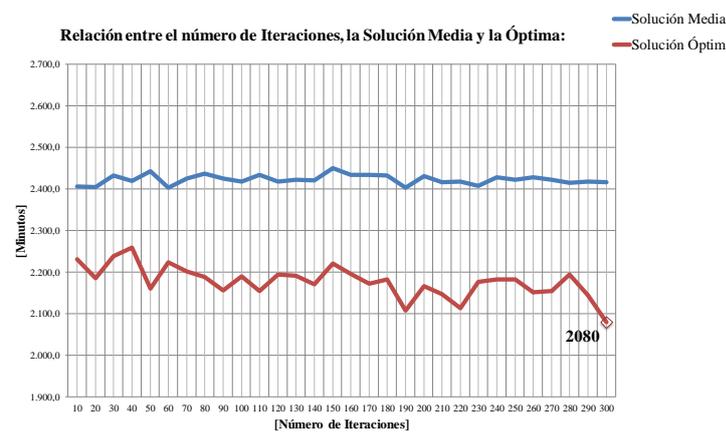
$\alpha=2,5$

Nº Iteraciones	Solución media	Solución óptima
10	2.399,8	2223
20	2.411,7	2281
30	2.432,5	2249
40	2.452,9	2221
50	2.434,4	2280
60	2.426,2	2220
70	2.435,6	2160
80	2.431,7	2178
90	2.429,0	2206
100	2.435,0	2207
110	2.430,0	2178
120	2.420,4	2140
130	2.427,0	2138
140	2.413,6	2112
150	2.438,5	2168
160	2.428,2	2131
170	2.432,3	2198
180	2.432,7	2184
190	2.434,8	2170
200	2.430,9	2156
210	2.410,2	2104
220	2.409,3	2180
230	2.425,0	2192
240	2.442,4	2126
250	2.430,6	2188
260	2.426,7	2160
270	2.426,0	1950
280	2.425,3	2170
290	2.419,3	2150
300	2.431,3	2122



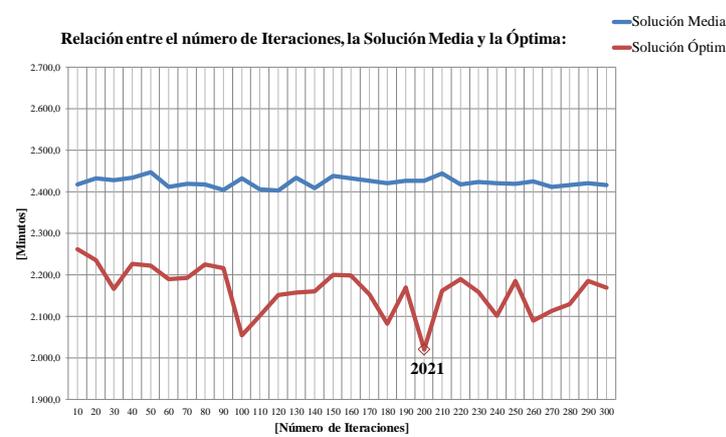
$\alpha=3$

Nº Iteraciones	Solución media	Solución óptima
10	2.406,7	2231
20	2.404,7	2186
30	2.432,9	2239
40	2.419,3	2259
50	2.443,3	2161
60	2.402,7	2224
70	2.425,3	2201
80	2.436,8	2188
90	2.425,3	2156
100	2.417,9	2190
110	2.433,9	2155
120	2.418,1	2195
130	2.423,1	2191
140	2.420,3	2171
150	2.449,9	2221
160	2.434,5	2196
170	2.434,5	2173
180	2.432,4	2182
190	2.403,4	2108
200	2.430,8	2166
210	2.416,9	2147
220	2.418,4	2113
230	2.407,6	2176
240	2.427,7	2182
250	2.423,0	2182
260	2.428,1	2152
270	2.422,9	2154
280	2.415,2	2195
290	2.417,8	2144
300	2.416,2	2080



$\alpha=3,5$

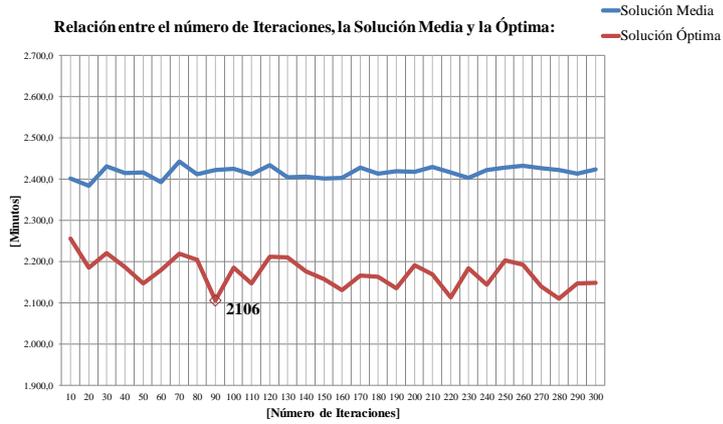
Nº Iteraciones	Solución media	Solución óptima
10	2.417,4	2262
20	2.433,3	2235
30	2.428,1	2166
40	2.433,7	2227
50	2.447,3	2222
60	2.411,6	2190
70	2.419,6	2193
80	2.418,0	2225
90	2.404,8	2217
100	2.433,3	2055
110	2.406,2	2102
120	2.402,9	2152
130	2.433,8	2157
140	2.409,3	2160
150	2.438,9	2200
160	2.433,2	2199
170	2.427,4	2153
180	2.421,2	2082
190	2.427,3	2170
200	2.426,5	2021
210	2.445,2	2162
220	2.418,2	2190
230	2.424,3	2159
240	2.421,1	2102
250	2.419,9	2186
260	2.425,9	2090
270	2.411,4	2114
280	2.416,1	2130
290	2.421,1	2186
300	2.417,1	2170



$\alpha=4$

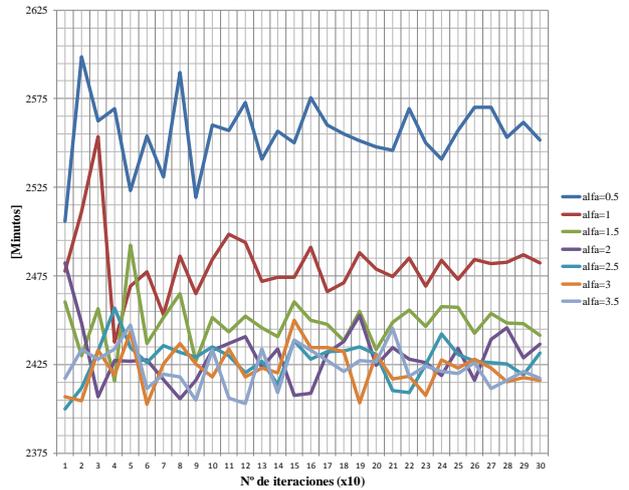
Nº Iteraciones	Solución media	Solución óptima
10	2.401,7	2256
20	2.383,7	2185
30	2.430,9	2221
40	2.414,5	2187
50	2.416,7	2147
60	2.392,5	2180
70	2.442,4	2220
80	2.412,2	2204
90	2.422,1	2106
100	2.424,8	2186
110	2.411,5	2148
120	2.434,8	2212
130	2.404,1	2211
140	2.405,9	2176
150	2.402,4	2158
160	2.403,7	2131
170	2.428,9	2167
180	2.412,9	2163
190	2.419,8	2135
200	2.418,4	2192
210	2.429,5	2169
220	2.417,2	2114
230	2.402,8	2184
240	2.421,8	2145
250	2.429,0	2203
260	2.432,8	2193
270	2.426,3	2140
280	2.421,9	2110
290	2.413,4	2148
300	2.423,6	2149

Relación entre el número de Iteraciones, la Solución Media y la Óptima:



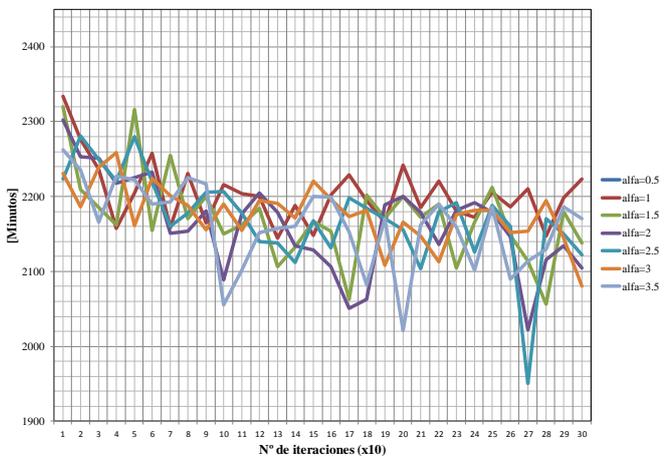
Nº Iteraciones	$\alpha=0,5$	$\alpha=1$	$\alpha=1,5$	$\alpha=2$	$\alpha=2,5$	$\alpha=3$	$\alpha=3,5$
10	2505,9	2477,9	2460,5	2482,2	2399,8	2406,7	2417,4
20	2598,8	2511,3	2429,9	2448,4	2411,7	2404,7	2433,3
30	2562,5	2553,7	2456,4	2406,7	2432,5	2432,9	2428,1
40	2569,4	2437,6	2415,6	2427,1	2456,9	2419,3	2433,7
50	2523,1	2469,3	2492,2	2426,9	2434,4	2443,3	2447,3
60	2554,1	2477,4	2436,8	2427,5	2426,2	2402,7	2411,6
70	2530,7	2453,2	2451,7	2416,6	2435,6	2425,3	2419,6
80	2589,8	2486	2465,1	2405,8	2431,7	2436,8	2418
90	2519,2	2464,9	2426,8	2415,9	2429	2425,3	2404,8
100	2560,2	2484,3	2451,4	2433,1	2435	2417,9	2433,3
110	2557,1	2498,5	2443,6	2436,8	2430	2433,9	2406,2
120	2572,8	2493,8	2452,4	2440,8	2420,4	2418,1	2402,9
130	2540,9	2471,9	2445,6	2423,4	2427	2423,1	2433,8
140	2556,8	2474,1	2440,7	2433,9	2413,6	2420,3	2409,3
150	2550,3	2474,3	2460,5	2407,6	2438,5	2449,9	2438,9
160	2575,6	2491,2	2450	2408,7	2428,2	2434,5	2433,2
170	2560,1	2466,3	2447,8	2431,3	2432,3	2434,5	2427,4
180	2555	2471,2	2438,3	2438	2432,7	2432,4	2421,2
190	2551,2	2488,3	2454,8	2452,7	2434,8	2403,4	2427,3
200	2547,7	2478,7	2433,6	2424,4	2430,9	2430,8	2426,5
210	2545,7	2474,7	2449	2434,5	2410,2	2416,9	2445,2
220	2569,2	2484,9	2455,6	2427,9	2409,3	2418,4	2418,2
230	2550	2469,4	2446,4	2426	2425	2407,6	2424,3
240	2540,7	2483,8	2457,6	2418,8	2442,4	2427,7	2421,1
250	2556,9	2473	2457,1	2434,3	2430,6	2423	2419,9
260	2570,2	2484,2	2442,7	2416	2426,7	2428,1	2425,9
270	2570,3	2481,8	2454	2439,3	2426	2422,9	2411,4
280	2553,3	2482,6	2448,4	2445,8	2425,3	2415,2	2416,1
290	2561,8	2487	2447,9	2428,7	2419,3	2417,8	2421,1
300	2551,6	2482,3	2441,6	2436,6	2431,3	2416,2	2417,1

Soluciones medias para 10, 20, 30, 40... hasta 300 iteraciones



Nº Iteraciones	$\alpha=1$	$\alpha=1,5$	$\alpha=2$	$\alpha=2,5$	$\alpha=3$	$\alpha=3,5$
10	2334	2320	2302	2223	2231	2262
20	2276	2209	2253	2281	2186	2235
30	2236	2185	2251	2249	2239	2166
40	2157	2162	2218	2221	2259	2227
50	2205	2316	2225	2280	2161	2222
60	2258	2155	2233	2220	2224	2190
70	2158	2255	2151	2160	2201	2193
80	2231	2170	2154	2178	2188	2225
90	2165	2200	2181	2206	2156	2217
100	2216	2150	2089	2207	2190	2055
110	2204	2162	2177	2178	2155	2102
120	2200	2184	2205	2140	2195	2152
130	2144	2106	2179	2138	2191	2157
140	2188	2132	2134	2112	2171	2160
150	2148	2167	2129	2168	2221	2200
160	2202	2154	2106	2131	2196	2199
170	2229	2063	2051	2198	2173	2153
180	2195	2202	2063	2184	2182	2082
190	2166	2171	2189	2170	2108	2170
200	2242	2200	2200	2156	2166	2021
210	2185	2172	2179	2104	2147	2162
220	2221	2190	2136	2180	2113	2190
230	2181	2105	2182	2192	2176	2159
240	2172	2166	2192	2126	2182	2102
250	2206	2212	2179	2188	2182	2186
260	2186	2148	2146	2160	2152	2090
270	2210	2114	2022	1950	2154	2114
280	2147	2056	2116	2170	2195	2130
290	2198	2180	2134	2150	2144	2186
300	2223	2138	2105	2122	2080	2170

Soluciones óptimas para 10, 20, 30, 40... hasta 300 iteraciones



## Capítulo 6 RESULTADOS Y CONCLUSIONES

### 1 Resultados

En este apartado se va a analizar en profundidad los resultados obtenidos mediante el programa desarrollado que simula la realización del mantenimiento preventivo en un aerogenerador. Para ello, se va a ejecutar la aplicación con un parámetro de ponderación preseleccionado ( $a=3$ ) y un número suficiente de iteraciones ( $N_i=300$ ).

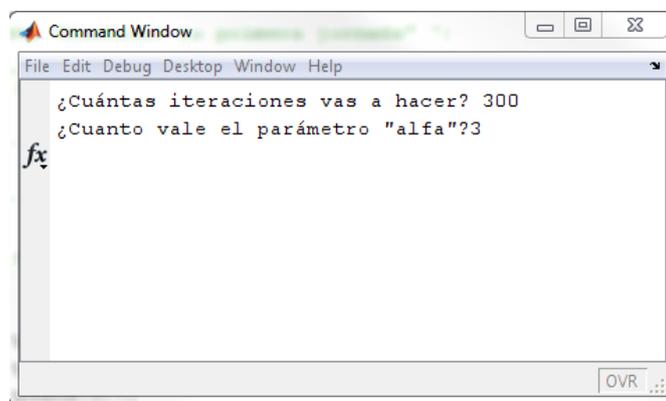


Figura 54 Ventana de comandos en Matlab donde se introducen los parámetros del programa.

El resultado de la aplicación se mostrará en las próximas hojas y se analizarán tanto las variables globales del problema como las que afectan de modo particular a cada operario.

La interpretación de estas variables son, en definitiva, las que explican el resultado obtenido y permiten extraer distintas conclusiones.

Como ya se ha dicho, el programa desarrollado en este proyecto se basa en las técnicas de Monte Carlo y para apoyar los datos obtenidos se compararán distintos resultados que permitan contextualizar los resultados obtenidos de acuerdo a la aleatoriedad que aportan dichas técnicas.

## 2 Solución

La figura de la izquierda representa los tiempos acumulados por cada uno de los operarios al completar el mantenimiento preventivo durante las dos jornadas laborales. Los tiempos se expresan en tres campos diferentes. El primero, denominado «Pesos», es la suma de todos los tiempos objeto de estudio: el de ejecución de la tarea, el de movimiento entre una zona y otra del aerogenerador, el de cambio de condición en la operación del aerogenerador, el de espera y el de penalización. Las otras dos reflejan cuál ha sido la contribución de los «tiempos de espera» y las «penalizaciones» al resultado final. En ambos casos se ve claramente que los valores son bajos, lo que permite asegurar desde un simple vistazo que el programa no ha violado las restricciones impuestas en el planteamiento inicial del problema.

La figura de la derecha representa el conjunto de todas las soluciones obtenidas durante la ejecución del programa. Los puntos sobre el espacio gráfico indican cada una de las 300 soluciones obtenidas. En la figura la mejor solución de todo el conjunto está representada en el punto verde, ligeramente más grande que el resto. Además, se observa una línea discontinua con la solución media obtenida entre todas las soluciones particulares.

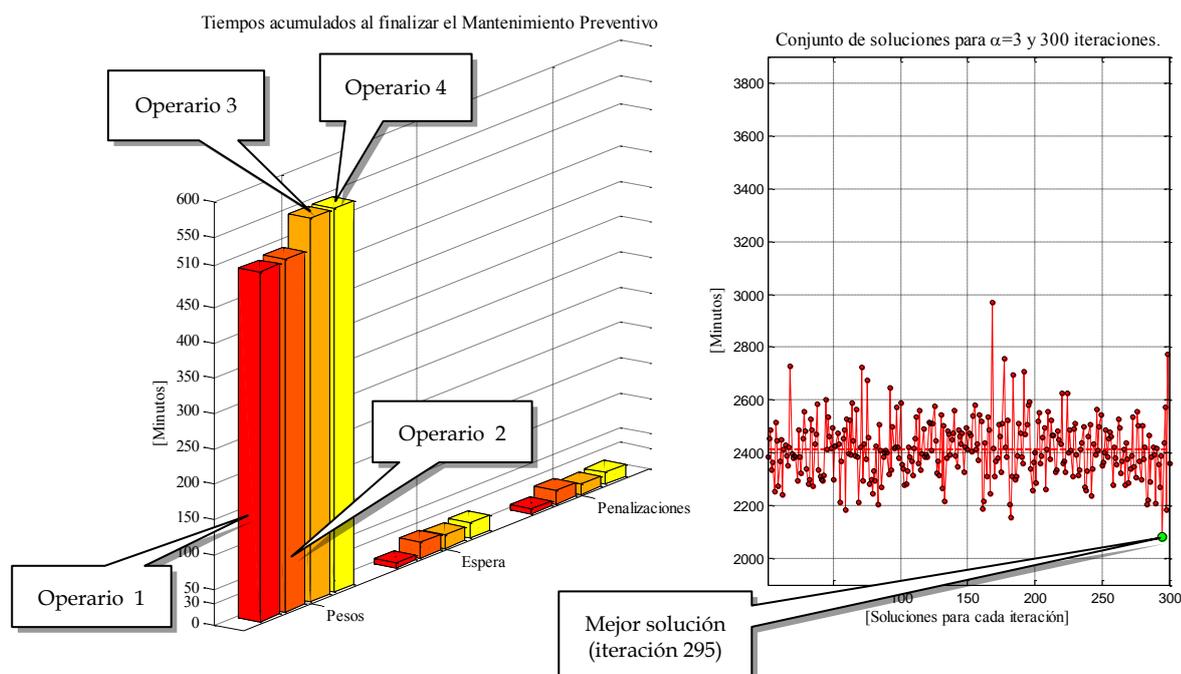


Figura 55 Salida del programa para 300 iteraciones y un parámetro de ponderación  $\alpha=3$ .

La mejor solución desarrollada se ha obtenido en la iteración 295 y el programa ha invertido en la ejecución de las 300 iteraciones un total de 89.13 segundos.

Pos J1	Pos J2
121	150

Mantenimiento Jornada 1 completado					
Operarios	Pesos	Conds	Zonas	Tesp	Penals
1	443	0	9	2	0
2	449	0	9	3	0
3	507	0	9	5	0
4	489	0	9	4	0

Mantenimiento Preventivo completado					
Operarios	Pesos	Conds	Zonas	Tesp	Penals
1	496	1	9	7	7
2	500	1	9	22	19
3	544	1	9	19	14
4	544	1	9	22	17

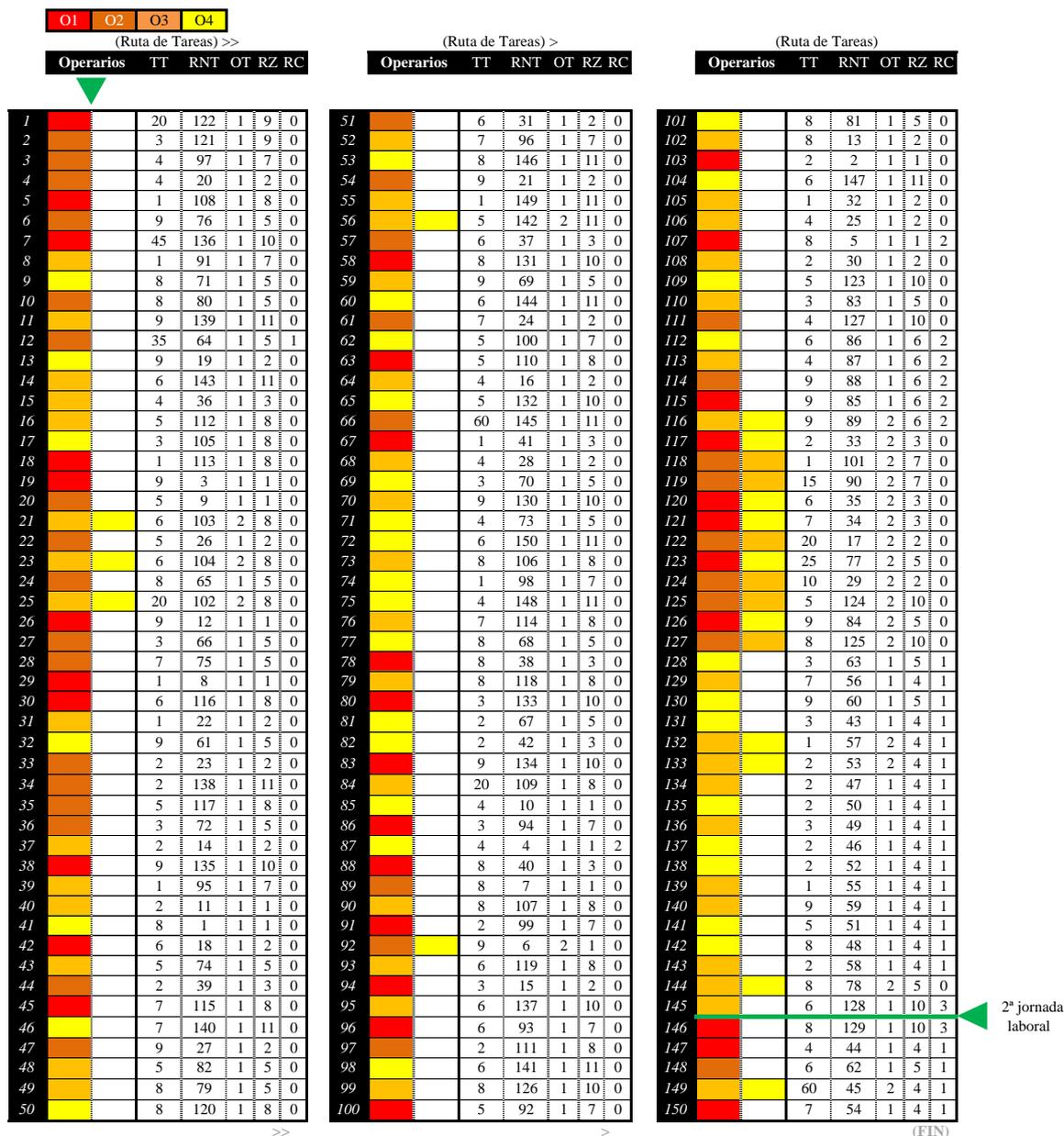


Figura 56 Datos de la solución. (TT: tiempo de ejecución de cada tarea; RNT: ruta por orden de tarea; OT: operarios requeridos para realizar la tarea; RZ: ruta por zonas; RC: ruta por condición de operación del aerogenerador; Pos J1: tareas completadas al finalizar la jornada 1; Pos J2: tareas completadas al finaliza la jornada 2).

### 3 Conclusiones

A la vista del programa desarrollado y las soluciones obtenidas se puede afirmar que sí hay una manera óptima para planificar las rutas de los operarios y realizar todo el mantenimiento preventivo en un aerogenerador, minimizando los tiempos improductivos y respetando las restricciones planteadas.

La principal dificultad para abordar la resolución del problema según una metodología, y una de las máximas de la Investigación Operativa, fue que la agregación de óptimos locales no tenía por qué generar un óptimo global (es decir, una solución de todo el problema en su conjunto). Sin embargo, el programa desarrollado con *Matlab* (que se basa en las conocidas técnicas de Monte Carlo) ha permitido la planificación del calendario de los cuatro operarios –la fuerza de trabajo considerada– cumpliendo el objetivo inicial: ejecutar de manera óptima todas las tareas de mantenimiento preventivo.

A lo largo de este proyecto los inconvenientes han salido a la luz con facilidad. El código del programa es mejorable sintácticamente y computacionalmente hablando. Quien se enfrenta al desarrollo de un programa en "código" con el objetivo de realizar cálculos que de otra manera no serían posibles se enfrenta, primero, al desconocimiento del software y, segundo, al lenguaje de programación.

Después del trabajo realizado hay una cuestión en el aire en la que se puede profundizar más y que desde el mismo momento en que se obtuvieron las primeras soluciones no se pudo analizar a fondo. Tiene que ver con la afinación y el hecho de que el programa se basa en las técnicas de Monte Carlo y con él, la aleatoriedad persistente entre una solución y otra. Sin embargo, al basarse en probabilidades y depender de números aleatorios que pueden ser menores o mayores, la idea de realizar más de una iteración ha permitido calcular muchísimas rutas. Esta es sin duda una razón que justifica la idoneidad del método seguido para buscar, no óptimos locales, sino uno óptimo global.

El objetivo de la afinación era determinar los dos parámetros fundamentales del programa: el *número de iteraciones* y el *peso o ponderación*. Los múltiples ensayos y el almacenamiento de soluciones varias no han determinado con exactitud un valor o

rango de valores de  $N_i$  y de  $a$  que permita afirmar que no existen soluciones óptimas mejores.

Como anécdota concluyente a este respecto se ejecutó el programa para un número de *100.000 iteraciones* y un peso  $a=6$ , obteniéndose en tal caso un tiempo total acumulado por los cuatro operarios de 1950 minutos con un coste computacional de 8841.93 segundos, razonablemente próximo al presentado como solución en el Capítulo 5.

¿Qué importancia tiene un proyecto como este? Estamos en un mundo competitivo donde cada vez más el paradigma de un desarrollo sano y seguro para las generaciones futuras no se entiende sin un aprovechamiento eficiente y responsable de los recursos energéticos y la tecnología aplicada para tal fin. La generación eólica ha cobrado para los países un interés estratégico, y en este contexto el mantenimiento de los aerogeneradores debe jugar un papel protagonista.

La mejora tecnológica está permitiendo unos precios cada vez más bajos y una mayor fiabilidad, por lo que es de esperar que aún sea más competitiva en las próximas décadas. Sin embargo, la industria eólica (y toda la industria en general) no podrá asentar dicho desarrollo sin el mantenimiento adecuado de sus sistemas, equipos o instalaciones.

En definitiva, la experiencia de este proyecto final de carrera, su estudio, análisis y desarrollo ha permitido estudiar un mundo apasionante, complejo y en continuo avance. Es más, ha puesto de manifiesto la capacidad que ofrece la Investigación Operativa como respuesta a este problema (y otros similares), demostrándose como una herramienta muy potente, sólida y flexible.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Carta González, J.A. Calero Pérez, R. Colmenar Santos, A. Castro Gil, M.A. *Centrales de energías renovables*. Ed. Pearson Educación, Madrid, (2009),
- [2] Talayero Navales, A. P. Telmo Martínez E. *Energía Eólica*. Colección de Textos Docentes, nº 140. Serie Energías Renovables, (2008).
- [3] Arqués Patón, José Luis. *Ingeniería y gestión del mantenimiento en el sector ferroviario*. Ed. Díaz de Santos, (2009).
- [4] Keith Mobley, R. *Maintenance Engineering Handbook*. McGraw-Hill, (2008).
- [5] Wireman, Terry. *Preventive Maintenance*. Ed. New York. Industrial Press, (2008).
- [6] Manzini, R. Regatier, A. Pham, H. Ferrar, E. *Maintenance for Industrial Systems*. Springer, (2010).
- [7] Creus Solé, Antonio. *Aerogeneradores*. 1 ed. Cano Pina. (2008)
- [8] González Fernández, F. J. *Teoría y Práctica del Mantenimiento Industrial Avanzado*. Ed. Fundación Confemetal, Madrid, (2005)
- [9] Crespo Márquez, Adolfo; Moreu de León, Pedro; Sánchez Herguedas, Antonio Jesús. *Ingeniería de mantenimiento: técnicas y métodos de aplicación a la fase operativa de los equipos*. Ediciones AENOR, Madrid, (2004).
- [10] García Garrido, Santiago. *Organización y gestión integral del mantenimiento*. Ed. Díaz de Santos, (2003).
- [11] Rodríguez Amenedo, J.L. Burgos Díaz, J.C. Arnalte Gómez, S. *Sistemas Eólicos de Producción de Energía Eólica*. Ed. Rueda, Madrid, (2003).
- [12] Rey Sacristán, Francisco. *Mantenimiento Total de la Producción (TPM). Proceso de Implantación y Desarrollo*. Ed. Fundación Confemetal, Madrid, (2001).
- [13] Boucly, Francis. *Gestión del mantenimiento*. AENOR, Madrid, (1999),
- [14] Gómez de Leon, Félix Cesáreo. *Tecnología del mantenimiento industrial*. Universidad de Murcia, (1998).
- [15] Knezevic, Jezdimir. *Mantenibilidad*. ISDEFE, Madrid (1996)
- [16] Knezevic, Jezdimir. *Mantenimiento*. ISDEFE, Madrid (1996)

- [17] Blanchard S., Benjamin. *Ingeniería Logística*. ISDEFE, Madrid, (1995).
- [18] Souris, Jean-Paul. *El mantenimiento, fuente de beneficios*. Ed. Díaz de Santos, (1992).
- [19] Monchy, F. *Teoría y Práctica del mantenimiento industrial*. Ed. Masson, Barcelona, (1990).
- [20] Takes, Frank. *Applying Monte Carlo Techniques to the Capacitated Vehicle Routing Problem*. Leiden University, Netherlands, (2010).
- [21] Fernández de Cordoba, P., García Raffi, L.M., Mayado, A., Sanchis, J.M. *A Real Delivery Problem dealt with Monte Carlo Techniques*. Sociedad de Estadística e Investigación operativa. TOP, Vol. 8, pp. 57-71, (2000).
- [22] Buxey, G.M. *The vehicle Scheduling Problem and Monte Carlo Simulation*. Journal of the Operational Research Society Vol.30, pp.563-573, (1997).
- [23] Clarke, G. and Wright, J.W. *Scheduling of vehicle from a central depot to a number of delivery points*. Operations Research, Vol. 12, pp.568-581, (1964).
- [24] *Implantación de un Sistema de Mantenimiento Preventivo*. Barcelona, 18 y 19 de febrero de 2009. Seminario AEM – Aula de formación.
- [25] Cortés Izquierdo, A. Mateo Sanz, A. *Mantenimiento de un parque eólico*. Ingeniería y gestión del mantenimiento, (2007).
- [26] Cortés Izquierdo, A. *El mantenimiento en las instalaciones energéticas*. Revista Energía, Madrid, (2003).

