

Método de Predicción de Fiabilidad en Vehículos Ferroviarios

Javier Piedrafita Orduna - fjpiedrafita@ita.es

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ARAGÓN

**XIII Congreso de Confiabilidad de la AEC
Zaragoza, 23-25 de Noviembre de 2011**

Índice:

- Requisitos Contractuales
- Fallos y averías
- Método de predicción
 - AMFE modificado
 - Proceso obtención tasas de averías
- Totales. Cumplimiento de objetivos
- Consideración del mantenimiento
- Ejemplo. Disyuntor

Requisitos Contractuales

Requisito 1: MKBF (Mean Kilometers Between Failures)

$$MKBF = \frac{\text{Km totales recorridos}}{\text{Número total de averías}} > 35.000 \text{ Km}$$

Requisito 2: Niveles de averías

Nivel	Descripción	$\Lambda(\text{Km}^{-1})$
1	Reemplazo <u>prematureo</u> de recambios y fungibles	3×10^{-4}
2	Retirada de servicio del vehículo en final de línea	3×10^{-5}
3	Tiempo de detención en línea superior a 3 minutos	1×10^{-5}
4	Evacuación del pasaje, y la retirada de servicio del vehículo por sus propios medios.	4×10^{-6}
5	Socorro (con otro vehículo) para efectuar su retirada de servicio	8×10^{-7}

Tasas de fallos

- Característica intrínseca de cada elemento, de valor constante (modelo exponencial).
- Datos “fácilmente” disponibles.

Consecuencias de un fallo de un elemento sobre la tasa de avería del vehículo:

- No produce avería
- Provoca una avería de un nivel determinado
- Provoca una avería de varios niveles, según el modo de fallo.

Factores que contribuyen a la tasa de avería de un determinado nivel:

- Fallos de los elementos del vehículo.
- Periodo de mantenimiento preventivo.

AMFE modificado

Ref	Elemento	λ (fallos/h)	Función	Modo de Fallo	P(MF)	Efectos		P(E)	λ_{MFE}	S	Tasas de averías (h ⁻¹)				
						Locales	Vehículo				A1	A2	A3	A4	A5

- **P(MF)**: Probabilidad de aparición del modo de fallo respecto a la tasa de fallos total del elemento. Para un determinado elemento i, $\sum_j P(MF_{ij}) = 1$
- **P(E)**: Probabilidad de ocurrencia del modo de fallo con ese efecto en particular. $\sum_k P(E_{ijk}) \leq 1$
- **λ_{MFE}** : tasa de fallos del modo de fallo + efecto. $\lambda_{MFE} = \lambda_{elem} \times P(MF) \times P(E)$

AMFE modificado

Ref	Elemento	λ (fallos/h)	Función	Modo de Fallo	P(MF)	Efectos		P(E)	λ MFE	S	Tasas de averías (h ⁻¹)				
						Locales	Vehículo				A1	A2	A3	A4	A5

• **S**: índice de severidad, consecuencias sobre el servicio → **Niveles de averías** (requisito 2)

Índice S	Consecuencias de la avería sobre el servicio
0	Sin consecuencias sobre el servicio
1	Reemplazo <u>prematureo</u> de recambios y fungibles
2	Retirada de servicio del vehículo en final de línea
3	Tiempo de detención en línea superior a 3 minutos
4	Evacuación del pasaje, y retirada de servicio del vehículo por sus propios medios.
5	Socorro (con otro vehículo) para efectuar su retirada de servicio

Método de predicción

Ref	Elemento	λ (fallos/h)	Función	Modo de Fallo	P(MF)	Efectos		P(E)	λ_{MFE}	S	Tasas de averías (h ⁻¹)				
						Locales	Vehículo				$\Lambda 1$	$\Lambda 2$	$\Lambda 3$	$\Lambda 4$	$\Lambda 5$

