

# OPTIMIZACIÓN DE LA RELACIÓN COSTE/DURACIÓN DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO. REDUCCIÓN A COSTE MÍNIMO.

# Objetivos

Planificar y programar el mantenimiento preventivo mediante técnicas:

PERT.

CPM.

Programación lineal.

Nivelación de Project.

# Objetivos

Cuantificar:

- Duración de actividades e intervención.
- Recursos necesarios y su sobreasignación.
- Coste de mantenimiento y de parada.
- Duración probable de la intervención.

# Fases

## FASE 1

Plan básico programado de mantenimiento.

Nivelación de recursos existentes.

Plazo de ejecución.

Probabilidad de finalizar el plan.

## FASE 2

Programación de proyecto a coste mínimo.

# Fases



# Fases



# Fase 1

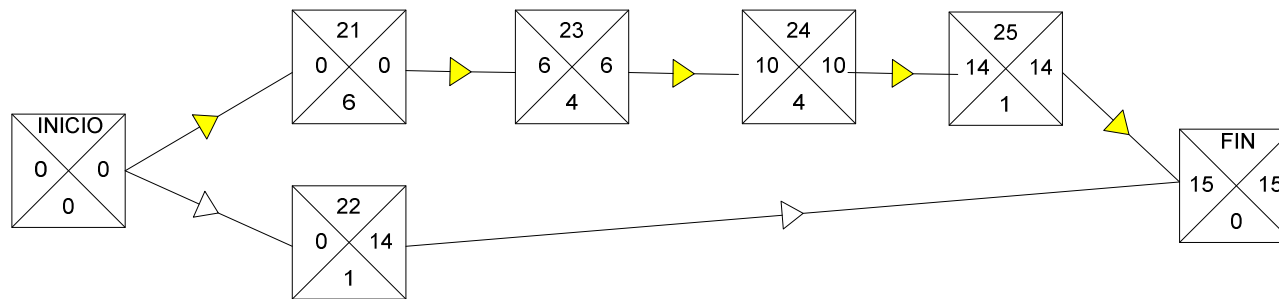
- 1.Actividades.
- 2.Diagrama de precedencias.
- 3.Determinación camino crítico.
- 4.Asignación de recursos.
- 5.Determinar sobreasignaciones.
- 6.Probabilidad (PERT).
- 7.Nivelación de recursos y determinación del nuevo plazo.

# Fase 1. Actividades.

Código	Descripción	Duración	Código	Descripción	Duración
111	Sustitución electroválvulas	3	21	Cambio rodamientos	6
112	Sustitución regulador	1	22	Revisión motorreductor	1
113	Sustitución manguitos	1	23	Sustitución rascadores	4
114	Revisión y purga calderín	0,5	24	Sustitución cinta	4
115	Sustitución pistones	5	25	Conexión	1
121	Desmontaje reductor	3	31	Desconexión	5
122	Revisión reductor	2	32	Rodamientos Cintas	4
123	Montaje reductor	4	33	Desmontar girador	4
131	Desmontaje reductor	3	34	Sustitución cinta	3
132	Revisión reductor	2	35	Rodamientos parte baja	5
133	Montaje reductor	4	36	Motorreductor 1	1
141	Sustitución correas	4	37	Motorreductor 2	2
142	Limpieza de ejes	4	38	Conexión	7
143	Cambio cadenas	2			
151	Cambio de aceite	4			
152	Cambio electroválvula 1	6			
153	Cambio electroválvula 2	6			
154	Cambio electroválvula 3	6			
155	Cambio electroválvula 4	6			
16	Revisión cuadro	6			
17	Apriete tornillería	8			