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Tipos de Mantenimiento según la norma AFNOR NFX 60-010. ....	22
Figura 2 Tipos de Mantenimiento según la norma EN-13460. ....	22
Figura 3 Curva de la bañera. ....	24
Figura 4 Evolución del fallo. ....	30
Figura 5 Estrategias de Mantenimiento. ....	34
Figura 6 Curva de costes de mantenimiento. ....	37
Figura 7 Evolución de los planes legislativos y normativos de las Energías Renovables. ....	43
Figura 8 Incremento anual de la Potencia eólica instalada en España. ....	44
Figura 9 Potencia instalada por fabricantes a finales de 2013. ....	47
Figura 10 Potencia acumulada por fabricantes a finales de 2013. ....	47
Figura 10 Evolución anual de la potencia media del aerogenerador 1997-2013. ....	52
Figura 11 Evolución del tamaño constructivo de los aerogeneradores. ....	52
Figura 12 Principales sistemas y componentes de un aerogenerador. ....	58
Figura 13 Organización del negocio eólico. ....	68
Figura 14 Distribución de los costes de los componentes. ....	69
Figura 15 Distribución de los costes de inversión. ....	69
Figura 16 Distribución de los costes de explotación. ....	70
Figura 17 Distribución de los costes de instalación y explotación de un parque eólico. ....	70
Figura 18 Ciclo de vida de un parque eólico. ....	73
Figura 19 Costes en el ciclo de vida de un parque eólico. ....	73
Figura 20 Características del mantenimiento de parques eólicos. ....	76
Figura 21 Tiempos asociados a la cronología de una avería. ....	79
Figura 22 Evolución de las averías en un aerogenerador. ....	81
Figura 23 Tipología de averías en aerogeneradores. ....	83
Figura 24 Distribución y porcentaje de fallos en un aerogenerador. ....	84
Figura 25 Frecuencia y tiempo de paradas por fallo en un aerogenerador. ....	84
Figura 26 Gestión de la información durante el proceso de mantenimiento de un parque eólico. ....	86
Figura 27 Operación del mantenimiento de un parque eólico. ....	88
Figura 28 Tipos de mantenimiento en un parque eólico. ....	89
Figura 29 Aplicación de los tipos de mantenimiento en un parque eólico. ....	90
Figura 30 Esquema del mantenimiento preventivo en un aerogenerador. ....	93

Figura 31 Plan de mantenimiento preventivo basado en RCM. ....	93
Figura 32 Esquema del mantenimiento predictivo en un aerogenerador. ....	99
Figura 33 Ubicación de los acelerómetros en un aerogenerador. ....	100
Figura 34 Ejemplos de mantenimiento correctivo en un aerogenerador. ....	104
Figura 35 Ejemplo de gran correctivo: sustitución del generador. ....	105
Figura 36 Modos de funcionamiento de un aerogenerador. ....	114
Figura 37 Estados de operación de un aerogenerador. ....	115
Figura 38 Tiempo de cambio entre las condiciones de operación del aerogenerador. ....	115
Figura 39 Matriz de desplazamientos entre las 11 zonas del aerogenerador. ....	117
Figura 40 Jornada laboral de los 4 operarios. ....	118
Figura 41 Objetivo del PFC. ....	121
Figura 42 Ejemplo. ....	125
Figura 43 Pseudocódigo: descripción de algoritmos en un lenguaje humano simplificado. ....	130
Figura 44 Esquema del bucle inicial de programa. ....	131
Figura 45 Pasos iniciales del bucle principal del programa. ....	132
Figura 46 Código Matlab: determinación del vector $1/s$ . ....	133
Figura 47 Código Matlab: determinación del vector $1/S$ . ....	133
Figura 48 Código Matlab: respeto de las condiciones de operación del aerogenerador. ....	134
Figura 49 Esquema del análisis de la sincronización. ....	135
Figura 50 Salida del programa para 500 iteraciones y parámetro de ponderación 3. ....	142
Figura 51 Proceso de afinación. ....	144
Figura 52 Comportamiento del parámetro de ponderación. ....	144
Figura 53 Ventana de comandos en Matlab donde se introducen los parámetros del programa. ....	149
Figura 54 Salida del programa para 300 iteraciones y un parámetro de ponderación $\alpha=3$ . ....	150
Figura 55 Datos de la solución. (TT: tiempo de ejecución de cada tarea; RNT: ruta por orden de tarea; OT: operarios requeridos para realizar la tarea; RZ: ruta por zonas; RC: ruta por condición de operación del aerogenerador; PosJ1: tareas completadas al finalizar la jornada 1; Pos J2: tareas completadas al finaliza la jornada 2). ....	151

## Parte III

## Código fuente del programa

```

clear,clc

ni=input ('¿Cuántas iteraciones vas a hacer? ');
alfa=input ('¿Cuanto vale el parámetro "alfa"?');

tic

SUMPES=3200;

for Z=1:ni

    tt=[8 2 9 4 8 9 8 1 5 4 2 9 8 2 3 4 20 6 9 4 9 1
2 7 4 5 9 4 10 2 6 1 2 7 6 4 6 8 2 8 1 2 3 4 60 2
2 8 3 2 5 2 2 7 1 7 1 2 9 9 9 6 3 35 8 3 2 8 9 3
8 3 4 5 7 9 25 8 8 8 8 5 3 9 9 6 4 9 9 15 1 5 6 3
1 7 4 1 2 5 1 20 6 6 3 8 8 1 20 5 2 5 1 7 7 6 5 8
6 8 3 20 5 5 8 8 4 6 8 9 8 5 3 9 9 45 6 2 9 7 6 5
6 6 60 8 6 4 1 6];
    ct=[0 0 0 0 2 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 2 2 2 2 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 3 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
    ot=[1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1
1 1 1 1 1 2 1 1 1 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 1
1 1 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 2 2 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 2 1 1 1 1
1 1 1 1 1 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1];
    td=[0 1 1 1 10 2 8 30 15 1 2; 1 0 3 5 4 3 2 30 14 2 2; 1 3 0 2 7 3 6 30 13 1 2; 1 5 2 0 1
2 4 30 10 1 1; 10 4 7 1 0 1 2 30 10 1 2; 2 3 3 2 1 0 1 30 8 1 2; 8 2 6 4 2 1 0 30 7 1 2; 30
30 30 30 30 30 0 5 2 1; 15 14 13 10 10 8 7 5 0 1 1; 1 2 1 1 1 1 1 2 1 0 1; 2 2 2 1 2 2 2 1
1 1 0];
    zt=[1:150];

    z=[1:11];

    for i=1:12
        zt1(i)=z(1);
        nt1(i)=i;
        tt1(i)=tt(i);
        ct1(i)=ct(i);
        ot1(i)=ot(i);
        if ct(i)==0
            cc1(i)=0;
        end
        if ct(i)==1
            cc1(i)=10;
        end
        if ct(i)==2
            cc1(i)=15;
        end
        if ct(i)==3
            cc1(i)=5;
        end
    end

    for i=13:32
        j=i-12;
        zt2(j)=z(2);
        nt2(j)=i;
        tt2(j)=tt(i);
        ct2(j)=ct(i);
        ot2(j)=ot(i);
        if ct(i)==0
            cc2(j)=0;
        end
        if ct(i)==1
            cc2(j)=10;
        end
    end

```

```

    if ct(i)==2
        cc2(j)=15;
    end
    if ct(i)==3
        cc2(j)=5;
    end
end

for i=33:42
    j=i-32;
    zt3(j)=z(3);
    nt3(j)=i;
    tt3(j)=tt(i);
    ct3(j)=ct(i);
    ot3(j)=ot(i);
    if ct(i)==0
        cc3(j)=0;
    end
    if ct(i)==1
        cc3(j)=10;
    end
    if ct(i)==2
        cc3(j)=15;
    end
    if ct(i)==3
        cc3(j)=5;
    end
end

for i=43:59
    j=i-42;
    zt4(j)=z(4);
    nt4(j)=i;
    tt4(j)=tt(i);
    ct4(j)=ct(i);
    ot4(j)=ot(i);
    if ct(i)==0
        cc4(j)=0;
    end
    if ct(i)==1
        cc4(j)=10;
    end
    if ct(i)==2
        cc4(j)=15;
    end
    if ct(i)==3
        cc4(j)=5;
    end
end

for i=60:84
    j=i-59;
    zt5(j)=z(5);
    nt5(j)=i;
    tt5(j)=tt(i);
    ct5(j)=ct(i);
    ot5(j)=ot(i);
    if ct(i)==0
        cc5(j)=0;
    end
    if ct(i)==1
        cc5(j)=10;
    end
    if ct(i)==2
        cc5(j)=15;
    end
    if ct(i)==3
        cc5(j)=5;
    end
end

for i=85:89
    j=i-84;
    zt6(j)=z(6);
    nt6(j)=i;
    tt6(j)=tt(i);
    ct6(j)=ct(i);

```

```

ot6(j)=ot(i);
if ct(i)==0
    cc6(j)=0;
end
if ct(i)==1
    cc6(j)=10;
end
if ct(i)==2
    cc6(j)=15;
end
if ct(i)==3
    cc6(j)=5;
end
end

for i=90:101
    j=i-89;
    zt7(j)=z(7);
    nt7(j)=i;
    tt7(j)=tt(i);
    ct7(j)=ct(i);
    ot7(j)=ot(i);
    if ct(i)==0
        cc7(j)=0;
    end
    if ct(i)==1
        cc7(j)=10;
    end
    if ct(i)==2
        cc7(j)=15;
    end
    if ct(i)==3
        cc7(j)=5;
    end
end

for i=102:120
    j=i-101;
    zt8(j)=z(8);
    nt8(j)=i;
    tt8(j)=tt(i);
    ct8(j)=ct(i);
    ot8(j)=ot(i);
    if ct(i)==0
        cc8(j)=0;
    end
    if ct(i)==1
        cc8(j)=10;
    end
    if ct(i)==2
        cc8(j)=15;
    end
    if ct(i)==3
        cc8(j)=5;
    end
end

for i=121:122
    j=i-120;
    zt9(j)=z(9);
    nt9(j)=i;
    tt9(j)=tt(i);
    ct9(j)=ct(i);
    ot9(j)=ot(i);
    if ct(i)==0
        cc9(j)=0;
    end
    if ct(i)==1
        cc9(j)=10;
    end
    if ct(i)==2
        cc9(j)=15;
    end
    if ct(i)==3
        cc9(j)=5;
    end
end
end

```

```

for i=123:137
    j=i-122;
    zt10(j)=z(10);
    nt10(j)=i;
    tt10(j)=tt(i);
    ct10(j)=ct(i);
    ot10(j)=ot(i);
    if ct(i)==0
        cc10(j)=0;
    end
    if ct(i)==1
        cc10(j)=10;
    end
    if ct(i)==2
        cc10(j)=15;
    end
    if ct(i)==3
        cc10(j)=5;
    end
end

for i=138:150
    j=i-137;
    zt11(j)=z(11);
    nt11(j)=i;
    tt11(j)=tt(i);
    ct11(j)=ct(i);
    ot11(j)=ot(i);
    if ct(i)==0
        cc11(j)=0;
    end
    if ct(i)==1
        cc11(j)=10;
    end
    if ct(i)==2
        cc11(j)=15;
    end
    if ct(i)==3
        cc11(j)=5;
    end
end

zt=[zt1 zt2 zt3 zt4 zt5 zt6 zt7 zt8 zt9 zt10 zt11];
nt=[nt1 nt2 nt3 nt4 nt5 nt6 nt7 nt8 nt9 nt10 nt11];
tt=[tt1 tt2 tt3 tt4 tt5 tt6 tt7 tt8 tt9 tt10 tt11];
ct=[ct1 ct2 ct3 ct4 ct5 ct6 ct7 ct8 ct9 ct10 ct11];
ot=[ot1 ot2 ot3 ot4 ot5 ot6 ot7 ot8 ot9 ot10 ot11];
cc=[cc1 cc2 cc3 cc4 cc5 cc6 cc7 cc8 cc9 cc10 cc11];

tarea1=0;
tarea2=0;
tarea3=0;
tarea4=0;
tareas=[tarea1 tarea2 tarea3 tarea4];

numtarea1=0;
numtarea2=0;
numtarea3=0;
numtarea4=0;
numtareas=[numtarea1 numtarea2 numtarea3 numtarea4];

cond1=0;
cond2=0;
cond3=0;
cond4=0;
conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

zona1=0;
zona2=0;
zona3=0;
zona4=0;
zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

peso1=0;
peso2=0;
peso3=0;
peso4=0;

```

```

pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

tesp1=0;
tesp2=0;
tesp3=0;
tesp4=0;
tesp=[tesp1 tesp2 tesp3 tesp4];

penal1=0;
penal2=0;
penal3=0;
penal4=0;
penals=[penal1 penal2 penal3 penal4];

pos1=0;
pos2=0;
pos3=0;
pos4=0;
poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

jornada1=0;
tmax1=450;
tmax2=450;
tmax3=510;
tmax4=510;
tmax=[tmax1 tmax2 tmax3 tmax4];

zfinal=9;
zc=12;
operarios=[1 2 3 4];

n=length(ct9);

for i=1:(n-1)
    r(i)=(ct9(i+1)-ct9(i));
end

suma=sum(abs(r));

if suma==0
    cond=min(ct9);
end

i=0;
for j=1:150
    if (ct(j)==cond) | (ct(j)==0);
        i=i+1;
        nct(i)=ct(j);
        ntt(i)=tt(j);
        not(i)=ot(j);
        nzt(i)=zt(j);
    end
end

o1=zeros(1,150);
o2=zeros(1,150);
o3=zeros(1,150);
o4=zeros(1,150);
op1=zeros(1,150);
op2=zeros(1,150);
op3=zeros(1,150);
op4=zeros(1,150);

rt=zeros(1,150);
rz=zeros(1,150);

for i=1:150
    rc(i)=33;
end

conttt=1:150;
contz=zt;

A=zeros(1,11);

n=length(nzt);
s=zeros(1,n);

```

```

pos=1;

pos1=1;
pos2=1;
pos3=1;
pos4=1;

zonai=9;
zona=zonai;

t2=zeros(1,length(ot9));

for i=1:length(ot9)
    if ot9(i)==2
        t2(i)=i;
    end
end

while sum(t2)~=0

    for i=1:length(t2)
        if t2(i)~=0
            tarea(i)=tt9(i);
        end
    end

    h=max(tarea);

    for i=1:length(tarea)
        if tarea(i)==h
            h=i;
            t2(h)=0;
        end
    end

    tarea1=tt9(h);
    tarea2=tt9(h);

    if tarea1==tarea2
        tarea=tarea1;
    end

    rt(pos1)=tarea;
    rz(pos1)=zona;
    rc(pos1)=ct9(h);
    ro(pos1)=nt9(h);

    o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
    o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;

    peso1=sum(o1);
    peso2=sum(o2);

    contt(nt9(h))=0;
    contz(nt9(h))=0;

    pos1=pos1+1;
    pos2=pos2+1;
    poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

    pos=pos1;

    pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];
    tareas=[tarea1 tarea2 tarea3 tarea4];

end

while (sum(contt(nt9))~=0)

    h=fix(rand*length(tt9))+1;

    while contt(nt9(h))==0
        h=fix(rand*length(tt9))+1;
    end

    tarea=tt9(h);

```

```

numtarea=nt9(h);

if (sum(o1)<sum(o2)) | (sum(o1)==sum(o2))

    tareal=tarea;
    numtarea1=numtarea;

    rt(pos)=tareal;
    rz(pos)=zona;
    rc(pos)=ct(numtarea);
    ro(pos)=numtarea;

    zonal=zt(numtarea);
    cond1=ct(numtarea);

    o1(pos1)=tareal;
    op1(pos1)=pos;

    peso1=sum(o1);

    contt(nt9(h))=0;
    contz(nt9(h))=0;

    pos1=pos1+1;
    pos=pos+1;
    poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

    pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];
    tareas=[tareal tarea2 tarea3 tarea4];
    numtareas=[numtarea1 numtarea2 numtarea3 numtarea4];
    zonas=[zonal zona2 zona3 zona4];
    conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

else
    tarea2=tarea;
    numtarea2=numtarea;

    rt(pos)=tarea2;
    rz(pos)=zona;
    rc(pos)=ct(numtarea);
    ro(pos)=numtarea;

    zona2=zt(numtarea);
    cond2=ct(numtarea);

    o2(pos2)=tarea2;
    op2(pos2)=pos;

    peso2=sum(o2);

    contt(nt9(h))=0;
    contz(nt9(h))=0;

    pos2=pos2+1;
    pos=pos+1;
    poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

    pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];
    tareas=[tareal tarea2 tarea3 tarea4];
    numtareas=[numtarea1 numtarea2 numtarea3 numtarea4];
    zonas=[zonal zona2 zona3 zona4];
    conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];
end
end
%
% ZONA INICIAL TERMINADA
%
while sum(operarios)~=0

    % Puerta de analisis de ERROR:
    for i=1:length(pesos)
        if (zonas(i)~=9) & (zonas(i)~=0)
            if (pesos(i)+td(zonas(i),zfinal)>tmax(i)) | (pesos(i)>tmax(i))
                STOPlinea498PESOS_no_validos
            end
        end
    end
end
end

```

```

% Las siguientes variables no servirán como rescate en caso de error:
PESOS500=pesos;
CONDS500=conds;
ZONAS500=zonas;
POSS500=pos;
TESP500=tesp;
PENALS500=penals;
OPERARIOS500=operarios;
POS500=pos;
NUMTAREA500=numtarea;
NUMTAREAS500=numtareas;

% Calculo si los operarios 3 y 4 han entrado a trabajar:
if (peso3==0) & (peso4==0)
    operarios(3)=0;
    operarios(4)=0;
    if (peso1>=30) | (peso2>=30)
        peso3=peso3+30;
        peso4=peso4+30;
        pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];
        zona3=zona1;
        zona4=zona1;
        zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];
        operarios=[1 2 3 4];
    end
end

% CONTROL INICIAL POR SI HAY UN OPERARIO EN "CASA", PARA NO SELECCIONARLO:
clear pes; clear wz; clear wc; clear w;
if length(find(operarios))<4
    w=find(operarios);

    for i=1:length(w)
        pes(i)=pesos(w(i));
    end

    [t,n]=min(pes);
    o=w(n);

    for i=1:length(pes)
        wc(i)=conds(w(i));
        wz(i)=zonas(w(i));
    end

else
    % Calculo el operario que menos tiempo lleva acumulado:
    for i=1:length(find(pesos))
        %disp('vector PES obtenido en la línea 547')
        pes(i)=pesos(i);
        wc(i)=conds(i);
        wz(i)=zonas(i);
        w=find(operarios);
    end

    [t,o]=min(pes);
end

% Calculo el vector 's' con los tiempos que incurrirá al visitar una zona u otra:
s=zeros(1,length(tt));

for c=1:length(tt) % Aquellas zonas cuyo 'td' valga cero lo cambio por 0.1 para que
luego evite la probabilidad "Inf"
    if td(zonas(o),zt(c))==0
        s(c)=0.1;
    else
        s(c)=td(zonas(o),zt(c));
    end
end

for c=1:length(tt)
    s(c)=s(c)^(-alfa);
end

for c=1:length(tt)
    if contt(c)==0
        s(c)=0;
    end
end

```

```

end
end

% Calculo el vector 'S' con los tiempos que incurrirá al cambiar de condición de
operación:
S=zeros(1,length(tt));

ccm=cc;

% Aquellas tareas que no requieran cambio de condición o cuya condición sea libre los
cambio por 0.1 para evitar "Inf"
for c=1:length(tt)
    if (ct(c)==conds(o)) | (ct(c)==0)
        ccm(c)=0.1;
    end
end

for c=1:length(tt)
    S(c)=(ccm(c))^-alfa;
end

ccm=cc;

for c=1:length(tt)
    if contt(c)==0
        S(c)=0;
    end
end

if length(find(operarios))<4
    if wc(n)~=0 % Tengo en cuenta que se RESPETEN las 'CONDICIONES DE OPERACIÓN' del
aerogenerador:
        s(ct~=0 & ct~=wc(n))=0;
        S(ct~=0 & ct~=wc(n))=0;
    else
        %disp('Utilizamos el vector PES en la linea 607')
        for i=1:length(pes)
            if i~=n
                if wc(i)~=0
                    s(ct~=0 & ct~=wc(i))=0;
                    S(ct~=0 & ct~=wc(i))=0;
                end
            end
        end
    end
else
    if conds(o)~=0 % Tengo en cuenta que se RESPETEN las 'CONDICIONES DE OPERACIÓN'
del aerogenerador:
        s(ct~=0 & ct~=conds(o))=0;
        S(ct~=0 & ct~=conds(o))=0;
    else
        for i=1:length(pesos)
            if i~=o
                if conds(i)~=0
                    s(ct~=0 & ct~=conds(i))=0;
                    S(ct~=0 & ct~=conds(i))=0;
                end
            end
        end
    end
end

P=s+S;

% En adelante, si 'P=0' en la Ln696 la situación indica que "NO SE CUMPLE LA
RESTRICCIÓN DE CONDICIÓN DE OPERACIÓN"
% SOLUCIÓN: Tendremos que "ESPERAR AL CAMBIO DE CONDICIÓN" de los 4 operarios:
PENALIZACIÓN

clear teop

% Calculamos la matriz de sincronización:
if length(find(operarios))<4
    %disp('Utilizamos el vector PES en la linea 644')
    for i=1:length(pes)
        %disp('Utilizamos el vector PES en la linea 646')
    end
end

```

```

        for j=1:length(pes)
            teop(i,j)=abs(pes(i)-pes(j));
        end
    end
else
    for i=1:length(pesos)
        for j=1:length(pesos)
            teop(i,j)=abs(pesos(i)-pesos(j));
        end
    end
    % Si los operarios 3 y 4 no han entrado, les ponemos un valor alto de "tiempo
entre operarios"
    for i=1:length(pesos)
        for j=1:length(pesos)
            if i~=j
                if (pesos(i)==0) | (pesos(j)==0)
                    teop(i,j)=100;
                end
            end
        end
    end
end
end
osinc=0;

% Comprobamos si hay "SINCRONIZACIÓN EN TIEMPO Y ZONA" entre el operario 'o' y otro:
if length(find(operarios))<4
    for i=1:length(w)
        if w(i)~=o
            if ((teop(n,i)<=3) & (teop(n,i)>=0)) & (zonas(o)==zonas(w(i)))
                teop(n,i);
                n;
                osinc=w(i);
            end
        end
    end
else
    for i=1:length(pesos)
        if i~=o
            if ((teop(o,i)<=3) & (teop(o,i)>=0)) & (zonas(o)==zonas(i))
                teop(o,i);
                o;
                osinc=i;
            end
        end
    end
end

if (o~=0) & (osinc~=0) % Si EXISTE SINCRONIZACIÓN EN TIEMPO Y ZONA entramos en este
bucle (fin en Ln 2727).....|
    % El valor de "teop(o,i)" será un "tiempo de espera" que habrá que considerar

    for c=1:length(ot) % Nos quedamos sólo con las "tareas de 2 operarios" de la
zona del operario 'o'
        % Como hay SINCRONIZACIÓN REAL el operario 'osinc' estará en la misma zona
que 'o'
        if (ot(c)~=2) | (zt(c)~=zonas(o))
            s(c)=0;
            S(c)=0;
        end
    end
    P=s+S;
    P677=P;

    if sum(P)==0 % Si P=0, NO HAY TAREAS de 2 operarios en la zona del operario
'o'
        % Calculo de nuevo 's' y 'S':

        s=zeros(1,length(tt)); % Calculo el vector 's' con los tiempos que incurrirá
al visitar una zona u otra:

        for c=1:length(tt) % Aquellas zonas cuyo 'td' valga cero lo cambio por
0.1 para que evite la probabilidad "Inf"
            if td(zonas(o),zt(c))==0
                s(c)=0.1;
            else
                s(c)=td(zonas(o),zt(c));
            end
        end
    end
end

```

```

    end
end

for c=1:length(tt)
    s(c)=s(c)^(-alfa);
end

for c=1:length(tt)
    if contt(c)==0
        s(c)=0;
    end
end

S=zeros(1,length(tt)); % Calculo el vector 'S' con los tiempos que incurrirá
al "cambiar de condición" de operación:

ccm=CC;

% Aquellas tareas que no requieran cambio de condición o cuya condición sea
libre los cambio por 0.1 para evitar "Inf"
for c=1:length(tt)
    if (ct(c)==conds(o)) | (ct(c)==0)
        ccm(c)=0.1;
    end
end

for c=1:length(tt)
    S(c)=(ccm(c)) ^ (-alfa);
end

ccm=CC;

for c=1:length(tt)
    if contt(c)==0
        S(c)=0;
    end
end

if length(find(operarios))<4
    if wc(n)~=0 % Tengo en cuenta que se RESPETEN las 'CONDICIONES DE
OPERACIÓN' del aerogenerador:
        s(ct~=0 & ct~=wc(n))=0;
        S(ct~=0 & ct~=wc(n))=0;
    else
        %disp('Utilizamos el vector PES en la linea 760')
        for i=1:length(pes)
            if i~=n
                if wc(i)~=0
                    s(ct~=0 & ct~=wc(i))=0;
                    S(ct~=0 & ct~=wc(i))=0;
                end
            end
        end
    end
else
    if conds(o)~=0 % Tengo en cuenta que se RESPETEN las 'CONDICIONES DE
OPERACIÓN' del aerogenerador:
        s(ct~=0 & ct~=conds(o))=0;
        S(ct~=0 & ct~=conds(o))=0;
    else
        for i=1:length(pesos)
            if i~=o
                if conds(i)~=0
                    s(ct~=0 & ct~=conds(i))=0;
                    S(ct~=0 & ct~=conds(i))=0;
                end
            end
        end
    end
end

P=s+S; % Recalculamos el vector de probabilidad P
P756=P; % Nos valdremos de esta variable en el CONTROL FINAL correspondiente.

suma=sum(P);

if suma~=0

```

```

        P=P*(1/suma);
    end

    suma=0;

    % Transformamos P en un vector de probabilidad acumulada
    for tarea=1:length(tt)
        suma=suma+P(tarea);
        P(tarea)=suma;
    end

    P1=0; % Lo prefijamos a '0' porque luego podremos utilizarlo como vector y
    como puerta de salida/entrada.

    % BUCLE DE PENALIZACIÓN CUANDO ESTAMOS EN SINCRONIZACIÓN:

    if sum(P)==0 % Habrá PENALIZACIÓN porque se incumplen las RESTRICCIONES DE
    CONDICIÓN DE OPERACIÓN.
        % "PENALIZAMOS" sobre "TIEMPOS DE ESPERA" para que los operarios estén
    "SINCRONIZADOS EN TIEMPO"
        % Una vez "SINCRONIZADOS EN TIEMPO" podrán cambiar de "CONDICIÓN DE
    OPERACIÓN"

        % Calculamos el peso máximo 'pmax' para penalizar:
        % ATENCIÓN: ES POSIBLE QUE HAYA QUE MEJORAR LA
        % ASIGNACION DE pmax, SOBRE TODO CUANDO tenemos 'o' y
        % 'osinc' y algun operario no asigando está bajo
        % condición 0 y su peso es el maximo.
        if length(find(operarios))<4
            %disp('Utilizamos el vector PES para obtener el máximo en la linea
    812')

            pmax=max(pes);
        else
            pmax=max(pesos);
        end

        % Calculamos cómo afecta la penalizacion a cada operario:
        if length(find(operarios))<4
            for i=1:length(w)
                if pesos(w(i))+(pmax-
    pesos(w(i))+td(zonas(w(i)),zfinal))>tmax(w(i))
                    % Mandamos al operario 'i' a casa:
                    pesos(w(i))=pesos(w(i))+td(zonas(w(i)),zfinal);
                    zonas(w(i))=zfinal;
                    % Situamos la condición del operario 'o' como 'libre'
                    conds(w(i))=0;
                    % En la posición actual del operario colocamos un '0' como
    señal de que ha finalizado.

                    if w(i)==1
                        o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
                        pos1=pos1+1;
                    end
                    if w(i)==2
                        o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
                        pos2=pos2+1;
                    end
                    if w(i)==3
                        o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
                        pos3=pos3+1;
                    end
                    if w(i)==4
                        o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
                        pos4=pos4+1;
                    end
                    % El operario 'i' ha terminado y ya está en la zona 9.
                    zonas(w(i))=zfinal;

                    pos=pos;

                    poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

                    % Situamos en '0' el operario que está en casa.
                    operarios(w(i))=0;
                else
                    penals(w(i))=penals(w(i))+(pmax-pesos(w(i)));
                    pesos(w(i))=pmax;
                end
            end
        end
    end