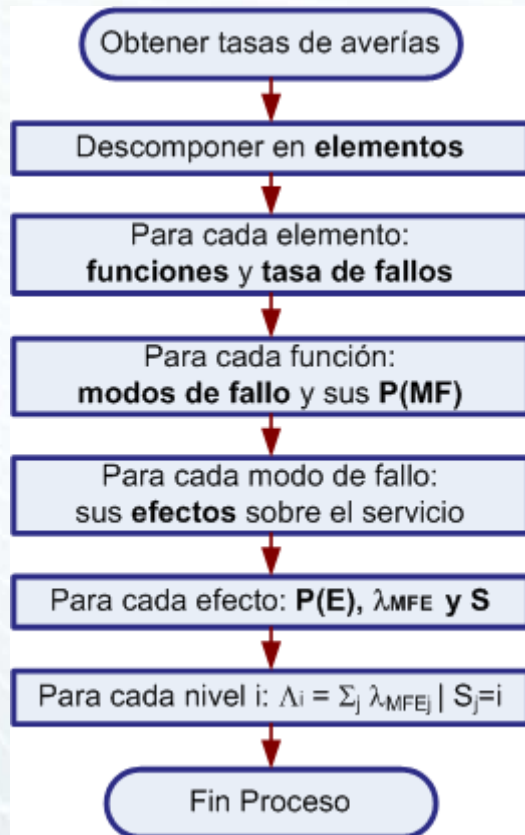
Comentarios:

- Como cualquier otro AMFE, el desarrollo lo debería llevar a cabo un equipo.
- Los siguientes parámetros no aparecen o no suelen aparecer en un AMFE “normal”:

Parámetro	Forma de obtenerlo
Tasa de fallos, λ	Como en las predicciones de fiabilidad
P(MF)	-Bases de datos públicas (MIL-HDBK-338B) -AMFE específico -Estimación expertos
P(E)	-Estimación expertos -Análisis por Árbol de Eventos
λ_{MFE}	$\lambda \times P(MF) \times P(E)$

Proceso obtención tasas de averías

Ref	Elemento	λ (fallos/h)	Función	Modo de Fallo	P(MF)	Efectos		P(E)	λ_{MFE}	S	Tasas de averías (h ⁻¹)				
						Locales	Vehículo				Λ_1	Λ_2	Λ_3	Λ_4	Λ_5



Asignación de tasas de fallo a tasas de avería

		Tasa de averías				
λ_{MFE}	S	Λ_1	Λ_2	Λ_3	Λ_4	Λ_5
4,00E-07	4				4,00E-07	
1,76E-06	5					1,76E-06
1,80E-06	3			1,80E-06		

Totales. Cumplimiento de objetivos

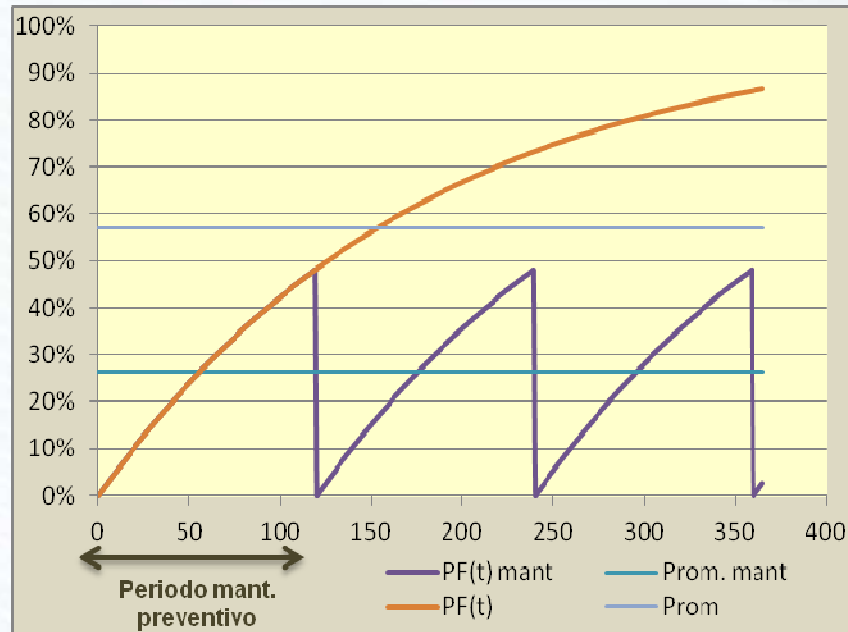
	Tasa de averías				
	$\Lambda 1$	$\Lambda 2$	$\Lambda 3$	$\Lambda 4$	$\Lambda 5$
Totales (h^{-1})	4,43E-03	1,52E-03	1,22E-03	2,30E-04	3,60E-04
Totales (Km^{-1})	2,22E-04	7,61E-05	6,09E-05	1,15E-05	1,80E-05
Objetivo (Km^{-1})	3,00E-04	3,00E-05	1,00E-05	4,00E-06	8,00E-07
Cumple	SI	NO	NO	NO	NO

