

The logo for CHEC, featuring the letters 'chec' in a stylized, lowercase font. The 'c' is green and the 'hec' is white.

Una empresa **epm**[®]

Feria Técnica y Comercial para Clientes CHEC

“Calidad del Servicio – Herramientas Conceptuales y Técnicas Asociadas”

Confiabilidad de Sistemas Industriales



Carlos J. Zapata

Universidad Tecnológica de Pereira



Agosto 24 de 2011



Grupo de Investigación Planeamiento de Sistemas Eléctricos

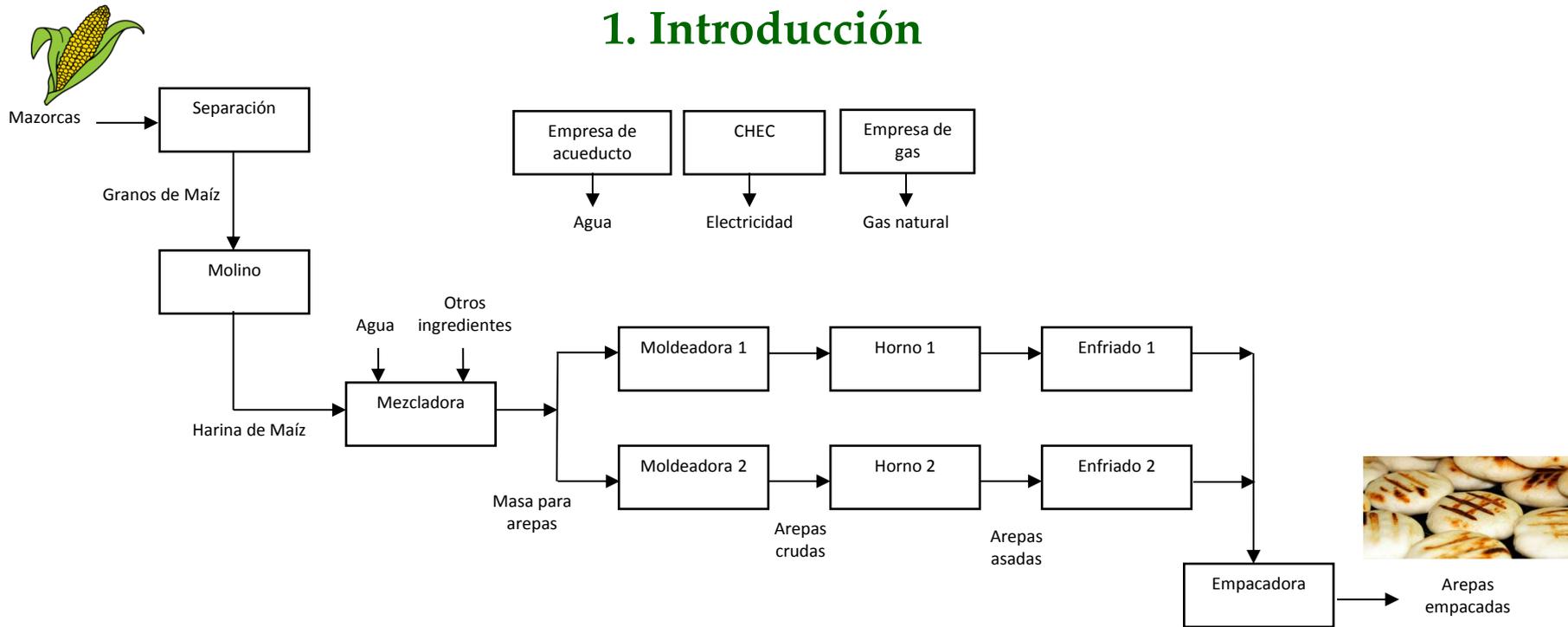


Fundado en el año 1999 por el ingeniero Ramón Alfonso Gallego Rendón, tiene como misión el desarrollar, mejorar y aplicar conocimiento en el área de sistemas eléctricos de potencia para transferirlo a la comunidad académica y a las empresas del sector eléctrico.

Sus áreas de trabajo son:

- Planeamiento de sistemas de transmisión de energía eléctrica
- Planeamiento de sistemas de distribución de energía eléctrica
- Confiabilidad de sistemas eléctricos
- Investigación de operaciones y optimización matemática
- Mercados de energía

1. Introducción



Un sistema industrial esta compuesto por equipos de diversos tipos, los operarios y por algunos insumos que son provistos por sistemas externos.

La misión de este sistema es fabricar un producto dado al menor costo posible y con nivel estipulado de calidad.

Se denomina “falla” a la situación en que un sistema industrial:

1. Deja cumplir parcialmente o totalmente su función
2. Presenta una diferencia inaceptable entre su desempeño nominal y el observado en la practica. Esto se manifiesta en:
 - Calidad de lo que produce
 - Capacidad o velocidad de producción
 - Eficiencia, rendimiento

Las fallas de un sistema industrial ocurren debido a:

1. Falla de los equipos: están relacionadas con su diseño, materiales, manufactura y mantenimiento.
2. Errores operativos: están relacionados con factores humanos.

Las fallas de un sistema industrial pueden causar:

1. Pérdidas económicas para el dueño del sistema.
2. Situaciones potencialmente peligrosas o de “riesgo” para el sistema, sus operarios y la sociedad en general (personas, medio ambiente) diferentes a las aceptadas o permitidas.
3. Pérdida de imagen para los productos o para el dueño del sistema

Por lo tanto, se requiere que todo sistema industrial ofrezca:

Calidad: Se refiere a su desempeño respecto a unas normas técnicas.

Seguridad: Que su uso no implique potenciales peligros o riesgos para los operadores o la sociedad (personas, medio ambiente) diferentes a los aceptados o permitidos.

Confiabilidad: Que cumpla su función durante el tiempo requerido bajo las condiciones operativas especificadas.