```

```

end
else
for i=1:length(pesos)
if pesos(i)+(pmax-pesos(i)+td(zonas(i),zfinal))>tmax(i)
% Mandamos al operario 'i' a casa:
pesos(i)=pesos(i)+td(zonas(i),zfinal);
zonas(i)=zfinal;
% Situamos la condición del operario 'o' como 'libre'
conds(i)=0;
% En la posición actual del operario colocamos un '0' como
señal de que ha finalizado.
if i==1
o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
pos1=pos1+1;
end
if i==2
o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
pos2=pos2+1;
end
if i==3
o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
pos3=pos3+1;
end
if i==4
o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
pos4=pos4+1;
end
% El operario 'i' ha terminado y ya está en la zona 9.
zonas(i)=zfinal;

pos=pos;

poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

% Situamos en '0' el operario que está en casa.
operarios(w(i))=0;
else
penals(i)=penals(i)+(pmax-pesos(i));
pesos(i)=pmax;
end
end
end

% La "penalización" la incluimos como "tiempo de espera":
tesp1=tesp(1)+penals(1);
tesp2=tesp(2)+penals(2);
tesp3=tesp(3)+penals(3);
tesp4=tesp(4)+penals(4);
tesp=[tesp1 tesp2 tesp3 tesp4];

% Penalizamos a los 4 operarios:
penal1=penals(1);
penal2=penals(2);
penal3=penals(3);
penal4=penals(4);
penals=[penal1 penal2 penal3 penal4];

peso1=pesos(1);
peso2=pesos(2);
peso3=pesos(3);
peso4=pesos(4);
pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

%
% if operarios(o)==0
% disp('Hemos mandado al operario "o", que estaba sincronizado con
"osinc" a CASA,')
% disp('después de haberlos penalizado, es decir, haberlos hecho
esperar para poder')
% disp(' ')
% disp('Presione INTRO para continuar: ')
% OPERARIOS500
% operarios
% o
% osinc
% pmax
% PESOS500
% pesos

```

```

ZONAS500
zonas
CONDS500
conds
tesp
penals
pause
end
% ¡¡¡HE MANDADO 'O' u 'OSINC' A CASA!!! ¿¿¿CÓMO SIGO??? ¿¿¿EMPIEZO DE
NUEVO???
% Como ya no habra sincro salimos del bucle y recomenzaremos:
if (operarios(o)~=0)&(operarios(osinc)~=0)
% Calculamos de nuevo las probabilidades 's' y 'S':
s=zeros(1,length(tt));
for c=1:length(tt)
if td(zonas(o),zt(c))==0
s(c)=0.1;
else
s(c)=td(zonas(o),zt(c));
end
end
for c=1:length(tt)
s(c)=s(c)^(-alfa);
end
for c=1:length(tt)
if contt(c)==0
s(c)=0;
end
end
S=zeros(1,length(tt));
ccm=cc;
for c=1:length(tt)
if (ct(c)==conds(o))|(ct(c)==0)
ccm(c)=0.1;
end
end
for c=1:length(tt)
S(c)=(ccm(c))^(alfa);
end
ccm=cc;
for c=1:length(tt)
if contt(c)==0
S(c)=0;
end
end
sincronización.
% Como ya estaban sincronizados NO calculamos la matriz de
P1=s+S;
P=P1; % Lo utilizaremos como puerta de entrada:
% CONTROL FINALIZACIÓN cuando HAY SINCRONIZACIÓN y cuando ha habido
PENALIZACIÓN.
% 1º) Creamos un vector que guarde, con su respectivo número, todas
las tareas susceptibles de ejecutarse:
for i=1:length(P)
if P(i)~=0
nF(i)=i;
else
nF(i)=0;
end
end
% 2º.a) Control "o" para discriminar las tareas que 'o' no pueda
hacer:
if pesos(o)<=pesos(osinc)
for i=1:length(P)

```

```

        if nF(i)~=0
            if
td(zonas(o),zt(i))+cc(i)+td(zt(i),zfinal)+tt(i)+(pesos(osinc)-pesos(o))>=(tmax(o)-pesos(o))
                nFo(i)=0;
            else
                nFo(i)=nF(i);
            end
        else
            nFo(i)=0;
        end
    end
    % 2°.b) Control "osinc" para discriminar las tareas que 'osinc' no
pueda hacer:
    for i=1:length(P)
        if nF(i)~=0
            if
td(zonas(osinc),zt(i))+cc(i)+td(zt(i),zfinal)+tt(i)>=(tmax(osinc)-pesos(osinc))
                nFosinc(i)=0;
            else
                nFosinc(i)=nF(i);
            end
        else
            nFosinc(i)=0;
        end
    end
end

% 3°) Comparamos 'o' y 'osinc' para discriminar tareas que no puedan
hacer de manera conjunta:
for i=1:length(P)
    if nF(i)~=0
        if nFo(i)~=0
            if nFo(i)==nFosinc(i)
                nF(i)=i;
            else
                nF(i)=0;
            end
        else
            nF(i)=0;
        end
    else
        nF(i)=0;
    end
end

% 4°) Reconstruimos el vector de probabilidad P:
for i=1:length(P)
    if nF(i)==0
        P(i)=0;
    end
end
P928=P;

% 5°) Si 'P=0' ambos o alguno de los dos operarios deben volver a
CASA:
if sum(P)==0
    if (sum(nFo)~=0) & (sum(nFosinc)==0)
        % El operario 'osinc' regresa a CASA.
        pesos(osinc)=pesos(osinc)+td(zonas(osinc),zfinal);
        peso1=pesos(1);
        peso2=pesos(2);
        peso3=pesos(3);
        peso4=pesos(4);
        pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

        % Situamos la condición del operario 'o' como 'libre'
        conds(osinc)=0;
        cond1=conds(1);
        cond2=conds(2);
        cond3=conds(3);
        cond4=conds(4);
        conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

        % En la posición actual del operario colocamos un '0' como
señal de que ha finalizado.
        if osinc==1

```

```

        o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
        pos1=pos1+1;
    end
    if osinc==2
        o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
        pos2=pos2+1;
    end
    if osinc==3
        o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
        pos3=pos3+1;
    end
    if osinc==4
        o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
        pos4=pos4+1;
    end

    % EL operario 'o' ha terminado y ya está en la zona 9.
    zonas(osinc)=zfinal;
    zonal=zonas(1);
    zona2=zonas(2);
    zona3=zonas(3);
    zona4=zonas(4);
    zonas=[zonal zona2 zona3 zona4];

    pos=pos;

    poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

    % Situamos en '0' el operario que está en casa.
    operarios(osinc)=0;
end

if (sum(nFosinc)~=0) & (sum(nFo)==0)
    % Mandamos al operario 'o' a casa:
    pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zfinal);
    peso1=pesos(1);
    peso2=pesos(2);
    peso3=pesos(3);
    peso4=pesos(4);
    pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

    % Situamos la condición del operario 'o' como 'libre'
    conds(o)=0;
    cond1=conds(1);
    cond2=conds(2);
    cond3=conds(3);
    cond4=conds(4);
    conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

    % En la posición actual del operario colocamos un '0' como
    señal de que ha finalizado.
    if o==1
        o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
        pos1=pos1+1;
    end
    if o==2
        o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
        pos2=pos2+1;
    end
    if o==3
        o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
        pos3=pos3+1;
    end
    if o==4
        o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
        pos4=pos4+1;
    end

    % EL operario 'o' ha terminado y ya está en la zona 9.
    zonas(o)=zfinal;
    zonal=zonas(1);
    zona2=zonas(2);
    zona3=zonas(3);
    zona4=zonas(4);
    zonas=[zonal zona2 zona3 zona4];

    pos=pos;

```

```

    poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

    % Situamos en '0' el operario que está en casa.
    operarios(o)=0;
end

if (sum(nFo)==0) & (sum(nFosinc)==0)
    % Ambos operarios regresan a CASA:
    pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zfinal);
    pesos(osinc)=pesos(osinc)+td(zonas(osinc),zfinal);
    peso1=pesos(1);
    peso2=pesos(2);
    peso3=pesos(3);
    peso4=pesos(4);
    pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

    % Situamos la condición de los operarios como 'libre'
    conds(o)=0;
    conds(osinc)=0;
    cond1=conds(1);
    cond2=conds(2);
    cond3=conds(3);
    cond4=conds(4);
    conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

    % En la posición actual de los operarios colocamos un '0'
    como señal de que ha finalizado.
    if o==1
        o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
        pos1=pos1+1;
    end
    if o==2
        o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
        pos2=pos2+1;
    end
    if o==3
        o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
        pos3=pos3+1;
    end
    if o==4
        o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
        pos4=pos4+1;
    end

    if osinc==1
        o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
        pos1=pos1+1;
    end
    if osinc==2
        o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
        pos2=pos2+1;
    end
    if osinc==3
        o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
        pos3=pos3+1;
    end
    if osinc==4
        o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
        pos4=pos4+1;
    end

    % Los operarios han terminado y ya están en la zona 9.
    zonas(o)=zfinal;
    zonas(osinc)=zfinal;
    zona1=zonas(1);
    zona2=zonas(2);
    zona3=zonas(3);
    zona4=zonas(4);
    zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

    pos=pos;

    poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

    % Situamos en '0' a los operarios porque han terminado su
jornada laboral.

```

```

        operarios(o)=0;
        operarios(osinc)=0;
    end

    if (sum(nFo)~=0) & (sum(nFosinc)~=0)
        % No hay tareas que puedan realizar de manera conjunta.
        Pensar qué hay que hacer aquí.
        STOP1138situacionIMPOSIBLE
    end

else
    % Como 'sum(P)~=0' hay tareas que se pueden ejecutar:
    P1=P928;
    suma=sum(P1);

    if suma~=0
        P1=P1*(1/suma);
    end

    suma=0;

    for tarea=1:length(tt)
        suma=suma+P1(tarea);
        P1(tarea)=suma;
    end

    h=rand(1);
    numtarea=1;

    % Calculamos la tarea que van a ejecutar:
    while (h>P1(numtarea))
        numtarea=numtarea+1;
    end

    tarea=tt(numtarea);

    if ot(numtarea)==1
        % Si la tarea seleccionada es de 1 operario, la asignamos
        sólo al operario 'o'

        tareas(o)=tarea;
        tarea1=tareas(1);
        tarea2=tareas(2);
        tarea3=tareas(3);
        tarea4=tareas(4);
        tareas=[tarea1 tarea2 tarea3 tarea4];

        numtareas(o)=numtarea;
        numtarea1=numtareas(1);
        numtarea2=numtareas(2);
        numtarea3=numtareas(3);
        numtarea4=numtareas(4);
        numtareas=[numtarea1 numtarea2 numtarea3 numtarea4];

        if length(find(operarios))<4
            for i=1:length(w)
                if w(i)~=o % Sumamos el CAMBIO DE CONDICIÓN a los
operarios que no son 'o'
                    if
pesos(w(i))+cc(numtarea)+td(zonas(w(i)),zfinal)>tmax(w(i))
                        % Mandamos al operario'i' a casa:
                        penals(w(i))=penals(w(i));

pesos(w(i))=pesos(w(i))+td(zonas(w(i)),zfinal);
                    % Situamos la condición del operario 'o' como
'libre'

                    conds(w(i))=0;
                    % En la posición actual del operario
colocamos un '0' como señal de que ha finalizado.
                    if w(i)==1
                        o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
                        pos1=pos1+1;
                    end
                    if w(i)==2
                        o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
                        pos2=pos2+1;
                    end
                    if w(i)==3

```

```

        o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
        pos3=pos3+1;
    end
    if w(i)==4
        o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
        pos4=pos4+1;
    end
    % El operario 'o' ha terminado y ya está en
la zona 9.
    zonas(w(i))=zfinal;

    pos=pos;

    poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

    % Situamos en '0' el operario que está en
casa.
    operarios(w(i))=0;
else
    pesos(w(i))=pesos(w(i))+cc(numtarea);
    conds(w(i))=ct(numtarea);
end
else % Sumamos el CAMBIO DE CONDICIÓN, el
DESPLAZAMIENTO y la EJECUCIÓN al operario 'o'
    pesos(w(i))=pesos(w(i))+td(zonas(w(i)),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tt(numtarea);
    conds(w(i))=ct(numtarea);
end
end
else
    for i=1:4
        if i~=o % Sumamos el CAMBIO DE CONDICIÓN a los
operarios que no son 'o'
            if
                pesos(i)+cc(numtarea)+td(zonas(i),zfinal)>tmax(i)
                    % Mandamos al operario'i' a casa:
                    penals(i)=0;
                    pesos(i)=pesos(i)+td(zonas(i),zfinal);
                    % Situamos la condición del operario 'o' como
'libre'
                    conds(i)=0;
                    % En la posición actual del operario
colocamos un '0' como señal de que ha finalizado.
                    if i==1
                        o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
                        pos1=pos1+1;
                    end
                    if i==2
                        o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
                        pos2=pos2+1;
                    end
                    if i==3
                        o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
                        pos3=pos3+1;
                    end
                    if i==4
                        o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
                        pos4=pos4+1;
                    end
                    % El operario 'o' ha terminado y ya está en
la zona 9.
                    zonas(i)=zfinal;

                    pos=pos;

                    poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

                    % Situamos en '0' el operario que está en
casa.
                    operarios(i)=0;
                else
                    pesos(i)=pesos(i)+cc(numtarea);
                    conds(i)=ct(numtarea);
                end
            end
        else % Sumamos el CAMBIO DE CONDICIÓN, el
DESPLAZAMIENTO y la EJECUCIÓN al operario 'o'

```

```

pesos(i)=pesos(i)+td(zonas(i),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tt(numtarea);
                                conds(i)=ct(numtarea);
                                end
                                end
                                end
peso1=pesos(1);
peso2=pesos(2);
peso3=pesos(3);
peso4=pesos(4);
pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

cond1=conds(1);
cond2=conds(2);
cond3=conds(3);
cond4=conds(4);
conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

rt(pos)=tareas(o);
rz(pos)=zt(numtarea);
rc(pos)=ct(numtarea);
ro(pos)=numtarea;

if o==1
    o1(pos1)=tarea;
    pos1=pos1+1;
end
if o==2
    o2(pos2)=tarea;
    pos2=pos2+1;
end
if o==3
    o3(pos3)=tarea;
    op3(pos3)=pos;
    pos3=pos3+1;
end
if o==4
    o4(pos4)=tarea;
    pos4=pos4+1;
end

zonas(o)=zt(numtarea);
zona1=zonas(1);
zona2=zonas(2);
zona3=zonas(3);
zona4=zonas(4);
zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

contt(numtarea)=0;
contz(numtarea)=0;

pos=pos+1;
poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];
else
    % Si la tarea seleccionada es de 2 operarios, la asignamos al
operario 'o' y al operario 'osinc':
    numtareas(o)=numtarea;
    numtareas(osinc)=numtarea;
    numtarea1=numtareas(1);
    numtarea2=numtareas(2);
    numtarea3=numtareas(3);
    numtarea4=numtareas(4);
    numtareas=[numtarea1 numtarea2 numtarea3 numtarea4];

    tareas(o)=tarea;
    tareas(osinc)=tarea;
    tarea1=tareas(1);
    tarea2=tareas(2);
    tarea3=tareas(3);
    tarea4=tareas(4);
    tareas=[tarea1 tarea2 tarea3 tarea4];

    if length(find(operarios))<4
        for i=1:length(w)
            if (w(i)~=o)&(w(i)~=osinc) % Sumamos el CAMBIO DE
CONDICIÓN a los operarios que no son 'o'

```

```

                                if
pesos(w(i))+cc(numtarea)+td(zonas(w(i)),zfinal)>tmax(w(i))
                                % Mandamos al operario'i' a casa:
                                penals(w(i))=penals(w(i));

pesos(w(i))=pesos(w(i))+td(zonas(w(i)),zfinal);
                                % Situamos la condición del operario 'o' como
'libre'
                                conds(w(i))=0;
                                % En la posición actual del operario
colocamos un '0' como señal de que ha finalizado.
                                if w(i)==1
                                    o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
                                    pos1=pos1+1;
                                end
                                if w(i)==2
                                    o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
                                    pos2=pos2+1;
                                end
                                if w(i)==3
                                    o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
                                    pos3=pos3+1;
                                end
                                if w(i)==4
                                    o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
                                    pos4=pos4+1;
                                end
                                % El operario 'o' ha terminado y ya está en
la zona 9.
                                zonas(w(i))=zfinal;

                                pos=pos;

                                poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

                                % Situamos en '0' el operario que está en
casa.
                                operarios(w(i))=0;
                                else
                                    pesos(w(i))=pesos(w(i))+cc(numtarea);
                                    conds(w(i))=ct(numtarea);
                                end
                                else % Sumamos el CAMBIO DE CONDICIÓN, el
DESPLAZAMIENTO y la EJECUCIÓN al operario 'o'
                                pesos(w(i))=pesos(w(i))+td(zonas(w(i)),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tt(numtarea);
                                conds(w(i))=ct(numtarea);
                                end
                                end
                                else
                                    for i=1:4
                                        if (i~=o)&(i~=osinc) % Sumamos el CAMBIO DE CONDICIÓN
a los operarios que no son 'o'
                                        if
pesos(i)+cc(numtarea)+td(zonas(i),zfinal)>tmax(i)
                                        % Mandamos al operario'i' a casa:
                                        penals(i)=0;
                                        pesos(i)=pesos(i)+td(zonas(i),zfinal);
                                        % Situamos la condición del operario 'o' como
'libre'
                                        conds(i)=0;
                                        % En la posición actual del operario
colocamos un '0' como señal de que ha finalizado.
                                        if i==1
                                            o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
                                            pos1=pos1+1;
                                        end
                                        if i==2
                                            o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
                                            pos2=pos2+1;
                                        end
                                        if i==3
                                            o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
                                            pos3=pos3+1;
                                        end
                                        if i==4
                                            o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;

```

```

                                pos4=pos4+1;
                                end
                                % El operario 'o' ha terminado y ya está en
                                zonas(i)=zfinal;

                                pos=pos;

                                poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

                                % Situamos en '0' el operario que está en
                                operarios(i)=0;
                                else
                                pesos(i)=pesos(i)+cc(numtarea);
                                conds(i)=ct(numtarea);
                                end
                                else % Sumamos el CAMBIO DE CONDICIÓN, el
                                DESPLAZAMIENTO y la EJECUCIÓN al operario 'o'
                                pesos(i)=pesos(i)+td(zonas(i),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tt(numtarea);
                                conds(i)=ct(numtarea);
                                end
                                end
                                end

                                conds(o)=ct(numtarea);
                                conds(osinc)=ct(numtarea);
                                cond1=conds(1);
                                cond2=conds(2);
                                cond3=conds(3);
                                cond4=conds(4);
                                conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

                                rt(pos)=tarea;
                                rz(pos)=zt(numtarea);
                                rc(pos)=ct(numtarea);
                                ro(pos)=numtarea;

                                if o==1
                                o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
                                pos1=pos1+1;
                                end
                                if o==2
                                o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
                                pos2=pos2+1;
                                end
                                if o==3
                                o3(pos3)=tarea;
                                op3(pos3)=pos;
                                pos3=pos3+1;
                                end
                                if o==4
                                o4(pos4)=tarea;
                                pos4=pos4+1;
                                end

                                if osinc==1
                                o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
                                pos1=pos1+1;
                                end
                                if osinc==2
                                o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
                                pos2=pos2+1;
                                end
                                if osinc==3
                                o3(pos3)=tarea;
                                op3(pos3)=pos;
                                pos3=pos3+1;
                                end
                                if osinc==4
                                o4(pos4)=tarea;
                                pos4=pos4+1;
                                end

                                if pesos(o)<pesos(osinc)
                                tesp(o)=tesp(o)+(pesos(osinc)-pesos(o));

```

```

        pesos(o)=pesos(osinc);
    else
        tresp(osinc)=tresp(osinc)+(pesos(o)-pesos(osinc));
        pesos(osinc)=pesos(o);
    end
    peso1=pesos(1);
    peso2=pesos(2);
    peso3=pesos(3);
    peso4=pesos(4);
    pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

    tresp1=tresp(1);
    tresp2=tresp(2);
    tresp3=tresp(3);
    tresp4=tresp(4);
    tresp=[tresp1 tresp2 tresp3 tresp4];

    zonas(o)=zt(numtarea);
    zonas(osinc)=zt(numtarea);
    zona1=zonas(1);
    zona2=zonas(2);
    zona3=zonas(3);
    zona4=zonas(4);
    zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

    contt(numtarea)=0;
    contz(numtarea)=0;

    pos=pos+1;
    poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];
end
end
end
end

% HAY SINCRONIZACIÓN Y NO HAY PENALIZACIÓN:
if (operarios(o)~=0)&(operarios(osinc)~=0)
    if P1==0 % La variable 'P1' hace de puerta para saber si ha habido o
no penalización:
        % P1=0 (No ha habido PENALIZACIÓN)---> ENTRAMOS
        % P1~=0 (Sí ha habido PENALIZACIÓN)---> NO ENTRAMOS

        % CONTROL FINALIZACIÓN:
        P=P756;

        % 1º) Creamos un vector que guarde, con su respectivo número, todas
        las tareas susceptibles de ejecutarse:
        for i=1:length(P)
            if P(i)~=0
                nF(i)=i;
            else
                nF(i)=0;
            end
        end

        % 2º) CONTROL OPERARIOS: Discriminamos las tareas que no puedan hacer
        juntos, teniendo en cuenta el "teop":

        % a) Control "o" para discriminar las tareas que 'o' no pueda hacer:
        if pesos(o)<=pesos(osinc)
            for i=1:length(P)
                if nF(i)~=0
                    if
td(zonas(o),zt(i))+cc(i)+td(zt(i),zfinal)+tt(i)+(pesos(osinc)-pesos(o))>(tmax(o)-pesos(o))
                        nFo(i)=0;
                    else
                        nFo(i)=nF(i);
                    end
                else
                    nFo(i)=0;
                end
            end
        end
        % b) Control "osinc" para discriminar las tareas que 'osinc' no
        pueda hacer:
        for i=1:length(P)
            if nF(i)~=0

```

```

        if
            td(zonas(osinc),zt(i))+cc(i)+td(zt(i),zfinal)+tt(i)>(tmax(osinc)-pesos(osinc))
                nFosinc(i)=0;
            else
                nFosinc(i)=nF(i);
            end
        else
            nFosinc(i)=0;
        end
    end
end

% 3°) Comparamos 'o' y 'osinc' para discriminar tareas que no puedan
hacer de manera conjunta:
for i=1:length(P)
    if nF(i)~=0
        if nFo(i)~=0
            if nFo(i)==nFosinc(i)
                nF(i)=i;
            else
                nF(i)=0;
            end
        else
            nF(i)=0;
        end
    else
        nF(i)=0;
    end
end

% 4°) Reconstruyo el vector de probabilidades P:
for i=1:length(P)
    if nF(i)==0
        P(i)=0;
    end
end

% 5°) Si P=0, ambos o alguno de los dos operarios sincronizados
deberían volver a CASA:
if sum(P)==0
    if (sum(nFo)~=0) & (sum(nFosinc)==0)
        % El operario 'osinc' regresa a CASA.
        pesos(osinc)=pesos(osinc)+td(zonas(osinc),zfinal);
        peso1=pesos(1);
        peso2=pesos(2);
        peso3=pesos(3);
        peso4=pesos(4);
        pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

        % Situamos la condición del operario 'o' como 'libre'
        conds(osinc)=0;
        cond1=conds(1);
        cond2=conds(2);
        cond3=conds(3);
        cond4=conds(4);
        conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

        % En la posición actual del operario colocamos un '0' como
señal de que ha finalizado.
        if osinc==1
            o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
            pos1=pos1+1;
        end
        if osinc==2
            o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
            pos2=pos2+1;
        end
        if osinc==3
            o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
            pos3=pos3+1;
        end
        if osinc==4
            o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
            pos4=pos4+1;
        end
    end

    % EL operario 'o' ha terminado y ya está en la zona 9.

```

```

zonas(osinc)=zfinal;
zonal=zonas(1);
zona2=zonas(2);
zona3=zonas(3);
zona4=zonas(4);
zonas=[zonal zona2 zona3 zona4];

pos=pos;

poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

% Situamos en '0' el operario que está en casa.
operarios(osinc)=0;
end

if (sum(nFosinc)~=0) & (sum(nFo)==0)
% El operario 'o' regresa a CASA.
pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zfinal);
peso1=pesos(1);
peso2=pesos(2);
peso3=pesos(3);
peso4=pesos(4);
pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

% Situamos la condición del operario 'o' como 'libre'
conds(o)=0;
cond1=conds(1);
cond2=conds(2);
cond3=conds(3);
cond4=conds(4);
conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

% En la posición actual del operario colocamos un '0' como
señal de que ha finalizado.
if o==1
o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
pos1=pos1+1;
end
if o==2
o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
pos2=pos2+1;
end
if o==3
o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
pos3=pos3+1;
end
if o==4
o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
pos4=pos4+1;
end

% EL operario 'o' ha terminado y ya está en la zona 9.
zonas(o)=zfinal;
zonal=zonas(1);
zona2=zonas(2);
zona3=zonas(3);
zona4=zonas(4);
zonas=[zonal zona2 zona3 zona4];

pos=pos;

poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

% Situamos en '0' el operario que está en casa.
operarios(o)=0;
end
if (sum(nFo)==0) & (sum(nFosinc)==0)
% Ambos operarios regresan a CASA:
pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zfinal);
pesos(osinc)=pesos(osinc)+td(zonas(osinc),zfinal);
peso1=pesos(1);
peso2=pesos(2);
peso3=pesos(3);
peso4=pesos(4);
pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

% Situamos la condición de los operarios como 'libre'

```

```

conds(o)=0;
conds(osinc)=0;
cond1=conds(1);
cond2=conds(2);
cond3=conds(3);
cond4=conds(4);
conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

% En la posición actual de los operarios colocamos un '0'
como señal de que ha finalizado.
if o==1
    o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
    pos1=pos1+1;
end
if o==2
    o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
    pos2=pos2+1;
end
if o==3
    o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
    pos3=pos3+1;
end
if o==4
    o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
    pos4=pos4+1;
end

if osinc==1
    o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
    pos1=pos1+1;
end
if osinc==2
    o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
    pos2=pos2+1;
end
if osinc==3
    o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
    pos3=pos3+1;
end
if osinc==4
    o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
    pos4=pos4+1;
end

% Los operarios han terminado y ya están en la zona 9.
zonas(o)=zfinal;
zonas(osinc)=zfinal;
zonal=zonas(1);
zona2=zonas(2);
zona3=zonas(3);
zona4=zonas(4);
zonas=[zonal zona2 zona3 zona4];

pos=pos;

poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

% Situamos en '0' el operario que está en casa.
operarios(o)=0;
operarios(osinc)=0;
end
if (sum(nFo)~=0) & (sum(nFosinc)~=0)
    % No hay tareas que puedan realizar de manera conjunta.
    PENSAR QUE HAY QUE HACER AQUI.
    STOP1606situacionIMPOSIBLE
end
else
    % Como P~=0 si hay tareas conjuntas que puedan ejecutar, por lo
    que procedemos de manera normal:
    suma=sum(P);

    if suma~=0
        P=P*(1/suma);
    end

    suma=0;

```

```

for tarea=1:length(tt)
    suma=suma+P(tarea);
    P(tarea)=suma;
end

h=rand(1);
numtarea=1;

while (h>P(numtarea))
    numtarea=numtarea+1;
end

tarea=tt(numtarea);

if ot(numtarea)==1
    tareas(o)=tarea;
    tarea1=tareas(1);
    tarea2=tareas(2);
    tarea3=tareas(3);
    tarea4=tareas(4);
    tareas=[tarea1 tarea2 tarea3 tarea4];

    numtareas(o)=numtarea;
    numtarea1=numtareas(1);
    numtarea2=numtareas(2);
    numtarea3=numtareas(3);
    numtarea4=numtareas(4);
    numtareas=[numtarea1 numtarea2 numtarea3 numtarea4];

    if (ct(numtarea)==conds(o))
        pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zt(numtarea))+tarea;
    else
pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tarea;
        end
        peso1=pesos(1);
        peso2=pesos(2);
        peso3=pesos(3);
        peso4=pesos(4);
        pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

        conds(o)=ct(numtarea);
        cond1=conds(1);
        cond2=conds(2);
        cond3=conds(3);
        cond4=conds(4);
        conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

        rt(pos)=tareas(o);
        rz(pos)=zt(numtarea);
        rc(pos)=ct(numtarea);
        ro(pos)=numtarea;

        if o==1
            o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
            pos1=pos1+1;
        end
        if o==2
            o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
            pos2=pos2+1;
        end
        if o==3
            o3(pos3)=tarea;
            op3(pos3)=pos;
            pos3=pos3+1;
        end
        if o==4
            o4(pos4)=tarea;
            pos4=pos4+1;
        end
        end

        zonas(o)=zt(numtarea);
        zona1=zonas(1);
        zona2=zonas(2);
        zona3=zonas(3);
        zona4=zonas(4);
        zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