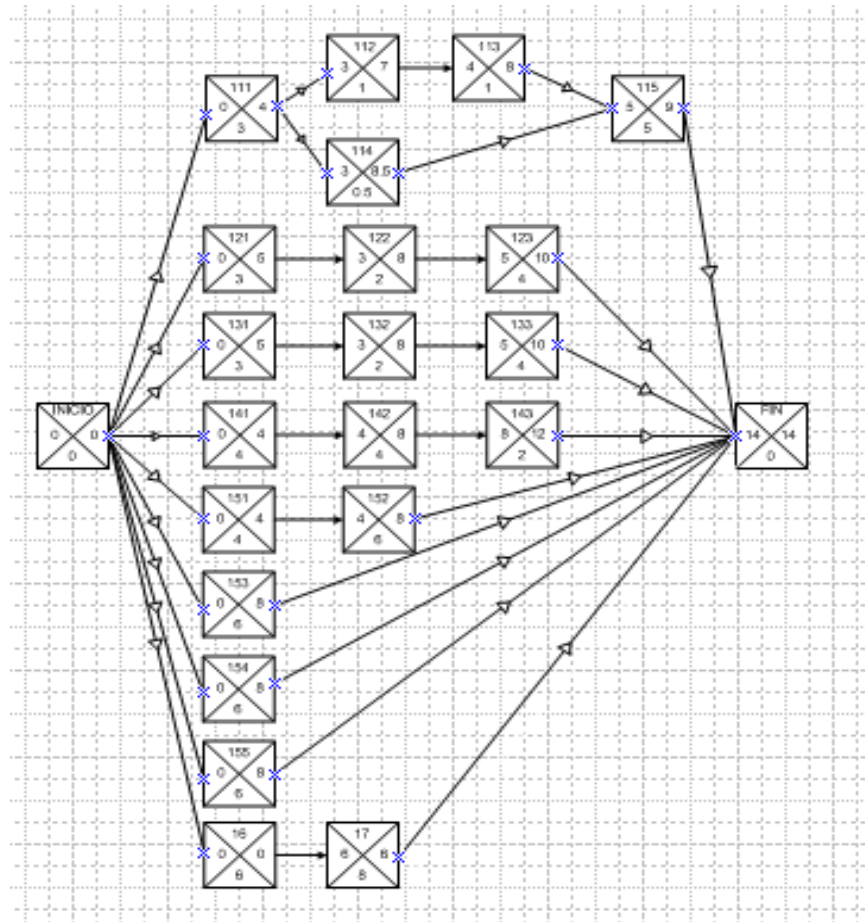


# Fase 1. Diagrama de precedencias



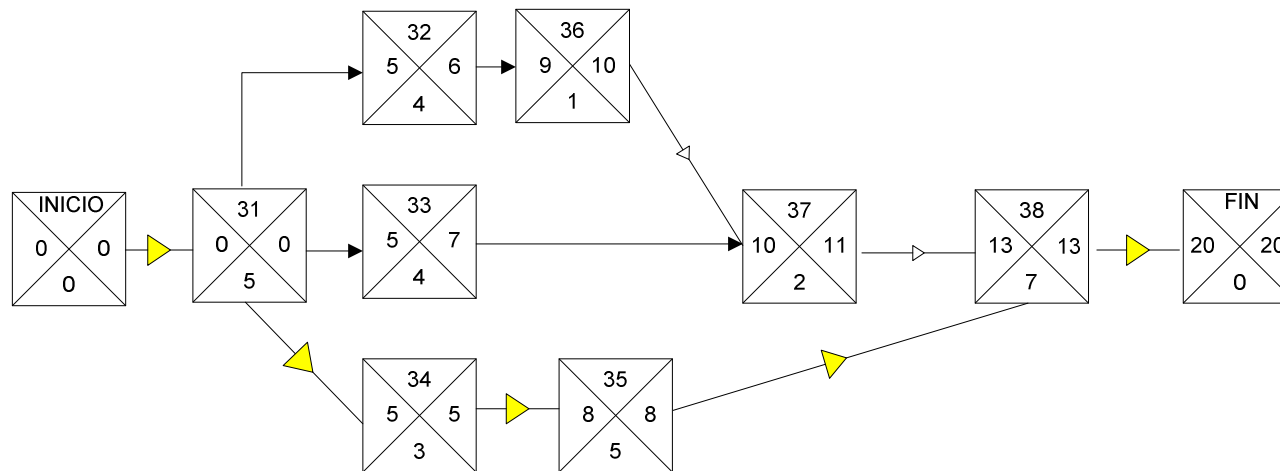
Línea 2  
2 caminos

# Fase 1. Diagrama de precedencias



Línea 1  
10 caminos

# Fase 1. Diagrama de precedencias

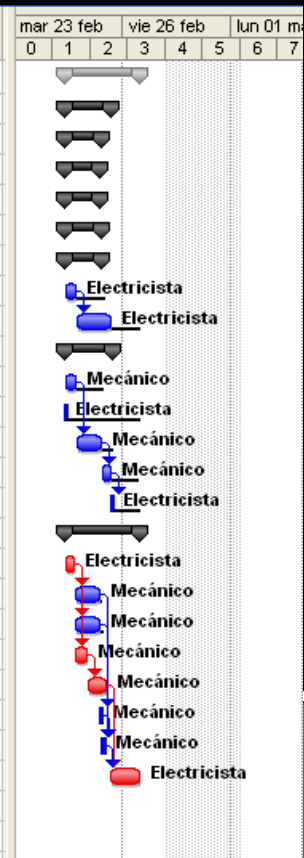


Línea 3  
3 caminos  
Camino crítico  
31-34-35-38

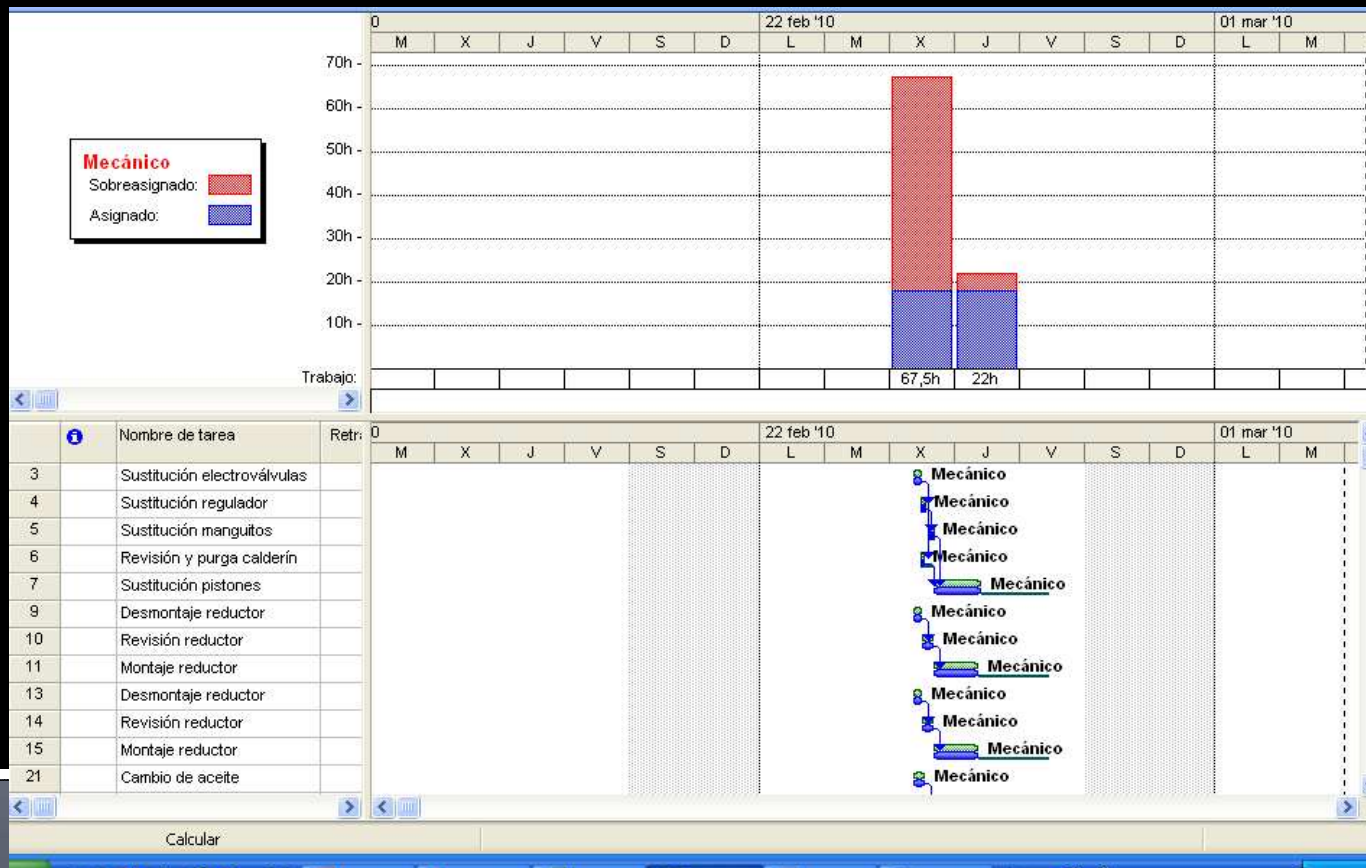
➡ Volver a PERT

# Fase 1. Asignación de recursos.

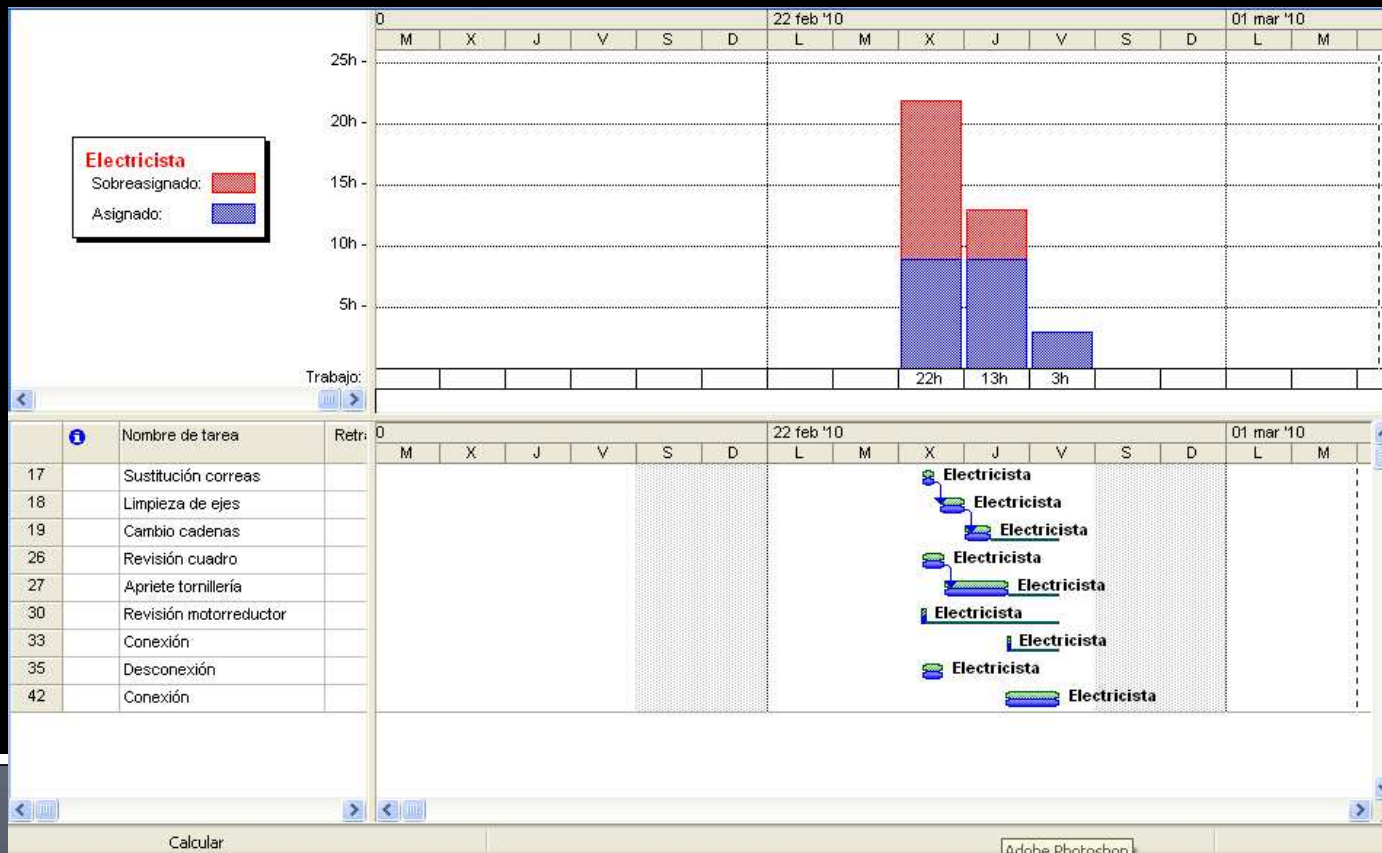
	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	Predeces	mar 23 feb	vie 26 feb	lun 01 mar
						0	1	2
0	☐ <b>Mantenimiento Línea</b>	20 horas	mié 24/02/10	vie 26/02/10				
1	☐ <b>1 Ensacadora</b>	14 horas	mié 24/02/10	jue 25/02/10				
2	☑ <b>1.1 Grupo neumático</b>	10 horas	mié 24/02/10	jue 25/02/10				
8	☑ <b>1.2 Reductor 1</b>	9 horas	mié 24/02/10	jue 25/02/10				
12	☑ <b>1.3 Reductor 2</b>	9 horas	mié 24/02/10	jue 25/02/10				
16	☑ <b>1.4 Sistema de arrastre</b>	10 horas	mié 24/02/10	jue 25/02/10				
20	☑ <b>1.5 Grupo hidráulico</b>	10 horas	mié 24/02/10	jue 25/02/10				