Confiabilidad  Continuidad en la operación cumpliendo calidad y seguridad

Mejoras en calidad y seguridad  Mejora en confiabilidad

La confiabilidad de un sistema industrial depende en primera instancia de:

1. La confiabilidad de los equipos que lo conforman
2. Su configuración operativa (nivel de redundancia, topología)

Otros factores que también tienen incidencia en su confiabilidad son:

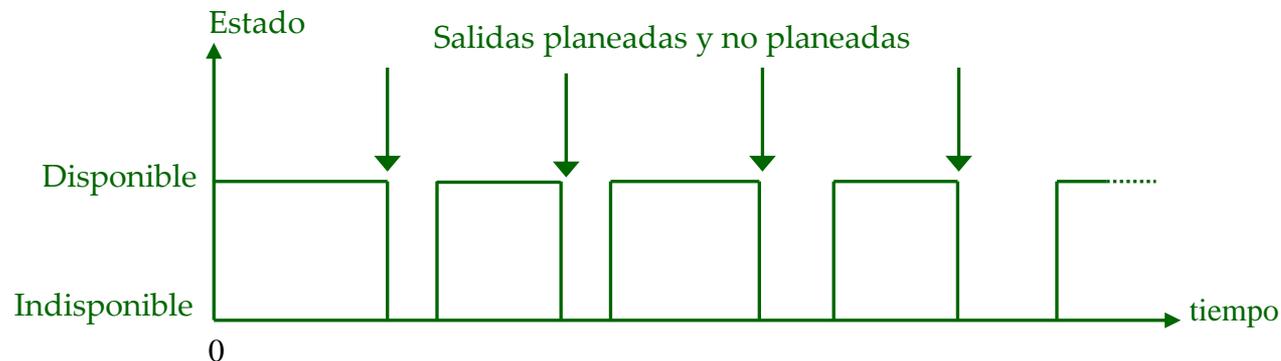
- Proceso de reparaciones (Logística, competencia del personal, herramientas disponibles, repuestos)
- Mantenimiento preventivo

Desde el punto de vista de la confiabilidad, un sistema industrial es:

1. Reparable: Cada vez que falla es restaurado al estado operativo mediante cualquier método (reparación, ajuste, etc.) excepto su reemplazo completo.

Así, todos sus equipos se consideran reparables sea mediante su reparación o su reemplazo.

2. Continuamente operado



Eventos internos y
externos que
producen las fallas



Son de
naturaleza
aleatoria



La posibilidad de su
ocurrencia se mide en
términos de probabilidad

Esto nos lleva a la definición clásica de confiabilidad para un sistema:

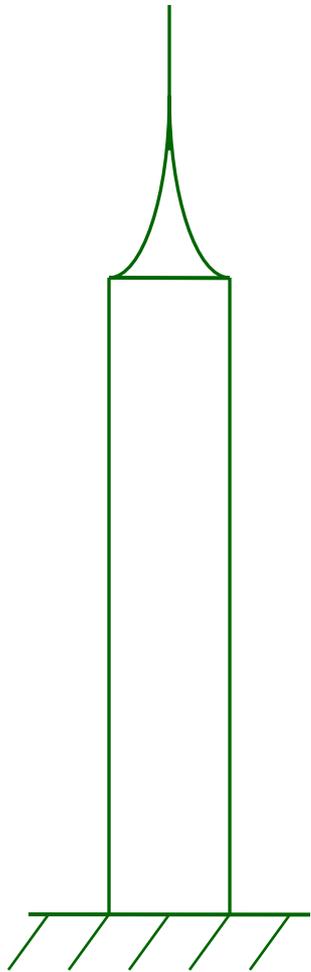
“Es la probabilidad de que cumpla su función en las condiciones operativas especificadas durante un intervalo de tiempo dado”

Análisis de
confiabilidad



Modelamiento
probabilístico

2. Análisis de Confiabilidad de un Sistema Industrial



Edificio

Análisis de confiabilidad del sistema
industrial

Columnas

Método de valoración de la confiabilidad



Cimentaciones

Modelo de los componentes



Terreno

Datos operativos

3. Datos operativos para análisis de confiabilidad

Registros de fallas
y reparaciones



- Instante de ocurrencia de la falla
- Tiempo de reparación
- Descripción del evento de falla
- Acciones correctivas tomadas

Registros de
mantenimiento
preventivo y otras
salidas planeadas



- Instante de ejecución
- Tiempo requerido
- Descripción de las acciones ejecutadas

Datos del sistema y
sus componentes



Topología

Modos operativos

Hoja de vida por componente

Inventario de componentes, cambios de componentes,
ampliaciones

Problemas que son comunes en el registro de información

1. Por increíble que parezca, no se conoce la cantidad de equipos instalados en el sistema, esto suele suceder en sistemas muy grandes.

Algunos sistemas crecen con el transcurso del tiempo, por lo cual, es necesario actualizar esta información periódicamente.

2. No se tiene para cada componente una hoja de vida donde se registren su código de identificación en el sistema o empresa, fabricante, referencia, número serial, características técnicas principales y el instante en el cual fue puesto en servicio.
3. Cuando se reemplaza un componente que ha fallado no se registra su identificación, el instante de su falla o reemplazo ni una descripción del estado en que se encontró el componente que permita luego analizar las causas de su falla.