```

```

contt(numtarea)=0;
contz(numtarea)=0;

pos=pos+1;
poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];
else
    % Realizamos una tarea de 2 operarios en otra zona diferente
    a la zona del operario 'o', que será la zona de 'numtarea'
    numtareas(o)=numtarea;
    numtareas(osinc)=numtarea;
    numtarea1=numtareas(1);
    numtarea2=numtareas(2);
    numtarea3=numtareas(3);
    numtarea4=numtareas(4);
    numtareas=[numtarea1 numtarea2 numtarea3 numtarea4];

    tareas(o)=tarea;
    tareas(osinc)=tarea;
    tarea1=tareas(1);
    tarea2=tareas(2);
    tarea3=tareas(3);
    tarea4=tareas(4);
    tareas=[tarea1 tarea2 tarea3 tarea4];

    conds(o)=ct(numtarea);
    conds(osinc)=ct(numtarea);
    cond1=conds(1);
    cond2=conds(2);
    cond3=conds(3);
    cond4=conds(4);
    conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

    rt(pos)=tarea;
    rz(pos)=zt(numtarea);
    rc(pos)=ct(numtarea);
    ro(pos)=numtarea;

    if o==1
        o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
        pos1=pos1+1;
    end
    if o==2
        o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
        pos2=pos2+1;
    end
    if o==3
        o3(pos3)=tarea;
        op3(pos3)=pos;
        pos3=pos3+1;
    end
    if o==4
        o4(pos4)=tarea;
        pos4=pos4+1;
    end

    if osinc==1
        o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
        pos1=pos1+1;
    end
    if osinc==2
        o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
        pos2=pos2+1;
    end
    if osinc==3
        o3(pos3)=tarea;
        op3(pos3)=pos;
        pos3=pos3+1;
    end
    if osinc==4
        o4(pos4)=tarea;
        pos4=pos4+1;
    end

    if (ct(numtarea)~=rc(pos-1))

pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tarea;

```

```

pesos (osinc)=pesos (osinc)+td(zonas (osinc),zt (numtarea))+cc (numtarea)+tarea;
    else
        pesos (o)=pesos (o)+td(zonas (o),zt (numtarea))+tarea;
pesos (osinc)=pesos (osinc)+td(zonas (osinc),zt (numtarea))+tarea;
    end

    if pesos (o)<pesos (osinc)
        tesp (o)=tesp (o)+(pesos (osinc)-pesos (o));
        pesos (o)=pesos (osinc);
    else
        tesp (osinc)=tesp (osinc)+(pesos (o)-pesos (osinc));
        pesos (osinc)=pesos (o);
    end
    peso1=pesos (1);
    peso2=pesos (2);
    peso3=pesos (3);
    peso4=pesos (4);
    pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

    tesp1=tesp (1);
    tesp2=tesp (2);
    tesp3=tesp (3);
    tesp4=tesp (4);
    tesp=[tesp1 tesp2 tesp3 tesp4];

    zonas (o)=zt (numtarea);
    zonas (osinc)=zt (numtarea);
    zona1=zonas (1);
    zona2=zonas (2);
    zona3=zonas (3);
    zona4=zonas (4);
    zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

    contt (numtarea)=0;
    contz (numtarea)=0;

    pos=pos+1;
    poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];
    end
end
end
else % Como 'sum(P)~=0' SÍ quedan tareas de 2 operarios en la zona del operario
'o'

    % CONTROL FINALIZACIÓN:
    P=P677;

    % 1º) Creamos un vector que guarde, con su respectivo número, todas las
    tareas susceptibles de ejecutarse:
    for i=1:length(P)
        if P(i)~=0
            nF(i)=i;
        else
            nF(i)=0;
        end
    end

    % 2º)
    % a) Control "o" para discriminar las tareas que 'o' no pueda hacer:
    if pesos (o)<=pesos (osinc)
        for i=1:length(P)
            if nF(i)~=0
                if td(zonas (o),zt (i))+cc (i)+td(zt (i),zfinal)+tt (i)+(pesos (osinc)-
                pesos (o))>(tmax (o)-pesos (o))
                    nFo(i)=0;
                else
                    nFo(i)=nF(i);
                end
            else
                nFo(i)=0;
            end
        end
    end
    % b) Control "osinc" para discriminar las tareas que 'osinc' no pueda
    hacer:

```

```

        for i=1:length(P)
            if nF(i)~=0
                if
                    td(zonas(osinc),zt(i))+cc(i)+td(zt(i),zfinal)+tt(i)>(tmax(osinc)-pesos(osinc))
                    nFosinc(i)=0;
                else
                    nFosinc(i)=nF(i);
                end
            else
                nFosinc(i)=0;
            end
        end
    end
end

% 3º) Comparamos 'o' y 'osinc' para discriminar tareas que no puedan hacer de
manera conjunta:
for i=1:length(P)
    if nF(i)~=0
        if nFo(i)~=0
            if nFo(i)==nFosinc(i)
                nF(i)=i;
            else
                nF(i)=0;
            end
        else
            nF(i)=0;
        end
    else
        nF(i)=0;
    end
end

% 4º) Reconstruyo el vector de probabilidades P:
for i=1:length(P)
    if nF(i)==0
        P(i)=0;
    end
end

% 5º) Si 'sum(P)=0' ambos o alguno de los operarios sincronizados deben
volver a CASA:
if sum(P)==0
    if (sum(nFo)~=0)&(sum(nFosinc)==0)
        % El operario 'osinc' regresa a CASA.
        pesos(osinc)=pesos(osinc)+td(zonas(osinc),zfinal);
        peso1=pesos(1);
        peso2=pesos(2);
        peso3=pesos(3);
        peso4=pesos(4);
        pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

        % Situamos la condición del operario 'osinc' como 'libre'
        conds(osinc)=0;
        cond1=conds(1);
        cond2=conds(2);
        cond3=conds(3);
        cond4=conds(4);
        conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

        % En la posición actual del operario colocamos un '0' como señal de
que ha finalizado.
        if osinc==1
            o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
            pos1=pos1+1;
        end
        if osinc==2
            o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
            pos2=pos2+1;
        end
        if osinc==3
            o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
            pos3=pos3+1;
        end
        if osinc==4
            o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
            pos4=pos4+1;
        end
    end
end

```

```

% EL operario 'osinc' ha terminado y ya está en la zona 9.
zonas(osinc)=zfinal;
zonal=zonas(1);
zona2=zonas(2);
zona3=zonas(3);
zona4=zonas(4);
zonas=[zonal zona2 zona3 zona4];

pos=pos;

poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

% Situamos en '0' el operario que está en casa.
operarios(osinc)=0;
end
if (sum(nFosinc)~=0) & (sum(nFo)==0)
% El operario 'o' regresa a CASA.
pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zfinal);
peso1=pesos(1);
peso2=pesos(2);
peso3=pesos(3);
peso4=pesos(4);
pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

% Situamos la condición del operario 'o' como 'libre'
conds(o)=0;
cond1=conds(1);
cond2=conds(2);
cond3=conds(3);
cond4=conds(4);
conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

% En la posición actual del operario colocamos un '0' como señal de
que ha finalizado.
if o==1
o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
pos1=pos1+1;
end
if o==2
o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
pos2=pos2+1;
end
if o==3
o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
pos3=pos3+1;
end
if o==4
o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
pos4=pos4+1;
end

% EL operario 'o' ha terminado y ya está en la zona 9.
zonas(o)=zfinal;
zonal=zonas(1);
zona2=zonas(2);
zona3=zonas(3);
zona4=zonas(4);
zonas=[zonal zona2 zona3 zona4];

pos=pos;

poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

% Situamos en '0' el operario que está en casa.
operarios(o)=0;
end
if (sum(nFo)==0) & (sum(nFosinc)==0)
% Antes de que ambos regresen a CASA, ¿pueden realizar alguna tarea
de otra zona que no sea la de "o/osinc"?.
% Para ello calculo de nuevo 's' y 'S':
for i=1:length(pesos)
if pesos(i)>tmax(i)
STOPlinea1979pesos_no_validos
end
end
end

```

```

s=zeros(1,length(tt));

for c=1:length(tt)
    if td(zonas(o),zt(c))==0
        s(c)=0.1;
    else
        s(c)=td(zonas(o),zt(c));
    end
end

for c=1:length(tt)
    s(c)=s(c)^(-alfa);
end

for c=1:length(tt)
    if contt(c)==0
        s(c)=0;
    end
end

S=zeros(1,length(tt));

ccm=cc;

for c=1:length(tt)
    if (ct(c)==conds(o))|(ct(c)==0)
        ccm(c)=0.1;
    end
end

for c=1:length(tt)
    S(c)=(ccm(c))^(-alfa);
end

ccm=cc;

for c=1:length(tt)
    if contt(c)==0
        S(c)=0;
    end
end

if length(find(operarios))<4
    if wc(n)~=0 % Tengo en cuenta que se RESPETEN las 'CONDICIONES
DE OPERACIÓN' del aerogenerador:
        s(ct~=0 & ct~=wc(n))=0;
        S(ct~=0 & ct~=wc(n))=0;
    else
        %disp('Utilizamos el vector PES en la linea 2178')
        for i=1:length(pes)
            if i~=n
                if wc(i)~=0
                    s(ct~=0 & ct~=wc(i))=0;
                    S(ct~=0 & ct~=wc(i))=0;
                end
            end
        end
    end
else
    if conds(o)~=0 % Tengo en cuenta que se RESPETEN las
'CONDICIONES DE OPERACIÓN' del aerogenerador:
        s(ct~=0 & ct~=conds(o))=0;
        S(ct~=0 & ct~=conds(o))=0;
    else
        for i=1:length(pesos)
            if i~=o
                if conds(i)~=0
                    s(ct~=0 & ct~=conds(i))=0;
                    S(ct~=0 & ct~=conds(i))=0;
                end
            end
        end
    end
end

P=s+S;

```

```

P1928=P;

suma=sum(P);

if suma~=0
    P=P*(1/suma);
end

suma=0;

for tarea=1:length(tt)
    suma=suma+P(tarea);
    P(tarea)=suma;
end

P2=0;

% "BUCLE DE PENALIZACIÓN cuando hay SINCRONIZACIÓN":

if sum(P)==0 % Habrá PENALIZACIÓN porque se incumplen las
RESTRICCIONES DE CONDICIÓN DE OPERACIÓN:
    STOP2077situacion_no_contemplada
    % "PENALIZAMOS" sobre "TIEMPOS DE ESPERA" para que los 4
operarios estén "SINCRONIZADOS EN TIEMPO"
    % Una vez "SINCRONIZADOS EN TIEMPO" podrán cambiar de "CONDICIÓN
DE OPERACIÓN"

    pmax=max(pesos);

    for i=1:4
        penals(i)=(pmax-pesos(i));
        pesos(i)=pmax;
    end
    % La "penalización" la incluimos como "tiempo de espera":
    tesp1=tesp1+penals(1);
    tesp2=tesp2+penals(2);
    tesp3=tesp3+penals(3);
    tesp4=tesp4+penals(4);
    tesp=[tesp1 tesp2 tesp3 tesp4];

    % Penalizamos a los 4 operarios:
    penal1=penal1+penals(1);
    penal2=penal2+penals(2);
    penal3=penal3+penals(3);
    penal4=penal4+penals(4);
    penals=[penal1 penal2 penal3 penal4];

    peso1=pesos(1);
    peso2=pesos(2);
    peso3=pesos(3);
    peso4=pesos(4);
    pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4]; % Todos los 'pesos' serán
similares

% Calculamos de nuevo las probabilidades 's' y 'S':
s=zeros(1,length(tt));
for c=1:length(tt)
    if td(zonas(o),zt(c))==0
        s(c)=0.1;
    else
        s(c)=td(zonas(o),zt(c));
    end
end

for c=1:length(tt)
    s(c)=s(c)^(-alfa);
end

for c=1:length(tt)
    if contt(c)==0
        s(c)=0;
    end
end

S=zeros(1,length(tt));

```

```

for c=1:length(tt)
    S(c)=(cc(c))^(alfa);
end

for c=1:length(tt)
    if contt(c)==0
        S(c)=0;
    end
end

% Calculamos de nuevo la matriz de sincronización:
% Todos están sincronizados en "tiempo" y algunos lo estarán en
"zona"

for i=1:length(pesos)
    for j=1:length(pesos)
        teop(i,j)=abs(pesos(i)-pesos(j));
    end
end

for i=1:length(pesos)
    for j=1:length(pesos)
        if i~=j
            if (pesos(i)==0)|(pesos(j)==0)
                teop(i,j)=100;
            end
        end
    end
end

% Hay SINCRONIZACIÓN REAL entre 'o' y un operario 'osinc':
for i=1:length(pesos)
    if i~=o
        if ((teop(o,i)<=3)&(teop(o,i)>=0))&(zonas(o)==zonas(i))
            teop(o,i);
            o; % Mantenemos el operario 'o' calculado
            osinc=i; % Por defecto (si hay más de una
sincronización real) asignaremos 'osinc' al último operario sincronizado
        end % El valor de "teop(o,i)" será un "tiempo
de espera" que habrá que considerar (¿Aquí siempre es '0'?)
    end
end

% Ya tenemos calculado 'o', el nuevo 'osinc' y el 'teop' entre
ambos

P2=s+S;

suma=sum(P2);

if suma~=0
    P2=P2*(1/suma);
end

suma=0;

for tarea=1:length(tt)
    suma=suma+P2(tarea);
    P2(tarea)=suma;
end

h=rand(1);
numtarea=1;

while (h>P2(numtarea))
    numtarea=numtarea+1;
end

tarea=tt(numtarea);

if ot(numtarea)==1
    tareas(o)=tarea;
    tarea1=tareas(1);
    tarea2=tareas(2);
    tarea3=tareas(3);
    tarea4=tareas(4);
end

```

```

tareas=[tarea1 tarea2 tarea3 tarea4];

numtareas(o)=numtarea;
numtarea1=numtareas(1);
numtarea2=numtareas(2);
numtarea3=numtareas(3);
numtarea4=numtareas(4);
numtareas=[numtarea1 numtarea2 numtarea3 numtarea4];

for i=1:4 % Añadimos el TIEMPO de "CAMBIO DE CONDICIÓN" a
todos los operarios:
    if i~=o
        pesos(i)=pesos(i)+cc(numtarea);
        conds(i)=ct(numtarea);
    else % Además, al operario 'o' debemos añadir el
"TIEMPO DE DESPLAZAMIENTO Y EJECUCIÓN" de la tarea:
pesos(i)=pesos(i)+td(zonas(i),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tt(numtarea);
        conds(i)=ct(numtarea);
    end
end
peso1=pesos(1);
peso2=pesos(2);
peso3=pesos(3);
peso4=pesos(4);
pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

% Completamos las "condiciones de operación":
cond1=conds(1);
cond2=conds(2);
cond3=conds(3);
cond4=conds(4);
conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

rt(pos)=tareas(o);
rz(pos)=zt(numtarea);
rc(pos)=ct(numtarea);
ro(pos)=numtarea;

if o==1
    o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
    pos1=pos1+1;
end
if o==2
    o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
    pos2=pos2+1;
end
if o==3
    o3(pos3)=tarea;
    op3(pos3)=pos;
    pos3=pos3+1;
end
if o==4
    o4(pos4)=tarea;
    pos4=pos4+1;
end

zonas(o)=zt(numtarea);
zona1=zonas(1);
zona2=zonas(2);
zona3=zonas(3);
zona4=zonas(4);
zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

contt(numtarea)=0;
contz(numtarea)=0;

pos=pos+1;
poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];
else
% Si la tarea seleccionada es de 2 operarios, la asignamos al
operario 'o' y al operario 'osinc':
% Ya tenemos calculado el 'osinc' en la línea 783:

numtareas(o)=numtarea;
numtareas(osinc)=numtarea;
numtarea1=numtareas(1);

```

```

numtarea2=numtareas(2);
numtarea3=numtareas(3);
numtarea4=numtareas(4);
numtareas=[numtarea1 numtarea2 numtarea3 numtarea4];

tareas(o)=tarea;
tareas(osinc)=tarea;
tarea1=tareas(1);
tarea2=tareas(2);
tarea3=tareas(3);
tarea4=tareas(4);
tareas=[tarea1 tarea2 tarea3 tarea4];

for i=1:4 % Añadimos el TIEMPO de "CAMBIO DE CONDICIÓN" a
todos los operarios:
    if (i~=o)&(i~=osinc)
        pesos(i)=pesos(i)+cc(numtarea);
        conds(i)=ct(numtarea);
    else % Además, debemos añadir a 'o' y 'osinc' los
"TIEMPOS DE DESPLAZAMIENTO Y EJECUCIÓN" de la tarea:
        pesos(i)=pesos(i)+td(zonas(i),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tt(numtarea);
        conds(i)=ct(numtarea);
    end
end

% Completamos las "condiciones de operación":
conds(o)=ct(numtarea);
conds(osinc)=ct(numtarea);
cond1=conds(1);
cond2=conds(2);
cond3=conds(3);
cond4=conds(4);
conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

rt(pos)=tarea;
rz(pos)=zt(numtarea);
rc(pos)=ct(numtarea);
ro(pos)=numtarea;

if o==1
    o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
    pos1=pos1+1;
end
if o==2
    o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
    pos2=pos2+1;
end
if o==3
    o3(pos3)=tarea;
    op3(pos3)=pos;
    pos3=pos3+1;
end
if o==4
    o4(pos4)=tarea;
    pos4=pos4+1;
end

if osinc==1
    o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
    pos1=pos1+1;
end
if osinc==2
    o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
    pos2=pos2+1;
end
if osinc==3
    o3(pos3)=tarea;
    op3(pos3)=pos;
    pos3=pos3+1;
end
if osinc==4
    o4(pos4)=tarea;
    op4(pos4)=pos;
    pos4=pos4+1;
end
end

```

```

if pesos(o)<pesos(osinc)
    tesp(o)=tesp(o)+(pesos(osinc)-pesos(o));
    pesos(o)=pesos(osinc);
else
    tesp(osinc)=tesp(osinc)+(pesos(o)-pesos(osinc));
    pesos(osinc)=pesos(o);
end
peso1=pesos(1);
peso2=pesos(2);
peso3=pesos(3);
peso4=pesos(4);
pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

tesp1=tesp(1);
tesp2=tesp(2);
tesp3=tesp(3);
tesp4=tesp(4);
tesp=[tesp1 tesp2 tesp3 tesp4];

zonas(o)=zt(numtarea);
zonas(osinc)=zt(numtarea);
zona1=zonas(1);
zona2=zonas(2);
zona3=zonas(3);
zona4=zonas(4);
zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

contt(numtarea)=0;
contz(numtarea)=0;

pos=pos+1;
poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];
end
end

% HAY SINCRONIZACIÓN Y NO HAY PENALIZACIÓN:
if P2==0 % La variable 'P1' hace de puerta para saber si ha habido
o no penalización:
    % P2=0 (No ha habido PENALIZACIÓN)---> ENTRAMOS
    % P2~=0 (Sí ha habido PENALIZACIÓN)---> NO ENTRAMOS

    % CONTROL FINALIZACIÓN:
    P=P1928;

    % 1º) Creamos un vector que guarde, con su respectivo número,
    todas las tareas susceptibles de ejecutarse:
    for i=1:length(P)
        if P(i)~=0
            nFnopen(i)=i;
        else
            nFnopen(i)=0;
        end
    end

    % 2º)
    % a) Control "o" para discriminar las tareas que 'o' no pueda
    hacer:
    if pesos(o)<=pesos(osinc)
        for i=1:length(P)
            if nFnopen(i)~=0
                if
td(zonas(o),zt(i))+cc(i)+td(zt(i),zfinal)+tt(i)+(pesos(osinc)-pesos(o))>(tmax(o)-pesos(o))
                    nFonopen(i)=0;
                else
                    nFonopen(i)=nFnopen(i);
                end
            else
                nFonopen(i)=0;
            end
        end

        % b) Control "osinc" para discriminar las tareas que 'osinc' no
    pueda hacer:
        for i=1:length(P)
            if nFnopen(i)~=0
                if
td(zonas(osinc),zt(i))+cc(i)+td(zt(i),zfinal)+tt(i)>(tmax(osinc)-pesos(osinc))
                    nFosincnopen(i)=0;
            end
        end
    end

```

```

        else
            nFosincnopen(i)=nFnopen(i);
        end
    else
        nFosincnopen(i)=0;
    end
end
end
end

% 3º) Comparamos 'o' y 'osinc' para discriminar tareas que no
puedan hacer de manera conjunta:
for i=1:length(P)
    if nFnopen(i)~=0
        if nFonopen(i)~=0
            if nFonopen(i)==nFosincnopen(i)
                nFnopen(i)=i;
            else
                nFnopen(i)=0;
            end
        else
            nFnopen(i)=0;
        end
    else
        nFnopen(i)=0;
    end
end

% 4º) Reconstruyo el vector de probabilidades P:
for i=1:length(P)
    if nFnopen(i)==0
        P(i)=0;
    end
end

% 5º) Si 'sum(P)=0' ambos o alguno de los dos operarios
sincronizados deberían volver a CASA:
if sum(P)==0
    if (sum(nFonopen)~=0) & (sum(nFosincnopen)==0)
        % El operario 'osinc' regresa a CASA.
        pesos(osinc)=pesos(osinc)+td(zonas(osinc),zfinal);
        peso1=pesos(1);
        peso2=pesos(2);
        peso3=pesos(3);
        peso4=pesos(4);
        pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

        % Situamos la condición del operario 'o' como 'libre'
        conds(osinc)=0;
        cond1=conds(1);
        cond2=conds(2);
        cond3=conds(3);
        cond4=conds(4);
        conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

        % En la posición actual del operario colocamos un '0'
        como señal de que ha finalizado.
        if osinc==1
            o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
            pos1=pos1+1;
        end
        if osinc==2
            o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
            pos2=pos2+1;
        end
        if osinc==3
            o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
            pos3=pos3+1;
        end
        if osinc==4
            o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
            pos4=pos4+1;
        end

        % EL operario 'o' ha terminado y ya está en la zona 9.
        zonas(osinc)=zfinal;
        zona1=zonas(1);
        zona2=zonas(2);
    end
end

```

```

zona3=zonas(3);
zona4=zonas(4);
zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

pos=pos;

poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

% Situamos en '0' el operario que está en casa.
operarios(osinc)=0;
end
if (sum(nFosincnopen)~=0) & (sum(nFonopen)==0)
% El operario 'o' regresa a CASA.
pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zfinal);
peso1=pesos(1);
peso2=pesos(2);
peso3=pesos(3);
peso4=pesos(4);
pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

% Situamos la condición del operario 'o' como 'libre'
conds(o)=0;
cond1=conds(1);
cond2=conds(2);
cond3=conds(3);
cond4=conds(4);
conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

% En la posición actual del operario colocamos un '0'
como señal de que ha finalizado.
if o==1
o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
pos1=pos1+1;
end
if o==2
o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
pos2=pos2+1;
end
if o==3
o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
pos3=pos3+1;
end
if o==4
o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
pos4=pos4+1;
end

% EL operario 'o' ha terminado y ya está en la zona 9.
zonas(o)=zfinal;
zona1=zonas(1);
zona2=zonas(2);
zona3=zonas(3);
zona4=zonas(4);
zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

pos=pos;

poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

% Situamos en '0' el operario que está en casa.
operarios(o)=0;
end
if (sum(nFonopen)==0) & (sum(nFosincnopen)==0)
% Ambos operarios regresan a CASA:
pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zfinal);
pesos(osinc)=pesos(osinc)+td(zonas(osinc),zfinal);
peso1=pesos(1);
peso2=pesos(2);
peso3=pesos(3);
peso4=pesos(4);
pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

% Situamos la condición de los operarios como 'libre'
conds(o)=0;
conds(osinc)=0;
cond1=conds(1);
cond2=conds(2);

```

```

cond3=conds(3);
cond4=conds(4);
conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

% En la posición actual de los operarios colocamos un '0'
como señal de que ha finalizado.
if o==1
    o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
    pos1=pos1+1;
end
if o==2
    o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
    pos2=pos2+1;
end
if o==3
    o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
    pos3=pos3+1;
end
if o==4
    o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
    pos4=pos4+1;
end

if osinc==1
    o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
    pos1=pos1+1;
end
if osinc==2
    o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
    pos2=pos2+1;
end
if osinc==3
    o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
    pos3=pos3+1;
end
if osinc==4
    o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
    pos4=pos4+1;
end

% Los operarios han terminado y ya están en la zona 9.
zonas(o)=zfinal;
zonas(osinc)=zfinal;
zona1=zonas(1);
zona2=zonas(2);
zona3=zonas(3);
zona4=zonas(4);
zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

pos=pos;

poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

% Situamos en '0' el operario que está en casa.
operarios(o)=0;
operarios(osinc)=0;
end
if (sum(nFonopen)~=0) & (sum(nFosincnopen)~=0)
    % No hay tareas que puedan realizar de manera conjunta.
    P=STOP2622situacion_imposible;
end
else
    % Como 'sum(P)~=0' SÍ hay tareas conjuntas que puedan
ejecutar:
    suma=sum(P);

    if suma~=0
        P=P*(1/suma);
    end

    suma=0;

    for tarea=1:length(tt)
        suma=suma+P(tarea);
        P(tarea)=suma;
    end
end

```

```

h=rand(1);
numtarea=1;

while (h>P(numtarea))
    numtarea=numtarea+1;
end

tarea=tt(numtarea);

if ot(numtarea)==1
    tareas(o)=tarea;
    tarea1=tareas(1);
    tarea2=tareas(2);
    tarea3=tareas(3);
    tarea4=tareas(4);
    tareas=[tarea1 tarea2 tarea3 tarea4];

    numtareas(o)=numtarea;
    numtarea1=numtareas(1);
    numtarea2=numtareas(2);
    numtarea3=numtareas(3);
    numtarea4=numtareas(4);
    numtareas=[numtarea1 numtarea2 numtarea3 numtarea4];

    if (ct(numtarea)==conds(o))
        pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zt(numtarea))+tarea;
    else

pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tarea;
    end
    peso1=pesos(1);
    peso2=pesos(2);
    peso3=pesos(3);
    peso4=pesos(4);
    pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

    conds(o)=ct(numtarea);
    cond1=conds(1);
    cond2=conds(2);
    cond3=conds(3);
    cond4=conds(4);
    conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

    rt(pos)=tareas(o);
    rz(pos)=zt(numtarea);
    rc(pos)=ct(numtarea);
    ro(pos)=numtarea;

    if o==1
        o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
        pos1=pos1+1;
    end
    if o==2
        o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
        pos2=pos2+1;
    end
    if o==3
        o3(pos3)=tarea;
        op3(pos3)=pos;
        pos3=pos3+1;
    end
    if o==4
        o4(pos4)=tarea;
        op4(pos4)=pos;
        pos4=pos4+1;
    end

    zonas(o)=zt(numtarea);
    zona1=zonas(1);
    zona2=zonas(2);
    zona3=zonas(3);
    zona4=zonas(4);
    zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

    contt(numtarea)=0;
    contz(numtarea)=0;

```

```

pos=pos+1;
poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];
else
numtareas(o)=numtarea;
numtareas(osinc)=numtarea;
numtarea1=numtareas(1);
numtarea2=numtareas(2);
numtarea3=numtareas(3);
numtarea4=numtareas(4);
numtareas=[numtarea1 numtarea2 numtarea3 numtarea4];

tareas(o)=tarea;
tareas(osinc)=tarea;
tarea1=tareas(1);
tarea2=tareas(2);
tarea3=tareas(3);
tarea4=tareas(4);
tareas=[tarea1 tarea2 tarea3 tarea4];

conds(o)=ct(numtarea);
conds(osinc)=ct(numtarea);
cond1=conds(1);
cond2=conds(2);
cond3=conds(3);
cond4=conds(4);
conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

rt(pos)=tarea;
rz(pos)=zt(numtarea);
rc(pos)=ct(numtarea);
ro(pos)=numtarea;

if o==1
    o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
    pos1=pos1+1;
end
if o==2
    o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
    pos2=pos2+1;
end
if o==3
    o3(pos3)=tarea;
    op3(pos3)=pos;
    pos3=pos3+1;
end
if o==4
    o4(pos4)=tarea;
    op4(pos4)=pos;
    pos4=pos4+1;
end

if osinc==1
    o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
    pos1=pos1+1;
end
if osinc==2
    o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
    pos2=pos2+1;
end
if osinc==3
    o3(pos3)=tarea;
    op3(pos3)=pos;
    pos3=pos3+1;
end
if osinc==4
    o4(pos4)=tarea;
    op4(pos4)=pos;
    pos4=pos4+1;
end

if (ct(numtarea)~=rc(pos-1))

pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tarea;

pesos(osinc)=pesos(osinc)+td(zonas(osinc),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tarea;
else