26	1.6 Revisión cuadro	6 horas	mié 24/02/10	mié 24/02/10				
27	1.7 Apriete tornillería	8 horas	mié 24/02/10	jue 25/02/10	26			
28	☐ <b>2 Tolva de alimentación</b>	15 horas	mié 24/02/10	jue 25/02/10				
29	2.1 Cambio rodamientos	6 horas	mié 24/02/10	mié 24/02/10				
30	2.2 Revisión motorreductor	1 hora	mié 24/02/10	mié 24/02/10				
31	2.3 Sustitución rascadores	4 horas	mié 24/02/10	jue 25/02/10	29			
32	2.4 Sustitución cinta	4 horas	jue 25/02/10	jue 25/02/10	31			
33	2.5 Conexión	1 hora	jue 25/02/10	jue 25/02/10	32			
34	☐ <b>3 Paletizador</b>	20 horas	mié 24/02/10	vie 26/02/10				
35	3.1 Desconexión	5 horas	mié 24/02/10	mié 24/02/10				
36	3.2 Rodamientos cintas	4 horas	mié 24/02/10	jue 25/02/10	35			
37	3.3 Desmontar girador	4 horas	mié 24/02/10	jue 25/02/10	35			
38	3.4 Sustitución cinta	3 horas	mié 24/02/10	mié 24/02/10	35			
39	3.5 Rodamientos parte baja	5 horas	jue 25/02/10	jue 25/02/10	38			
40	3.6 Motorreductor 1	1 hora	jue 25/02/10	jue 25/02/10	36			
41	3.7 Motorreductor 2	2 horas	jue 25/02/10	jue 25/02/10	37,40			
42	3.8 Conexión	7 horas	jue 25/02/10	vie 26/02/10	39,41			