Cambio de unidades: de **averías/hora** a **averías/km**:

$$\Lambda(km^{-1}) = \Lambda(h^{-1}) / v_m \quad \text{siendo } v_m \text{ la velocidad media en km/h}$$

¿Qué hacer si no se cumplen los objetivos de los requisitos contractuales? → **Mantenimiento preventivo**

Consideración del mantenimiento



Suposiciones:

- Los fallos de los elementos siguen un modelo exponencial: fiabilidad $R(t) = e^{-\lambda t}$, λ constante.
- Se realiza un mantenimiento periódico “perfecto”, es decir, todos los fallos se detectan y se reparan, dejando cada elemento en un estado idéntico a como si fuera nuevo.
- Tiempo de restauración nulo

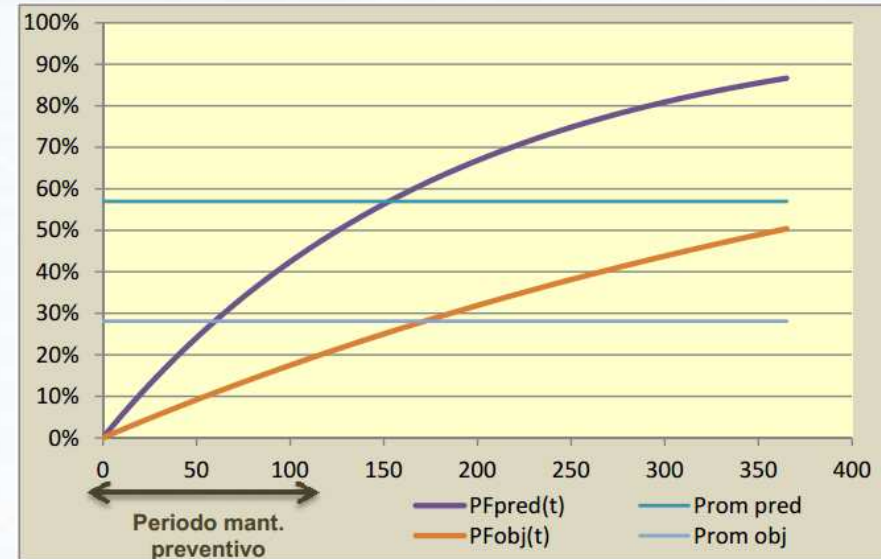
$PF(t) = \text{probabilidad de fallo} = 1 - e^{-\lambda t}$

$PF(t) \text{ mant} = \text{prob. de fallo con mantenimiento} = 1 - \exp(-\lambda * (t \text{ MOD } \tau))$, siendo τ el periodo de mantenimiento.

Consideración del mantenimiento

Caso de aplicación al método:

- Para un determinado nivel i , dos tasas de averías:
 - Λ_i , obtenida en la predicción
 - O_i , objetivo (requisitos contractuales)
 - $\Lambda_i > O_i$ (si no, no es necesario mant.)



$$PF_{avg} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} (1 - e^{-\lambda t}) dt = 1 - \frac{1 - e^{-\lambda \tau}}{\lambda \tau}$$

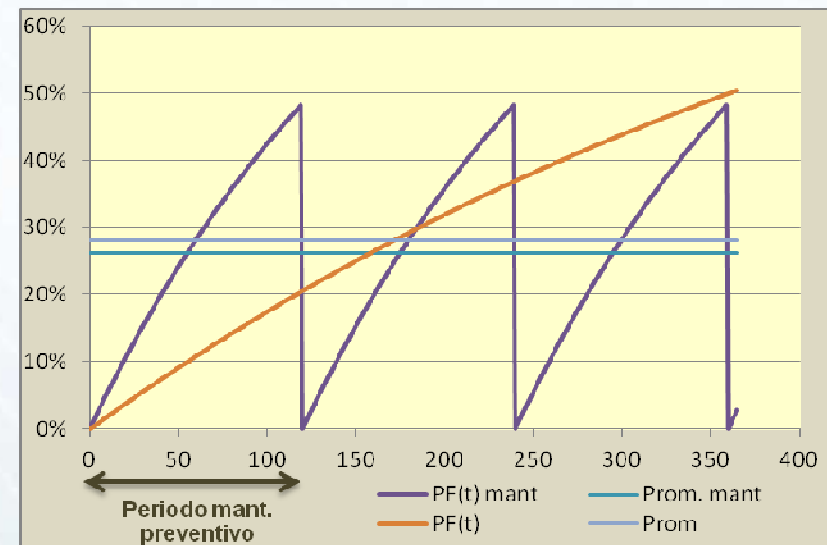
Consideración del mantenimiento

Sea:

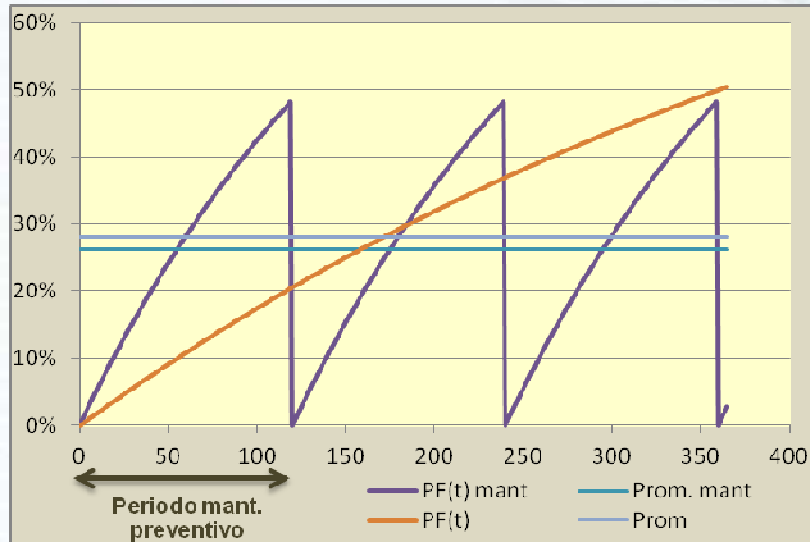
- p : periodo de tiempo total de cálculo.
- $PF_{avg,obj}$: probabilidad de fallo media en el periodo p , con la tasa de averías objetivo y sin mantenimiento preventivo.
- $PF_{avg,pred}$: probabilidad de fallo media con la tasa de averías de la predicción y con mantenimiento preventivo (independiente de p).
- Λ : tasa de averías predicción.
- O : tasa de averías objetivo.
- T : periodo de mantenimiento preventivo.
- R_{avg} la fiabilidad media en el periodo p

$$PF_{avg,obj} = 1 - \frac{1 - e^{-O \cdot p}}{O \cdot p} = 1 - R_{avg}$$

$$PF_{avg,pred} = 1 - \frac{1 - e^{-\Lambda \cdot T}}{\Lambda \cdot T}$$



Consideración del mantenimiento



$$PF_{avg,obj} = 1 - \frac{1 - e^{-0 \cdot p}}{0 \cdot p} = 1 - R_{avg}$$

$$PF_{avg,pred} = 1 - \frac{1 - e^{-\Lambda \cdot T}}{\Lambda \cdot T}$$

$$PF_{avg,obj} = PF_{avg,pred} \rightarrow \frac{1 - e^{-\Lambda \cdot T}}{\Lambda \cdot T} = R_{avg}$$

- Objetivo: Hallar periodo T tal que:

$$PF_{avg,obj} = PF_{avg,pred}$$

- Problema: $PF_{avg,obj} = f(p)$ (creciente)
- Por ejemplo: $p = 1$ año \Rightarrow calcular un periodo de mantenimiento T tal que reducirá la probabilidad de fallo media hasta igualarla con la probabilidad de fallo media durante un año de la tasa de averías objetivo.

Consideración del mantenimiento

Resolución por el método de Newton:

- Método de Newton: método iterativo para hallar raíces de $f(x)$

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$

- Ecuación a resolver:

$$\frac{1 - e^{-\Lambda \cdot T}}{\Lambda \cdot T} = R_{\text{avg}}$$

$$f(T) = 1 - e^{-\Lambda \cdot T} - R_{\text{avg}} \cdot \Lambda \cdot T$$

$$f'(T) = \Lambda \cdot (e^{-\Lambda \cdot T} - R_{\text{avg}})$$

- Valor inicial: dos primeros términos del desarrollo de Taylor de e^x :

$$PF_{\text{avg.pred}} = 1 - R_{\text{avg}} \cong \Lambda \cdot T / 2 \Rightarrow T \cong 2(1 - R_{\text{avg}}) / \Lambda$$