```

```

        pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zt(numtarea))+tarea;

pesos(osinc)=pesos(osinc)+td(zonas(osinc),zt(numtarea))+tarea;
    end

    if pesos(o)<pesos(osinc)
        tesp(o)=tesp(o)+(pesos(osinc)-pesos(o));
        pesos(o)=pesos(osinc);
    else
        tesp(osinc)=tesp(osinc)+(pesos(o)-pesos(osinc));
        pesos(osinc)=pesos(o);
    end
    peso1=pesos(1);
    peso2=pesos(2);
    peso3=pesos(3);
    peso4=pesos(4);
    pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

    tesp1=tesp(1);
    tesp2=tesp(2);
    tesp3=tesp(3);
    tesp4=tesp(4);
    tesp=[tesp1 tesp2 tesp3 tesp4];

    zonas(o)=zt(numtarea);
    zonas(osinc)=zt(numtarea);
    zona1=zonas(1);
    zona2=zonas(2);
    zona3=zonas(3);
    zona4=zonas(4);
    zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

    contt(numtarea)=0;
    contz(numtarea)=0;

    pos=pos+1;
    poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];
end
end
end
if (sum(nFo)~=0) & (sum(nFosinc)~=0)
    % No hay tareas que puedan realizar de manera conjunta. Pensar qué
    hay que hacer aquí.
    STOP2823situacion_imposible
end
else
    % Como sum(P)~=0 sí hay tareas conjuntas que puedan ejecutar, por lo que
    procedemos de manera normal:

    suma=sum(P);

    if suma~=0
        P=P*(1/suma);
    end

    suma=0;

    for tarea=1:length(tt)
        suma=suma+P(tarea);
        P(tarea)=suma;
    end

    h=rand(1);
    numtarea=1;

    while (h>P(numtarea))
        numtarea=numtarea+1;
    end

    tarea=tt(numtarea);

    % Asigna la tarea a los operarios 'o' y 'osinc':
    numtareas(o)=numtarea;
    numtareas(osinc)=numtarea;
    numtarea1=numtareas(1);
    numtarea2=numtareas(2);

```

```

numtarea3=numtareas(3);
numtarea4=numtareas(4);
numtareas=[numtarea1 numtarea2 numtarea3 numtarea4];

tareas(o)=tarea;
tareas(osinc)=tarea;
tarea1=tareas(1);
tarea2=tareas(2);
tarea3=tareas(3);
tarea4=tareas(4);
tareas=[tarea1 tarea2 tarea3 tarea4];

conds(o)=ct(numtarea);
conds(osinc)=ct(numtarea);
cond1=conds(1);
cond2=conds(2);
cond3=conds(3);
cond4=conds(4);
conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

rt(pos)=tarea;
rz(pos)=zt(numtarea);
rc(pos)=ct(numtarea);
ro(pos)=numtarea;

if o==1
    o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
    pos1=pos1+1;
end
if o==2
    o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
    pos2=pos2+1;
end
if o==3
    o3(pos3)=tarea;
    op3(pos3)=pos;
    pos3=pos3+1;
end
if o==4
    o4(pos4)=tarea;
    op4(pos4)=pos;

    pos4=pos4+1;
end

if osinc==1
    o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
    pos1=pos1+1;
end
if osinc==2
    o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
    pos2=pos2+1;
end
if osinc==3
    o3(pos3)=tarea;
    op3(pos3)=pos;
    pos3=pos3+1;
end
if osinc==4
    o4(pos4)=tarea;
    op4(pos4)=pos;

    pos4=pos4+1;
end

if (ct(numtarea)~=rc(pos-1))
    pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tarea;

pesos(osinc)=pesos(osinc)+td(zonas(osinc),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tarea;
else
    pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zt(numtarea))+tarea;
    pesos(osinc)=pesos(osinc)+td(zonas(osinc),zt(numtarea))+tarea;
end
if pesos(o)<pesos(osinc)
    tresp(o)=tresp(o)+(pesos(osinc)-pesos(o));
    pesos(o)=pesos(osinc);
else

```

```

        tesp(osinc)=tesp(osinc)+(pesos(o)-pesos(o));
        pesos(osinc)=pesos(o);
    end
    peso1=pesos(1);
    peso2=pesos(2);
    peso3=pesos(3);
    peso4=pesos(4);
    pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

    tesp1=tesp(1);
    tesp2=tesp(2);
    tesp3=tesp(3);
    tesp4=tesp(4);
    tesp=[tesp1 tesp2 tesp3 tesp4];

    zonas(o)=zt(numtarea);
    zonas(osinc)=zt(numtarea);
    zona1=zonas(1);
    zona2=zonas(2);
    zona3=zonas(3);
    zona4=zonas(4);
    zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

    contt(numtarea)=0;
    contz(numtarea)=0;

    pos=pos+1;
    poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];
end
end
end
for i=1:length(pesos)
    if pesos(i)~=0
        if pesos(i)+td(zonas(i),zfinal)>tmax(i)
            STOPlinea23205Pesos_no_validos
        end
    end
end

% Cuando NO HAY SINCRONIZACIÓN REAL entre operarios:
if (osinc==0) & (sum(operarios)~=0)
    % Hacemos que la PROBABILIDAD de ejecutar tareas de 2 operarios sea '0':
    for c=1:length(tt)
        if (ot(c)==2)
            s(c)=0;
            S(c)=0;
        end
    end
end

P=s+S;
P2849=P;
if sum(P)==0 % Habrá PENALIZACIÓN porque se incumplen la RESTRICCIÓN DE
CONDICIONES DE OPERACIÓN:
    % Penalizamos a los operarios para poder llevar a cabo un "cambio de
condición"
    % Debemos introducir la penalización en los tiempos de espera.

    clear pesopen; clear ppenals;
    pesopen=pesos;
    PESOPEN2862=pesopen;
    ppenals=[0 0 0 0];

    clear pmax;
    if length(find(operarios))<4
        %disp('Utilizamos el vector PES para obtener el máximo en la línea 3133')
        pmax=max(pes);
    else
        pmax=max(pesos);
    end

    % Penalizamos añadiendo la espera de penalización para igualar pesos y que
puedan cambiar de condición:
    if length(find(operarios))<4
        for i=1:length(w)
            if pesopen(w(i))+td(zonas(w(i)),zfinal)+(pmax-
pesopen(w(i)))<tmax(w(i))

```

```

        ppenals(w(i))=(pmax-pesopen(w(i)));
        pesopen(w(i))=pmax;
    else
        ppenals(w(i))=0;
        % Mandamos al operario 'i' a casa:
        pesopen(w(i))=pesopen(w(i))+td(zonas(w(i)),zfinal);
        % Situamos la condición del operario 'o' como 'libre'
        conds(w(i))=0;
        % En la posición actual del operario colocamos un '0' como señal
de que ha finalizado.
        if w(i)==1
            o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
            pos1=pos1+1;
        end
        if w(i)==2
            o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
            pos2=pos2+1;
        end
        if w(i)==3
            o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
            pos3=pos3+1;
        end
        if w(i)==4
            o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
            pos4=pos4+1;
        end

        % EL operario 'o' ha terminado y ya está en la zona 9.
        zonas(w(i))=zfinal;

        pos=pos;

        poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

        % Situamos en '0' el operario que está en casa.
        operarios(w(i))=0;
    end
end
penal1=penals(1)+ppenals(1);
penal2=penals(2)+ppenals(2);
penal3=penals(3)+ppenals(3);
penal4=penals(4)+ppenals(4);
penals=[penal1 penal2 penal3 penal4];

tesp1=tesp(1)+ppenals(1);
tesp2=tesp(2)+ppenals(2);
tesp3=tesp(3)+ppenals(3);
tesp4=tesp(4)+ppenals(4);
tesp=[tesp1 tesp2 tesp3 tesp4];

peso1=pesopen(1);
peso2=pesopen(2);
peso3=pesopen(3);
peso4=pesopen(4);
pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

for i=1:length(pesos)
    if pesos(i)~=0
        if pesos(i)+td(zonas(i),zfinal)>tmax(i)
            STOPlinea3305pesoInvalido
        end
    end
end

cond1=conds(1);
cond2=conds(2);
cond3=conds(3);
cond4=conds(4);
conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

zonal=zonas(1);
zona2=zonas(2);
zona3=zonas(3);
zona4=zonas(4);
zonas=[zonal zona2 zona3 zona4];
else
    for i=1:length(pesopen)

```

```

if pesopen(i)+td(zonas(i),zfinal)+(pmax-pesopen(i))<tmax(i)
    ppenals(i)=(pmax-pesopen(i));
    pesopen(i)=pmax;
else
    ppenals(i)=0;
    % Mandamos al operario 'i' a casa:
    pesopen(i)=pesopen(i)+td(zonas(i),zfinal);
    % Situamos la condición del operario 'o' como 'libre'
    conds(i)=0;
    % En la posición actual del operario colocamos un '0' como señal
    de que ha finalizado.

    if i==1
        o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
        pos1=pos1+1;
    end
    if i==2
        o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
        pos2=pos2+1;
    end
    if i==3
        o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
        pos3=pos3+1;
    end
    if i==4
        o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
        pos4=pos4+1;
    end
    % El operario 'o' ha terminado y ya está en la zona 9.
    zonas(i)=zfinal;

    pos=pos;

    poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

    % Situamos en '0' el operario que está en casa.
    operarios(i)=0;
end
end
penal1=penals(1)+ppenals(1);
penal2=penals(2)+ppenals(2);
penal3=penals(3)+ppenals(3);
penal4=penals(4)+ppenals(4);
penals=[penal1 penal2 penal3 penal4];

tesp1=tesp(1)+ppenals(1);
tesp2=tesp(2)+ppenals(2);
tesp3=tesp(3)+ppenals(3);
tesp4=tesp(4)+ppenals(4);
tesp=[tesp1 tesp2 tesp3 tesp4];

peso1=pesopen(1);
peso2=pesopen(2);
peso3=pesopen(3);
peso4=pesopen(4);
pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

for i=1:length(pesos)
    if pesos(i)~=0
        if pesos(i)>tmax(i)
            STOPlinea3380pesoInvalido
        end
    end
end
end

cond1=conds(1);
cond2=conds(2);
cond3=conds(3);
cond4=conds(4);
conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

zonal=zonas(1);
zona2=zonas(2);
zona3=zonas(3);
zona4=zonas(4);
zonas=[zonal zona2 zona3 zona4];
end

```

```

for i=1:length(pesos)
    if pesos(i)+td(zonas(i),zfinal)>tmax(i)
        disp('Hemos penalizado en el bucle de la LN 3239 y por culpa de ello
mandaremos algún operario a casa...')
        pause
    end
end

% Hasta aquí tenemos a los operarios adecuadamente penalizados (y los
vectores 'pesos', 'penals' y 'tesp' fijados).
% Calculamos de nuevo las probabilidades 's' y 'S' sin considerar el respeto
de las Condiciones de Operación:
if sum(operarios)~=0
    s=zeros(1,length(tt));

    for c=1:length(tt)
        if td(zonas(o),zt(c))==0
            s(c)=0.1;
        else
            s(c)=td(zonas(o),zt(c));
        end
    end

    for c=1:length(tt)
        s(c)=s(c)^(-alfa);
    end

    for c=1:length(tt)
        if contt(c)==0
            s(c)=0;
        end
    end

    S=zeros(1,length(tt));

    ccm=cc;

    for c=1:length(tt)
        if (ct(c)==conds(o)) | (ct(c)==0)
            ccm(c)=0.1;
        end
    end

    for c=1:length(tt)
        S(c)=(ccm(c)) ^(-alfa);
    end

    ccm=cc;

    for c=1:length(tt)
        if contt(c)==0
            S(c)=0;
        end
    end

    P=s+S;
    P3044=P;

% Debido a la previa penalización, si hemos mandado a algún operario a
casa, recalculamos 'pes', 'wz' y 'wc':
%disp('Calcularemos de nuevo el vector PES con los operarios que restan
en la línea 3345')

clear pes; clear wz; clear wc; clear w;

if length(find(operarios))<4
    w=find(operarios);

    for i=1:length(w)
        %disp('Utilizamos el vector PES para quedarnos con los operarios
que restan en la línea 3352')
        pes(i)=pesos(w(i));
    end

%disp('Llamamos al vector PES en la línea 3356')
for i=1:length(pes)
    wc(i)=conds(w(i));
    wz(i)=zonas(w(i));
end

```

```

end
end

% Calculamos la nueva 'matriz de sincronización' por si estaban
sincronizados en "zona" pero no en "tiempo":
clear teop

if length(find(operarios))<4
for i=1:length(w)
for j=1:length(w)
teop(i,j)=abs(pesos(w(i))-pesos(w(j)));
end
end
else
for i=1:length(pesos)
for j=1:length(pesos)
teop(i,j)=abs(pesos(i)-pesos(j));
end
end
for i=1:length(pesos)
for j=1:length(pesos)
if i~=j
if (pesopen(i)==0) | (pesopen(j)==0)
teop(i,j)=100;
end
end
end
end
end

% Tras la penalización, vemos si hay 'sincronización real' entre el
operario 'o' y algún otro operario 'osinc':
osinc=0;

if length(find(operarios))<4
n=0;
for i=1:length(w)
if w(i)==o
n=i;
end
end
if n~=0
for i=1:length(w)
if w(i)~=o
if
((teop(n,i)<=3) & (teop(n,i)>=0)) & (zonas(o)==zonas(w(i)))
teop(n,i);
n;
osinc=w(i);
end
end
end
end
else
for i=1:length(pesos)
if i~=o
if ((teop(o,i)<=3) & (teop(o,i)>=0)) & (zonas(o)==zonas(i))
teop(o,i);
o;
osinc=i;
end
end
end
end

% CONTROL FINALIZACIÓN:
if n~=0
if osinc==0 % Si después de la penalización NO hay
sincronización:
% La penalización implica que hemos sumado un tiempo a los
operarios, ¿podrán hacerlo?

% 1º) Reconstruimos el vector P para que guarde, con su
respectivo número, todas las tareas susceptibles de ejecutarse:
for i=1:length(P)
if P(i)~=0
nF(i)=i;

```

```

else
    nF(i)=0;
end
end

% 2º) Discriminamos aquellas tareas que por la restricción de la
jornada laboral no pueda ejecutar:
if osinc==0
    for i=1:length(P)
        if nF(i)~=0
            if
td(zonas(o),zt(i))+cc(i)+td(zt(i),zfinal)+tt(i)>=(tmax(o)-pesopen(o))
                nF(i)=0;
            end
        end
    end
end

% 3º) Reconstruyo el vector de probabilidad P:
if sum(nF)~=0
    for i=1:length(P)
        if nF(i)==0
            P(i)=0;
        end
    end
else
    for i=1:length(P)
        if nF(i)==0
            P(i)=0;
        end
    end
end

P3158=P;

% 4º) Control Final:

if sum(P)==0 % FINALIZACIÓN: Mandamos al operario 'o' a casa:
    pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zfinal);
    peso1=pesos(1);
    peso2=pesos(2);
    peso3=pesos(3);
    peso4=pesos(4);
    pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

    % Situamos la condición del operario 'o' como 'libre'
    conds(o)=0;
    cond1=conds(1);
    cond2=conds(2);
    cond3=conds(3);
    cond4=conds(4);
    conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

    % En la posición actual del operario colocamos un '0' como
señal de que ha finalizado.
    if o==1
        o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
        pos1=pos1+1;
    end
    if o==2
        o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
        pos2=pos2+1;
    end
    if o==3
        o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
        pos3=pos3+1;
    end
    if o==4
        o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
        pos4=pos4+1;
    end

    % EL operario 'o' ha terminado y ya está en la zona 9.
    zonas(o)=zfinal;
    zona1=zonas(1);
    zona2=zonas(2);
    zona3=zonas(3);

```

```

zona4=zonas(4);
zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

pos=pos;

poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

% Situamos en '0' el operario que está en casa.
operarios(o)=0;
else % Queda alguna tarea que sí puede ejecutar el operario 'o':
suma=sum(P);

if suma~=0
    P=P*(1/suma);
end

suma=0;

for tarea=1:length(tt)
    suma=suma+P(tarea);
    P(tarea)=suma;
end

h=rand(1);
numtarea=1;

while (h>P(numtarea))
    numtarea=numtarea+1;
end

tarea=tt(numtarea);
%disp('Hemos seleccionado la tarea en la Línea 3647')
%numtarea

if ot(numtarea)==1 % Si la tarea seleccionada es de 1
operario

    tareas(o)=tarea;
    tarea1=tareas(1);
    tarea2=tareas(2);
    tarea3=tareas(3);
    tarea4=tareas(4);
    tareas=[tarea1 tarea2 tarea3 tarea4];

    numtareas(o)=numtarea;
    numtarea1=numtareas(1);
    numtarea2=numtareas(2);
    numtarea3=numtareas(3);
    numtarea4=numtareas(4);
    numtareas=[numtarea1 numtarea2 numtarea3 numtarea4];

    if length(find(operarios))<4
        for i=1:length(w)
            if w(i)~=o % Sumamos el CAMBIO DE CONDICIÓN a los
operarios que no son 'o'
                if
pesos(w(i))+cc(numtarea)+td(zonas(w(i)),zfinal)>tmax(w(i))
                    % Mandamos al operario 'i' a casa:
                    ppenals(w(i))=0;

pesopen(w(i))=pesopen(w(i))+td(zonas(w(i)),zfinal); % Situamos la condición del operario 'o'
como 'libre'
                    conds(w(i))=0;
                    % En la posición actual del operario
colocamos un '0' como señal de que ha finalizado.
                    if w(i)==1
                        o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
                        pos1=pos1+1;
                    end
                    if w(i)==2
                        o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
                        pos2=pos2+1;
                    end
                    if w(i)==3
                        o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
                        pos3=pos3+1;
                    end
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```

```

en la zona 9.
casa.
(conds(w(i))==0) | (conds(w(i))==ct(numtarea))

if w(i)==4
    o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
    pos4=pos4+1;
end
% El operario 'o' ha terminado y ya está
zonas(w(i))=zfinal;
pos=pos;
poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];
% Situamos en '0' el operario que está en
operarios(w(i))=0;
else
if
    pesos(w(i))=pesos(w(i));
    conds(w(i))=conds(w(i));
else
    pesos(w(i))=pesos(w(i))+cc(numtarea);
    conds(w(i))=ct(numtarea);
end
end
else % Sumamos el CAMBIO DE CONDICIÓN, el
DESPLAZAMIENTO y la EJECUCIÓN al operario 'o'
pesos(w(i))=pesos(w(i))+td(zonas(w(i)),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tt(numtarea);
conds(w(i))=ct(numtarea);
end
end
else
for i=1:length(pesos)
if i~=o % Sumamos el CAMBIO DE CONDICIÓN a los
operarios que no son 'o'
if
pesos(i)+cc(numtarea)+td(zonas(i),zfinal)>tmax(i)
% Mandamos al operario 'i' a casa:
ppenals(i)=0;
% Situamos la condición del operario 'o'
conds(i)=0;
% En la posición actual del operario
colocamos un '0' como señal de que ha finalizado.
if i==1
    o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
    pos1=pos1+1;
end
if i==2
    o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
    pos2=pos2+1;
end
if i==3
    o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
    pos3=pos3+1;
end
if i==4
    o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
    pos4=pos4+1;
end
% El operario 'o' ha terminado y ya está
zonas(i)=zfinal;
pos=pos;
poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];
% Situamos en '0' el operario que está en
operarios(i)=0;
else
if (conds(i)==0) | (conds(i)==ct(numtarea))
    pesos(i)=pesos(i);

```

```

                                conds(i)=conds(i);
                                else
                                pesos(i)=pesos(i)+cc(numtarea);
                                conds(i)=ct(numtarea);
                                end
                                end
                                else % Sumamos el CAMBIO DE CONDICIÓN, el
DESPLAZAMIENTO y la EJECUCIÓN al operario 'o'
                                pesos(i)=pesos(i)+td(zonas(i),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tt(numtarea);
                                conds(i)=ct(numtarea);
                                end
                                end
                                end
                                peso1=pesos(1);
                                peso2=pesos(2);
                                peso3=pesos(3);
                                peso4=pesos(4);
                                pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

                                cond1=conds(1);
                                cond2=conds(2);
                                cond3=conds(3);
                                cond4=conds(4);
                                conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

                                rt(pos)=tareas(o);
                                rz(pos)=zt(numtarea);
                                rc(pos)=ct(numtarea);
                                ro(pos)=numtarea;

                                if o==1
                                o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
                                pos1=pos1+1;
                                end
                                if o==2
                                o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
                                pos2=pos2+1;
                                end
                                if o==3
                                o3(pos3)=tarea;
                                op3(pos3)=pos;
                                pos3=pos3+1;
                                end
                                if o==4
                                o4(pos4)=tarea;
                                op4(pos4)=pos;

                                pos4=pos4+1;
                                end
                                zonas(o)=zt(numtarea);
                                zona1=zonas(1);
                                zona2=zonas(2);
                                zona3=zonas(3);
                                zona4=zonas(4);
                                zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

                                contt(numtarea)=0;
                                contz(numtarea)=0;

                                pos=pos+1;
                                poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

                                else % Si la tarea seleccionada es de 2 operarios:
                                if osinc==0

                                % Seleccionaremos una tarea de 1 operario manteniendo
's' y 'S' y haciendo que la "P(tareas2operar)=0":
                                % Pero, ¿y si no quedan más tareas de 1 operario?
                                Intentamos controlar dicha situación:

                                P=P3158;

                                % Creo un vector 't1' para controlar si quedan tareas
de 1 operario:

                                t1=contt;
                                for i=1:length(tt)

```

```

if ((contt(i)~=0) & (ot(i)~=2) & (P(i)~=0))
    t1(i)=ot(i);
else
    t1(i)=0;
end
end

if sum(t1)==0
    % Significará que no pueden ejecutar más tareas
de 1 operario sino sólo tareas de 2 operarios:
    if (length(find(operarios))==1) & (osinc==0)
        % Mandamos al operario 'o' a CASA:
        pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zfinal);
        peso1=pesos(1);
        peso2=pesos(2);
        peso3=pesos(3);
        peso4=pesos(4);
        pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

        % Situamos la condición del operario 'o' como
'libre'

        conds(o)=0;
        cond1=conds(1);
        cond2=conds(2);
        cond3=conds(3);
        cond4=conds(4);
        conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

        % En la posición actual del operario
colocamos un '0' como señal de que ha finalizado.
        if o==1
            o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
            pos1=pos1+1;
        end
        if o==2
            o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
            pos2=pos2+1;
        end
        if o==3
            o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
            pos3=pos3+1;
        end
        if o==4
            o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
            pos4=pos4+1;
        end
        end

        % EL operario 'o' ha terminado y ya está en
la zona 9.

        zonas(o)=zfinal;
        zona1=zonas(1);
        zona2=zonas(2);
        zona3=zonas(3);
        zona4=zonas(4);
        zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

        pos=pos;

        poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

        % Situamos en '0' el operario que está en
casa.

        operarios(o)=0;
    else
        % Creo un vector 'p2' que guarda las tareas
de 2 operarios que faltan por ejecutar:
        j=1;
        for i=1:150
            if contt(i)~=0
                if ot(i)==2
                    p2(j)=contt(i);
                    j=j+1;
                end
            end
        end
        end
        %disp('Calculamos en la línea 3889 el vector
"p2"')

```

```

%p2

% IMPORTANTE: Hasta aquí ya TENEMOS ASIGNADA
una tarea 'numtarea' de 2 operarios para ejecutar:
% Además, tenemos pesos igualados (por la
penalización) para lograr sincronización de tiempo.
% Añadimos a "pesos" el tiempo de "CAMBIO DE
CONDICIÓN" de los operarios

condpen=conds;
pesopen=pesos;

if length(find(operarios))<4
for i=1:length(w)
if w(i)~=0
if
((condpen(w(i))~=ct(numtarea)) & (condpen(w(i))~=0))
pesopen(w(i))=pesopen(w(i))+cc(numtarea);
condpen(w(i))=ct(numtarea);
end
else
if
((condpen(w(i))~=ct(numtarea)) & (condpen(w(i))~=0))
pesopen(w(i))=pesopen(w(i))+cc(numtarea);
condpen(w(i))=ct(numtarea);
end
end
else
for i=1:length(pesos)
if i~=0
if
((condpen(i)~=ct(numtarea)) & (condpen(i)~=0))
pesopen(i)=pesopen(i)+cc(numtarea);
condpen(i)=ct(numtarea);
end
else
if
((condpen(i)~=ct(numtarea)) & (condpen(i)~=0))
pesopen(i)=pesopen(i)+cc(numtarea);
condpen(i)=ct(numtarea);
end
end
end
end

% Aquí, operarios están SINCRONIZADOS EN
TIEMPO y con la "CONDICIÓN DE OPERACIÓN" necesaria
% Debemos SELECCIONAR el OPERARIO 'osinc' más
adecuado que acompañe al operario 'o'
% Faltará considerar el tiempo de
desplazamiento para juntar a los operarios:

% Si algún operario está en la zona de la
tarea seleccionado, será 'osinc':
if length(find(operarios))<4
for i=1:length(w)
if w(i)~=0
if zt(numtarea)==zonas(w(i))
osinc=w(i);
end
end
end
else
for i=1:length(pesos)
if i~=0
if zt(numtarea)==zonas(i)
osinc=i;
end
end
end
end
end

```

```

tarea seleccionada:
este de la zona de la tarea a ejecutar:
la línea 3830')

línea 3835')

distancia en la línea 3838')

distancia(j)=td(zonas(w(i)),zt(numtarea));

distancia en la línea 3856')

distancia(j)=td(zonas(w(i)),zt(numtarea));

zona correspondiente donde se debe ejecutar la tarea
adecuadamente penalizados).

if
pesopen(o)+td(zonas(o),zt(numtarea))+td(zt(numtarea),zfinal)>tmax(o)
operario OSINC a casa:')

el desplazamiento, ni la espera:

% Si ningún operario está en la zona de la
% 'osinc' será aquel operario que más cerca
%disp('El programa se para en este bucle de
clear distancia; clear dist;

if osinc==0
j=1;
if length(find(operarios))<4
%disp('Utilizamos el vector PES en la

for i=1:length(pes)
if w(i)~=0
%disp('No llega a leer la

dist(j)=w(i);
j=j+1;
end
end
[ minimo,x]=min(distancia);
osinc=dist(x);
else
pes=pesos;
w=find(operarios);
wz=zonas;
wc=conds;
j=1;
for i=1:length(pes)
if w(i)~=0
%disp('No llega a leer la

dist(j)=w(i);
j=j+1;
end
end
[ minimo,x]=min(distancia);
osinc=dist(x);
end
end

% DESPLAZAMOS al operario 'o' u 'osinc' a la
% (Hasta aquí ya teníamos a los operarios

if
pesos(o)=PESOS500(o)+td(zonas(o),zfinal);
peso1=pesos(1);
peso2=pesos(2);
peso3=pesos(3);
peso4=pesos(4);
pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

tesp1=TESP500(1);
tesp2=TESP500(2);
tesp3=TESP500(3);
tesp4=TESP500(4);
tesp=[tesp1 tesp2 tesp3 tesp4];

penal1=PENALS500(1);
penal2=PENALS500(2);
penal3=PENALS500(3);
penal4=PENALS500(4);
penal=[penal1 penal2 penal3 penal4];

```

```

como 'libre'

colocamos un '0' como señal de que ha finalizado.

en la zona 9.

vuelve a casa.

pesopen(o)=pesopen(o)+td(zonas(o),zt(numtarea));

pesopen(osinc)+td(zonas(osinc),zt(numtarea))+td(zt(numtarea),zfinal)>tmax(osinc)
operario OSINC a casa:')

el desplazamiento, ni la espera:

pesos(osinc)=PESOS500(osinc)+td(zonas(o),zfinal);

'osinc' como 'libre'

'osinc' colocamos un '0' como señal de que ha finalizado.

```

```

% Situamos la condición del operario 'o'
conds(o)=0;

% En la posición actual del operario 'o'
if o==1
    o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
    pos1=pos1+1;
end
if o==2
    o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
    pos2=pos2+1;
end
if o==3
    o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
    pos3=pos3+1;
end
if o==4
    o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
    pos4=pos4+1;
end

% El operario 'o' ha terminado y ya está
zonas(o)=zfinal;

pos=pos;

poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

% Situamos en '0' el operario 'o' que
operarios(o)=0;
else
if
%disp('En la linea 4051 mandamos al
% MANDAMOS OPERARIO 'osinc' A CASA.
% No consideramos ni la penalización ni
peso1=pesos(1);
peso2=pesos(2);
peso3=pesos(3);
peso4=pesos(4);
pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

tesp1=TESP500(1);
tesp2=TESP500(2);
tesp3=TESP500(3);
tesp4=TESP500(4);
tesp=[tesp1 tesp2 tesp3 tesp4];

penal1=PENALS500(1);
penal2=PENALS500(2);
penal3=PENALS500(3);
penal4=PENALS500(4);
penal=[penal1 penal2 penal3 penal4];

% Situamos la condición del operario
conds(osinc)=0;

% En la posición actual del operario
if osinc==1
    o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
    pos1=pos1+1;
end

```

```

if osinc==2
    o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
    pos2=pos2+1;
end
if osinc==3
    o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
    pos3=pos3+1;
end
if osinc==4
    o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
    pos4=pos4+1;
end

% El operario 'osinc' ha terminado y ya
zonas(osinc)=zfinal;

pos=pos;

poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

% Situamos en '0' el operario 'osinc' que
operarios(osinc)=0;

else

pesopen(osinc)=pesopen(osinc)+td(zonas(osinc),zt(numtarea));
end

%
zona de la tarea:')
%
%
%
%
%
%
%
%
%
%
alguno tendrá que ESPERAR

pesopen(o);

ptesp(osinc)=ptesp(osinc)+(pesopen(o)-pesopen(osinc));

DESPLAZAMIENTO:
'esperar' tienen tiempo para ejecutar la 'tarea de 2 operarios' seleccionada:
if
(tt(numtarea)+td(zt(numtarea),zfinal)>(tmax(o)-
pesopen(o)))|(tt(numtarea)+td(zt(numtarea),zfinal)>(tmax(osinc)-pesopen(osinc)))
    disp('Alguno o ambos operarios "o"
y "osinc" deben regresar a casa...')
    disp('Presiona INTRO para
continuar...')
    pause
    if
        (tt(numtarea)+td(zt(numtarea),zfinal)>(tmax(o)-
pesopen(o)))&(tt(numtarea)+td(zt(numtarea),zfinal)>(tmax(osinc)-pesopen(osinc)))
            % El desplazamiento no es
factible:
            % MANDAMOS AMBOS OPERARIOS 'o' Y
'osinc' A CASA:

```

```

ambos operarios a casa:')
penalización ni el desplazamiento, ni la espera:
pesos(o)=PESOS500(o)+td(zonas(o),zfinal);
pesos(osinc)=PESOS500(osinc)+td(zonas(o),zfinal);

penal4];

operarios 'o' y 'osinc' como 'libre'

operarios 'o' y 'osinc' colocamos un '0' como señal de que
terminado y ya está en la zona 9.