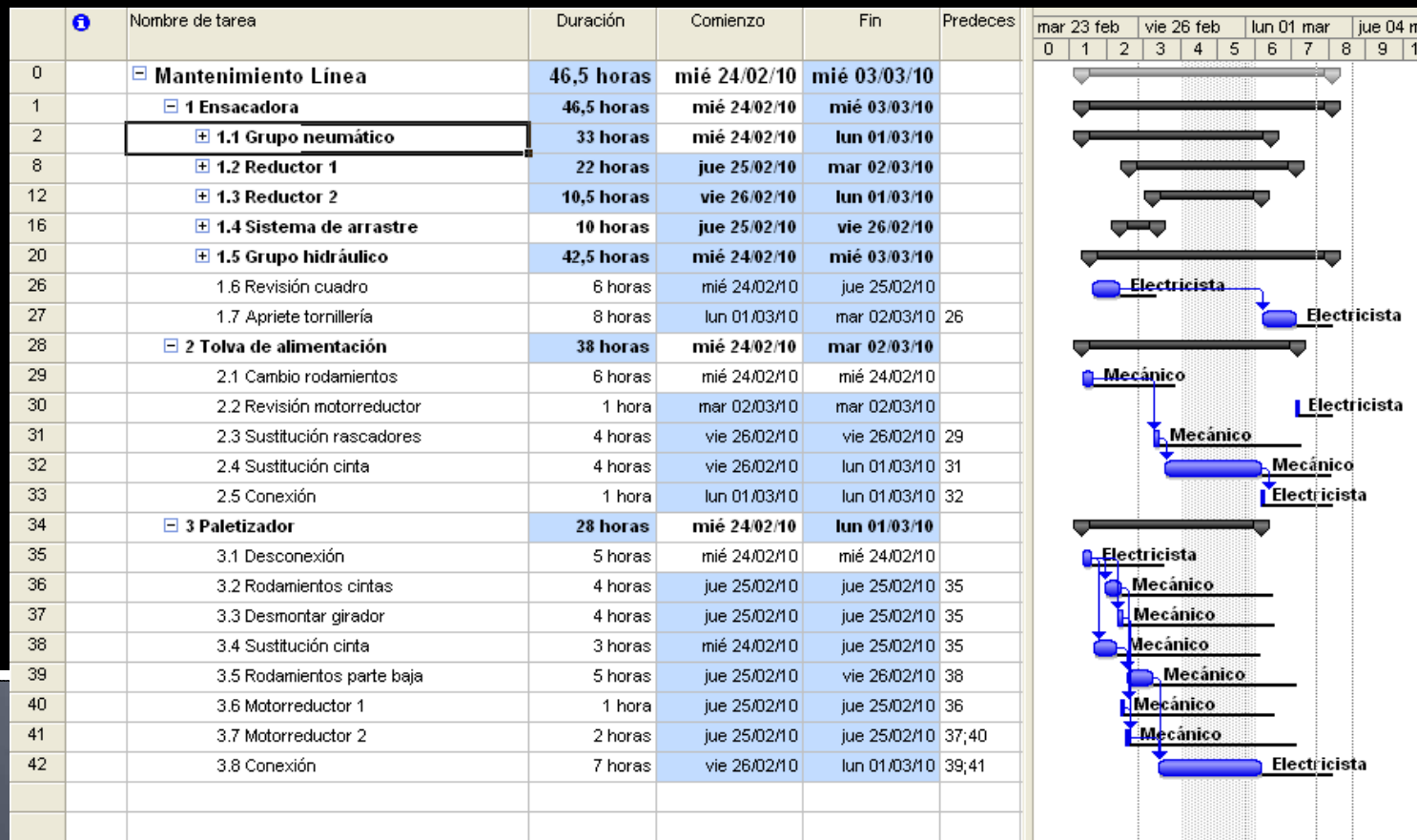
# Fase 1. Sobreasignación



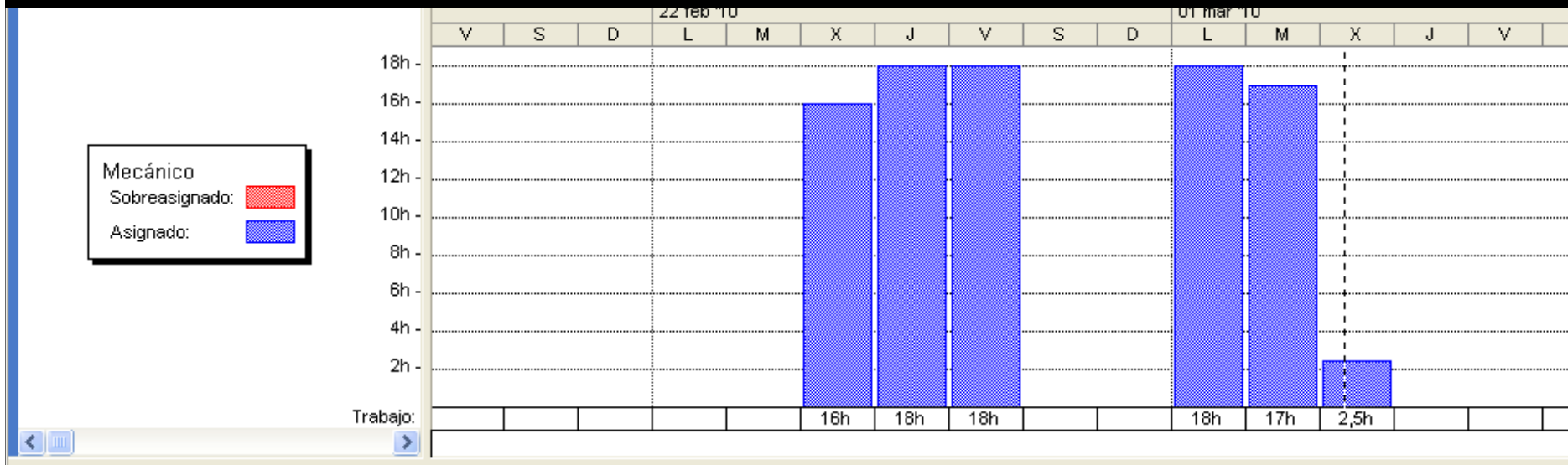
# Fase 1. Sobreasignación



# Fase 1. Nivelación de recursos.



# Fase 1. Nivelación de recursos.





# Fase 1. PERT

1. Determinación de duraciones.
2. Determinación de varianzas.

Duración esperada =  $(a+4b+c)/6$

Varianza =  $(b - a)/6^2$

# Fase 1. PERT.

COD	Descripción	Opt	Esp	Pes	COD	Descripción	Opt	Esp	Pes
111	Sustitución electroválvulas	2,5	3	3,5	21	Cambio rodamientos	5	6	7
112	Sustitución regulador	0,5	1	1,5	22	Revisión motorreductor	1	1	1
113	Sustitución manguitos	0,5	1	1,5	23	Sustitución rascadores	3	4	5
114	Revisión y purga calderín	0,5	0,5	0,5	24	Sustitución cinta	3	4	5
115	Sustitución pistones	4	5	6	25	Conexión	1	1	1
121	Desmontaje reductor	2	3	4	31	Desconexión	4	5	6
122	Revisión reductor	1,5	2	2,5	32	Rodamientos Cintas	3	4	5
123	Montaje reductor	3	4	5	33	Desmontar girador	3	4	6
131	Desmontaje reductor	2	3	4	34	Sustitución cinta	2,5	3	4
132	Revisión reductor	1,5	2	2,5	35	Rodamientos parte baja	4	5	6
133	Montaje reductor	3	4	5	36	Motorreductor 1	1	1	1
141	Sustitución correas	3	4	5	37	Motorreductor 2	1,5	2	3
142	Limpieza de ejes	3,5	4	4,5	38	Conexión	5	7	8
143	Cambio cadenas	2	2	2					
151	Cambio de aceite	3	4	5					
152	Cambio electroválvula 1	5	6	7					
153	Cambio electroválvula 2	5	6	7					
154	Cambio electroválvula 3	5	6	7					
155	Cambio electroválvula 4	5	6	7					
16	Revisión cuadro	5	6	8					
17	Apriete tornillería	6	8	10					

# Fase 1. PERT.

Código	Descripción	Duración	Esperada	Varianza
31	Desconexión	5	5,00	0,11
32	Rodamientos Cintas	4	4,00	0,11
33	Desmontar girador	4	4,17	0,25
34	Sustitución cinta	3	3,08	0,06
35	Rodamientos parte baja	5	5,00	0,11
36	Motorreductor 1	1	1,00	0,00
37	Motorreductor 2	2	2,08	0,06
38	Conexión	7	6,83	0,25

Duración esperada =  $(a+4b+c)/6$

Varianza =  $[(b - a)/6]^2$

# Fase 1. PERT

Camino crítico formado por las tareas:

**31 - 34 - 35 - 38**

5h - 3,1h - 5 h - 6,8 h

Duración esperada: 19,9 horas.

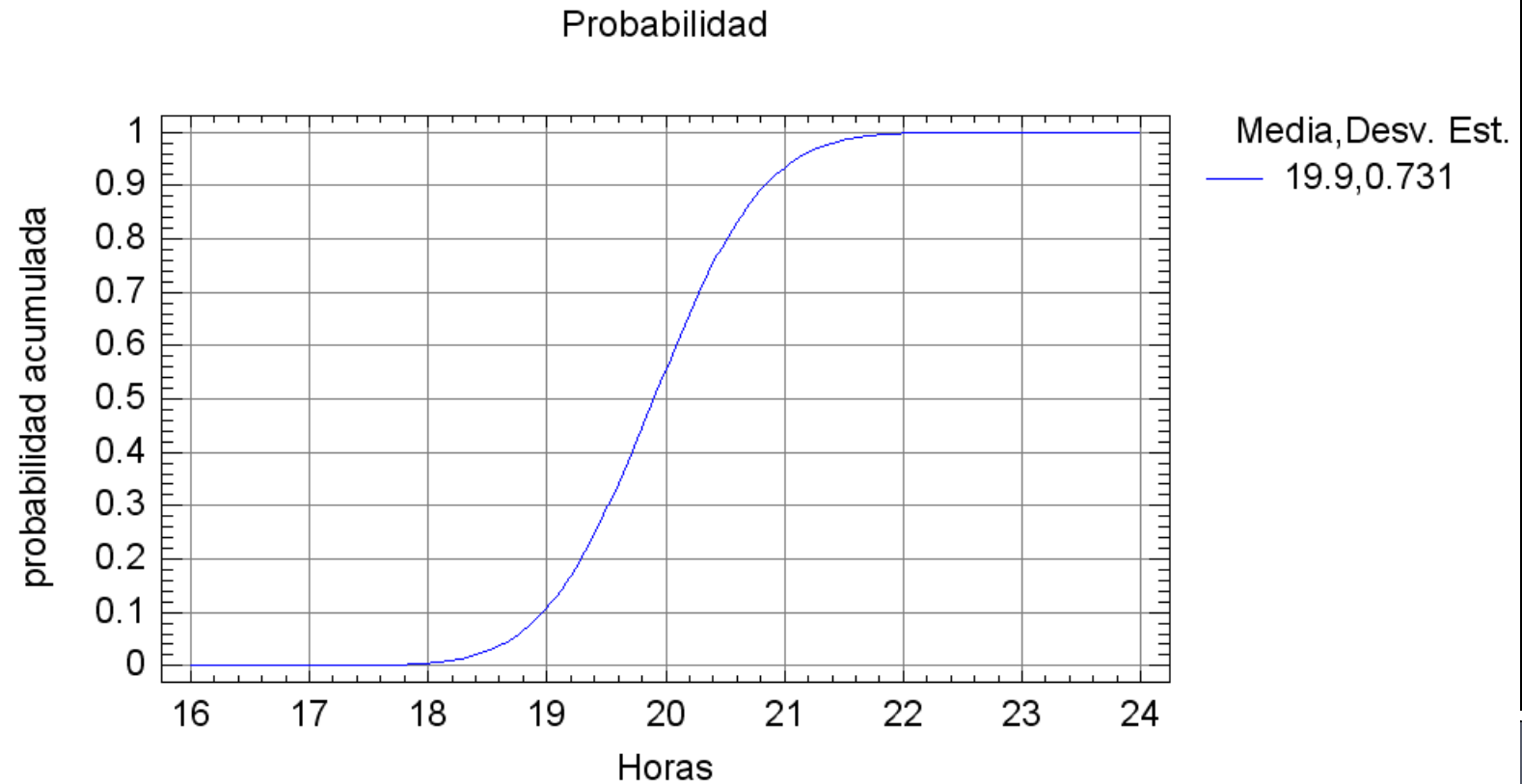
Varianza: 0,5 horas<sup>2</sup>.

