



## **SEMINARIO INTERNACIONAL BIENAL CIGRE 2005 “Confiabilidad de los Sistemas Eléctricos”**

**Segundo Bloque: Transportistas del Mercado Eléctrico,  
Proyectos, Visiones y Experiencias en la Confiabilidad de los  
Sistemas Eléctricos**

**Disponibilidad, Confiabilidad y Mantenibilidad del Sistema de  
Transporte de Electricidad en Bolivia**

**Sistema:** **Colección** de componentes que ejecuta una o varias **funciones**.

La función (o funciones) ejecutada (s) por el sistema no puede (n) ser ejecutada (s) por componentes individuales.

**Subsistema:** subgrupo del propio Sistema con una o más funciones específicas.

**Supersistema:** Colección de sistemas interdependientes que en conjunto ejecutan una o más funciones normalmente complejas.

**Confiabilidad de Sistemas:** Orientado al control de fallas a nivel de componentes y a la búsqueda de configuraciones estructurales que garanticen en mayor grado a alcanzar el nivel de desempeño requerido.

Para entender el concepto, reflexionemos inicialmente a partir de nuestra intuición.

Para ello pensemos brevemente en hechos que a nuestro juicio están relacionados con baja confiabilidad:

Indisponibilidad, desconexiones, fallas, penalizaciones, reparaciones de emergencia, repuestos de emergencia, accidentes, problemas ambientales, menor eficiencia, estrés, mal mantenimiento, mala operación, falta de adiestramiento, desconfianza general, etc.

La confiabilidad se define como la **probabilidad** de que un equipo o sistema opere **sin falla** por un determinado período de tiempo, bajo unas condiciones de operación establecidas.

Ahora bien, la Confiabilidad Operacional es la capacidad de una instalación o sistema (procesos, tecnología y gente), para cumplir su función dentro de sus límites de diseño y bajo un contexto operacional específico.

Pero, que aspectos están relacionados con la confiabilidad operacional y que comprende el contexto operacional?

## Confiabilidad Humana

- Involucramiento
- Sentirse dueño
- Interfaces
- Conocimiento



## Confiabilidad Operacional



## Confiabilidad del Proceso

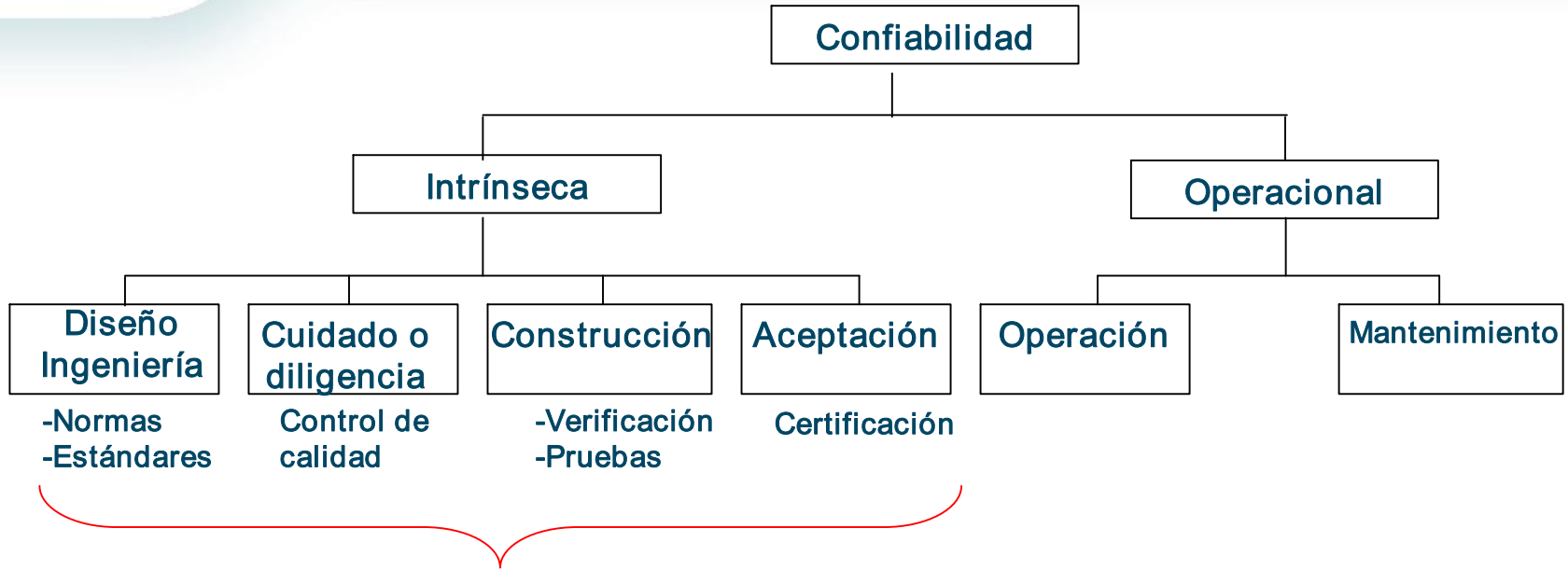
- Operación dentro de las condiciones de diseño
- Comprensión del proceso y los procedimientos