%disp('En la línea 4130 mandamos
% No consideramos ni la

peso1=pesos(1);
peso2=pesos(2);
peso3=pesos(3);
peso4=pesos(4);
pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

tesp1=TESP500(1);
tesp2=TESP500(2);
tesp3=TESP500(3);
tesp4=TESP500(4);
tesp=[tesp1 tesp2 tesp3 tesp4];

penal1=PENALS500(1);
penal2=PENALS500(2);
penal3=PENALS500(3);
penal4=PENALS500(4);
penal=[penal1 penal2 penal3

% Situamos la condición de los

conds(o)=0;
conds(osinc)=0;

% En la posición actual de los
ha finalizado.
if o==1
    o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
    pos1=pos1+1;
end
if o==2
    o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
    pos2=pos2+1;
end
if o==3
    o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
    pos3=pos3+1;
end
if o==4
    o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
    pos4=pos4+1;
end

if osinc==1
    o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
    pos1=pos1+1;
end
if osinc==2
    o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
    pos2=pos2+1;
end
if osinc==3
    o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
    pos3=pos3+1;
end
if osinc==4
    o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
    pos4=pos4+1;
end

% Los operarios 'o' y 'osinc' han

zonas(o)=zfinal;
zonas(osinc)=zfinal;

pos=pos;

poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

```

```

porque vuelven a casa.

% Situamos en '0' ambos operarios
operarios(o)=0;
operarios(osinc)=0;
else
if
(tt(numtarea)+td(zt(numtarea),zfinal)>(tmax(o)-pesopen(o)))
%
mandamos al operario O a casa:')
%
continuar...')
%
CASA:
penalización ni el desplazamiento, ni la espera:
pesos(o)=PESOS500(o)+td(zonas(o),zfinal);

peso4];

tesp4];

penal4];

operario 'o' como 'libre'

operario 'o' colocamos un '0' como señal de que ha finalizado.

terminado y ya está en la zona 9.

'o' que vuelve a casa.

disp('En la linea 4204
disp('Presione INTRO para
pause
% MANDAMOS AL OPERARIO 'o' a
% No consideramos ni la
peso1=pesos(1);
peso2=pesos(2);
peso3=pesos(3);
peso4=pesos(4);
pesos=[peso1 peso2 peso3
tesp1=TESP500(1);
tesp2=TESP500(2);
tesp3=TESP500(3);
tesp4=TESP500(4);
tesp=[tesp1 tesp2 tesp3
penal1=PENALS500(1);
penal2=PENALS500(2);
penal3=PENALS500(3);
penal4=PENALS500(4);
penal=[penal1 penal2 penal3
% Situamos la condición del
conds(o)=0;
% En la posición actual del
if o==1
o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
pos1=pos1+1;
end
if o==2
o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
pos2=pos2+1;
end
if o==3
o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
pos3=pos3+1;
end
if o==4
o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
pos4=pos4+1;
end
% El operario 'o' ha
zonas(o)=zfinal;
pos=pos;
poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];
% Situamos en '0' el operario
operarios(o)=0;
end
if
(tt(numtarea)+td(zt(numtarea),zfinal)>(tmax(osinc)-pesopen(osinc)))

```

```

% Mandamos al operario OSINC a casa:')
%
% continuar...')
%
CASA.

penalización ni el desplazamiento, ni la espera:

pesos(osinc)=PESOS500(osinc)+td(zonas(o),zfinal);

peso4];

tesp4];

penal4];

operario 'osinc' como 'libre'

operario 'osinc' colocamos un '0' como señal de que ha finalizado.

terminado y ya está en la zona 9.

'osinc' que vuelve a casa.

operarios':

pesopen(osinc)=pesopen(osinc)+tt(numtarea);

disp('En la linea 4258
disp('Presiona INTRO para
pause
% MANDAMOS OPERARIO 'osinc' A
% No consideramos ni la

peso1=pesos(1);
peso2=pesos(2);
peso3=pesos(3);
peso4=pesos(4);
pesos=[peso1 peso2 peso3

tesp1=TESP500(1);
tesp2=TESP500(2);
tesp3=TESP500(3);
tesp4=TESP500(4);
tesp=[tesp1 tesp2 tesp3

penal1=PENALS500(1);
penal2=PENALS500(2);
penal3=PENALS500(3);
penal4=PENALS500(4);
penal=[penal1 penal2 penal3

% Situamos la condición del
conds(osinc)=0;

% En la posición actual del
if osinc==1
o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
pos1=pos1+1;
end
if osinc==2
o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
pos2=pos2+1;
end
if osinc==3
o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
pos3=pos3+1;
end
if osinc==4
o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
pos4=pos4+1;
end

% El operario 'osinc' ha
zonas(osinc)=zfinal;

pos=pos;

poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

% Situamos en '0' el operario
operarios(osinc)=0;
end
end
else
% Sí pueden EJECUTAR la 'tarea de 2
pesopen(o)=pesopen(o)+tt(numtarea);

peso1=pesopen(1);
peso2=pesopen(2);
peso3=pesopen(3);

```

```

peso4=pesopen(4);
pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

tesp1=ptesp(1);
tesp2=ptesp(2);
tesp3=ptesp(3);
tesp4=ptesp(4);
tesp=[tesp1 tesp2 tesp3 tesp4];

penal1=penals(1);
penal2=penals(2);
penal3=penals(3);
penal4=penals(4);
penals=[penal1 penal2 penal3 penal4];

numtareas(o)=numtarea;
numtareas(osinc)=numtarea;
numtarea1=numtareas(1);
numtarea2=numtareas(2);
numtarea3=numtareas(3);
numtarea4=numtareas(4);
numtareas=[numtarea1 numtarea2
numtarea3 numtarea4];

tareas(o)=tarea;
tareas(osinc)=tarea;
tarea1=tareas(1);
tarea2=tareas(2);
tarea3=tareas(3);
tarea4=tareas(4);
tareas=[tarea1 tarea2 tarea3 tarea4];

cond1=condpen(1);
cond2=condpen(2);
cond3=condpen(3);
cond4=condpen(4);
conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

rt(pos)=tarea;
rz(pos)=zt(numtarea);
rc(pos)=ct(numtarea);
ro(pos)=numtarea;

if o==1
    o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
    pos1=pos1+1;
end
if o==2
    o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
    pos2=pos2+1;
end
if o==3
    o3(pos3)=tarea;
    op3(pos3)=pos;
    pos3=pos3+1;
end
if o==4
    o4(pos4)=tarea;
    op4(pos4)=pos;

    pos4=pos4+1;
end

if osinc==1
    o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
    pos1=pos1+1;
end
if osinc==2
    o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
    pos2=pos2+1;
end
if osinc==3
    o3(pos3)=tarea;
    op3(pos3)=pos;
    pos3=pos3+1;
end
if osinc==4

```

```

        o4(pos4)=tarea;
        op4(pos4)=pos;

        pos4=pos4+1;
    end

    zonas(o)=zt(numtarea);
    zonas(osinc)=zt(numtarea);
    zona1=zonas(1);
    zona2=zonas(2);
    zona3=zonas(3);
    zona4=zonas(4);
    zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

    contt(numtarea)=0;
    contz(numtarea)=0;

    pos=pos+1;
    poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];
end
end
end
else % Si sum(t1)~=0 quedan tareas de 1 operario que
ejecutará 'o':

    P=P3158;

    for i=1:length(P)
        if t1(i)==0
            P(i)=0;
        end
    end

    suma=sum(P);
    if suma~=0
        P=P*(1/suma);
    end

    suma=0;

    for tarea=1:length(tt)
        suma=suma+P(tarea);
        P(tarea)=suma;
    end

    h=rand(1);
    numtarea=1;

    while (h>P(numtarea))
        numtarea=numtarea+1;
    end

    tarea=tt(numtarea);

    % Asignamos dicha tarea al operario 'o':
    tareas(o)=tarea;
    tarea1=tareas(1);
    tarea2=tareas(2);
    tarea3=tareas(3);
    tarea4=tareas(4);
    tareas=[tarea1 tarea2 tarea3 tarea4];

    numtareas(o)=numtarea;
    numtarea1=numtareas(1);
    numtarea2=numtareas(2);
    numtarea3=numtareas(3);
    numtarea4=numtareas(4);
    numtareas=[numtarea1 numtarea2 numtarea3
numtarea4];

    % Este bucle es el que provoca un ERROR:
    if length(find(operarios))<4
        for i=1:length(w)
            if w(i)~=0
                if
                    pesos(w(i))+cc(numtarea)+td(zonas(w(i)),zfinal)>tmax(w(i))
                    % Mandamos al operario'i' a casa:

```

```

pesopen(w(i))=pesopen(w(i))+td(zonas(w(i)),zfinal);
operario 'o' como 'libre'

operario colocamos un '0' como señal de que ha finalizado.

ya está en la zona 9.

está en casa.

pesos(w(i))=pesos(w(i))+cc(numtarea);

pesos(w(i))=pesos(w(i))+td(zonas(w(i)),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tt(numtarea);

pesos(i)+cc(numtarea)+td(zonas(i),zfinal)>tmax(i)

pesopen(i)=pesopen(i)+td(zonas(i),zfinal);
operario 'o' como 'libre'

operario colocamos un '0' como señal de que ha finalizado.

ppenals(w(i))=0;
% Situamos la condición del
conds(w(i))=0;
% En la posición actual del
if w(i)==1
    o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
    pos1=pos1+1;
end
if w(i)==2
    o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
    pos2=pos2+1;
end
if w(i)==3
    o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
    pos3=pos3+1;
end
if w(i)==4
    o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
    pos4=pos4+1;
end
% El operario 'o' ha terminado y
zonas(w(i))=zfinal;

pos=pos;

poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

% Situamos en '0' el operario que
operarios(w(i))=0;
else
    conds(w(i))=ct(numtarea);
end
else
    conds(w(i))=ct(numtarea);
end
end
for i=1:4
    if i~=0
        if
            % Mandamos al operario 'i' a casa:
            ppenals(i)=0;

            % Situamos la condición del
            conds(i)=0;
            % En la posición actual del
            if i==1
                o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
                pos1=pos1+1;
            end
            if i==2
                o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
                pos2=pos2+1;
            end
            if i==3
                o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
                pos3=pos3+1;
            end
            if i==4
                o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
                pos4=pos4+1;
            end
        end
    end
end

```

```

ya está en la zona 9.

está en casa.

% El operario 'o' ha terminado y
zonas(i)=zfinal;
pos=pos;
poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];
% Situamos en '0' el operario que
operarios(i)=0;
else
pesos(i)=pesos(i)+cc(numtarea);
conds(i)=ct(numtarea);
end
else
pesos(i)=pesos(i)+td(zonas(i),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tt(numtarea);
conds(i)=ct(numtarea);
end
end
end
peso1=pesos(1);
peso2=pesos(2);
peso3=pesos(3);
peso4=pesos(4);
pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

cond1=conds(1);
cond2=conds(2);
cond3=conds(3);
cond4=conds(4);
conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

rt(pos)=tareas(o);
rz(pos)=zt(numtarea);
rc(pos)=ct(numtarea);
ro(pos)=numtarea;

if o==1
o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
pos1=pos1+1;
end
if o==2
o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
pos2=pos2+1;
end
if o==3
o3(pos3)=tarea;
op3(pos3)=pos;
pos3=pos3+1;
end
if o==4
o4(pos4)=tarea;
op4(pos4)=pos;

pos4=pos4+1;
end

zonas(o)=zt(numtarea);
zona1=zonas(1);
zona2=zonas(2);
zona3=zonas(3);
zona4=zonas(4);
zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

contt(numtarea)=0;
contz(numtarea)=0;

pos=pos+1;
poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];
end
else
numtareas(o)=numtarea;
numtareas(osinc)=numtarea;
numtarea1=numtareas(1);
numtarea2=numtareas(2);

```

```

numtarea3=numtareas(3);
numtarea4=numtareas(4);
numtareas=[numtarea1 numtarea2 numtarea3 numtarea4];

tareas(o)=tarea;
tareas(osinc)=tarea;
tarea1=tareas(1);
tarea2=tareas(2);
tarea3=tareas(3);
tarea4=tareas(4);
tareas=[tarea1 tarea2 tarea3 tarea4];

for i=1:4
    if (i~=o)&(i~=osinc)
        pesos(i)=pesos(i)+cc(numtarea);
        conds(i)=ct(numtarea);
    else
pesos(i)=pesos(i)+td(zonas(i),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tt(numtarea);
        conds(i)=ct(numtarea);
    end
end

conds(o)=ct(numtarea);
conds(osinc)=ct(numtarea);
cond1=conds(1);
cond2=conds(2);
cond3=conds(3);
cond4=conds(4);
conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

rt(pos)=tarea;
rz(pos)=zt(numtarea);
rc(pos)=ct(numtarea);
ro(pos)=numtarea;

if o==1
    o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
    pos1=pos1+1;
end
if o==2
    o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
    pos2=pos2+1;
end
if o==3
    o3(pos3)=tarea;
    op3(pos3)=pos;
    pos3=pos3+1;
end
if o==4
    o4(pos4)=tarea;
    op4(pos4)=pos;

    pos4=pos4+1;
end

if osinc==1
    o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
    pos1=pos1+1;
end
if osinc==2
    o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
    pos2=pos2+1;
end
if osinc==3
    o3(pos3)=tarea;
    op3(pos3)=pos;
    pos3=pos3+1;
end
if osinc==4
    o4(pos4)=tarea;
    op4(pos4)=pos;

    pos4=pos4+1;
end

if pesos(o)<pesos(osinc)

```

```

        tresp(o)=tresp(o)+(pesos(osinc)-pesos(o));
        pesos(o)=pesos(osinc);
    else
        tresp(osinc)=tresp(osinc)+(pesos(o)-pesos(osinc));
        pesos(osinc)=pesos(o);
    end
    peso1=pesos(1);
    peso2=pesos(2);
    peso3=pesos(3);
    peso4=pesos(4);
    pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

    tresp1=tresp(1);
    tresp2=tresp(2);
    tresp3=tresp(3);
    tresp4=tresp(4);
    tresp=[tresp1 tresp2 tresp3 tresp4];

    zonas(o)=zt(numtarea);
    zonas(osinc)=zt(numtarea);
    zona1=zonas(1);
    zona2=zonas(2);
    zona3=zonas(3);
    zona4=zonas(4);
    zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

    contt(numtarea)=0;
    contz(numtarea)=0;

    pos=pos+1;
    poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];
end
end
end
else % Si después de la penalización SÍ HAY SINCRONIZACIÓN:
% CONTROL FINAL:

P=P3044;

% 1º) Creamos un vector que guarde, con su respectivo número,
todas las tareas susceptibles de ejecutarse:
for i=1:length(P)
    if P(i)~=0
        nF(i)=i;
    else
        nF(i)=0;
    end
end

% 2º)
% a) Control "o" para discriminar las tareas que 'o' no pueda
hacer:

if pesos(o) <= pesos(osinc)
    for i=1:length(P)
        if nF(i)~=0
            if
td(zonas(o),zt(i))+cc(i)+td(zt(i),zfinal)+tt(i)>(tmax(o)-pesos(o))
                nFo(i)=0;
            else
                nFo(i)=nF(i);
            end
        else
            nFo(i)=0;
        end
    end

    % b) Control "osinc" para discriminar las tareas que 'osinc' no
pueda hacer:

    for i=1:length(P)
        if nF(i)~=0
            if
td(zonas(osinc),zt(i))+cc(i)+td(zt(i),zfinal)+tt(i)>(tmax(osinc)-pesos(osinc))
                nFosinc(i)=0;
            else
                nFosinc(i)=nF(i);
            end
        else
            nFosinc(i)=0;
        end
    end
end
end
end
end

```

```

end
end
end

% 3º) Comparamos 'o' y 'osinc' para discriminar tareas que no
puedan hacer de manera conjunta:
for i=1:length(P)
    if nF(i)~=0
        if nFo(i)~=0
            if nFo(i)==nFosinc(i)
                nF(i)=i;
            else
                nF(i)=0;
            end
        else
            nF(i)=0;
        end
    else
        nF(i)=0;
    end
end

% 4º) Reconstruyo el vector de probabilidades P:
for i=1:length(P)
    if nF(i)==0
        P(i)=0;
    end
end

if sum(P)==0
    if (sum(nFo)==0) & (sum(nFosinc)~=0)
        % Mandamos al operario 'o' a CASA:
        pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zfinal);
        peso1=pesos(1);
        peso2=pesos(2);
        peso3=pesos(3);
        peso4=pesos(4);
        pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

        % Situamos la condición del operario 'o' como 'libre'
        conds(o)=0;
        cond1=conds(1);
        cond2=conds(2);
        cond3=conds(3);
        cond4=conds(4);
        conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

        % En la posición actual del operario colocamos un '0'
        como señal de que ha finalizado.
        if o==1
            o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
            pos1=pos1+1;
        end
        if o==2
            o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
            pos2=pos2+1;
        end
        if o==3
            o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
            pos3=pos3+1;
        end
        if o==4
            o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
            pos4=pos4+1;
        end

        % El operario 'o' ha terminado y ya está en la zona 9.
        zonas(o)=zfinal;
        zonal=zonas(1);
        zona2=zonas(2);
        zona3=zonas(3);
        zona4=zonas(4);
        zonas=[zonal zona2 zona3 zona4];

        pos=pos;

        poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];
    end
end

```

```

% Situamos en '0' el operario que está en casa.
operarios(o)=0;
end
if (sum(nFo)==0) & (sum(nFosinc)==0)
% Ambos operarios regresan a CASA:
pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zfinal);
pesos(osinc)=pesos(osinc)+td(zonas(osinc),zfinal);
peso1=pesos(1);
peso2=pesos(2);
peso3=pesos(3);
peso4=pesos(4);
pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

% Situamos la condición de los operarios como 'libre'
conds(o)=0;
conds(osinc)=0;
cond1=conds(1);
cond2=conds(2);
cond3=conds(3);
cond4=conds(4);
conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

% En la posición actual de los operarios colocamos un '0'
como señal de que ha finalizado.
if o==1
o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
pos1=pos1+1;
end
if o==2
o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
pos2=pos2+1;
end
if o==3
o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
pos3=pos3+1;
end
if o==4
o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
pos4=pos4+1;
end

if osinc==1
o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
pos1=pos1+1;
end
if osinc==2
o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
pos2=pos2+1;
end
if osinc==3
o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
pos3=pos3+1;
end
if osinc==4
o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
pos4=pos4+1;
end

% Los operarios han terminado y ya están en la zona 9.
zonas(o)=zfinal;
zonas(osinc)=zfinal;
zonal=zonas(1);
zona2=zonas(2);
zona3=zonas(3);
zona4=zonas(4);
zonas=[zonal zona2 zona3 zona4];

pos=pos;

poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

% Situamos en '0' el operario que está en casa.
operarios(o)=0;
operarios(osinc)=0;
end
if (sum(nFo)~=0) & (sum(nFosinc)==0)

```

```

% Mandamos al operario 'osinc' a CASA:
pesos(osinc)=pesos(osinc)+td(zonas(osinc),zfinal);
peso1=pesos(1);
peso2=pesos(2);
peso3=pesos(3);
peso4=pesos(4);
pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

% Situamos la condición del operario 'o' como 'libre'
conds(osinc)=0;
cond1=conds(1);
cond2=conds(2);
cond3=conds(3);
cond4=conds(4);
conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

% En la posición actual del operario colocamos un '0'
como señal de que ha finalizado.
if osinc==1
    o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
    pos1=pos1+1;
end
if osinc==2
    o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
    pos2=pos2+1;
end
if osinc==3
    o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
    pos3=pos3+1;
end
if osinc==4
    o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
    pos4=pos4+1;
end

% El operario 'o' ha terminado y ya está en la zona 9.
zonas(osinc)=zfinal;
zona1=zonas(1);
zona2=zonas(2);
zona3=zonas(3);
zona4=zonas(4);
zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

pos=pos;

poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

% Situamos en '0' el operario que está en casa.
operarios(osinc)=0;
end
if (sum(nFo)~=0) & (sum(nFosinc)~=0)
    STOP4019situacionImposible
end
else
    suma=sum(P);

    if suma~=0
        P=P*(1/suma);
    end

    suma=0;

    for tarea=1:length(tt)
        suma=suma+P(tarea);
        P(tarea)=suma;
    end

    h=rand(1);
    numtarea=1;

    while (h>P(numtarea))
        numtarea=numtarea+1;
    end

    tarea=tt(numtarea);

    if ot(numtarea)==1

```

```

% Asignamos la tarea al operario 'o':
tareas(o)=tarea;
tarea1=tareas(1);
tarea2=tareas(2);
tarea3=tareas(3);
tarea4=tareas(4);
tareas=[tarea1 tarea2 tarea3 tarea4];

numtareas(o)=numtarea;
numtarea1=numtareas(1);
numtarea2=numtareas(2);
numtarea3=numtareas(3);
numtarea4=numtareas(4);
numtareas=[numtarea1 numtarea2 numtarea3 numtarea4];

if length(find(operarios))<4
    %disp('Utilizamos el vector PES en la linea 4623')
    for i=1:length(pes)
        if w(i)~=o
            % ATENCIÓN: Al ser una tarea de 1 operario,
            % pero sí que debe sumar el tiempo de cambio
            % si el hecho de continuar en su zona
            % por violar el tiempo de su jornada laboral,
            % enviaremos a la zona donde se ejecuta la
            tarea:
                if
                    pesos(w(i))+cc(numtarea)+td(zonas(w(i)),zfinal)>tmax(w(i))
                        % Mandamos al operario 'w(i)' a CASA pero
                    nos aseguramos:
                        if
                            pesos(w(i))+cc(numtarea)+td(zonas(w(i)),zt(numtarea))+td(zt(numtarea),zfinal)<=tmax(w(i))
                                pesos(w(i))=pesos(w(i))+cc(numtarea)+td(zonas(w(i)),zt(numtarea));
                                conds(w(i))=ct(numtarea);
                                zonas(w(i))=zt(numtarea);
                            else
                                % Mandamos al operario 'i' a casa:
                                pesos(w(i))=pesos(w(i))+td(zonas(w(i)),zfinal);
                                % Situamos la condición del operario
                                'o' como 'libre'
                                conds(w(i))=0;
                                % En la posición actual del operario
                                colocamos un '0' como señal de que ha finalizado.
                                if w(i)==1
                                    o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
                                    pos1=pos1+1;
                                end
                                if w(i)==2
                                    o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
                                    pos2=pos2+1;
                                end
                                if w(i)==3
                                    o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
                                    pos3=pos3+1;
                                end
                                if w(i)==4
                                    o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
                                    pos4=pos4+1;
                                end
                                % El operario 'o' ha terminado y ya
                                zonas(w(i))=zfinal;

                                pos=pos;

                                poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

                                % Situamos en '0' el operario que
                                operarios(w(i))=0;
                            end
                        else

```

el osinc no la ejecuta

de condición, por ello

original le impide luego, por

regresar a casa, lo

pesos(w(i))=pesos(w(i))+td(zonas(w(i)),zfinal);

'o' como 'libre'

colocamos un '0' como señal de que ha finalizado.

está en la zona 9.

está en casa.

```

                                if
(conds(w(i))==0) | (conds(w(i))==ct(numtarea))
                                pesos(w(i))=pesos(w(i));
                                conds(w(i))=conds(w(i));
                                else
                                pesos(w(i))=pesos(w(i))+cc(numtarea);
                                conds(w(i))=ct(numtarea);
                                end
                                end
                                else
pesos(w(i))=pesos(w(i))+td(zonas(w(i)),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tt(numtarea);
                                conds(w(i))=ct(numtarea);
                                end
                                else
                                for i=1:length(pesos) % Añadimos el TIEMPO de
"CAMBIO DE CONDICIÓN" a todos los operarios:
                                if i~=0
                                % ATENCIÓN: Al ser una tarea de 1 operario,
                                % pero sí que debe sumar el tiempo de cambio
                                % si el hecho de continuar en su zona
                                % por violar el tiempo de su jornada labora,
                                % enviaremos a la zona donde se ejecuta la
                                % tarea:
                                if
                                pesos(i)+cc(numtarea)+td(zonas(i),zfinal)>tmax(i)
                                % Mandamos al operario 'i' a CASA pero
                                nos aseguramos:
                                if
                                pesos(i)+cc(numtarea)+td(zonas(i),zt(numtarea))+td(zt(numtarea),zfinal)<=tmax(i)
                                pesos(i)=pesos(i)+cc(numtarea)+td(zonas(i),zt(numtarea));
                                conds(i)=ct(numtarea);
                                zonas(i)=zt(numtarea);
                                else
                                % Mandamos al operario 'i' a casa:
                                % Situamos la condición del operario
                                conds(i)=0;
                                % En la posición actual del operario
                                if i==1
                                o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
                                pos1=pos1+1;
                                end
                                if i==2
                                o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
                                pos2=pos2+1;
                                end
                                if i==3
                                o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
                                pos3=pos3+1;
                                end
                                if i==4
                                o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
                                pos4=pos4+1;
                                end
                                % El operario 'o' ha terminado y ya
                                zonas(i)=zfinal;
                                pos=pos;
                                poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];
                                % Situamos en '0' el operario que
                                operarios(i)=0;
                                end
                                está en la zona 9.
                                está en casa.

```

```

else % Además, al operario 'o' debemos
añadir el "TIEMPO DE DESPLAZAMIENTO Y EJECUCIÓN" de la tarea:
    if (conds(i)==0) | (conds(i)==ct(numtarea))
        pesos(i)=pesos(i);
        conds(i)=conds(i);
    else
        pesos(i)=pesos(i)+cc(numtarea);
        conds(i)=ct(numtarea);
    end
end
else
pesos(i)=pesos(i)+td(zonas(i),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tt(numtarea);
        conds(i)=ct(numtarea);
    end
end
end
end
peso1=pesos(1);
peso2=pesos(2);
peso3=pesos(3);
peso4=pesos(4);
pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

penals1=penals(1);
penals2=penals(2);
penals3=penals(3);
penals4=penals(4);
penals=[penals1 penals2 penals3 penals4];

cond1=conds(1);
cond2=conds(2);
cond3=conds(3);
cond4=conds(4);
conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

rt(pos)=tareas(o);
rz(pos)=zt(numtarea);
rc(pos)=ct(numtarea);
ro(pos)=numtarea;

if o==1
    o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
    pos1=pos1+1;
end
if o==2
    o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
    pos2=pos2+1;
end
if o==3
    o3(pos3)=tarea;
    op3(pos3)=pos;
    pos3=pos3+1;
end
if o==4
    o4(pos4)=tarea;
    op4(pos4)=pos;

    pos4=pos4+1;
end

zonas(o)=zt(numtarea);
zona1=zonas(1);
zona2=zonas(2);
zona3=zonas(3);
zona4=zonas(4);
zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

contt(numtarea)=0;
contz(numtarea)=0;

pos=pos+1;
poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

for i=1:4
    if pesos(i)+td(zonas(i),zfinal)>tmax(i)
        disp('Hay un ERROR en el bucle que empieza en la

```

Línea 5172')

```

                                STOPlinea4729
                                end
                                end
else
    % Asignamos la tarea a los operarios 'o' y 'osinc':
    numtareas(o)=numtarea;
    numtareas(osinc)=numtarea;
    numtarea1=numtareas(1);
    numtarea2=numtareas(2);
    numtarea3=numtareas(3);
    numtarea4=numtareas(4);
    numtareas=[numtarea1 numtarea2 numtarea3 numtarea4];

    tareas(o)=tarea;
    tareas(osinc)=tarea;
    tarea1=tareas(1);
    tarea2=tareas(2);
    tarea3=tareas(3);
    tarea4=tareas(4);
    tareas=[tarea1 tarea2 tarea3 tarea4];

    if length(find(operarios))<4
        if length(find(operarios))<4
            w=find(operarios);
            for i=1:length(w)
                pes(i)=pesos(w(i));
            end
            for i=1:length(pes)
                wc(i)=conds(w(i));
                wz(i)=zonas(w(i));
            end
        end
        %disp('Utilizamos las referencias de "w" en la linea
4919')

        for i=1:length(pes)
            if (w(i)~=o) & (w(i)~=osinc)
                % ATENCIÓN: Al ser una tarea de 1 operario,
                % pero sí que debe sumar el tiempo de cambio
                % si el hecho de continuar en su zona
                % por violar el tiempo de su jornada laboral,
                % enviaremos a la zona donde se ejecuta la
                tarea:
                if
                    pesos(w(i))+cc(numtarea)+td(zonas(w(i)),zfinal)>tmax(w(i))
                        % Mandamos al operario 'w(i)' a CASA pero
                    nos aseguramos:
                        if
                            pesos(w(i))+cc(numtarea)+td(zonas(w(i)),zt(numtarea))+td(zt(numtarea),zfinal)<=tmax(w(i))
                                pesos(w(i))=pesos(w(i))+cc(numtarea)+td(zonas(w(i)),zt(numtarea));
                                conds(w(i))=ct(numtarea);
                                zonas(w(i))=zt(numtarea);
                            else
                                % Mandamos al operario 'i' a casa:
                                pesos(w(i))=pesos(w(i))+td(zonas(w(i)),zfinal);

                                % Situamos la condición del operario
                                'o' como 'libre'
                                conds(w(i))=0;
                                % En la posición actual del operario
                                colocamos un '0' como señal de que ha finalizado.