Desviación: 0,731 horas.



Ir a diagrama de precedencias

# Fase 1. PERT



# Fase 1. PERT.

Una vez obtenida la distribución normal con media 19,9 y varianza 0,5 se pueden calcular las probabilidades para distintas opciones:

1. 95% de probabilidades de finalizar entre la hora 18,4 y la hora 21,33.
2. 95% de probabilidades de finalizar antes de 21,1 horas.
3. Probabilidad de finalizar en 19,9 horas o menos igual a 50%.
4. Probabilidad de finalizar en 19 horas o menos igual a 10%.
5. Probabilidad de finalizar en 21 horas o menos igual a 93,38%.

# Fase 1. PERT

El PERT obtenido en Project da tres valores para la duración del camino crítico\*, con lo que se obtiene una duración optimista, una esperada y una pesimista.

Optimista: 16,5 horas.

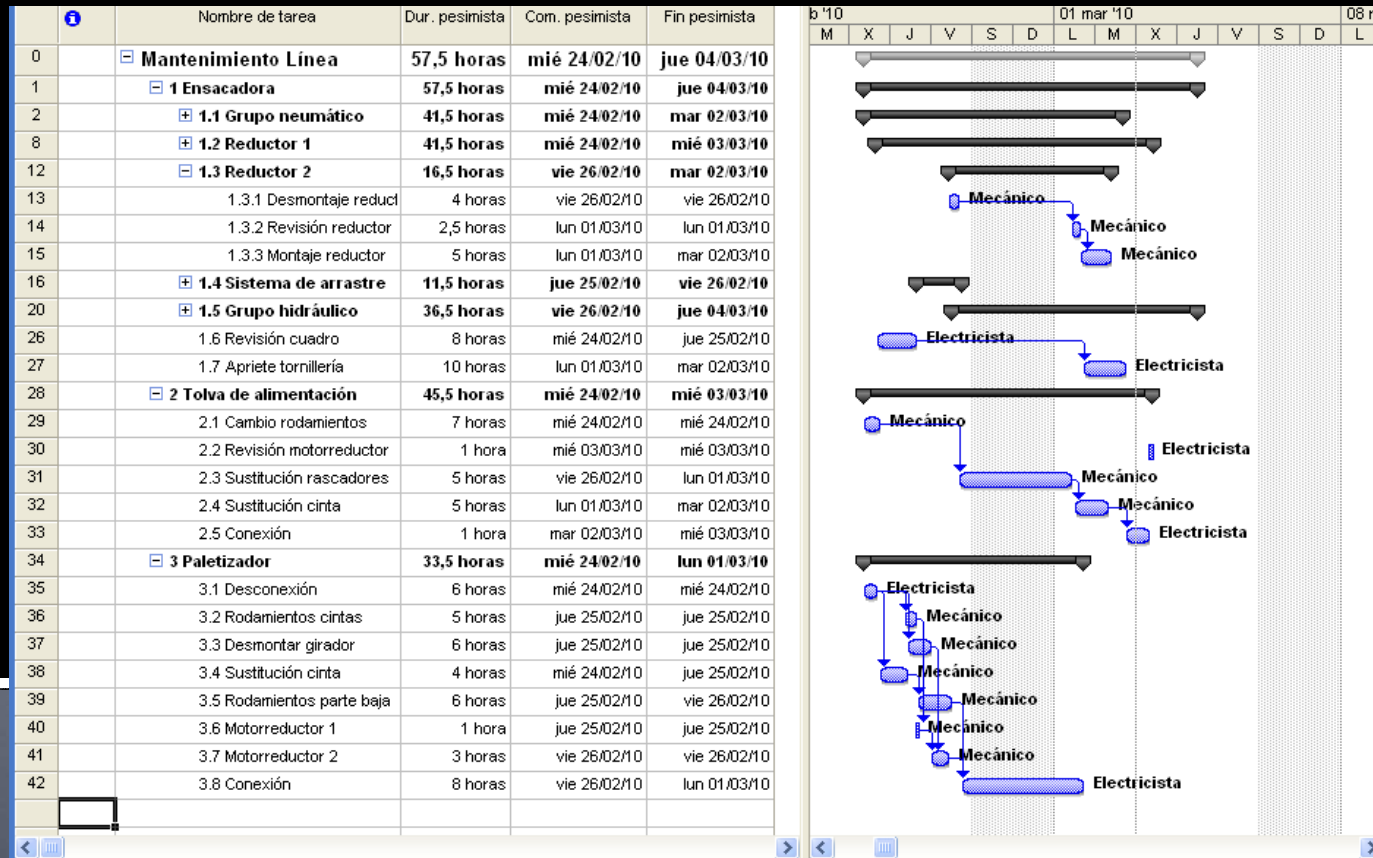
Esperada: 20 horas.

Pesimista: 24,5 horas.

\*En este caso se ha forzado la simulación de modo que los recursos no sean limitantes.