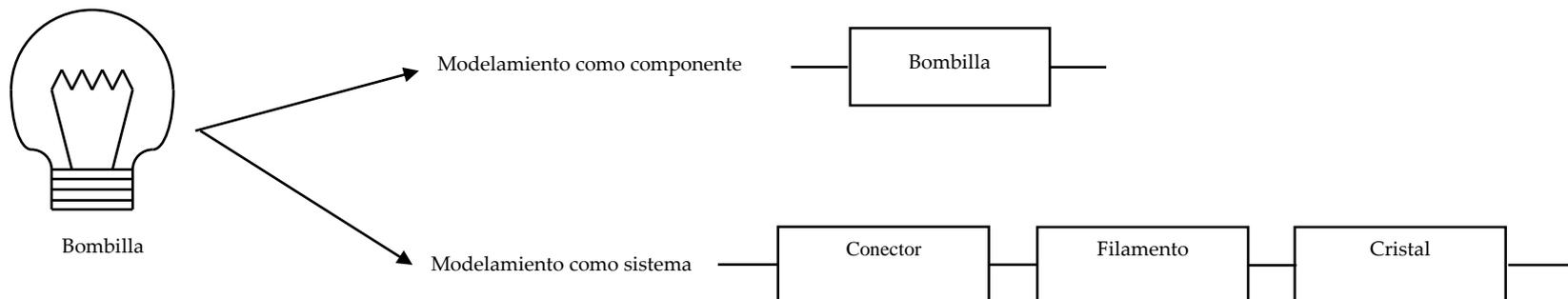
4. No se realiza un análisis “post-mortem” de los componentes que han fallado para establecer las causas de su falla y clasificarlas.
5. Errores en el registro de fechas, código de los componentes, ubicación de los componentes.
6. Descripciones ilegibles o no entendibles por mala escritura o uso de términos no técnicos.
7. Pérdida parcial o total de los documentos o archivos donde se registra la información.

4. Análisis de confiabilidad a nivel de componentes

Qué es un componente?

- **Componente:** Un equipo, máquina, aparato, dispositivo o sub-sistema que será modelado en forma global como un todo
- **Sistema:** Un conjunto de componentes interconectados para cumplir una función.

Así, dependiendo del objetivo del estudio un equipo, máquina o dispositivo puede ser tratado como componente o como sistema



Si para un sistema industrial dado interesa:

Estudiar el efecto sobre su confiabilidad de la confiabilidad individual de los subcomponentes de los equipos que lo conforman y de su configuración operativa



Los equipos tienen que ser tratados como un sub-sistemas

Estudiar el efecto sobre su confiabilidad de la confiabilidad individual de los equipos sin detallar en lo que sucede internamente



Los equipos pueden ser tratados como un todo, es decir, como un componente

Tipos de componentes

- No reparable: Aquel que se descarta la primera vez que falla.

Ejemplos: aislador eléctrico, diodo, transistor, circuito integrado, empaque plástico, tornillo, etc.

- Reparable: Aquel que una vez falla puede ser restaurado al estado operativo mediante cualquier método (reparación, ajuste, etc.) excepto su reemplazo completo.

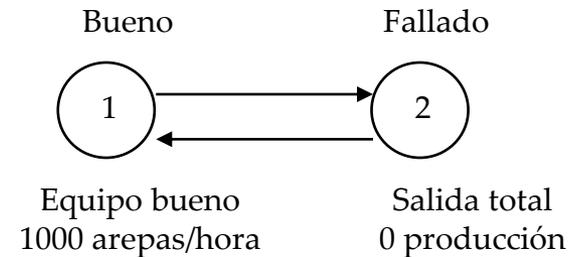
Ejemplos: sistema eléctrico de potencia, sistema de acueducto, computador, refrigerador, etc.

Como se mencionó anteriormente, para un sistema industrial se considera que todos los componentes son reparables: Los componentes no reparables se reparan reemplazándolos

Tipos de componentes según sus modos de falla

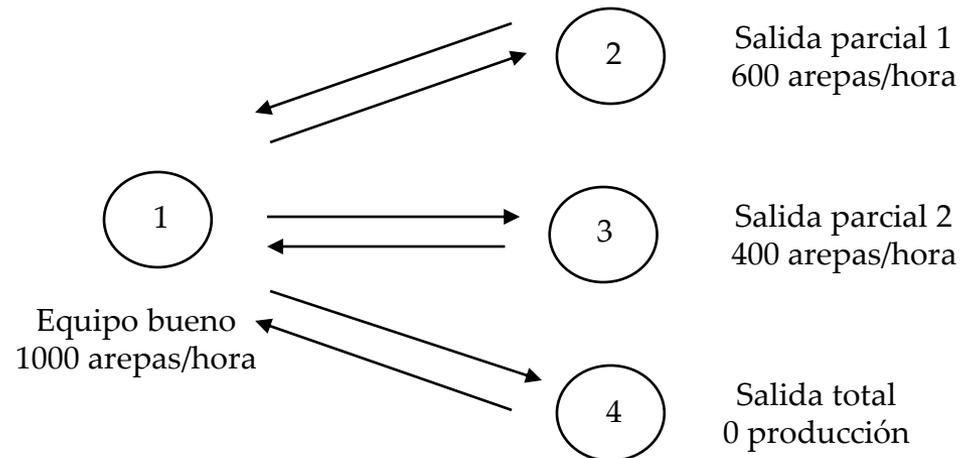
Dos estados operativos – un modo de falla:

Todas las fallas activas tienen el mismo
efecto sobre la producción

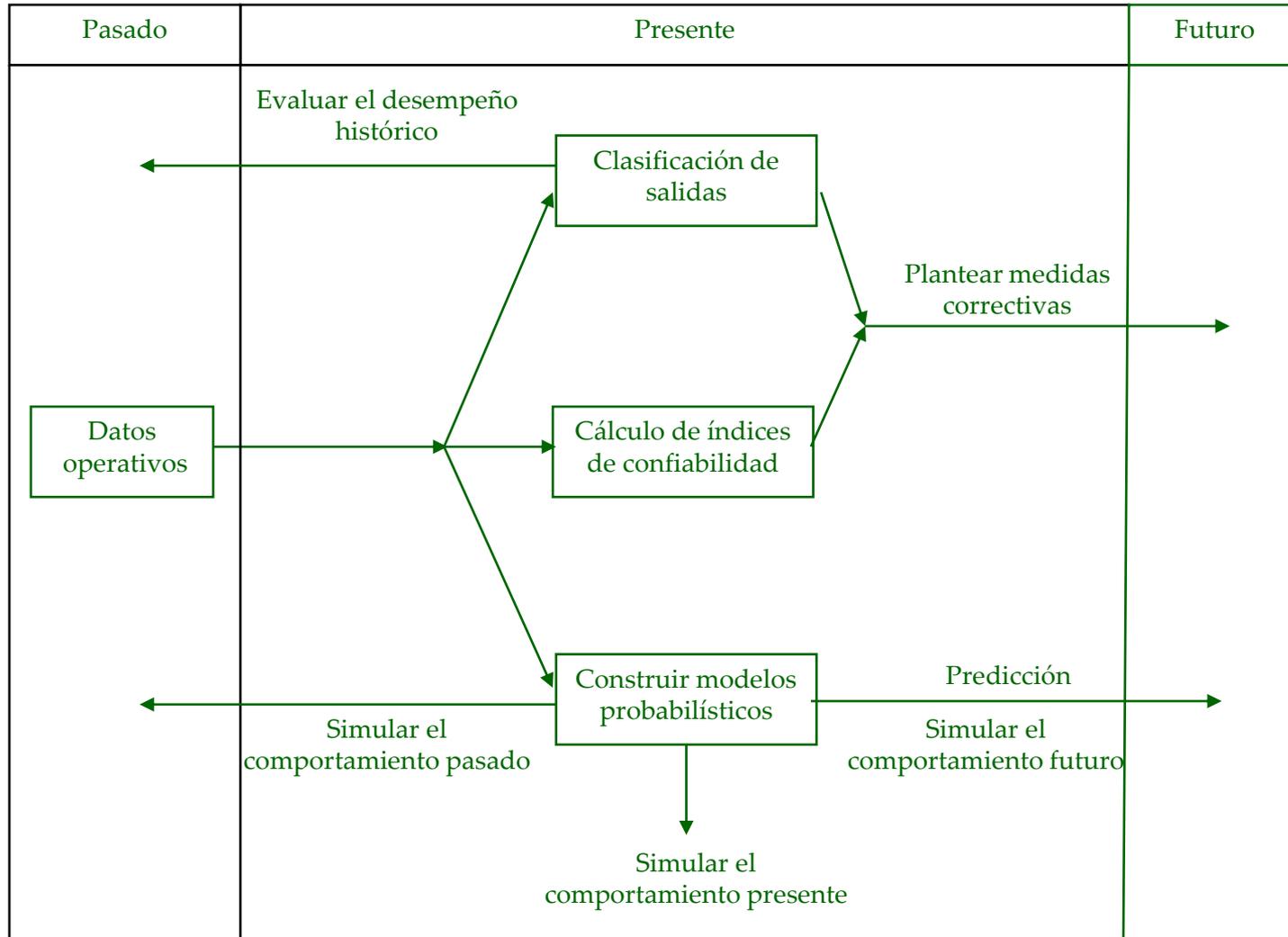


Más de dos estados operativos – varios
modos de falla:

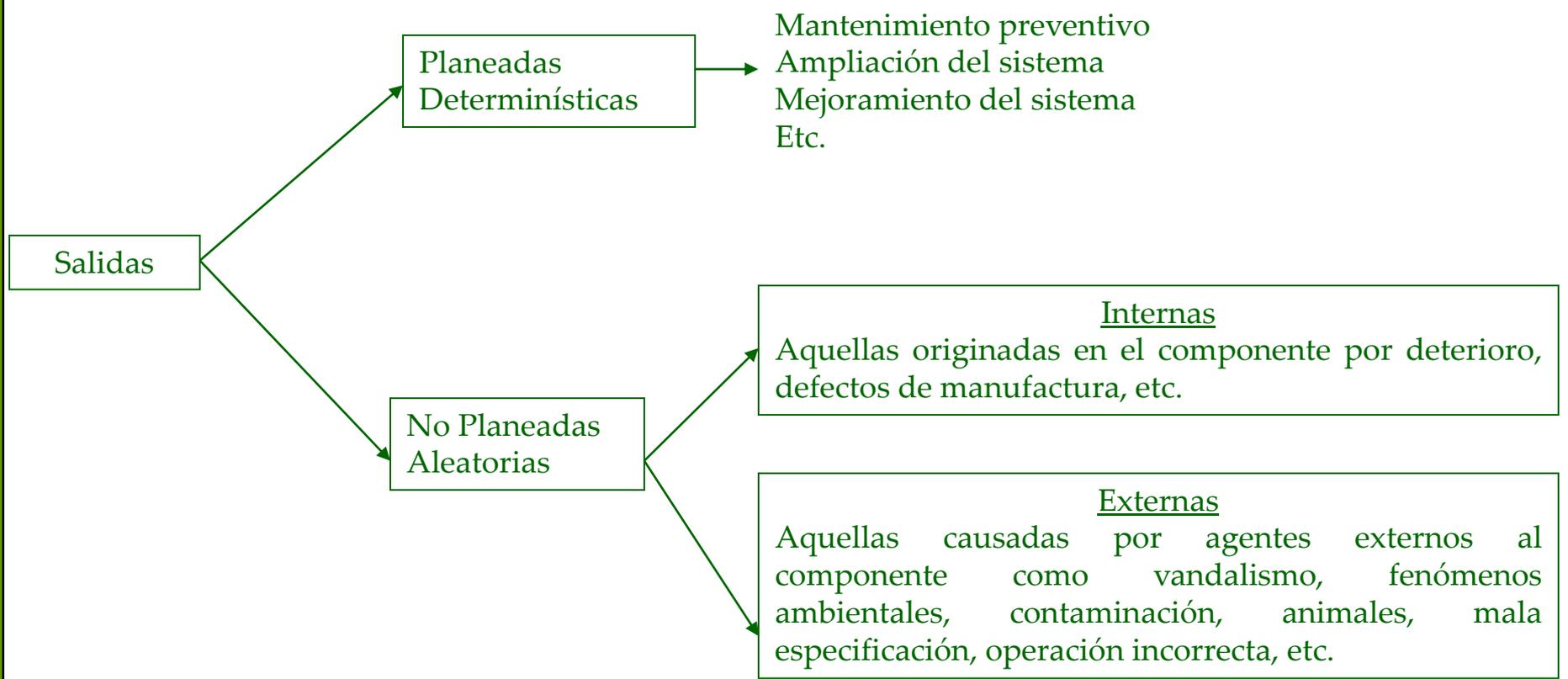
Las fallas activas tienen distintos efectos
sobre la producción