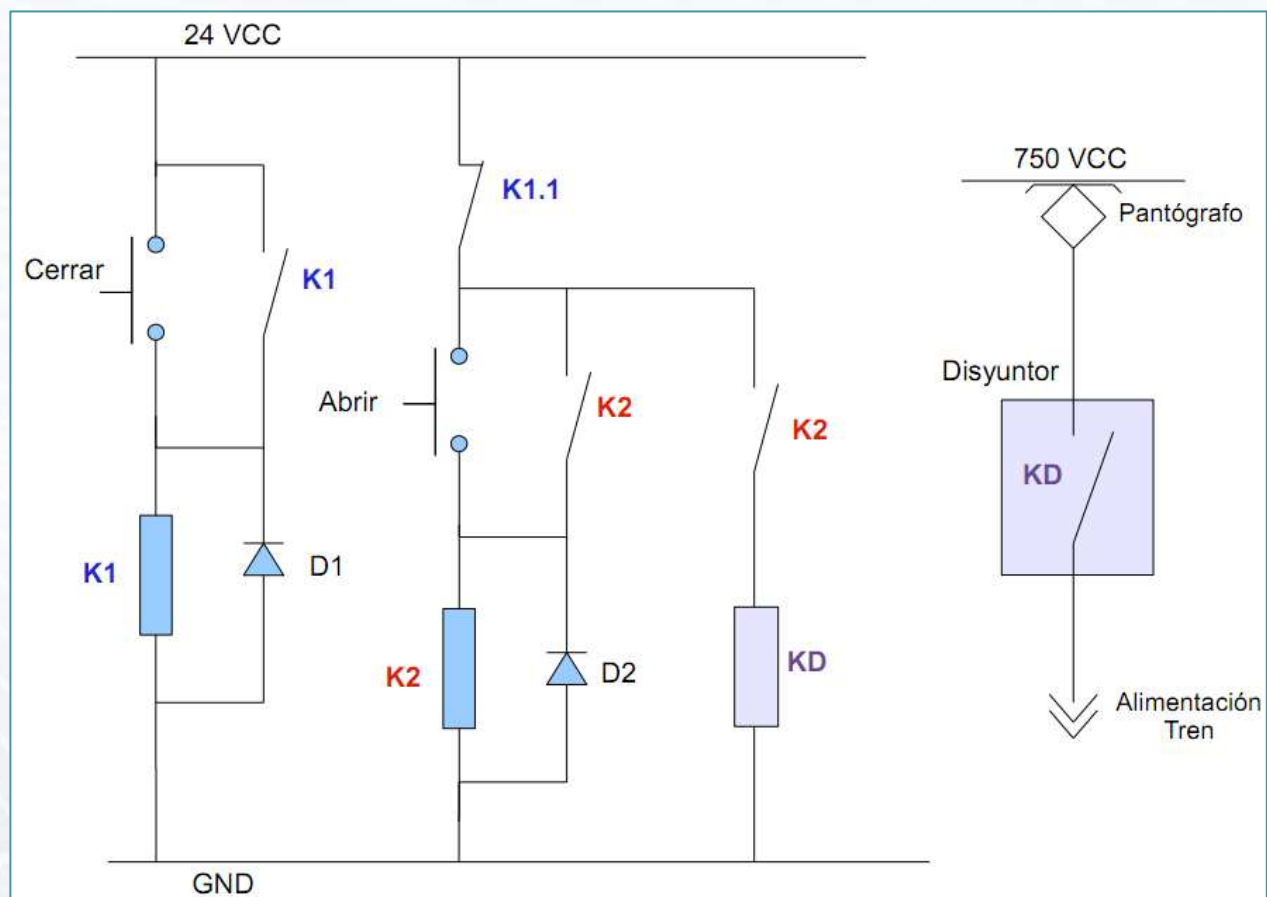
Ejemplo. Disyuntor

Disyuntor:

- Función: Interrumpir la entrada de alimentación del vehículo con el fin de evitar daños a los equipos conectados a esta alimentación.
- La apertura (circuito abierto) puede realizarse de forma manual, o bien, en el caso de que llegue una sobreintensidad, de forma automática.
- El cierre será siempre manual.
- Un fallo en el cierre de los contactos implicará:
 - Que el tren no pueda continuar, necesitando ser remolcado (avería de nivel 5).
 - Que el tren no pueda entrar en servicio (suponiendo que hay vehículos de reserva, no implica avería).
- Un fallo en la apertura de los contactos implicará:
 - Que el tren no pueda continuar con su viaje previsto; no obstante, no quedará inmovilizado (avería de nivel 4).
 - No evitaría desconectar el tren de la alimentación principal al disponer de otro mecanismo (pantógrafo).