## Mantenimiento de Equipos

- Confiabilidad incorporada desde fase de diseño
- Multiusos
- Reducción del TPPR

## Confiabilidad de Equipos

- Estrategia de Mantenimiento
- Efectividad del Mantenimiento
- Extensión del TPEF



Se supone que estas fases fueron realizadas en forma confiable y que se han tomado en cuenta:

- Accesibilidad
- Estandarización
- Facilidades de detección y diagnóstico de fallas
- Criterios de expansión

- ❑ La confiabilidad efectiva de un equipo o sistema en operación es el producto resultante de la confiabilidad de diseño, la confiabilidad en el proceso de fabricación y la confiabilidad en la utilización o explotación.
- ❑ La confiabilidad intrínseca es en gran medida una responsabilidad del proveedor; sin embargo éste no es responsable por la confiabilidad operacional.

### **Pero que hacer cuando las instalaciones ya están construidas y en operación?**

- ❑ Un proceso de Mejora de la Confiabilidad Operacional (MCO) requiere tratar de una manera estructurada la mejora de cada uno de los aspectos que involucran la Confiabilidad Operacional (CO).
- ❑ El MCO es un proceso de mejoramiento continuo basado en hechos, alcanzado por una armonía de implantación de herramientas y técnicas basadas en riesgo.
- ❑ Un programa de mejora de la Confiabilidad Operacional es una mezcla única de soluciones técnicas, pensamiento estructurado, motivación de trabajadores y desarrollo organizacional, todo asegurado por experiencias de primera mano probadas y datos fuertes.

- ❑ **Mantenimiento Básico 45 %**
- ❑ **Mantenimiento Planificado 60%**
- ❑ **Mantenimiento Basado en la condición (predictivo) 70%**
- ❑ **Mantenimiento Productivo Total (TPM) 80 %**
- ❑ **Mantenimiento basado en la confiabilidad (RCM) 85 %**
- ❑ **Mantenimiento Basado en el Riesgo (RBM) 90 %**

Fuente: HSB Reliability Technologies (Eficacia y Eficiencia del Mantto.)

- ❑ Qué es RCM?
  - Un enfoque sistemático para la planificación del mantenimiento que tiene en cuenta los aspectos de la confiabilidad se le denomina RCM.
  - Las normas SAE JA 1011 ó SAE JA 1012 establecen las características que debe cumplir un proceso para que se pueda considerar un proceso RCM.
  
- ❑ Características del RCM:
  - Las funciones de un equipo juntamente con las características operacionales, determinan su plan de mantenimiento.
  - Uso de un procedimiento de identificación de modos de fallos y análisis de sus efectos.
  - Uso de un procedimiento para la toma de decisión para la programación del mantenimiento.
  
- ❑ Metodología del RCM:
  - Uso de FMEA como elemento básico de entrada para la planificación del mto.
  - Uso de un esquema de decisión para la estrategia de Mto. en cada modo de fallo que jerarquiza efectos.
  - Uso de potentes herramientas para análisis y evaluación de las estrategias y su perfeccionamiento

## Mantenimiento Basado en la Confiabilidad (RCM)

- ❑ Jerarquía de efectos según RCM?
  - Seguridad de las personas y del medio ambiente
  - Costos operacionales
  - Costos de reparación
  
- ❑ Inicio del algoritmo de decisión para un modo de fallo
  - Fallo evidente
  - Fallo oculto
  
- ❑ Posibles estrategias para un modo de fallo
  - Tarea preventiva por tiempo
  - Tarea de inspección
  - Instalar condición de alarma y/o protección
  - Recomendar rediseño o medida afín
  - Recomendar medidas “a falta de”.