# Fase 1. PERT

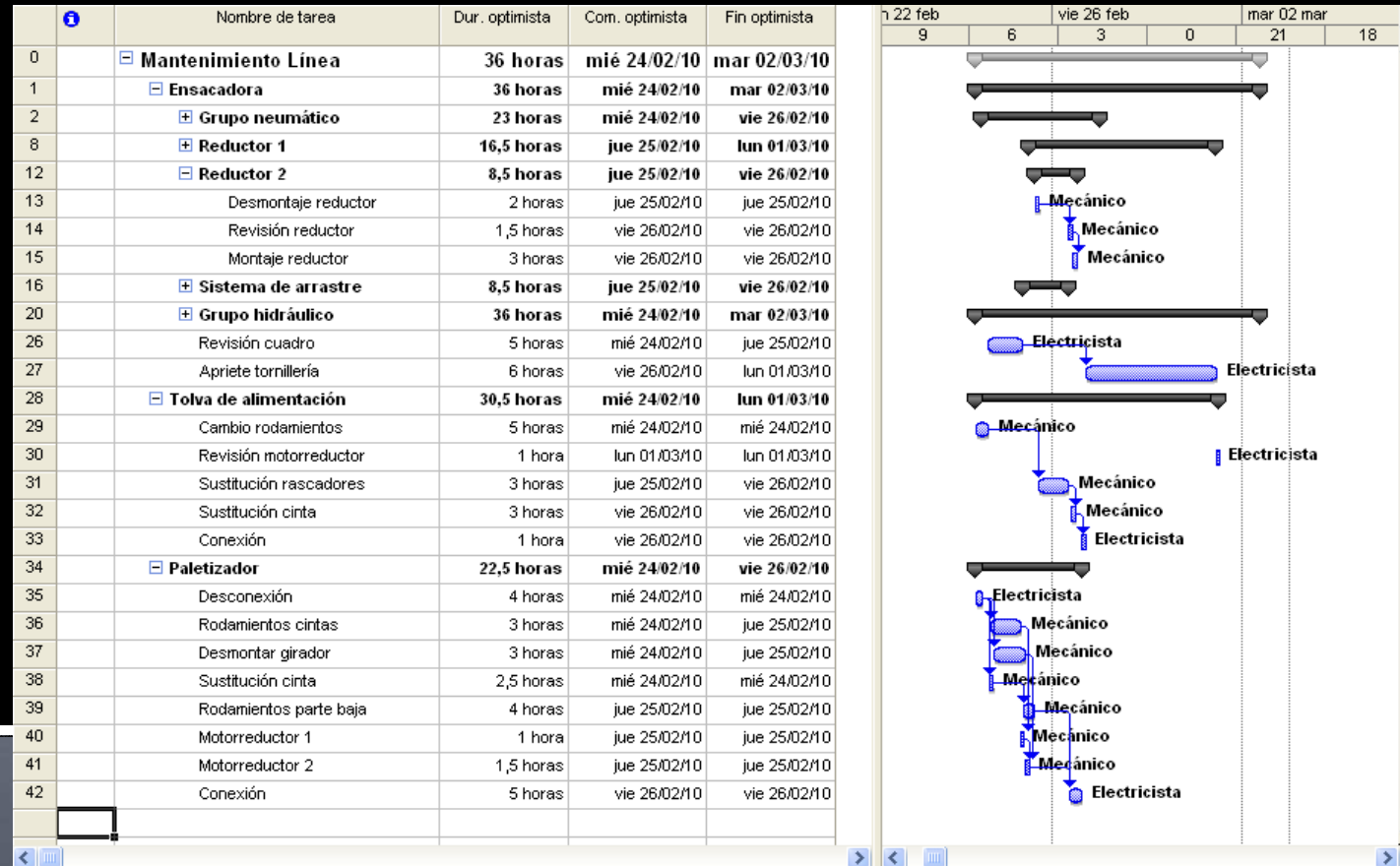
PERT pesimista obtenido en Project con los recursos reales.





# Fase 1. PERT

PERT optimista obtenido en Project con los recursos reales.



# Fase 1. Conclusiones.

La planificación y programación de proyectos con las técnicas anteriores permite obtener información acerca de:

1. Recursos necesarios.
2. Duración del plan de mantenimiento y tiempo estimado de paro de la línea.
3. Actividades “cuello de botella” donde poder dedicar más recursos para acelerar el proyecto.
4. Ratio de costes Hora Paro / Hora intervención.

# Fase 1. Conclusiones.

## 1. RECURSOS NECESARIOS

Mecánicos: 89,83 horas.

Electricista: 38 horas.

A partir del total de horas se puede conocer el coste del plan de mantenimiento preventivo.

2 mecánicos y 1 electricista no son suficientes para llevar a cabo el mantenimiento en las 20 horas de duración del camino crítico.

# Fase 1. Conclusiones.

## 2. DURACIÓN

El tiempo mínimo de intervención es de 20 horas (camino crítico).

Dado que los recursos limitan esta ejecución, al nivelar con los existentes, se obtiene una duración estimada de 46,5 horas.

Con el estudio PERT se obtienen probabilidades de duración del camino crítico.

# Fase 1. Conclusiones.

## 3. ACTIVIDADES “CUELLO DE BOTELLA”

Se obtienen las actividades **31 - 34 - 35 - 38** como camino crítico (para todo el proyecto). Son las actividades donde se deberían dedicar más recursos si se quiere acortar el tiempo de paro de la línea.

En la fase 2 se estudiará la programación a coste mínimo.

# Fase 1. Conclusiones.

## 4. COSTE PARO LÍNEA / COSTE INTERVENCIÓN

A partir del coste que supone parar la línea 1 hora se puede estudiar la viabilidad de incrementar recursos para acortar la duración del plan de mantenimiento (Fase 2).

## Fase 2. Reducción coste mínimo.

En esta fase se estudiarán todas las actividades para ver cuales de ellas pueden ver disminuida su duración y el coste asociado por hora reducida.

A continuación se determinarán los nuevos diagramas de precedencias y se detectarán si aparecen nuevos caminos críticos.

Mediante programación lineal se optimizará la reducción de la duración de aquellas tareas que permitan disminuir el camino crítico.

# Fase 2. Reducción coste mínimo.

- 1.Actividades.
- 2.Diagrama de precedencias.
- 3.Determinación camino crítico.
- 4.Intervalo factible de reducción del camino crítico y coste.
- 5.Reducción global de la duración del proyecto con nivelación de recursos.
- 6.Valoración económica y viabilidad de la reducción.



# Fase 2. Actividades.

Código	Descripción	Duración	Duracion tope	Coste unitario	Recurso
111	Sustitución electroválvulas	3	2	22	Agen
112	Sustitución regulador	1	1	0	-
113	Sustitución manguitos	1	1	0	-
114	Revisión y purga calderín	0,5	0,5	0	-
115	Sustitución pistones	5	3	48	Aesp
121	Desmontaje reductor	3	1	22	Agen
122	Revisión reductor	2	2	0	-
123	Montaje reductor	4	1	22	Agen
131	Desmontaje reductor	3	1	22	Agen
132	Revisión reductor	2	2	0	-
133	Montaje reductor	4	1	22	Agen
141	Sustitución correas	4	4	0	-
142	Limpieza de ejes	4	4	0	-
143	Cambio cadenas	2	2	0	-
151	Cambio de aceite	4	3	48	Aesp
152	Cambio electroválvula 1	6	3	48	Aesp
153	Cambio electroválvula 2	6	3	48	Aesp
154	Cambio electroválvula 3	6	3	48	Aesp
155	Cambio electroválvula 4	6	3	48	Aesp
16	Revisión cuadro	6	3	48	Aesp
17	Apriete tornillería	7	4	48	Aesp

# Fase 2. Actividades.

Código	Descripción	Duración	Duración tope	Coste unitario	Recurso
21	Cambio rodamientos	6	4	22	Bgen
22	Revisión motorreductor	1	1	0	-
23	Sustitución rascadores	4	2	22	Bgen
24	Sustitución cinta	2	2	22	Bgen
25	Conexión	1	1	0	-
31	Desconexión	5	3	22	Cgen
32	Rodamientos Cintas	4	2	22	Cgen
33	Desmontar girador	4	2	22	Cgen
34	Sustitución cinta	3	1	50	Cesp
35	Rodamientos parte baja	5	4	50	Cesp
36	Motorreductor 1	1	1	0	
37	Motorreductor 2	2	1	22	Cgen
38	Conexión	7	5	22	Cgen

# Fase 2. Diagrama de precedencias.

## FASE 1

Línea 1:  
16-17: 14 horas

Línea 2:  
L21-23-24-25: 15 horas

Línea 3:  
31-34-35-38: 20 horas

**Camino crítico: 20 horas**

## FASE 2

Línea 1:  
141-142-143: 10 horas

Línea 2:  
L21-23-24-25: 9 horas

Línea 3:  
31-32-36-37-38: 13 horas

**Camino crítico: 13 horas**



Volver a reducción global

# Fase 2. Intervalo de reducción.

El modelo de programación lineal se lanzará para las duraciones de:

- 20 horas
- 19 horas
- 18 horas
- 17 horas
- 16 horas
- 15 horas
- 14 horas
- 13 horas