                                if w(i)==1
                                    o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
                                    pos1=pos1+1;
                                end
                                if w(i)==2
                                    o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
                                    pos2=pos2+1;
                                end
                                if w(i)==3
                                    o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
                                    pos3=pos3+1;
                                end
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```

```

end
if w(i)==4
    o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
    pos4=pos4+1;
end
% El operario 'o' ha terminado y ya
zonas(w(i))=zfinal;

pos=pos;

poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

% Situamos en '0' el operario que
operarios(w(i))=0;
end
else
    if
        (conds(w(i))==0) | (conds(w(i))==ct(numtarea))

        pesos(w(i))=pesos(w(i));
        conds(w(i))=conds(w(i));
    else
        pesos(w(i))=pesos(w(i))+cc(numtarea);
        conds(w(i))=ct(numtarea);
    end
end
else
    pesos(w(i))=pesos(w(i))+td(zonas(w(i)),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tt(numtarea);
    conds(w(i))=ct(numtarea);
end
end

else
    for i=1:length(pesos) % Añadimos el TIEMPO de
"CAMBIO DE CONDICIÓN" a todos los operarios:
        if (i~=o)&(i~=osinc)
            if
                pesos(i)+cc(numtarea)+td(zonas(i),zfinal)>tmax(i)
                    % Mandamos al operario 'i' a CASA pero
                    nos aseguramos:
                    if
                        pesos(i)+cc(numtarea)+td(zonas(i),zt(numtarea))+td(zt(numtarea),zfinal)<=tmax(i)
                            pesos(i)=pesos(i)+cc(numtarea)+td(zonas(i),zt(numtarea));
                            conds(i)=ct(numtarea);
                            zonas(i)=zt(numtarea);
                        else
                            % Mandamos al operario 'i' a casa:
                            pesos(i)=pesos(i)+td(zonas(i),zfinal);
                            % Situamos la condición del operario
                            conds(i)=0;
                            % En la posición actual del operario
                            if i==1
                                o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
                                pos1=pos1+1;
                            end
                            if i==2
                                o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
                                pos2=pos2+1;
                            end
                            if i==3
                                o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
                                pos3=pos3+1;
                            end
                            if i==4
                                o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
                                pos4=pos4+1;
                            end
                        end
                    end
                    % El operario 'o' ha terminado y ya
                    zonas(i)=zfinal;
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        pos=pos;

        poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

        % Situamos en '0' el operario que
está en casa.
        operarios(i)=0;
    end
    else % Además, a los demas debemos añadir
el "TIEMPO DE DESPLAZAMIENTO Y EJECUCIÓN" de la tarea:
        % Si alguno de los operarios esta
bajo codición libre no le cambiaremos de condición:
        if (conds(i)==0) | (conds(i)==ct(numtarea))
            pesos(i)=pesos(i);
            conds(i)=conds(i);
        else
            pesos(i)=pesos(i)+cc(numtarea);
            conds(i)=ct(numtarea);
        end
    end
    else
        pesos(i)=pesos(i)+td(zonas(i),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tt(numtarea);
        conds(i)=ct(numtarea);
    end
end
end
peso1=pesos(1);
peso2=pesos(2);
peso3=pesos(3);
peso4=pesos(4);
pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

penals1=penals(1);
penals2=penals(2);
penals3=penals(3);
penals4=penals(4);
penals=[penals1 penals2 penals3 penals4];

% Completamos las "condiciones de operación":
cond1=conds(1);
cond2=conds(2);
cond3=conds(3);
cond4=conds(4);
conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

rt(pos)=tarea;
rz(pos)=zt(numtarea);
rc(pos)=ct(numtarea);
ro(pos)=numtarea;

if o==1
    o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
    pos1=pos1+1;
end
if o==2
    o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
    pos2=pos2+1;
end
if o==3
    o3(pos3)=tarea;
    op3(pos3)=pos;
    pos3=pos3+1;
end
if o==4
    o4(pos4)=tarea;
    op4(pos4)=pos;

    pos4=pos4+1;
end

if osinc==1
    o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
    pos1=pos1+1;
end
if osinc==2
    o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;

```

```

        pos2=pos2+1;
    end
    if osinc==3
        o3(pos3)=tarea;
        op3(pos3)=pos;
        pos3=pos3+1;
    end
    if osinc==4
        o4(pos4)=tarea;
        op4(pos4)=pos;

        pos4=pos4+1;
    end

    % Como hemos llegado tras PENALIZACIÓN no hace falta que
    ni 'o' u 'osinc' esperen.

    tesp1=tesp(1);
    tesp2=tesp(2);
    tesp3=tesp(3);
    tesp4=tesp(4);
    tesp=[tesp1 tesp2 tesp3 tesp4];

    zonas(o)=zt(numtarea);
    zonas(osinc)=zt(numtarea);
    zona1=zonas(1);
    zona2=zonas(2);
    zona3=zonas(3);
    zona4=zonas(4);
    zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

    %disp('Hay un error en el bucle que empieza en la línea
4919')

    for i=1:length(pesos)
        if pesos(i)+td(zonas(i),zfinal)>tmax(i)
            STOPbucleLINEA4908
        end
    end

    contt(numtarea)=0;
    contz(numtarea)=0;

    pos=pos+1;
    poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];
end
end
end
end
else
    % FINAL DEL BUCLE DE PENALIZACIÓN.

    % Si NO HAY PENALIZACIÓN porque 'sum(P)~=0' y NO HAY SINCRONIZACIÓN...
    % El vector 'P=s+S' con el que continuamos está calculado en la línea 2838.

    % CONTROL FINALIZACIÓN:

    % 1º) Reconstruimos el vector P para que guarde, con su respectivo número,
    todas las tareas susceptibles de ejecutarse:
    for i=1:length(P)
        if P(i)~=0
            nF(i)=i;
        else
            nF(i)=0;
        end
    end

    % 2º) Discriminamos aquellas tareas que por la restricción de la jornada
    laboral no pueda ejecutar:
    if osinc==0
        for i=1:length(P)
            if nF(i)~=0
                if td(zonas(o),zt(i))+cc(i)+td(zt(i),zfinal)+tt(i)>(tmax(o)-
pesos(o))
                    nF(i)=0;
                end
            end
        end
    end
end
end

```

```

end

% 3º) Reconstruyo el vector de probabilidad P:
if sum(nF)~=0
    for i=1:length(P)
        if nF(i)==0
            P(i)=0;
        end
    end
else
    for i=1:length(P)
        if nF(i)==0
            P(i)=0;
        end
    end
end

% 4º) Control final:
if sum(P)~=0

    suma=sum(P);

    if suma~=0
        P=P*(1/suma);
    end

    suma=0;

    for tarea=1:length(tt)
        suma=suma+P(tarea);
        P(tarea)=suma;
    end

    h=rand(1);
    numtarea=1;

    while (h>P(numtarea))
        numtarea=numtarea+1;
    end

    tarea=tt(numtarea);

    % Asignamos la tarea al operario 'o':
    tareas(o)=tarea;
    tarea1=tareas(1);
    tarea2=tareas(2);
    tarea3=tareas(3);
    tarea4=tareas(4);
    tareas=[tarea1 tarea2 tarea3 tarea4];

    numtareas(o)=numtarea;
    numtarea1=numtareas(1);
    numtarea2=numtareas(2);
    numtarea3=numtareas(3);
    numtarea4=numtareas(4);
    numtareas=[numtarea1 numtarea2 numtarea3 numtarea4];

    if (ct(numtarea)==conds(o))
        pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zt(numtarea))+tarea;
    else
        pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tarea;
    end
    peso1=pesos(1);
    peso2=pesos(2);
    peso3=pesos(3);
    peso4=pesos(4);
    pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

    conds(o)=ct(numtarea);
    cond1=conds(1);
    cond2=conds(2);
    cond3=conds(3);
    cond4=conds(4);
    conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

    rt(pos)=tareas(o);
    rz(pos)=zt(numtarea);

```

```

rc(pos)=ct(numtarea);
ro(pos)=numtarea;

if o==1
    o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
    pos1=pos1+1;
end
if o==2
    o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
    pos2=pos2+1;
end
if o==3
    o3(pos3)=tarea;
    op3(pos3)=pos;
    pos3=pos3+1;
end
if o==4
    o4(pos4)=tarea;
    op4(pos4)=pos;

    pos4=pos4+1;
end

zonas(o)=zt(numtarea);
zonal=zonas(1);
zona2=zonas(2);
zona3=zonas(3);
zona4=zonas(4);
zonas=[zonal zona2 zona3 zona4];

contt(numtarea)=0;
contz(numtarea)=0;

pos=pos+1;
poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

else
    % Mandamos al operario 'o' a casa:
    pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zfinal);
    peso1=pesos(1);
    peso2=pesos(2);
    peso3=pesos(3);
    peso4=pesos(4);
    pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

    % Situamos la condición del operario 'o' como 'libre'
    conds(o)=0;
    cond1=conds(1);
    cond2=conds(2);
    cond3=conds(3);
    cond4=conds(4);
    conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

    % En la posición actual del operario colocamos un '0' como señal de que
    ha finalizado.
    if o==1
        o1(pos1)=0;op1(pos1)=0;
        pos1=pos1+1;
    end
    if o==2
        o2(pos2)=0;op2(pos2)=0;
        pos2=pos2+1;
    end
    if o==3
        o3(pos3)=0;op3(pos3)=0;
        pos3=pos3+1;
    end
    if o==4
        o4(pos4)=0;op4(pos4)=0;
        pos4=pos4+1;
    end

    % EL operario 'o' ha terminado y ya está en la zona 9.
    zonas(o)=zfinal;
    zonal=zonas(1);
    zona2=zonas(2);
    zona3=zonas(3);

```

```

zona4=zonas(4);
zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

pos=pos;

poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

% Situamos en '0' el operario que está en casa.
operarios(o)=0;
end
end
end
% for i=1:length(pesos)
% if pesos(i)>tmax(i)
%     STOPlinea4616algunPesoInvalido
% end
% end
end

jornada1=pesos;
zonas1=zonas;
conds1=conds;
pjornada1=penals;
tjornada1=tesp;
posjornada1=pos;
tespJ1=tesp;
penalsJ1=penals;

% operarios=[1 2 3 4];
% J1=[operarios;jornada1;conds1;zonas1;tespJ1;penalsJ1];
% J1=J1';
% posjornada1
% disp("Resultados hasta finalizar la primera jornada" ')
% disp('-----')
% disp(' Operar. Pesos Conds Zonas Tesp Penals');disp(J1)
%
% disp('-----')
% disp(' FIN JORNADA 1 ')
% disp('-----')
%
% disp('Presione INTRO para continuar y obtener el resultado final...')
% pause

tesp1=tesp(1)+(tmax(1)-pesos(1));
tesp2=tesp(2)+(tmax(2)-pesos(2));
tesp3=tesp(3)+(tmax(3)-pesos(3));
tesp4=tesp(4)+(tmax(4)-pesos(4));
tesp=[tesp1 tesp2 tesp3 tesp4];

penal1=penals(1)+(tmax(1)-pesos(1));
penal2=penals(2)+(tmax(2)-pesos(2));
penal3=penals(3)+(tmax(3)-pesos(3));
penal4=penals(4)+(tmax(4)-pesos(4));
penals=[penal1 penal2 penal3 penal4];

peso1=tmax(1);
peso2=tmax(2);
peso3=tmax(3);
peso4=tmax(4);
pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

% J=[operarios;pesos;conds;zonas;tesp;penals];
% J=J';
% pos
% disp("Resultados antes de empezar la segunda jornada" ')
% disp('-----')
% disp(' Operar. Pesos Conds Zonas Tesp Penals');disp(J)

PESOSJ1=pesos;

% Y=[pesos;tesp;penals];
% createfigure2(Y)

% Calculamos la SEGUNDA JORNADA DE TRABAJO:
%
.....
.....|

```

```

operarios=[1 2 3 4];

peso1=0;
peso2=0;
peso3=0;
peso4=0;
pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

zonal=zonas(1);
zona2=zonas(2);
zona3=0;
zona4=0;

while pos<151
    % Calculo si los operarios 3 y 4 han entrado a trabajar:
    if (peso3==0)&(peso4==0)
        if (pesos(1)>=30)|(pesos(2)>=30)
            peso3=peso3+30;
            peso4=peso4+30;
            pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];
            zona3=zona1;
            zona4=zona1;
            zonas=[zonal zona2 zona3 zona4];
        end
    end

    % Calculo el operario que menos tiempo lleva acumulado:
    for i=1:length(find(pesos))
        pes(i)=pesos(i);
    end

    [t,o]=min(pes);

    % Calculo el vector 's' con los tiempos que incurrirá al visitar una zona u otra:
    s=zeros(1,length(tt));

    for c=1:length(tt) % Aquellas zonas cuyo 'td' valga cero lo cambio por 0.1 para que
    luego evite la probabilidad "Inf"
        if td(zonas(o),zt(c))==0
            s(c)=0.1;
        else
            s(c)=td(zonas(o),zt(c));
        end
    end

    for c=1:length(tt)
        s(c)=s(c)^(-alfa);
    end

    for c=1:length(tt)
        if contt(c)==0
            s(c)=0;
        end
    end

    % Calculo el vector 'S' con los tiempos que incurrirá al cambiar de condición de
    operación:
    S=zeros(1,length(tt));

    ccm=cc;

    % Aquellas tareas que no requieran cambio de condición o cuya condición sea libre los
    cambio por 0.1 para evitar "Inf"
    for c=1:length(tt)
        if (ct(c)==conds(o))|(ct(c)==0)
            ccm(c)=0.1;
        end
    end

    for c=1:length(tt)
        S(c)=(ccm(c)) ^ (-alfa);
    end

    ccm=cc;

    for c=1:length(tt)
        if contt(c)==0

```

```

        S(c)=0;
    end
end

    if conds(o)~=0 % Tengo en cuenta que se RESPETEN las 'CONDICIONES DE OPERACIÓN' del
aerogenerador:
        s(ct~=0 & ct~=conds(o))=0;
        S(ct~=0 & ct~=conds(o))=0;
    else
        for i=1:length(pesos)
            if i~=o
                if conds(i)~=0
                    s(ct~=0 & ct~=conds(i))=0;
                    S(ct~=0 & ct~=conds(i))=0;
                end
            end
        end
    end

P=s+S;

% Calculamos la matriz de sincronización:
for i=1:length(pesos)
    for j=1:length(pesos)
        teop(i,j)=abs(pesos(i)-pesos(j));
    end
end

% Si los operarios 3 y 4 no han entrado, les ponemos un valor alto de "tiempo entre
operarios"
for i=1:length(pesos)
    for j=1:length(pesos)
        if i~=j
            if (pesos(i)==0) | (pesos(j)==0)
                teop(i,j)=100;
            end
        end
    end
end

osinc=0;

% Comprobamos si hay "SINCRONIZACIÓN EN TIEMPO Y ZONA" entre el operario 'o' y otro:
for i=1:length(pesos)
    if i~=o
        if ((teop(o,i)<=3) & (teop(o,i)>=0)) & (zonas(o)==zonas(i))
            teop(o,i);
            o;
            osinc=i;
        end
    end
end

if (o~=0) & (osinc~=0) % Si EXISTE SINCRONIZACIÓN:

    for c=1:length(ot)
        if (ot(c)~=2) | (zt(c)~=zonas(o))
            s(c)=0;
            S(c)=0;
        end
    end

P=s+S;

if sum(P)==0 % Si P=0, NO HAY TAREAS de 2 operarios en la zona del operario
'o'

    % Calculo de nuevo 's' y 'S':
    s=zeros(1,length(tt));

    for c=1:length(tt)
        if td(zonas(o),zt(c))==0
            s(c)=0.1;
        else
            s(c)=td(zonas(o),zt(c));
        end
    end
end

```

```

for c=1:length(tt)
    s(c)=s(c)^(-alfa);
end

for c=1:length(tt)
    if contt(c)==0
        s(c)=0;
    end
end

S=zeros(1,length(tt));

ccm=cc;

for c=1:length(tt)
    if (ct(c)==conds(o)) || (ct(c)==0)
        ccm(c)=0.1;
    end
end

for c=1:length(tt)
    S(c)=(ccm(c)) ^ (-alfa);
end

ccm=cc;

for c=1:length(tt)
    if contt(c)==0
        S(c)=0;
    end
end

if conds(o)~=0 % Tengo en cuenta que se RESPETEN las 'CONDICIONES DE
OPERACIÓN' del aerogenerador:
    s(ct~=0 & ct~=conds(o))=0;
    S(ct~=0 & ct~=conds(o))=0;
else
    for i=1:length(pesos)
        if i~=o
            if conds(i)~=0
                s(ct~=0 & ct~=conds(i))=0;
                S(ct~=0 & ct~=conds(i))=0;
            end
        end
    end
end

P=s+S;

suma=sum(P);

if suma~=0
    P=P*(1/suma);
end

suma=0;

for tarea=1:length(tt)
    suma=suma+P(tarea);
    P(tarea)=suma;
end

P1=0;

% "BUCLE DE PENALIZACIÓN": entramos si 'sum(P)=0'
if sum(P)==0

    pmax=max(pesos);

    for i=1:4
        if zonas(i)~=0
            penals(i)=(pmax-pesos(i));
            pesos(i)=pmax;
        end
    end
end
% La "penalización" la incluimos como "tiempo de espera":

```

```

tesp1=tesp1+penals(1);
tesp2=tesp2+penals(2);
tesp3=tesp3+penals(3);
tesp4=tesp4+penals(4);
tesp=[tesp1 tesp2 tesp3 tesp4];

% Penalizamos a los 4 operarios:
penal1=penal1+penals(1);
penal2=penal2+penals(2);
penal3=penal3+penals(3);
penal4=penal4+penals(4);
penals=[penal1 penal2 penal3 penal4];

peso1=pesos(1);
peso2=pesos(2);
peso3=pesos(3);
peso4=pesos(4);
pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

% Calculamos de nuevo las probabilidades 's' y 'S':
s=zeros(1,length(tt));
for c=1:length(tt)
    if td(zonas(o),zt(c))==0
        s(c)=0.1;
    else
        s(c)=td(zonas(o),zt(c));
    end
end

for c=1:length(tt)
    s(c)=s(c)^(-alfa);
end

for c=1:length(tt)
    if contt(c)==0
        s(c)=0;
    end
end

S=zeros(1,length(tt));

for c=1:length(tt)
    S(c)=(cc(c))^(-alfa);
end

for c=1:length(tt)
    if contt(c)==0
        S(c)=0;
    end
end

% Matriz de sincronización:
for i=1:length(pesos)
    for j=1:length(pesos)
        teop(i,j)=abs(pesos(i)-pesos(j));
    end
end

for i=1:length(pesos)
    for j=1:length(pesos)
        if i~=j
            if (pesos(i)==0)|(pesos(j)==0)
                teop(i,j)=100;
            end
        end
    end
end

% Después de la penalización habrá SINCRONIZACIÓN REAL entre 'o' y un
operario 'osinc':
for i=1:length(pesos)
    if i~=o
        if ((teop(o,i)<=3)&(teop(o,i)>=0))&(zonas(o)==zonas(i))
            teop(o,i);
            o;
            osinc=i;
        end
    end
end

```

```

        end
    end

    P1=s+S;

    suma=sum(P1);

    if suma~=0
        P1=P1*(1/suma);
    end

    suma=0;

    for tarea=1:length(tt)
        suma=suma+P1(tarea);
        P1(tarea)=suma;
    end

    h=rand(1);
    numtarea=1;

    while (h>P1(numtarea))
        numtarea=numtarea+1;
    end

    tarea=tt(numtarea);

    if ot(numtarea)==1
        % Asignamos la tarea al operario 'o':
        tareas(o)=tarea;
        tarea1=tareas(1);
        tarea2=tareas(2);
        tarea3=tareas(3);
        tarea4=tareas(4);
        tareas=[tarea1 tarea2 tarea3 tarea4];

        numtareas(o)=numtarea;
        numtarea1=numtareas(1);
        numtarea2=numtareas(2);
        numtarea3=numtareas(3);
        numtarea4=numtareas(4);
        numtareas=[numtarea1 numtarea2 numtarea3 numtarea4];

        for i=1:4 % Añadimos el TIEMPO de "CAMBIO DE CONDICIÓN" a todos los
operarios:
            if i~=o
                if zonas(i)~=0
                    if (conds(i)==0) | (conds(i)==ct(numtarea))
                        pesos(i)=pesos(i);
                        conds(i)=conds(i);
                    else
                        pesos(i)=pesos(i)+cc(numtarea);
                        conds(i)=ct(numtarea);
                    end
                end
            else % Además, al operario 'o' debemos añadir el "TIEMPO DE
DESPLAZAMIENTO Y EJECUCIÓN" de la tarea:
                pesos(i)=pesos(i)+td(zonas(i),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tt(numtarea);
                conds(i)=ct(numtarea);
            end
        end
        peso1=pesos(1);
        peso2=pesos(2);
        peso3=pesos(3);
        peso4=pesos(4);
        pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

        % Completamos las "condiciones de operación":
        cond1=conds(1);
        cond2=conds(2);
        cond3=conds(3);
        cond4=conds(4);
        conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

        rt(pos)=tareas(o);
        rz(pos)=zt(numtarea);

```

```

rc(pos)=ct(numtarea);
ro(pos)=numtarea;

if o==1
    o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
    pos1=pos1+1;
end
if o==2
    o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
    pos2=pos2+1;
end
if o==3
    o3(pos3)=tarea;
    op3(pos3)=pos;
    pos3=pos3+1;
end
if o==4
    o4(pos4)=tarea;
    op4(pos4)=pos;

    pos4=pos4+1;
end

zonas(o)=zt(numtarea);
zona1=zonas(1);
zona2=zonas(2);
zona3=zonas(3);
zona4=zonas(4);
zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

contt(numtarea)=0;
contz(numtarea)=0;

pos=pos+1;
poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];
else
    % Si la tarea seleccionada es de 2 operarios:
    numtareas(o)=numtarea;
    numtareas(osinc)=numtarea;
    numtarea1=numtareas(1);
    numtarea2=numtareas(2);
    numtarea3=numtareas(3);
    numtarea4=numtareas(4);
    numtareas=[numtarea1 numtarea2 numtarea3 numtarea4];

    tareas(o)=tarea;
    tareas(osinc)=tarea;
    tarea1=tareas(1);
    tarea2=tareas(2);
    tarea3=tareas(3);
    tarea4=tareas(4);
    tareas=[tarea1 tarea2 tarea3 tarea4];

    for i=1:4 % Añadimos el TIEMPO de "CAMBIO DE CONDICIÓN" a los
operarios:
        if (i~=o) & (i~=osinc)
            if zonas(i)~=0
                if (conds(i)==0) | (conds(i)==ct(numtarea))
                    pesos(i)=pesos(i);
                    conds(i)=conds(i);
                else
                    pesos(i)=pesos(i)+cc(numtarea);
                    conds(i)=ct(numtarea);
                end
            end
        else % Además, debemos añadir a 'o' y 'osinc' los "TIEMPOS DE
DESPLAZAMIENTO Y EJECUCIÓN" de la tarea:
            pesos(i)=pesos(i)+td(zonas(i),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tt(numtarea);
            conds(i)=ct(numtarea);
        end
    end
    conds(o)=ct(numtarea);
    conds(osinc)=ct(numtarea);
    cond1=conds(1);
    cond2=conds(2);
    cond3=conds(3);

```

```

cond4=conds(4);
conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

rt(pos)=tarea;
rz(pos)=zt(numtarea);
rc(pos)=ct(numtarea);
ro(pos)=numtarea;

if o==1
    ol(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
    pos1=pos1+1;
end
if o==2
    o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
    pos2=pos2+1;
end
if o==3
    o3(pos3)=tarea;
    op3(pos3)=pos;
    pos3=pos3+1;
end
if o==4
    o4(pos4)=tarea;
    op4(pos4)=pos;

    pos4=pos4+1;
end

if osinc==1
    ol(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
    pos1=pos1+1;
end
if osinc==2
    o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
    pos2=pos2+1;
end
if osinc==3
    o3(pos3)=tarea;
    op3(pos3)=pos;
    pos3=pos3+1;
end
if osinc==4
    o4(pos4)=tarea;
    op4(pos4)=pos;

    pos4=pos4+1;
end

if pesos(o)<pesos(osinc)
    tesp(o)=tesp(o)+(pesos(osinc)-pesos(o));
    pesos(o)=pesos(osinc);
else
    tesp(osinc)=tesp(osinc)+(pesos(o)-pesos(osinc));
    pesos(osinc)=pesos(o);
end
peso1=pesos(1);
peso2=pesos(2);
peso3=pesos(3);
peso4=pesos(4);
pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

tesp1=tesp(1);
tesp2=tesp(2);
tesp3=tesp(3);
tesp4=tesp(4);
tesp=[tesp1 tesp2 tesp3 tesp4];

zonas(o)=zt(numtarea);
zonas(osinc)=zt(numtarea);
zona1=zonas(1);
zona2=zonas(2);
zona3=zonas(3);
zona4=zonas(4);
zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

contt(numtarea)=0;
contz(numtarea)=0;

```

```

        pos=pos+1;
        poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];
    end
end
% Si P~=0 no habremos hecho nada del BUCLE DE PENALIZACIÓN CUANDO HAY
SINCRONIZACIÓN:
penalización:
if P1==0    % La variable 'P1' hace de puerta para saber si ha habido o no
    % P1=0 (No ha habido PENALIZACIÓN)---> ENTRAMOS
    % P1=0 (Si ha habido PENALIZACIÓN)---> NO ENTRAMOS

    h=rand(1);
    numtarea=1;

    while (h>P(numtarea))
        numtarea=numtarea+1;
    end

    tarea=tt(numtarea);

    if ot(numtarea)==1
        tareas(o)=tarea;
        tarea1=tareas(1);
        tarea2=tareas(2);
        tarea3=tareas(3);
        tarea4=tareas(4);
        tareas=[tarea1 tarea2 tarea3 tarea4];

        numtareas(o)=numtarea;
        numtarea1=numtareas(1);
        numtarea2=numtareas(2);
        numtarea3=numtareas(3);
        numtarea4=numtareas(4);
        numtareas=[numtarea1 numtarea2 numtarea3 numtarea4];

        if (ct(numtarea)==conds(o))
            pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zt(numtarea))+tarea;
        else
            pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tarea;
        end
        peso1=pesos(1);
        peso2=pesos(2);
        peso3=pesos(3);
        peso4=pesos(4);
        pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

        conds(o)=ct(numtarea);
        cond1=conds(1);
        cond2=conds(2);
        cond3=conds(3);
        cond4=conds(4);
        conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

        rt(pos)=tareas(o);
        rz(pos)=zt(numtarea);
        rc(pos)=ct(numtarea);
        ro(pos)=numtarea;

        if o==1
            o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
            pos1=pos1+1;
        end
        if o==2
            o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
            pos2=pos2+1;
        end
        if o==3
            o3(pos3)=tarea;
            op3(pos3)=pos;
            pos3=pos3+1;
        end
        if o==4
            o4(pos4)=tarea;
            op4(pos4)=pos;