## Fase preparatoria:

- Etapa de comprensión y comprometimiento de la alta dirección de la organización con la aplicación del MCO
- Etapa de divulgación y debate con los directivos de los niveles medios y básicos.
- Etapa de divulgación y debate para todos los miembros de la organización (mantenedores y operadores).
- Etapa de capacitación especializada.

## Fase organizativa

- Establecer las organizaciones básicas para la ejecución del MCO, las características del sistema informativo y de gestión del mantenimiento.
- Definir los sistemas y subsistemas que serán objeto del MCO y sus características.
- Formación de los grupos naturales de trabajo y definición de los indicadores de gestión,
- Definición de clases y prioridades para correctivo.
- Determinación de listas de los elementos críticos del sistema.
- Evaluación previa de la confiabilidad y seguridad de los subsistemas.

## Fase organizativa (Cont.)

- Determinación de los rubros de gastos y costos.
- Elaboración de los documentos de Información y de decisión

## Fase ejecutiva

- Control de costos y gastos.
- Control de calidad de ejecución
- Análisis de fallas y de la actividad en general.
- Control de indicadores
- Divulgación de resultados
- Comunicación entre todos los involucrados
- Programación de acciones para cumplimiento del programa.

## Fase evaluativa

- Análisis de tendencias de indicadores
- Evaluación del programa en el periodo considerado
- Evaluación de modificaciones y perfeccionamiento continuo del programa de MCO a partir de la aplicación de las herramientas de análisis y evaluación utilizadas.
- Elaboración del nuevo plan para el próximo periodo

- LEY No 1604 (Del 21 DE DICIEMBRE DE 1994)

- **INFRACCIONES Y SANCIONES:**

- **ARTÍCULO 56. (INFRACCIONES DE TITULARES Y DE TERCEROS).**

La Superintendencia de Electricidad impondrá sanciones a los Titulares y/o terceros por la comisión de infracciones a las disposiciones de la Ley N° 1600 (Ley del Sistema de Regulación Sectorial) de fecha 28 de octubre de 1994, la presente ley y sus reglamentos.

- **REGLAMENTO DE CALIDAD DE TRANSMISIÓN:**

Reducciones en la Remuneración por incumplimiento de valores exigidos y admitidos.

- **REGLAMENTO DE INFRACCIONES Y SANCIONES:**

Aplicación de inciso v) artículo 22 “Incumplir reiteradamente las exigencias de calidad, establecidas en el Reglamento de Calidad de Distribución y Transmisión, será sancionado con 2%” .....de la remuneración por transporte de los 3 últimos meses – “En caso de obtenerse  $N_r > N_a$  y  $D_r > D_a$ , la Superintendencia podrá aplicar la sanción establecida en el Reglamento de Infracciones y Sanciones de la Ley de Electricidad” (Reglamento de Calidad de Transmisión).

- ARTICULO 4.- (RESPONSABILIDAD).- El Transmisor será responsable de la calidad del servicio de transmisión dentro los límites definidos y aprobados como satisfactorios y suficientes para el comportamiento de cada uno de sus Componentes individuales.
  
- ARTICULO 8. – (MEDICION DE LA CALIDAD DEL SERVICIO).- Los Índices de Calidad para evaluar el comportamiento de Componente del Sistema de Transmisión que serán calculados anualmente son los siguientes:
  - a) La Frecuencia de Desconexiones del Componente  
 $N = \text{Número de Desconexiones}$
  
  - b) La Duración Media de Desconexiones del Componente:  
(Duración de las Desconexiones [minutos])  
$$D = \frac{\text{Duración de las Desconexiones [minutos]}}{\text{Número de Desconexiones}}$$

**ARTICULO 24.-** Los factores de reducción de las remuneraciones al Transmisor serán determinados para cada año y para cada Componente del Sistema de Transmisión:

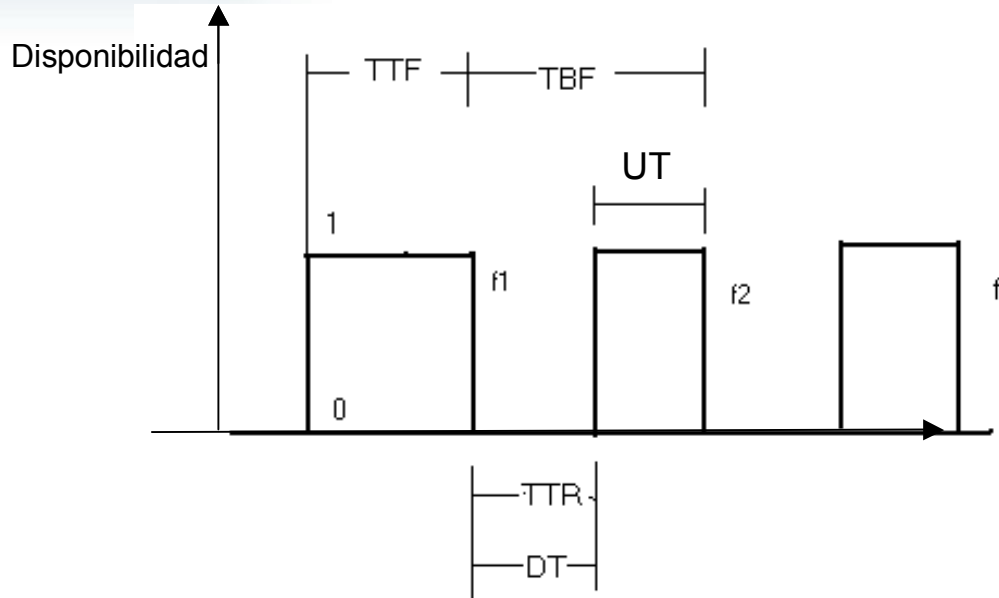
a) Factor de Reducción por desviación en la Frecuencia de Desconexiones FRN:

$$FNR = \frac{Nr - Ne}{Na - Ne} \times F1 \quad \text{Si } Nr < Ne \text{ entonces } FRN = 0; \text{ Si } Nr > Ne \text{ entonces } FRN = F1$$

b) Factor de Reducción por desviación en la Duración Media de Desconexiones FRD:

$$FRD = \frac{Dr - De}{Da - De} \times F2 \quad \text{Si } Dr < Ne \text{ entonces } FRD = 0; \text{ Si } Dr > Ne \text{ entonces } FRD = F2$$

$$F1 + F2 = 1$$

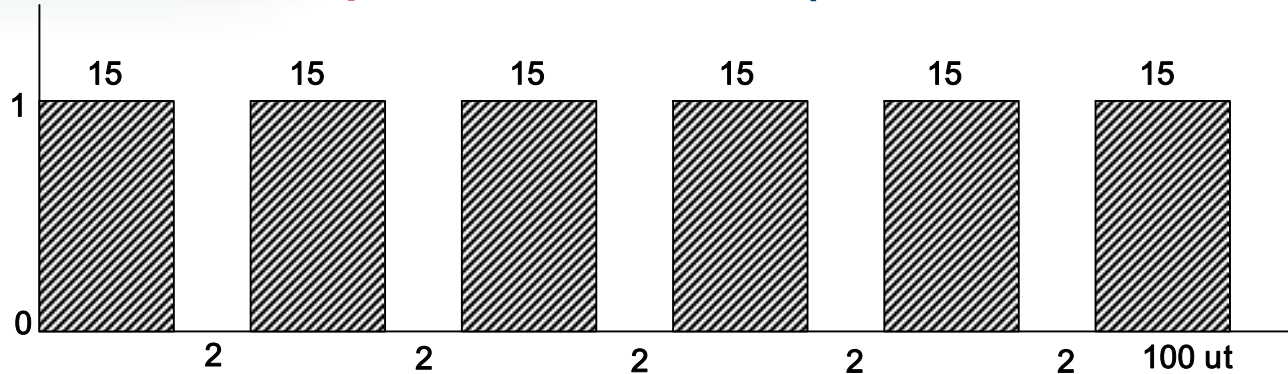


- 1.- Condición operacional
- 0.- Condición no operacional
- $f_i$ .- falla  $i$ -ésima
- TTF.- Tiempo hasta fallar
- TBF.- Tiempo entre fallas
- UT.- Tiempo operativo entre fallas
- DT.- Tiempo no operativo entre fallas
- TTR.- Tiempo necesario para reparar