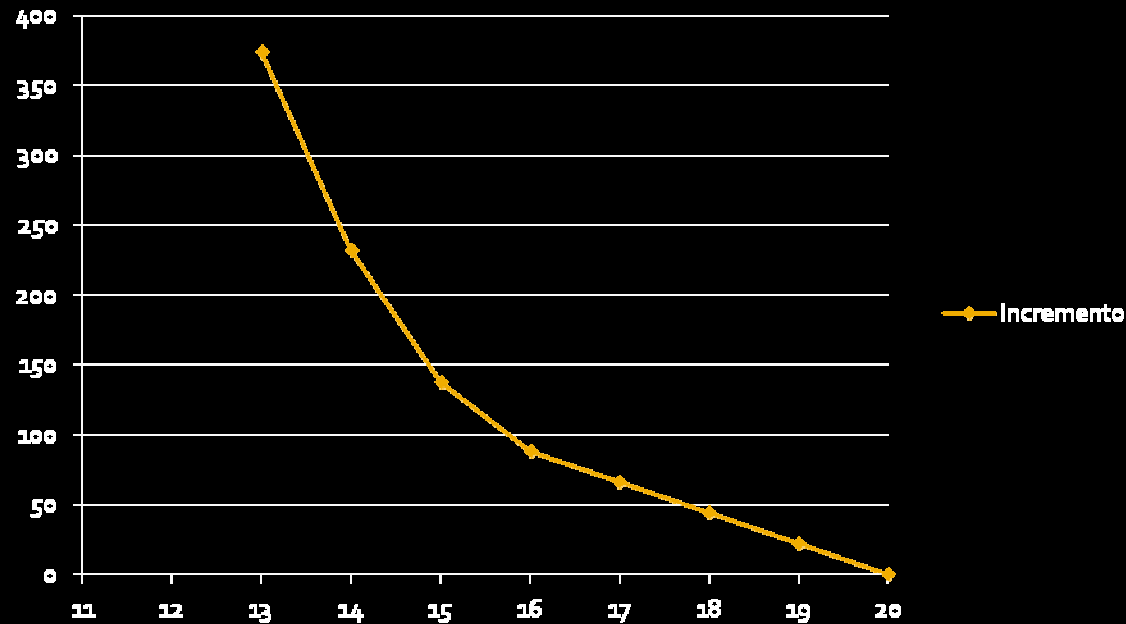
# Fase 2. Actividades.

$$\text{MAX} = 22(A111+A121+A123+A131+A133)+ 48(A115+A151+A152+A153+A154+A155+A16+A17)+ 22(B21+B23+B24) + 22*(C31+C32+C33+C37+C38)+ 50*(C34+C35);$$

[CAMINOA1] $A111+A112+A113+A115 \leq 13;$	@BND(2,A111,3);
[CAMINOA2] $A111+A114+A115 \leq 13;$	@BND(1,A112,1);
[CAMINOA3] $A121+A122+A123 \leq 13;$	@BND(1,A113,1);
[CAMINOA4] $A131+A132+A133 \leq 13;$	@BND(0.5,A114,0.5);
[CAMINOA5] $A141+A142+A143 \leq 13;$	@BND(3,A115,5);
[CAMINOA6] $A151+A152 \leq 13;$	@BND(1,A121,3);
[CAMINOA7] $A153 \leq 13;$	@BND(2,A122,2);
[CAMINOA8] $A154 \leq 13;$	@BND(1,A123,4);
[CAMINOA9] $A155 \leq 13;$	@BND(1,A131,3);
[CAMINOA10] $A16+A17 \leq 13;$	@BND(2,A132,2);
[CAMINOB1] $B21+B23+B24+B25 \leq 13;$	@BND(1,A133,4);
[CAMINOB2] $B22 \leq 13;$	@BND(4,A141,4);
[CAMINOC1] $C31+C32+C36+C37+C38 \leq 13;$	@BND(4,A142,4);
[CAMINOC2] $C31+C33+C37+C38 \leq 13;$	@BND(2,A143,2);
[CAMINOC3] $C31+C34+C35+C38 \leq 13;$	

# Fase 2. Intervalo de reducción.

Incremento



## Fase 2. Reducción global

En el gráfico se ven principalmente 2 tramos:

1. El primer tramo de reducción (20 h a 16 h) solo afecta a un camino y se ve como el incremento es lineal (además implica al mismo recurso de mantenimiento a 22€/hora).
2. El segundo tramo (16 h a 13 h) afecta a varios caminos (y diferentes recursos de mantenimiento con distintos costes) y su pendiente es mayor.



Ir a caminos

## Fase 2. Reducción global

En el modelo de programación lineal (PL) se puede ver como, para cada iteración de horas (de 20 h a 13 h, de una en una), los caminos sin holgura son todos aquellos que van a tener que reducir la duración de alguna de sus tareas.

Row	Slack	Dual price
CAMINOA10	0.000000	48.00000
CAMINOB1	0.000000	22.00000
CAMINOB2	13.00000	0.000000
CAMINOC1	0.000000	22.00000
CAMINOC2	1.000000	0.000000
CAMINOC3	0.000000	50.00000

Salida parcial de PL de la iteración resultado para 14 horas.



## Fase 2. Reducción global

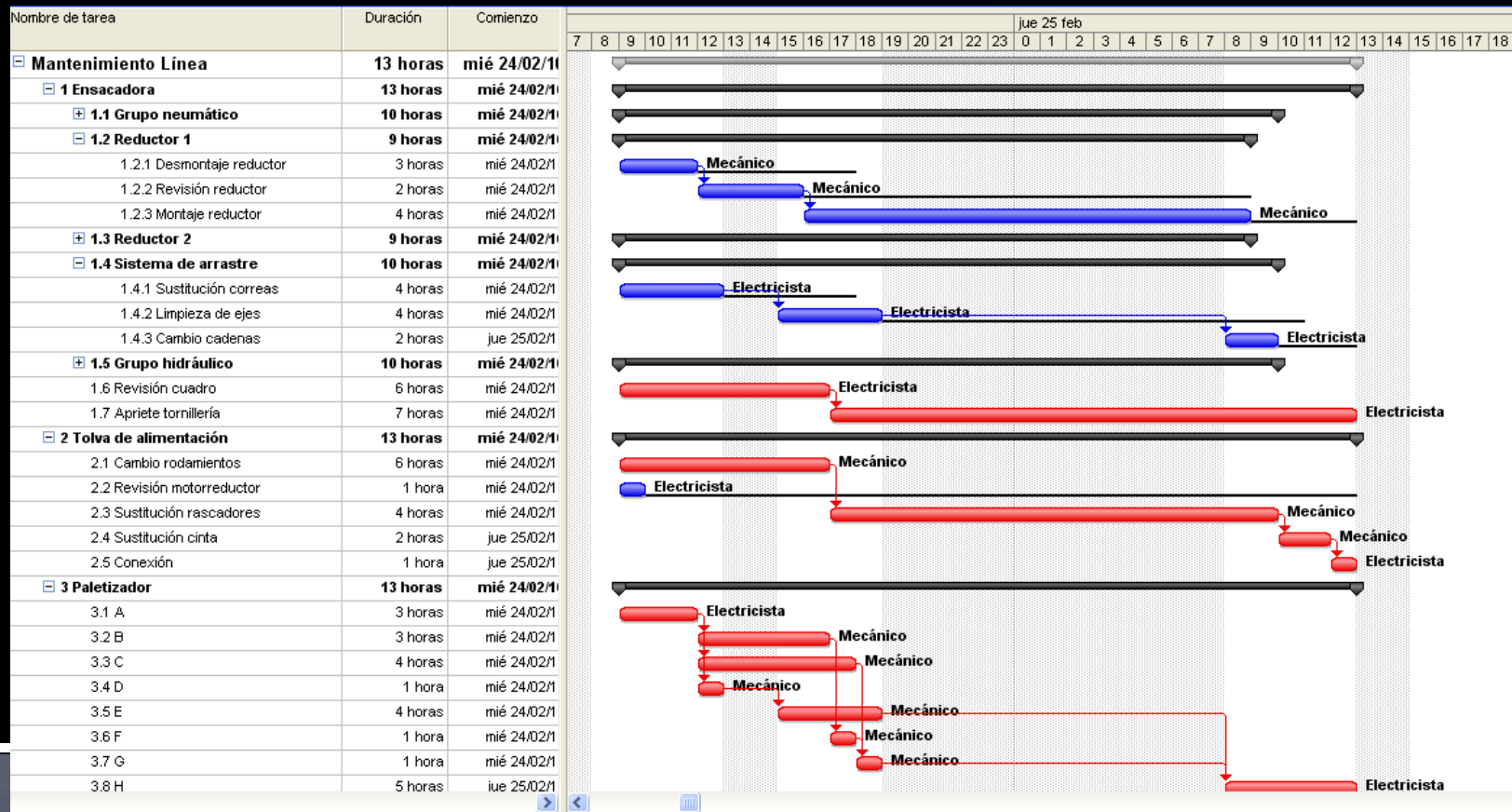
En la iteración para 13 horas de PL, aparecen 5 caminos críticos con duración de 13 horas. Uno es de la línea 1, otro de la línea 2 y tres son de la línea 3.