Tipos de análisis de confiabilidad a nivel de componentes



Clasificación de salidas



Este análisis es de gran importancia ya que permite tomar acciones correctivas como:

1. Mejora de las especificaciones técnicas
2. Mejora en los diseños
3. Estrategias de mantenimiento
4. Estrategias operativas

Índices estadísticos de confiabilidad

Son medidas de la confiabilidad de los componentes.

Sirven para comparar el desempeño respecto a componentes similares

Si el los índices se calculan utilizando información operativa agrupada de varios componentes, se refieren entonces a un componente “típico” o “medio” del grupo de componentes.

Existen muchos índices de confiabilidad, a continuación se muestran algunos

Debe tenerse cuidado al utilizarlo ya que son valores constantes y puede ocultarse el hecho de que los procesos de falla y reparación sean no estacionarios

Tasa de salidas

$$\lambda_o = n / (N * T - \sum_{i=1}^n ttrs_i)$$

Disponibilidad operacional

$$A_o = (1 - \sum_{i=1}^n ttrs_i / (N * T)) * 100\%$$

Tiempo medio para restauración

$$MTTRS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ttrs$$

Tasa de restauraciones

$$\mu_R = 1 / MTTRS$$

Tasa de fallas

$$\lambda = n_f / (N * T - \sum_{i=1}^{n_f} ttr_i)$$

Disponibilidad

$$A = (1 - \sum_{i=1}^{n_f} ttr_i / (N * T)) * 100\%$$

Tiempo medio para reparación

$$r = \frac{1}{n_f} \sum_{i=1}^{n_f} ttr$$

Tasa de reparaciones

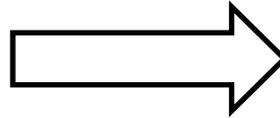
$$\mu = 1 / r$$

Modelos de confiabilidad de los componentes

Realidad

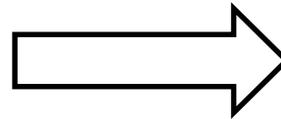
Idealización

Muestra de tiempos
para falla



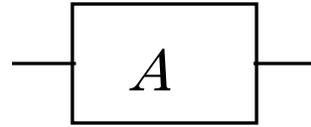
Modelo de fallas

Muestra de tiempos
para reparación

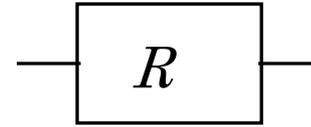


Modelo de reparaciones

Bloques de confiabilidad

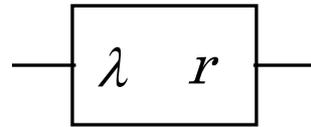


$$U = 1 - A$$



$$F = 1 - R$$

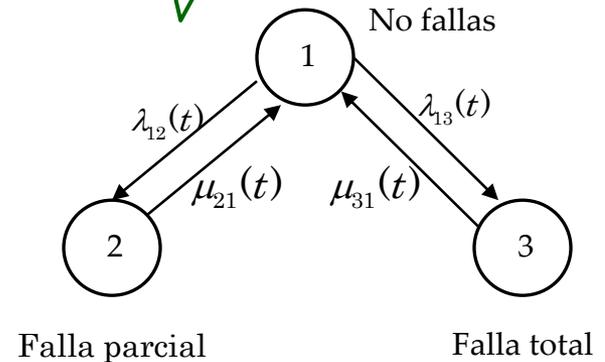
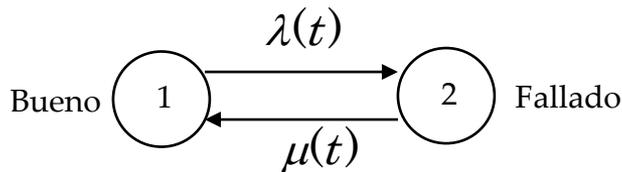
Frecuencia y duración