Ejemplo. Disyuntor

Esquema:



Ejemplo. Disyuntor

Disyuntor

Ref	Elemento	λ (fallos/h)	Función	Modo de Fallo	%MF	Efectos					Tasa de averías					
						Locales	Vehículo	P(E)	λ MFE	S	Λ 1	Λ 2	Λ 3	Λ 4	Λ 5	
	Disyuntor	4,00E-06	Aislar al tren de la alimentación principal	Fallo en la apertura	10%		El vehículo no puede continuar su viaje	100%	4,00E-07	4				4,00E-07		
				Fallo en el cierre	44%		El vehículo debe ser remolcado	100%	1,76E-06	5					1,76E-06	
				Falsas aperturas	45%		Paradas esporádicas	100%	1,80E-06	3			1,80E-06			
			Proteger equipos del vehículo en caso de sobrecorriente	No abre cuando hay sobrecorriente	1%	Daños irreversibles en equipos principales		El vehículo debe ser remolcado	30%	1,20E-08	5					1,20E-08
						Daños en equipos importantes		El vehículo no puede continuar su viaje	40%	1,60E-08	4				1,60E-08	
						Reset de equipos		Vehículo parado durante más de 3 minutos	30%	1,20E-08	3			1,20E-08		

Contactor cierre y Protección contactor

Ref	Elemento	λ (fallos/h)	Función	Modo de Fallo	%MF	Efectos		P(E)	λ MFE	S	Tasa de averías				
						Locales	Vehículo				$\Lambda 1$	$\Lambda 2$	$\Lambda 3$	$\Lambda 4$	$\Lambda 5$
K1	Contactor cierre disyuntor	3,50E-06	Habilitar / inhabilitar K2 y apertura disyuntor	Fallo en la activación	90%	No se puede cerrar disyuntor	El vehículo debe ser remolcado	100%	3,15E-06	5					3,15E-06
				Fallo en la liberación	10%	No se podrá abrir cuando se solicite	El vehículo no puede continuar su viaje	100%	3,50E-07	4				3,50E-07	
D1	Protección contactor K1	2,00E-07	Evitar daños en bobina K1 en la desconexión	Cortocircuito	50%	Corto entre 24V y GND al pulsar "Cierre"	Daños en equipos	100%	1,00E-07	2		1,00E-07			
				Circuito abierto	50%	Daños en bobina K1. No se activa	El vehículo debe ser remolcado	50%	5,00E-08	5					5,00E-08
						Daños en bobina K1. No se desactiva	El vehículo no puede continuar su viaje	50%	5,00E-08	4				5,00E-08	

Ejemplo. Disyuntor

Totales del vehículo:

	$\Lambda 1$	$\Lambda 2$	$\Lambda 3$	$\Lambda 4$	$\Lambda 5$	Λ Total
Totales (h^{-1})	4,43E-03	1,52E-03	1,22E-03	2,30E-04	3,60E-04	7,76E-03
Totales (Km^{-1})	2,22E-04	7,61E-05	6,09E-05	1,15E-05	1,80E-05	3,88E-04
Objetivo (Km^{-1})	3,00E-04	3,00E-05	1,00E-05	4,00E-06	8,00E-07	2,86E-05
Cumple	SI	NO	NO	NO	NO	NO

$V_{media} = 20 \text{ Km/h}$

Resultados aplicando método mantenimiento preventivo

	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Total
Λ_i (h^{-1})	1,52E-03	1,22E-03	2,30E-04	3,60E-04	7,76E-03
O_i (h^{-1})	6,00E-04	2,00E-04	8,00E-05	1,60E-05	5,71E-04
R_{avg}	0,189	0,472	0,719	0,933	0,199
Tini (h)	2702	866	2444	372	700
T (h)	3458	1436	3047	389	645
T (días)	144	60	127	16	27

Periodo
 $p = 1 \text{ año}$

Método de Predicción de Fiabilidad en Vehículos Ferroviarios

Javier Piedrafita Orduna- fjpiedrafita@ita.es

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ARAGÓN

FIN DE LA PRESENTACIÓN

**XIII Congreso de Confiabilidad de la AEC
Zaragoza, 23-25 de Noviembre de 2011**