```

```

        pos4=pos4+1;
    end

    zonas(o)=zt(numtarea);
    zona1=zonas(1);
    zona2=zonas(2);
    zona3=zonas(3);
    zona4=zonas(4);
    zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

    contt(numtarea)=0;
    contz(numtarea)=0;

    pos=pos+1;
    poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];
else
    % Realizamos una tarea de 2 operarios en otra zona diferente a la
    zona del operario 'o', que será la zona de 'numtarea'
    numtareas(o)=numtarea;
    numtareas(osinc)=numtarea;
    numtarea1=numtareas(1);
    numtarea2=numtareas(2);
    numtarea3=numtareas(3);
    numtarea4=numtareas(4);
    numtareas=[numtarea1 numtarea2 numtarea3 numtarea4];

    tareas(o)=tarea;
    tareas(osinc)=tarea;
    tarea1=tareas(1);
    tarea2=tareas(2);
    tarea3=tareas(3);
    tarea4=tareas(4);
    tareas=[tarea1 tarea2 tarea3 tarea4];

    conds(o)=ct(numtarea);
    conds(osinc)=ct(numtarea);
    cond1=conds(1);
    cond2=conds(2);
    cond3=conds(3);
    cond4=conds(4);
    conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

    rt(pos)=tarea;
    rz(pos)=zt(numtarea);
    rc(pos)=ct(numtarea);
    ro(pos)=numtarea;

    if o==1
        o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
        pos1=pos1+1;
    end
    if o==2
        o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
        pos2=pos2+1;
    end
    if o==3
        o3(pos3)=tarea;
        op3(pos3)=pos;
        pos3=pos3+1;
    end
    if o==4
        o4(pos4)=tarea;
        op4(pos4)=pos;

        pos4=pos4+1;
    end

    if osinc==1
        o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
        pos1=pos1+1;
    end
    if osinc==2
        o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
        pos2=pos2+1;
    end
    if osinc==3
        o3(pos3)=tarea;

```

```

        op3(pos3)=pos;
        pos3=pos3+1;
    end
    if osinc==4
        o4(pos4)=tarea;
        op4(pos4)=pos;
        pos4=pos4+1;
    end

    if (ct(numtarea)~=rc(pos-1))
        pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tarea;
    pesos(osinc)=pesos(osinc)+td(zonas(osinc),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tarea;
    else
        pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zt(numtarea))+tarea;
        pesos(osinc)=pesos(osinc)+td(zonas(osinc),zt(numtarea))+tarea;
    end
    if pesos(o)<pesos(osinc)
        tesp(o)=tesp(o)+(pesos(osinc)-pesos(o));
        pesos(o)=pesos(osinc);
    else
        tesp(osinc)=tesp(osinc)+(pesos(o)-pesos(osinc));
        pesos(osinc)=pesos(o);
    end
    peso1=pesos(1);
    peso2=pesos(2);
    peso3=pesos(3);
    peso4=pesos(4);
    pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

    tesp1=tesp(1);
    tesp2=tesp(2);
    tesp3=tesp(3);
    tesp4=tesp(4);
    tesp=[tesp1 tesp2 tesp3 tesp4];

    zonas(o)=zt(numtarea);
    zonas(osinc)=zt(numtarea);
    zona1=zonas(1);
    zona2=zonas(2);
    zona3=zonas(3);
    zona4=zonas(4);
    zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

    contt(numtarea)=0;
    contz(numtarea)=0;

    pos=pos+1;
    poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];
end
end

else % si 'sum(P)~=0' SÍ quedan tareas de 2 operarios en la zona del operario
'o'
    suma=sum(P);
    if suma~=0
        P=P*(1/suma);
    end

    suma=0;

    for tarea=1:length(tt)
        suma=suma+P(tarea);
        P(tarea)=suma;
    end

    h=rand(1);
    numtarea=1;

    while (h>P(numtarea))
        numtarea=numtarea+1;
    end

    tarea=tt(numtarea);

    % Asigna la tarea a los operarios 'o' y 'osinc':

```

```

numtareas(o)=numtarea;
numtareas(osinc)=numtarea;
numtarea1=numtareas(1);
numtarea2=numtareas(2);
numtarea3=numtareas(3);
numtarea4=numtareas(4);
numtareas=[numtarea1 numtarea2 numtarea3 numtarea4];

tareas(o)=tarea;
tareas(osinc)=tarea;
tarea1=tareas(1);
tarea2=tareas(2);
tarea3=tareas(3);
tarea4=tareas(4);
tareas=[tarea1 tarea2 tarea3 tarea4];

conds(o)=ct(numtarea);
conds(osinc)=ct(numtarea);
cond1=conds(1);
cond2=conds(2);
cond3=conds(3);
cond4=conds(4);
conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

rt(pos)=tarea;
rz(pos)=zt(numtarea);
rc(pos)=ct(numtarea);
ro(pos)=numtarea;

if o==1
    o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
    pos1=pos1+1;
end
if o==2
    o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
    pos2=pos2+1;
end
if o==3
    o3(pos3)=tarea;
    op3(pos3)=pos;
    pos3=pos3+1;
end
if o==4
    o4(pos4)=tarea;
    op4(pos4)=pos;
    pos4=pos4+1;
end

if osinc==1
    o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
    pos1=pos1+1;
end
if osinc==2
    o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
    pos2=pos2+1;
end
if osinc==3
    o3(pos3)=tarea;
    op3(pos3)=pos;
    pos3=pos3+1;
end
if osinc==4
    o4(pos4)=tarea;
    op4(pos4)=pos;
    pos4=pos4+1;
end

if (ct(numtarea)~=rc(pos-1))
    pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tarea;
pesos(osinc)=pesos(osinc)+td(zonas(osinc),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tarea;
else
    pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zt(numtarea))+tarea;
    pesos(osinc)=pesos(osinc)+td(zonas(osinc),zt(numtarea))+tarea;
end
if pesos(o)<pesos(osinc)
    tesp(o)=tesp(o)+(pesos(osinc)-pesos(o));

```

```

        pesos(o)=pesos(osinc);
    else
        tesp(osinc)=tesp(osinc)+(pesos(o)-pesos(o));
        pesos(osinc)=pesos(o);
    end
    peso1=pesos(1);
    peso2=pesos(2);
    peso3=pesos(3);
    peso4=pesos(4);
    pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

    tesp1=tesp(1);
    tesp2=tesp(2);
    tesp3=tesp(3);
    tesp4=tesp(4);
    tesp=[tesp1 tesp2 tesp3 tesp4];

    zonas(o)=zt(numtarea);
    zonas(osinc)=zt(numtarea);
    zonal=zonas(1);
    zona2=zonas(2);
    zona3=zonas(3);
    zona4=zonas(4);
    zonas=[zonal zona2 zona3 zona4];

    contt(numtarea)=0;
    contz(numtarea)=0;

    pos=pos+1;
    poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];
end
end

if osinc==0 % Cuando NO HAY SINCRONIZACIÓN REAL entre operarios

    for c=1:length(tt) % Hacemos que la PROBABILIDAD de ejecutar tareas de 2
operarios sea '0'
        if (ot(c)==2)
            s(c)=0;
            S(c)=0;
        end
    end

    P=s+S;

    if sum(P)==0 % Habrá PENALIZACIÓN porque se incumplen la RESTRICCIÓN DE
CONDICIONES DE OPERACIÓN:
        % Penalizamos a los operarios para poder llevar a cabo un "cambio
de condición"
        pmax=max(pesos);

        for i=1:4
            if zonas(i)~=0
                penals(i)=(pmax-pesos(i));
                pesos(i)=pmax;
            end
        end

        % La "penalización" la incluimos como "tiempo de espera":
        tesp1=tesp1+penals(1);
        tesp2=tesp2+penals(2);
        tesp3=tesp3+penals(3);
        tesp4=tesp4+penals(4);
        tesp=[tesp1 tesp2 tesp3 tesp4];

        % Penalizamos a los 4 operarios:
        penal1=penal1+penals(1);
        penal2=penal2+penals(2);
        penal3=penal3+penals(3);
        penal4=penal4+penals(4);
        penals=[penal1 penal2 penal3 penal4];

        peso1=pesos(1);
        peso2=pesos(2);
        peso3=pesos(3);
        peso4=pesos(4);
        pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

```

```

% Calculamos de nuevo las probabilidades 's' y 'S':
s=zeros(1,length(tt));

for c=1:length(tt)
    if td(zonas(o),zt(c))==0
        s(c)=0.1;
    else
        s(c)=td(zonas(o),zt(c));
    end
end

for c=1:length(tt)
    s(c)=s(c)^(-alfa);
end

for c=1:length(tt)
    if contt(c)==0
        s(c)=0;
    end
end

S=zeros(1,length(tt));

for c=1:length(tt)
    S(c)=(cc(c))^(alfa);
end

for c=1:length(tt)
    if contt(c)==0
        S(c)=0;
    end
end

% Calculamos de nuevo la matriz de sincronización por si estaban
sincronizados en "zona" pero no en "tiempo":
for i=1:length(pesos)
    for j=1:length(pesos)
        teop(i,j)=abs(pesos(i)-pesos(j));
    end
end

for i=1:length(pesos)
    for j=1:length(pesos)
        if i~=j
            if (pesos(i)==0) | (pesos(j)==0)
                teop(i,j)=100;
            end
        end
    end
end

% Vemos si después de la penalización hay "sincronización real" entre el
operario 'o' y algún otro operario 'osinc':
for i=1:length(pesos)
    if i~=o
        if ((teop(o,i)<=3) & (teop(o,i)>=0)) & (zonas(o)==zonas(i))
            teop(o,i);
            o;
            osinc=i;
        end
    end
end

P=s+S;

suma=sum(P);

if suma~=0
    P=P*(1/suma);
end

suma=0;

for tarea=1:length(tt)
    suma=suma+P(tarea);
    P(tarea)=suma;
end

```

```

h=rand(1);
numtarea=1;

while (h>P(numtarea))
    numtarea=numtarea+1;
end

tarea=tt(numtarea);

if ot(numtarea)==1
    % Asignamos la tarea al operario 'o':
    tareas(o)=tarea;
    tarea1=tareas(1);
    tarea2=tareas(2);
    tarea3=tareas(3);
    tarea4=tareas(4);
    tareas=[tarea1 tarea2 tarea3 tarea4];

    numtareas(o)=numtarea;
    numtarea1=numtareas(1);
    numtarea2=numtareas(2);
    numtarea3=numtareas(3);
    numtarea4=numtareas(4);
    numtareas=[numtarea1 numtarea2 numtarea3 numtarea4];

    for i=1:4
        if i~=o % Sumamos el CAMBIO DE CONDICIÓN a los operarios que no son
'o'
            if zonas(i)~=0
                if (conds(i)==0) | (conds(i)==ct(numtarea))
                    pesos(i)=pesos(i);
                    conds(i)=conds(i);
                else
                    pesos(i)=pesos(i)+cc(numtarea);
                    conds(i)=ct(numtarea);
                end
            end
        else % Sumamos el CAMBIO DE CONDICIÓN, el DESPLAZAMIENTO y la
EJECUCIÓN al operario 'o'
            pesos(i)=pesos(i)+td(zonas(i),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tt(numtarea);
            conds(i)=ct(numtarea);
        end
    end
    peso1=pesos(1);
    peso2=pesos(2);
    peso3=pesos(3);
    peso4=pesos(4);
    pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

    cond1=conds(1);
    cond2=conds(2);
    cond3=conds(3);
    cond4=conds(4);
    conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

    rt(pos)=tareas(o);
    rz(pos)=zt(numtarea);
    rc(pos)=ct(numtarea);
    ro(pos)=numtarea;

    if o==1
        o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
        pos1=pos1+1;
    end
    if o==2
        o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
        pos2=pos2+1;
    end
    if o==3
        o3(pos3)=tarea;
        op3(pos3)=pos;
        pos3=pos3+1;
    end
    if o==4
        o4(pos4)=tarea;

```

```

        op4(pos4)=pos;
        pos4=pos4+1;
    end
    zonas(o)=zt(numtarea);
    zona1=zonas(1);
    zona2=zonas(2);
    zona3=zonas(3);
    zona4=zonas(4);
    zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

    contt(numtarea)=0;
    contz(numtarea)=0;

    pos=pos+1;
    poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

    else % Si la tarea seleccionada es de 2 operarios:
        if osinc==0
            % Seleccionaremos una tarea de 1 operario manteniendo 's' y 'S' y
            haciendo que las tareas de 2 operarios valgan '0':

            t1=contt;
            for i=1:length(tt) % Creo un vector 't1' para controlar si
            quedan tareas de 1 operario
                if (contt(i)~=0)&(ot(i)~=2)
                    t1(i)=ot(i);
                else
                    t1(i)=0;
                end
            end

            if sum(t1)==0 % No quedan más tareas de 1 operario sino sólo
            tareas de 2 operarios
                j=1;
                for i=1:150 % Creo un vector 'p2' que guarda las tareas de 2
                operarios que faltan por ejecutar
                    if contt(i)~=0
                        p2(j)=contt(i);
                        j=j+1;
                    end
                end
                % IMPORTANTE: Hasta aquí ya TENEMOS ASIGNADA una tarea 'numtarea'
                de 2 operarios para ejecutar:
                % IMPORTANTE: Además, ya tenemos los PESOS IGUALADOS (por
                penalización) para lograr sincronización de tiempo:

                % Añadimos a "pesos" el tiempo de "CAMBIO DE CONDICIÓN" de los 4
                operarios (CORREGIR)

                for i=1:4
                    if i~=o
                        if zonas(i)~=0
                            if ((conds(i)~=ct(numtarea))&(conds(i)~=0))
                                pesos(i)=pesos(i)+cc(numtarea);
                                conds(i)=ct(numtarea);
                            end
                        end
                    else
                        if ((conds(i)~=ct(numtarea))&(conds(i)~=0))
                            pesos(i)=pesos(i)+cc(numtarea);
                            conds(i)=ct(numtarea);
                        end
                    end
                end
                peso1=pesos(1);
                peso2=pesos(2);
                peso3=pesos(3);
                peso4=pesos(4);
                pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

                cond1=conds(1);
                cond2=conds(2);
                cond3=conds(3);
                cond4=conds(4);
                conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

```

```

% Tenemos a los operarios SINCRONIZADOS EN TIEMPO y bajo la
"CONDICIÓN DE OPERACIÓN" necesaria
% Debemos SELECCIONAR OPERARIO 'osinc' más adecuado que acompañe
al operario 'o'

for i=1:length(pesos)
    if i~=0
        if zt(numtarea)==zonas(i)
            osinc=i;
        end
    end
end

if osinc==0
    j=1;
    for i=1:length(pesos)
        if i~=0
            if zonas(i)~=0
                distancia(j)=td(zonas(i),zt(numtarea));
                j=j+1;
            end
        end
    end
    [minimo,osinc]=min(distancia);
end

% DESPLAZAMOS al operario 'o' u 'osinc' a la zona correspondiente
donde se debe ejecutar la tarea

pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zt(numtarea));
pesos(osinc)=pesos(osinc)+td(zonas(osinc),zt(numtarea));

peso1=pesos(1);
peso2=pesos(2);
peso3=pesos(3);
peso4=pesos(4);
pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

% Tras DESPLAZARLOS, si NO ESTÁN SINCRONIZADOS en TIEMPO tendrá
que ESPERAR uno de los dos operarios
if pesos(o)<pesos(osinc)
    tesp(o)=tesp(o)+(pesos(osinc)-pesos(o));
    pesos(o)=pesos(osinc);
else
    tesp(osinc)=tesp(osinc)+(pesos(o)-pesos(osinc));
    pesos(osinc)=pesos(o);
end
peso1=pesos(1);
peso2=pesos(2);
peso3=pesos(3);
peso4=pesos(4);
pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

tesp1=tesp(1);
tesp2=tesp(2);
tesp3=tesp(3);
tesp4=tesp(4);
tesp=[tesp1 tesp2 tesp3 tesp4];

% Ahora ya pueden EJECUTAR la "tarea de 2 operarios"
seleccionada:

pesos(o)=pesos(o)+tt(numtarea);
pesos(osinc)=pesos(osinc)+tt(numtarea);

peso1=pesos(1);
peso2=pesos(2);
peso3=pesos(3);
peso4=pesos(4);
pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

numtareas(o)=numtarea;
numtareas(osinc)=numtarea;
numtarea1=numtareas(1);
numtarea2=numtareas(2);
numtarea3=numtareas(3);
numtarea4=numtareas(4);
numtareas=[numtarea1 numtarea2 numtarea3 numtarea4];

```

```

tareas(o)=tarea;
tareas(osinc)=tarea;
tarea1=tareas(1);
tarea2=tareas(2);
tarea3=tareas(3);
tarea4=tareas(4);
tareas=[tarea1 tarea2 tarea3 tarea4];

conds(o)=ct(numtarea);
conds(osinc)=ct(numtarea);
cond1=conds(1);
cond2=conds(2);
cond3=conds(3);
cond4=conds(4);
conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

rt(pos)=tarea;
rz(pos)=zt(numtarea);
rc(pos)=ct(numtarea);
ro(pos)=numtarea;

if o==1
    o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
    pos1=pos1+1;
end
if o==2
    o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
    pos2=pos2+1;
end
if o==3
    o3(pos3)=tarea;
    op3(pos3)=pos;
    pos3=pos3+1;
end
if o==4
    o4(pos4)=tarea;
    op4(pos4)=pos;
    pos4=pos4+1;
end

if osinc==1
    o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
    pos1=pos1+1;
end
if osinc==2
    o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
    pos2=pos2+1;
end
if osinc==3
    o3(pos3)=tarea;
    op3(pos3)=pos;
    pos3=pos3+1;
end
if osinc==4
    o4(pos4)=tarea;
    op4(pos4)=pos;

    pos4=pos4+1;
end

zonas(o)=zt(numtarea);
zonas(osinc)=zt(numtarea);
zona1=zonas(1);
zona2=zonas(2);
zona3=zonas(3);
zona4=zonas(4);
zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

contt(numtarea)=0;
contz(numtarea)=0;

pos=pos+1;
poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];
else

% Si sum(t1)~=0 queda tareas de 1 operario:

```

```

s=zeros(1,length(tt));

for c=1:length(tt)
    if td(zonas(o),zt(c))==0
        s(c)=0.1;
    else
        s(c)=td(zonas(o),zt(c));
    end
end

for c=1:length(tt)
    s(c)=s(c)^(-alfa);
end

for c=1:length(tt)
    if contt(c)==0
        s(c)=0;
    end
end

S=zeros(1,length(tt));

for c=1:length(tt)
    S(c)=(cc(c)) ^(-alfa);
end

for c=1:length(tt)
    if contt(c)==0
        S(c)=0;
    end
end

for c=1:length(tt)
    if ot(c)==2
        s(c)=0;
        S(c)=0;
    end
end

P=s+S;

if sum(P)==0
    %disp('En la linea 6343 obtenemos un vector P de ceros')
    %disp('Significa que sólo quedan tareas de 2 operarios')
    STOP6939
end

suma=sum(P);

if suma~=0
    P=P*(1/suma);
end

suma=0;

for tarea=1:length(tt)
    suma=suma+P(tarea);
    P(tarea)=suma;
end

h=rand(1);
numtarea=1;

while (h>P(numtarea))
    numtarea=numtarea+1;
end

tarea=tt(numtarea);

tareas(o)=tarea;
tarea1=tareas(1);
tarea2=tareas(2);
tarea3=tareas(3);
tarea4=tareas(4);
tareas=[tarea1 tarea2 tarea3 tarea4];

numtareas(o)=numtarea;
numtarea1=numtareas(1);

```

```

numtarea2=numtareas(2);
numtarea3=numtareas(3);
numtarea4=numtareas(4);
numtareas=[numtarea1 numtarea2 numtarea3 numtarea4];

for i=1:4
    if i~=0
        if zonas(i)~=0
            if (conds(i)==0) | (conds(i)==ct(numtarea))
                pesos(i)=pesos(i);
                conds(i)=conds(i);
            else
                pesos(i)=pesos(i)+cc(numtarea);
                conds(i)=ct(numtarea);
            end
        end
    else
        pesos(i)=pesos(i)+td(zonas(i),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tt(numtarea);
        conds(i)=ct(numtarea);
    end
end
peso1=pesos(1);
peso2=pesos(2);
peso3=pesos(3);
peso4=pesos(4);
pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

cond1=conds(1);
cond2=conds(2);
cond3=conds(3);
cond4=conds(4);
conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

rt(pos)=tareas(o);
rz(pos)=zt(numtarea);
rc(pos)=ct(numtarea);
ro(pos)=numtarea;

if o==1
    o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
    pos1=pos1+1;
end
if o==2
    o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
    pos2=pos2+1;
end
if o==3
    o3(pos3)=tarea;
    op3(pos3)=pos;
    pos3=pos3+1;
end
if o==4
    o4(pos4)=tarea;
    op4(pos4)=pos;

    pos4=pos4+1;
end

zonas(o)=zt(numtarea);
zonal=zonas(1);
zona2=zonas(2);
zona3=zonas(3);
zona4=zonas(4);
zonas=[zonal zona2 zona3 zona4];

contt(numtarea)=0;
contz(numtarea)=0;

pos=pos+1;
poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];
end
else
numtareas(o)=numtarea;
numtareas(osinc)=numtarea;
numtarea1=numtareas(1);
numtarea2=numtareas(2);

```

```

numtarea3=numtareas(3);
numtarea4=numtareas(4);
numtareas=[numtarea1 numtarea2 numtarea3 numtarea4];

tareas(o)=tarea;
tareas(osinc)=tarea;
tarea1=tareas(1);
tarea2=tareas(2);
tarea3=tareas(3);
tarea4=tareas(4);
tareas=[tarea1 tarea2 tarea3 tarea4];

for i=1:4
    if (i~=o)&(i~=osinc)
        if zonas(i)~=0
            if (conds(i)==0)|(conds(i)==ct(numtarea))
                pesos(i)=pesos(i);
                conds(i)=conds(i);
            else
                pesos(i)=pesos(i)+cc(numtarea);
                conds(i)=ct(numtarea);
            end
        end
    else
        pesos(i)=pesos(i)+td(zonas(i),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tt(numtarea);
        conds(i)=ct(numtarea);
    end
end

conds(o)=ct(numtarea);
conds(osinc)=ct(numtarea);
cond1=conds(1);
cond2=conds(2);
cond3=conds(3);
cond4=conds(4);
conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

rt(pos)=tarea;
rz(pos)=zt(numtarea);
rc(pos)=ct(numtarea);
ro(pos)=numtarea;

if o==1
    o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
    pos1=pos1+1;
end
if o==2
    o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
    pos2=pos2+1;
end
if o==3
    o3(pos3)=tarea;
    op3(pos3)=pos;
    pos3=pos3+1;
end
if o==4
    o4(pos4)=tarea;
    op4(pos4)=pos;
    pos4=pos4+1;
end

if osinc==1
    o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
    pos1=pos1+1;
end
if osinc==2
    o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos;
    pos2=pos2+1;
end
if osinc==3
    o3(pos3)=tarea;
    op3(pos3)=pos;
    pos3=pos3+1;
end
if osinc==4
    o4(pos4)=tarea;

```

```

        op4(pos4)=pos;

        pos4=pos4+1;
    end

    if pesos(o)<pesos(osinc)
        tesp(o)=tesp(o)+(pesos(osinc)-pesos(o));
        pesos(o)=pesos(osinc);
    else
        tesp(osinc)=tesp(osinc)+(pesos(o)-pesos(osinc));
        pesos(osinc)=pesos(o);
    end
    peso1=pesos(1);
    peso2=pesos(2);
    peso3=pesos(3);
    peso4=pesos(4);
    pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

    tesp1=tesp(1);
    tesp2=tesp(2);
    tesp3=tesp(3);
    tesp4=tesp(4);
    tesp=[tesp1 tesp2 tesp3 tesp4];

    zonas(o)=zt(numtarea);
    zonas(osinc)=zt(numtarea);
    zona1=zonas(1);
    zona2=zonas(2);
    zona3=zonas(3);
    zona4=zonas(4);
    zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

    contt(numtarea)=0;
    contz(numtarea)=0;

    pos=pos+1;
    poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];
end
else % FIN BUCLE PENALIZACIÓN
    % Como sum(P)~=0 No hay PENALIZACIÓN y NO HAY SINCRONIZACIÓN:

    suma=sum(P);

    if suma~=0
        P=P*(1/suma);
    end

    suma=0;

    for tarea=1:length(tt)
        suma=suma+P(tarea);
        P(tarea)=suma;
    end

    h=rand(1);
    numtarea=1;

    while (h>P(numtarea))
        numtarea=numtarea+1;
    end

    tarea=tt(numtarea);

    tareas(o)=tarea;
    tarea1=tareas(1);
    tarea2=tareas(2);
    tarea3=tareas(3);
    tarea4=tareas(4);
    tareas=[tarea1 tarea2 tarea3 tarea4];

    numtareas(o)=numtarea;
    numtarea1=numtareas(1);
    numtarea2=numtareas(2);
    numtarea3=numtareas(3);
    numtarea4=numtareas(4);

```

```

numtareas=[numtarea1 numtarea2 numtarea3 numtarea4];

if (ct(numtarea)==conds(o))
    pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zt(numtarea))+tarea;
else
    pesos(o)=pesos(o)+td(zonas(o),zt(numtarea))+cc(numtarea)+tarea;
end
peso1=pesos(1);
peso2=pesos(2);
peso3=pesos(3);
peso4=pesos(4);
pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

conds(o)=ct(numtarea);
cond1=conds(1);
cond2=conds(2);
cond3=conds(3);
cond4=conds(4);
conds=[cond1 cond2 cond3 cond4];

rt(pos)=tareas(o);
rz(pos)=zt(numtarea);
rc(pos)=ct(numtarea);
ro(pos)=numtarea;

if o==1
    o1(pos1)=tarea;op1(pos1)=pos;
    pos1=pos1+1;
end
if o==2
    o2(pos2)=tarea;op2(pos2)=pos2;
    pos2=pos2+1;
end
if o==3
    o3(pos3)=tarea;
    op3(pos3)=pos;
    pos3=pos3+1;
end
if o==4
    o4(pos4)=tarea;
    op4(pos4)=pos;
    pos4=pos4+1;
end

zonas(o)=zt(numtarea);
zona1=zonas(1);
zona2=zonas(2);
zona3=zonas(3);
zona4=zonas(4);
zonas=[zona1 zona2 zona3 zona4];

contt(numtarea)=0;
contz(numtarea)=0;

pos=pos+1;
poss=[pos1 pos2 pos3 pos4];

end
end
end

peso1=pesos(1)+td(zonas(1),zfinal);
peso2=pesos(2)+td(zonas(2),zfinal);
peso3=pesos(3)+td(zonas(3),zfinal);
peso4=pesos(4)+td(zonas(4),zfinal);
pesos=[peso1 peso2 peso3 peso4];

zonal=zfinal;
zona2=zfinal;
zona3=zfinal;
zona4=zfinal;
zonas=[zonal zona2 zona3 zona4];

PESOSJ2=pesos;
pesos=PESOSJ1+PESOSJ2;

```

```

% Para tener los tiempos reales, restamos a los operarios 3 y 4 '60 minutos' ya que
empezaban media hora más tarde:
pesos(3)=pesos(3)-60;
pesos(4)=pesos(4)-60;

SUMPESOS(Z)=sum(pesos);

if SUMPESOS(Z)<SUMPES
    SUMPES=SUMPESOS(Z);
    SUMPES
    dmin=Z;
    SOL=pesos;
    CONDS=conds;
    ZONAS=zonas;
    TESP=tesp;
    PENALS=penals;
    RT=rt';
    RZ=rz';
    RC=rc';
    RO=ro';
    RTT=tt(ro)';
    RNT=nt(ro)';
    POSS=poss;
    O1=o1';
    O2=o2';
    O3=o3';
    O4=o4';
    OP1=op1';
    OP2=op2';
    OP3=op3';
    OP4=op4';
end

end

toc

operarios=[1 2 3 4];
Fin=[operarios;SOL;CONDS;ZONAS;TESP;PENALS];
Fin=Fin';
pos
disp('Mejor resultado al finalizar todo el mantenimiento' )
disp('_____')
disp('Oper. Pesos Conds Zonas Tesp Penals');disp(Fin)

SSUM=sum(SUMPESOS);

for i=1:Z
SUMedio(i)=SSUM/Z;
end

sum(SOL)
SUMedio(Z)

Y=[SOL;TESP;PENALS];

figure('Position',[90 100 1100 600])
subplot(1,2,1)
bar3(Y,'group')
grid on
%brush on
Title('Tiempos acumulados al finalizar el Mantenimiento
Preventivo','FontName','times','FontSize',12)
xlabel('Minutos','FontName','times','FontSize',11)
set(gca,'ZTick',[0 30 50 100 150 200 250 300 350 400 450 510 550 600 650 700 750])
set(gca,'YTickLabel',{'Pesos','Espera','Penalizaciones'],'FontName','times','FontSize',11,'Po
sition',[0.1071 0.02381 0.3643 0.9429])
rotate3d;
view([-145.5 16]);
colormap(autumn)

operarios=[1 2 3 4];
J1=[operarios;jornada1;conds1;zonas1;tespJ1;penalsJ1];
J1=J1';
posjornadal
disp('Resultados hasta finalizar la primera jornada' )
disp('_____')
disp(' Operar. Pesos Conds Zonas Tesp Penals');disp(J1)

```

```

subplot(1,2,2)
hold on
box on
grid on
set(gca,'YLim',[1900 3900],'Layer','top')
set(gca,'XLim',[1 ni],'Layer','top')
d=1:1:ni;
plot(d,SUMedio(d),'--r','LineWidth',2)
plot(d,SUMPESOS(d),'-ro','MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',4)
plot(dmin,SUMPESOS(dmin),'-ro','MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','g','MarkerSize',6)
Title(['Conjunto de soluciones para \alpha=',num2str(alfa),' y ',num2str(ni),'
iteraciones.'],'FontName','times','FontSize',12)
xlabel(['Soluciones para cada iteración'],'FontName','times','FontSize',11)
ylabel(['Minutos'],'FontName','times','FontSize',11,'Position',[0.6357 0.2738 0.3304 0.4952])

```