**DISPONIBILIDAD**

**Frecuencia de desconexiones = Confiabilidad**  
**Duración de desconexiones = Mantenibilidad**

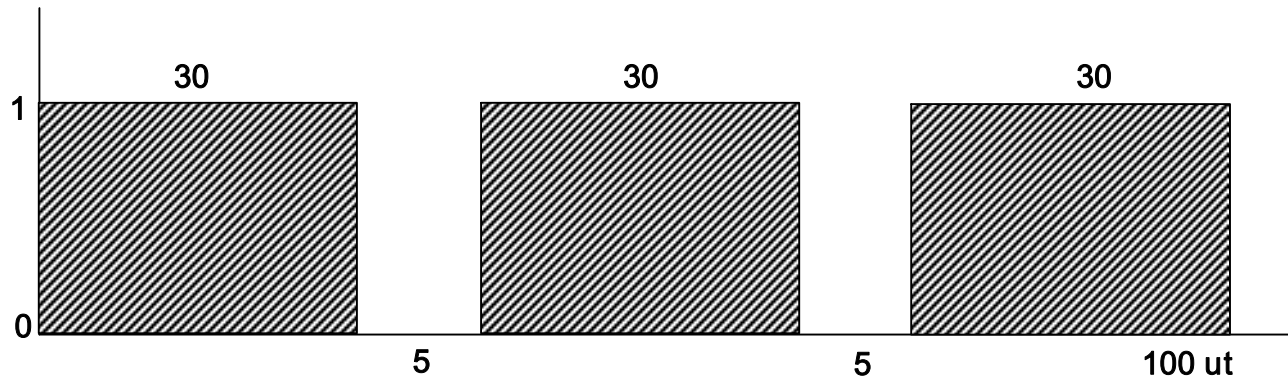
## Disponibilidad = f (confiabilidad, mantenibilidad)



Acciones orientadas hacia:

- Equipo baja confiabilidad (muchas fallas) } ACR
- Equipo de buena mantenibilidad (Reparación rápida) } No Acción

$$D = \frac{6 \times 15}{6 \times 15 + 5 \times 2} = \frac{90}{90 + 10} = 90\%$$



-Equipo de mayor confiabilidad (menos fallas) } No Acción

-Equipo de menor mantenibilidad (Reparación mas lenta) } Adiestramiento

$$D = \frac{3 \times 30}{3 \times 30 + 2 \times 5} = \frac{90}{90 + 10} = 90\%$$

- La Ingeniería de Confiabilidad es la ciencia de la predicción y el modelaje probabilístico del Deterioro (Estudia las características físicas y aleatorias del fenómeno “falla”).
- La Ingeniería de Confiabilidad es una disciplina de amplio alcance que permite modelar y resolver problemas particulares que pudieran estar fuera del alcance de las metodologías tradicionales basadas en confiabilidad, tal como MCC.
- Escuelas en Ingeniería de Confiabilidad:
  - Confiabilidad Basada en el Análisis Probabilístico del Tiempo Para la Falla o historial de fallas (Statistical Based Reliability Analysis)
  - Confiabilidad Basada en el Análisis Probabilístico del Deterioro o Física de la Falla (Physics Based Reliability Analysis)

Ambas escuelas tienen un objetivo común “ caracterizar probabilísticamente la falla para hacer pronósticos y establecer acciones proactivas, reconociendo la aleatoriedad o incertidumbre de las variables analizadas y su consecuente tratamiento probabilístico. La diferencia entre ambas es la óptica desde la cuál se analiza la falla (Frecuencia histórica o Tasa de Fallas y la Física del Proceso de Deterioro, respectivamente)

Es la rama de la confiabilidad que estudia la variable aleatoria “tiempo para la falla” y tiene dos grandes áreas:

## •Equipos No Reparables:

La variable aleatoria de interés es el Tiempo para la falla y para caracterizarla probabilísticamente se requiere estimar la Tasa de Fallas.

Dentro de los equipos no reparables muchos tienen tasas de fallos constantes (Distribución exponencial) y los demás responden a distribuciones del tipo Weibull, Log-Normal, entre otras.

## •Equipos Reparables:

La variable aleatoria de interés es el número de fallas en un período específico y para caracterizarla probabilísticamente se requiere estimar la tasa de ocurrencia de fallas y la tasa de reparación Disponibilidad =  $f(\text{Confiabilidad} + \text{Mantenibilidad})$ .