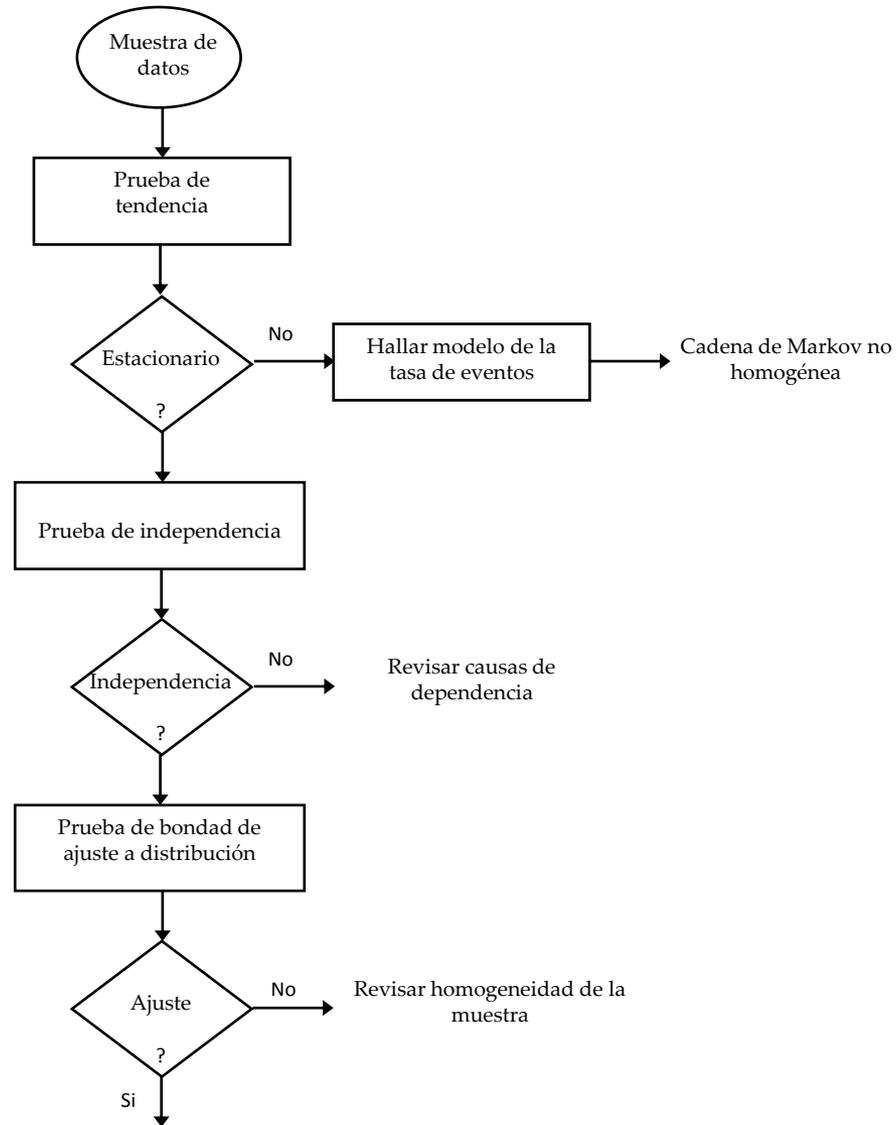


$$U = \lambda r$$

Si A, U, R, F, λ , r son constantes los procesos de falla y reparación son estacionarios. Esto debe verificarse!

Cadenas de Markov





(Distribución Exponencial, Lognormal, Gamma, etc.)

Cadena de Markov homogénea

5. Métodos de valoración de confiabilidad del sistema

Los métodos para valorar confiabilidad se utilizan para predecir el comportamiento futuro del sistema ante:

- Cambios en el sistema
- Cambios en los componentes
- Cambios en las estrategias operativas
- Cambios en las estrategias de mantenimiento preventivo
- Cambios en las estrategias de mantenimiento correctivo (reparaciones)

La predicción se realiza porque, en general, no se hacen ensayos directamente en el sistema sin primero haber evaluado en forma teórica su efecto.

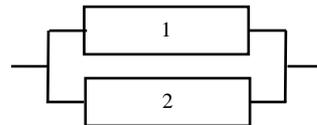
Diagramas de Red

Se aplica si:

- Las componentes son independientes en cuanto a sus fallas (no hay fallas de modo común)
- Cada componente solo tiene dos estados operativos: “bueno” y “fallado”, “disponible” e “indisponible”, etc.
- El sistema solo tiene dos estados operativos: “bueno” y “fallado”, “disponible” e “indisponible”, etc.