En el GANT construido con las duraciones obtenidas con PL se aprecian los caminos críticos en color rojo.

Row	Slack	Dual price
CAMINOA10	0.000000	48.00000
CAMINOB1	0.000000	22.00000
CAMINOB2	12.00000	0.000000
CAMINOC1	0.000000	22.00000
CAMINOC2	0.000000	22.00000
CAMINOC3	0.000000	50.00000

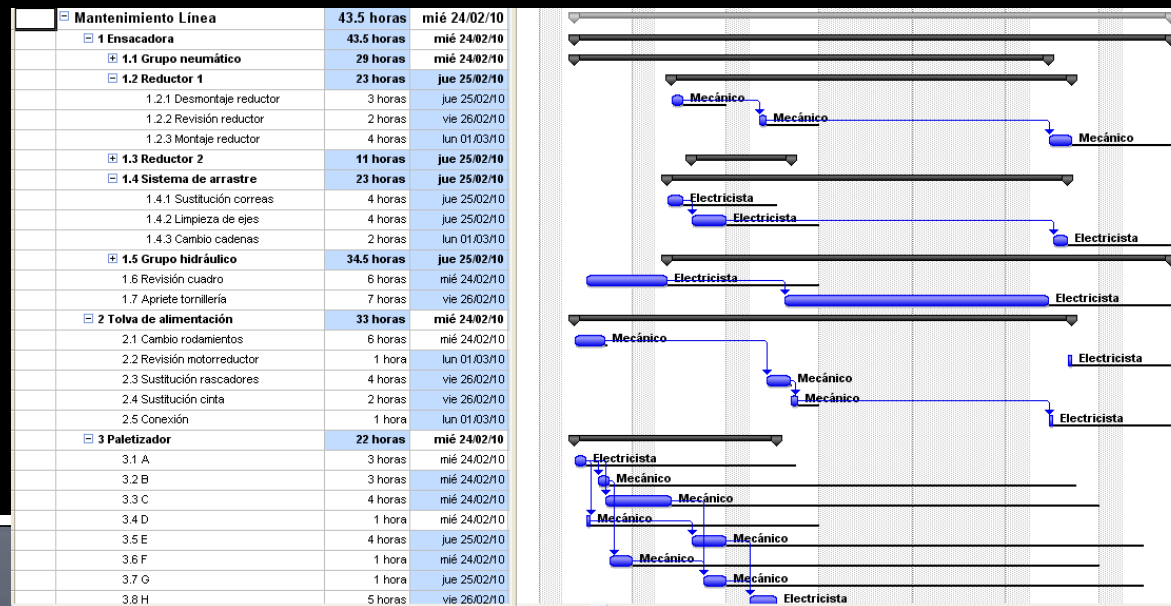
Salida parcial de PL de la iteración resultado para 13 horas.

# Fase 2. Reducción global



# Fase 2. Reducción global

Con estos datos se nivelan los recursos (mediante Project) y se obtiene la duración global de la intervención a 43,5 horas.



## Fase 2. Viabilidad económica.

Mediante programación lineal se ha conseguido optimizar a coste mínimo la reducción de duración del camino crítico en 7 horas (de 20 horas a 13 horas).

Al pasar las nuevas duraciones de las actividades y nivelar con Project, se obtiene una reducción de 3 horas (de 46,5 horas a 43,5 horas).

## Fase 2. Viabilidad económica.

### CAMINO CRÍTICO

El coste por hora reducida es de 53,57 euros.  
(375 euros/ 7 horas).

### DURACIÓN GLOBAL

El coste por hora reducida es de 125 euros.  
(375 euros/ 3 horas).

## Fase 2. Viabilidad económica.

Si el coste de paro de la línea supera los 125 euros por hora, es viable económicamente subcontratar a los servicios de asistencia técnica para realizar intervenciones de mantenimiento y así acortar el paro estimado de la línea.

## Fase 2. Observaciones adicionales.

Como información adicional, se le puede aplicar al modelo lineal la información de recursos externos limitados para saber si es viable realizar las intervenciones, ya que a priori, no se sabe cuantas unidades de recursos externos se necesitarán.

## Fase 2. Observaciones adicionales.

Por este motivo se han dividido los diagramas de precedencias y las actividades en tres grupos (uno para cada máquina), según el servicio técnico que puede actuar sobre cada una de ellas:

1. Máquina 1. Actividades 1\* (en programación lineal A).
2. Máquina 2. Actividades 2\* (en programación lineal B).
3. Máquina 3. Actividades 3\* (en programación lineal C).



## Fase 2. Observaciones adicionales.

Se determina la cantidad de horas disponibles de cada recurso externo y su coste unitario (tabla de duración tope) para cada recurso genérico y cada recurso especialista.

Por ejemplo,  
para la línea B solo se tienen disponibles 8 horas del recurso genérico de B.



Ir a tabla de duraciones tope

# Fase 2. Observaciones adicionales.

Para el recurso B, solo se puede utilizar la duración original de las tareas (14 horas) menos la nueva duración de las tareas que pueden ser reducidas por el recurso B y esto debe ser inferior a las horas disponibles del recurso B (8 horas).

MODEL:

MAX = 22\*(A111+A121+A123+A131+A133)+48\*(A115+A151+A152+A153+A154+A155+A16+A17)+  
22\*(B21+B23+B24) + 22\*(C31+C32+C33+C37+C38)+50\*(C34+C35);

[rec\_b] 14 - (B21+B23+B24) <= 8;

[CAMINOB1] B21+B23+B24+B25<=13;

[CAMINOB2] B22<=13;

# Fase 2. Observaciones adicionales.

MODEL:

MAX =

$22*(A111+A121+A123+A131+A133)+48*(A115+A151+A152+A153+A154+A155+A16+A17)+$   
 $22*(B21+B23+B24) + 22*(C31+C32+C33+C37+C38)+50*(C34+C35);$

[rec\_b]  $14 - (B21+B23+B24) \leq 8;$

[CAMINOB1]  $B21+B23+B24+B25 \leq 13;$

[CAMINOB2]  $B22 \leq 13;$

Row	Slack	Dual Price
1	3448.000	1.000000
REC_B	6.000000	0.000000
CAMINOA1	3.000000	0.000000

Salida parcial de PL donde se ve que todavía existe holgura de 6 horas para el recurso B, ya que se han consumido 2 horas.

# Fase 2. Observaciones adicionales.

En otro ejemplo, simulamos que del recurso genérico solo hay 4 horas y del especialista 8 horas, para la máquina C:

[rec\_Cgenerico]       $22 - (C_{31}+C_{32}+C_{33}+C_{37}+C_{38}) \leq 4;$   
 [rec\_Cespecialista]       $8 - (C_{34}+C_{35}) \leq 8;$

Row	Slack	Dual Price
REC_CGENERICO	-1.000000	0.5000000E+11
REC_CESPECIALISTA	5.000000	0.000000

Salida parcial de PL donde se ve que falta una hora del recurso genérico de C.