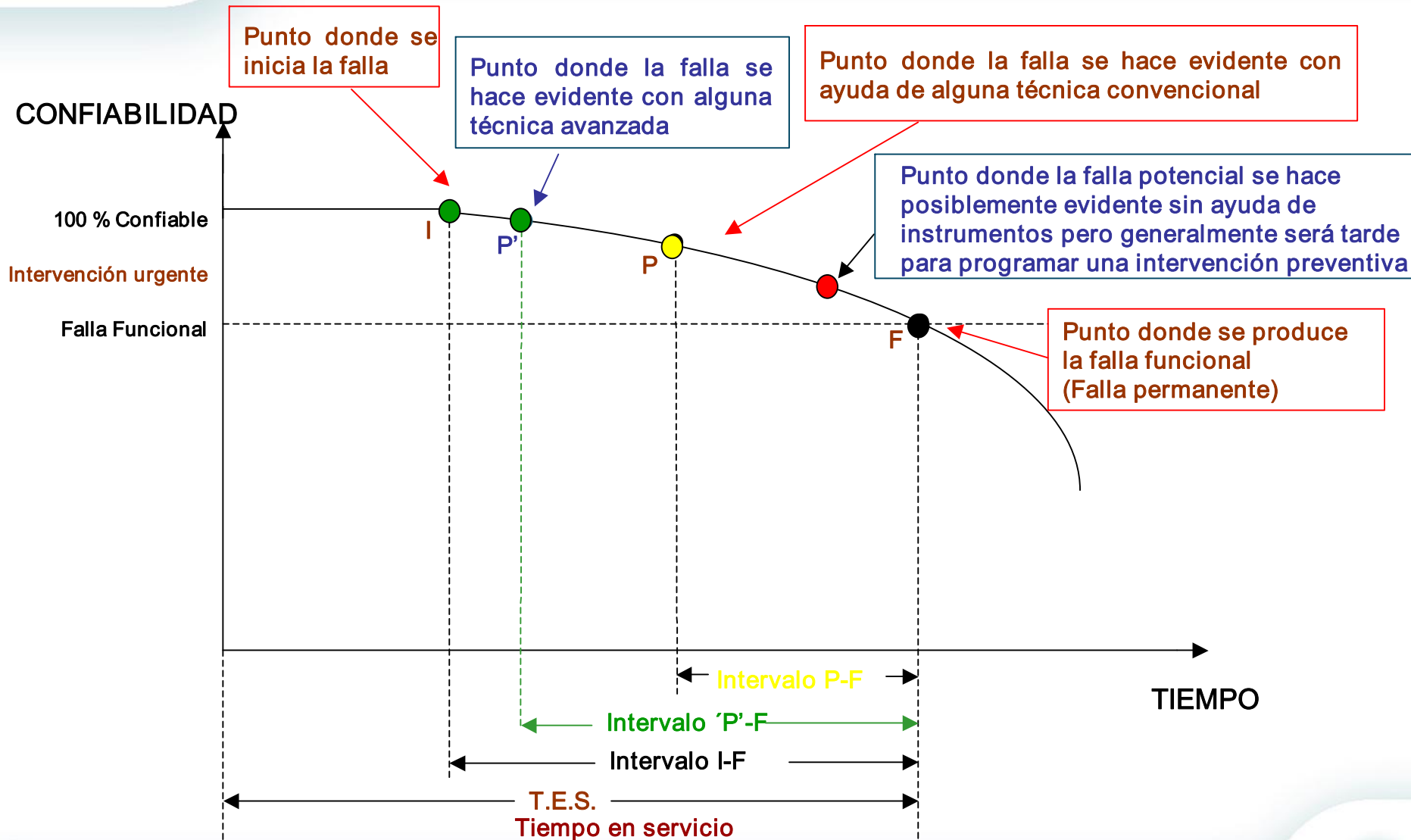
Además de la confiabilidad se requiere calcular la disponibilidad (probabilidad de que el equipo esté disponible), es decir que no esté en reparación.

Buscando una mejora continua de procesos, el análisis tradicional (tiempo para la falla, ampliamente utilizado) dio paso a los programas de monitoreo de condiciones o parámetros que reflejan el deterioro.