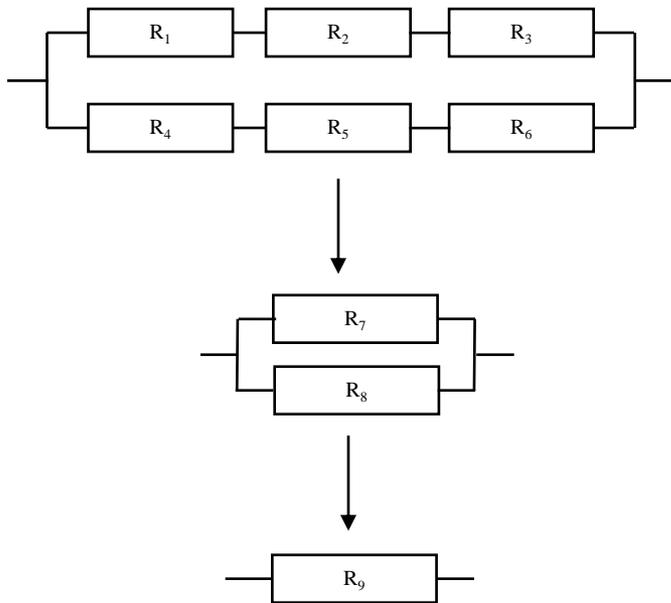
$$R_{SISTEMA} = R_A R_B$$



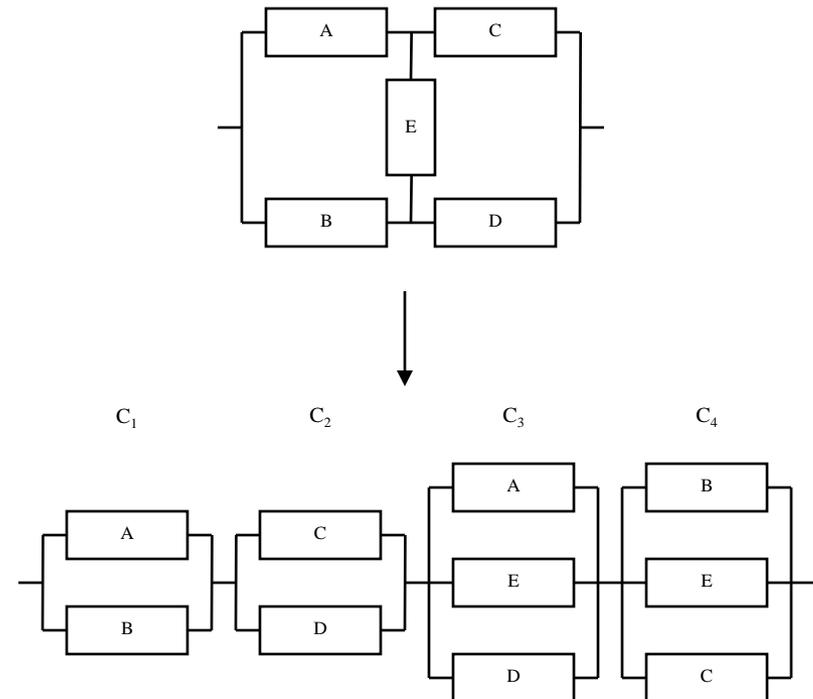
$$F_{SISTEMA} = F_A F_B$$

Formas de solucionar el diagrama de red

Reducción secuencial mediante
combinaciones serie y paralelo

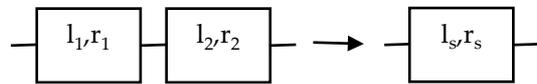


Para estructuras complejas se establece la red
equivalente de conjuntos de cortes para luego
aplicar la reducción secuencial mediante
combinaciones serie y paralelo

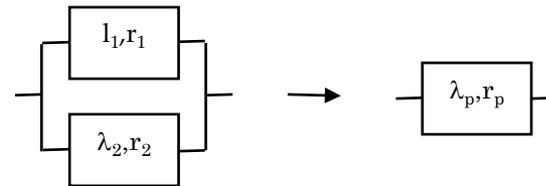


Frecuencia y duración

Este método es una aproximación derivada de la cadena de Markov homogéneo exponencial y en el cual cada componente se considera como un “bloque”



$$\lambda_s = \lambda_1 + \lambda_2 \quad r_s = \frac{(\lambda_1 r_1 + \lambda_2 r_2)}{(\lambda_1 + \lambda_2)}$$



$$\lambda_p = \lambda_1 \lambda_2 (r_1 + r_2) \quad r_p = \frac{r_1 r_2}{(r_1 + r_2)}$$

- Como este método opera sobre el concepto de diagrama de red, entonces, deben cumplirse las condiciones de dicho método.
- Como este método se deriva de la cadena de Markov homogénea exponencial, los tiempos para falla y reparación deben estar exponencialmente distribuidos. Esto debería verificarse antes de aplicar este método.
- Solo se recomienda utilizar este tipo de modelamiento si la indisponibilidad anual de cada componente es menor al 10%.
- Los procesos de falla y reparación son estacionarios

Enumeración de Estados

Se aplica para sistemas de componentes independientes y dos estados operativos.

La probabilidad de ocurrencia de uno de los estados operativos del sistema se puede hallar mediante la fórmula de probabilidad de ocurrencia simultánea de eventos independientes:

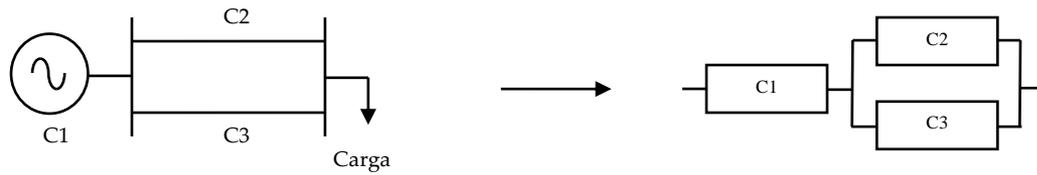
$$P[E_1 \cap E_2 \cap \dots \cap E_n] = P[E_1]P[E_2] \dots P[E_n] = \prod_{i=1}^n P[E_i]$$

$$E_i = F_i \quad \rightarrow \quad \bar{E}_i = R_i$$

$$E_i = U_i \quad \rightarrow \quad \bar{E}_i = A_i$$

Para aplicar este método debe realizarse una enumeración exhaustiva de todos los estados operativos posibles, lo cual, puede ser una tarea complicada incluso para sistemas con pocos componentes.

Es buena su aplicación cuando las fallas de los componentes y sus combinaciones tienen diferentes resultados sobre la operación del sistema.



i	Componentes disponibles			P[estado i]
	C1	C2	C3	
1	SI	SI	SI	$A_{c1} A_{c2} A_{c3}$
2	SI	SI	NO	$A_{c1} A_{c2} U_{c3}$
3	SI	NO	SI	$A_{c1} U_{c2} A_{c3}$
4	NO	SI	SI	$U_{c1} A_{c2} A_{c3}$
5	NO	NO	SI	$U_{c1} U_{c2} A_{c3}$
6	NO	SI	NO	$U_{c1} A_{c2} U_{c3}$
7	SI	NO	NO	$A_{c1} U_{c2} U_{c3}$
8	NO	NO	NO	$U_{c1} U_{c2} U_{c3}$

Para facilitar la aplicación de este método reduciendo la cantidad de estados operativos del sistema se agrupan componentes que están en serie (desde el punto de vista de confiabilidad)

Cadenas de Markov

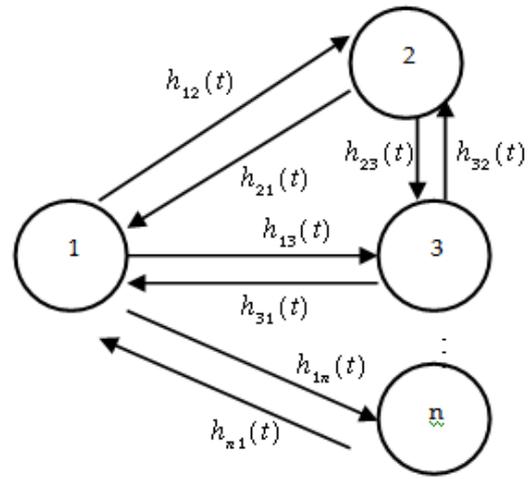
Con este método:

- Se pueden considerar componentes con cualquier número de estados operativos
- Se pueden considerar componentes independientes y con modos de falla dependientes
- Se pueden utilizar tasas de fallas y reparaciones constantes o variables en el tiempo
- Se representa la secuencia de estados operativos de los componentes que llevan a un determinado estado operativo del sistema

Para aplicar este método debe realizarse una enumeración exhaustiva de todos los estados operativos posibles, lo cual, puede ser una tarea complicada incluso para sistemas con pocos componentes.