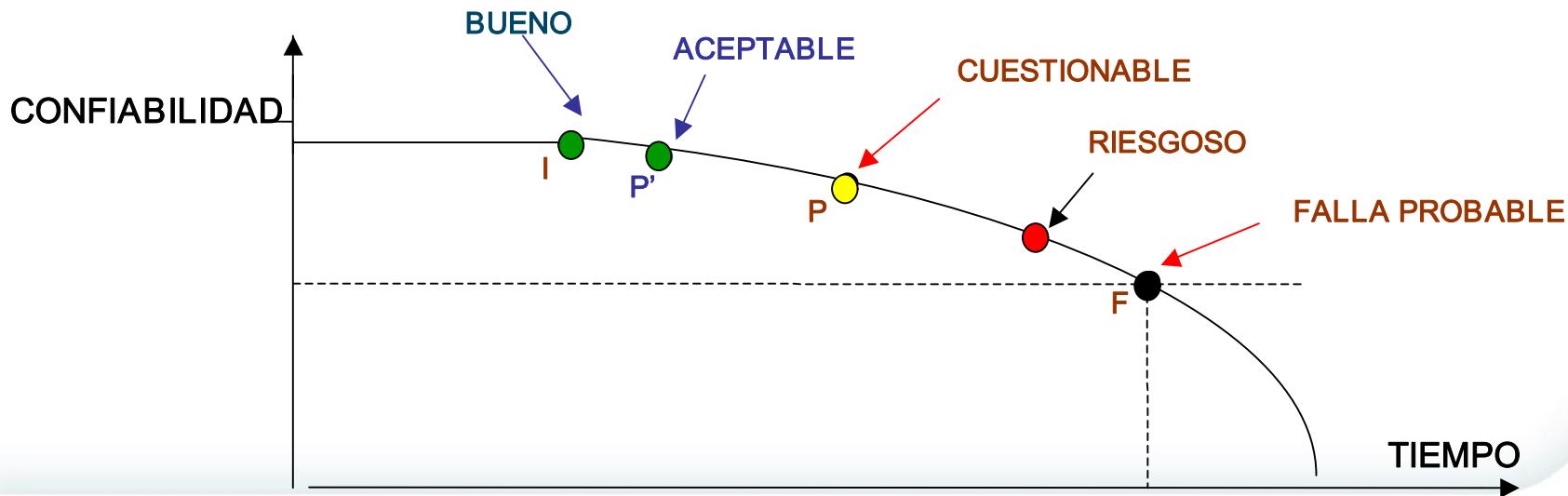
Esta rama requiere un conocimiento profundo de los fenómenos físicos para transformar la información recolectada sobre el deterioro de un activo en acciones que pueden efectivamente detenerlo e inclusive eliminarlo.

Este enfoque concentra sus esfuerzos en predecir la ocurrencia de la falla a través del entendimiento de “como ocurre la falla” o sea “estudiando la “física de la falla”.

La columna vertebral de este método son los valores límites y el denominado “Análisis Carga – Resistencia”, que tiene como premisa de que las fallas son el resultado de una situación donde la carga produce un esfuerzo y que éste excede su resistencia. Para que un equipo sea confiable debe cumplirse la condición Esfuerzo < Resistencia.



- Variable.- Cantidad susceptible de tomar valores numéricos diferentes, comprendidos o no dentro de un límite.
- Parámetro.- Valor que toma la variable, determinada a través de un instrumento de medida, y permite calificarla.
- Calificadores.- Identificadores de condición dados a un equipo en la confrontación de los resultados de las mediciones, verificaciones y ajustes.
- Valor límite.- Valor extremo de un calificador, que indica el estado de riesgo de falla de un equipo y que determina la necesidad de realizar trabajos preventivos



□ Confiabilidad:

Es la probabilidad de que un sistema cumpla su función por un intervalo de tiempo especificado y bajo las condiciones de operación de diseño.

□ Riesgo:

Es el producto de la frecuencia esperada de ocurrencia de una falla o evento ( $F$ ) por las consecuencias ( $C$ ) que tal falla o evento implican.

□ Objetivo de la aplicación de Ingeniería de confiabilidad:

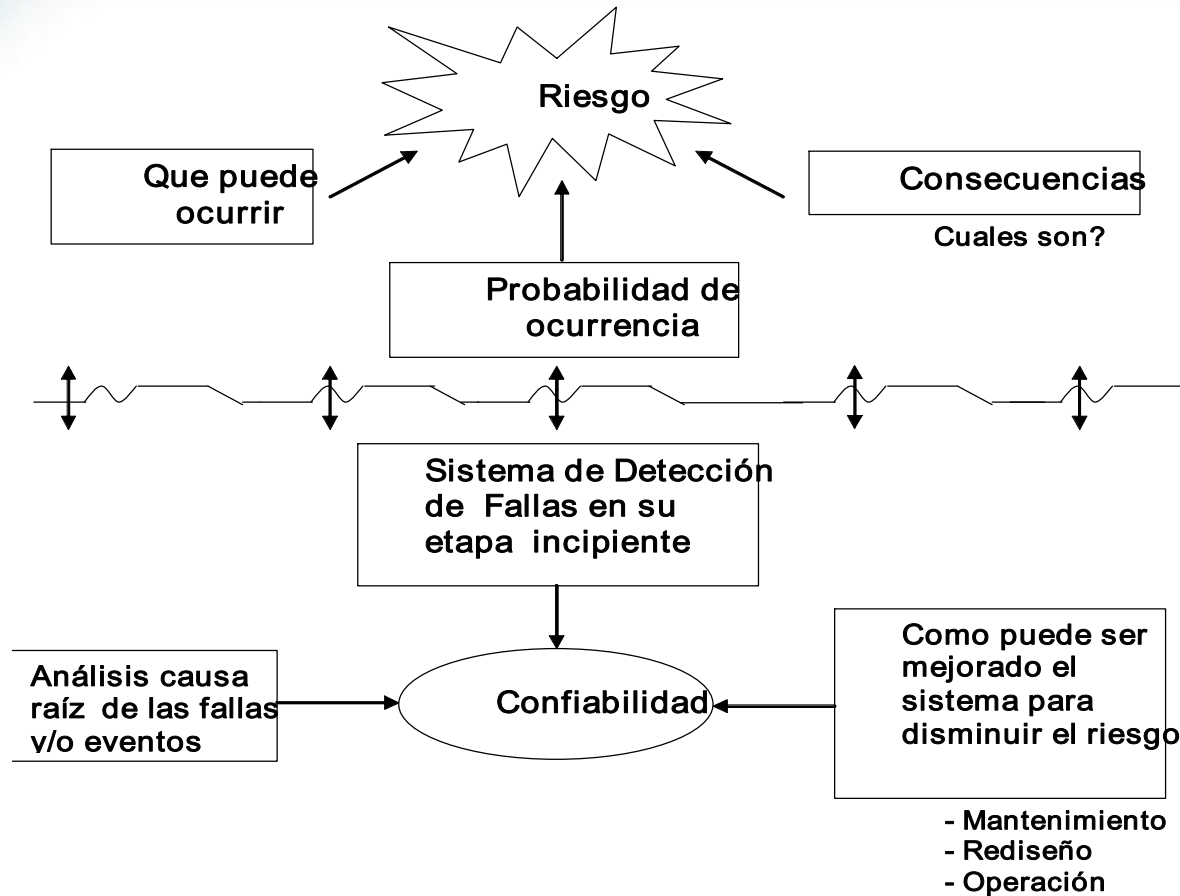
“Aumentar el diferencial de riesgo”

$$\Delta R = RA - RF$$

$\Delta R$  = Beneficio obtenido por la aplicación de Ingeniería de confiabilidad

RA = Riesgo total

RF = Riesgo futuro



Un análisis de Ingeniería de Confiabilidad es aquel que nos permite definir acciones concretas sobre el sistema para llevar el factor de riesgo a su mínima expresión.

## Definiciones de Criticidad

- “Medición relativa de las consecuencias de un modo de fallo y su frecuencia de ocurrencia”
- “Característica (cálculo numérico determinístico) de un sistema, que representa el impacto de la falla en cuanto a seguridad, ambiente o producción del proceso al cual pertenece; evalúa la flexibilidad operacional, costos de reparación-mantenimiento y confiabilidad. Esta característica puede ubicarse en bandas alta, media y baja. ”

Ecuación matemática de la Criticidad:

$$\textit{Criticidad} = \text{Consecuencia} * \text{Probabilidad de Ocurrencia}$$

## Factores considerados

- ❑ Costo por incumplimiento de Calidad (CC)
- ❑ Costo por Infracciones y Sanciones (CIS)
- ❑ Costo por Reparación (CR)
- ❑ Factor por Costos Intangibles (FI)
- ❑ Factor por afectación a la Seguridad (FS)
- ❑ Factor por impacto al Medio Ambiente (FMA)

Ecuación matemática propuesta:

$$CRITICIDAD = (CC + CIS + CR) * FI * FS * FMA$$



## **SEMINARIO INTERNACIONAL BIENAL CIGRE 2005 “Confiabilidad de los Sistemas Eléctricos”**

**Segundo Bloque: Transportistas del Mercado Eléctrico,  
Proyectos, Visiones y Experiencias en la Confiabilidad de los  
Sistemas Eléctricos**

**Disponibilidad, Confiabilidad y Mantenibilidad del Sistema de  
Transporte de Electricidad en Bolivia**