Pasos para aplicar este método:

1. Definir los estados operativos del sistema y hacer su diagrama.
2. Para cada uno de los tiempos de transición entre estados analizar la tendencia. Dos casos pueden aparecer:
 - No hay tendencia: En este caso la tasa de transición es constante. Se procede a obtener la distribución de probabilidad de los tiempos de transición.
 - Si hay tendencia: En este caso la tasa de transición es variable con el tiempo. Se procede a obtener la función que representa la tasa de transición, por ejemplo, aplicando el método de mínimos cuadrados.
3. Dependiendo de la forma de las tasas de transición entre estados (constantes o variables en el tiempo) y de la distribución de probabilidad asociadas a las tasas de transición constantes, seleccionar el método de solución para el sistema de ecuaciones diferenciales que describen el sistema.



$$\overline{\dot{P}(t)}^t = T^t \overline{P(t)}^t$$

$$T = \begin{pmatrix} h_{11}(t) & h_{12}(t) & \cdots & h_{1n}(t) \\ h_{21}(t) & h_{22}(t) & \cdots & h_{2n}(t) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_{n1}(t) & h_{n2}(t) & \cdots & h_{nn}(t) \end{pmatrix}$$

	Condiciones	Nombre	Características	Método de solución
1	Todos los h_{ij} son constantes y todos los t_{ij} están exponencialmente distribuidos	Cadena de Markov homogénea exponencial	Proceso estacionario homogéneo	Análítica y numérica por métodos numéricos de ecuaciones diferenciales y simulación de Montecarlo
2	Todos los h_{ij} son constantes, pero no todos los t_{ij} están exponencialmente distribuidos	Cadena de Markov homogénea general	Proceso estacionario homogéneo	Simulación de Montecarlo, mecanismo de las etapas (<u>device of stages</u>) y adición de variables
3	Algunos h_{ij} varían con el tiempo	Cadena de Markov no homogénea	Proceso no estacionario no homogéneo	Métodos numéricos de ecuaciones diferenciales y simulación de Montecarlo

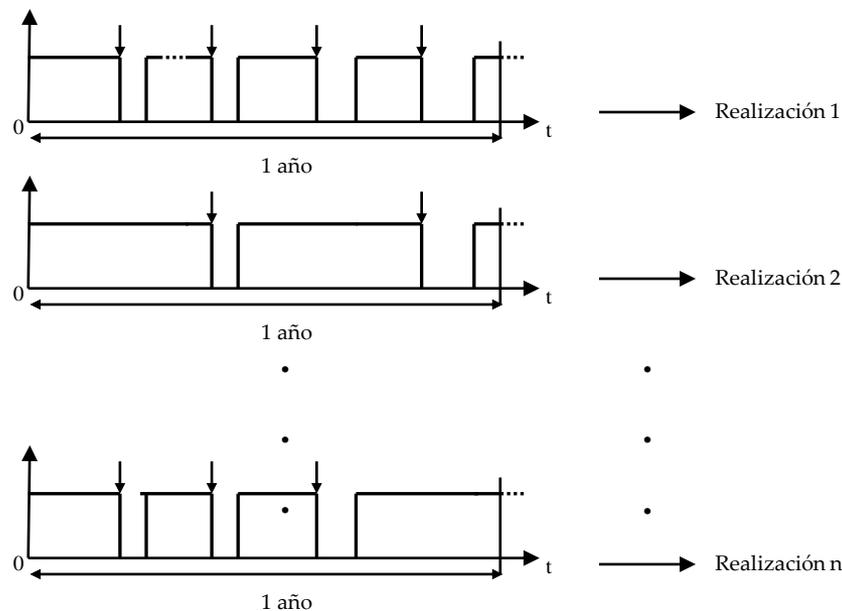
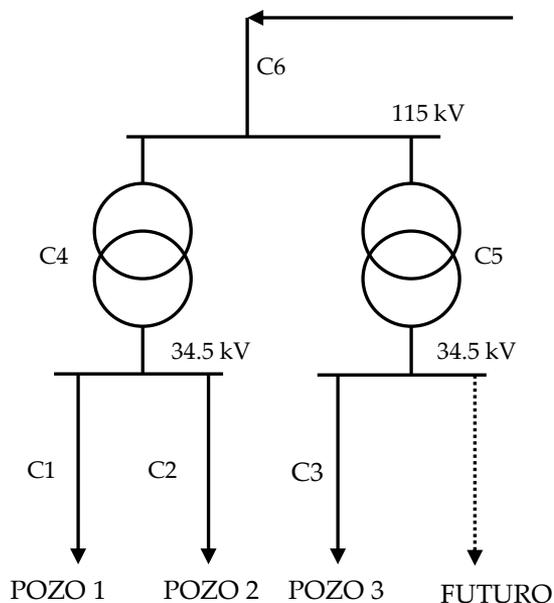
Simulación de Montecarlo

Este método permite mezclar diversos tipos de modelamiento de los componentes, modos de falla común, procesos estacionarios y no estacionarios, diversas secuencias operativas, diversas logísticas para reparación, operación balanceada o desbalanceada, y lo más importante, se puede combinar con otros procesos iterativos como algoritmos genéticos, flujos de carga, etc.

Su mayor desventaja radica en el alto tiempo computacional y capacidad de memoria RAM requeridos, lo cual se agrava en sistemas que tienen componentes con tasas de fallas muy bajas.

Su aplicación no es tan sencilla como la de otros métodos, ya que requiere el desarrollo de un programa de computador para su aplicación. Esto desmotiva su aplicación con respecto a los otros métodos.

Algoritmo básico para sistemas reparables y criterio de pérdida de componentes n-1



Datos de entrada:

- Modelos de falla y reparación de cada uno de los componentes
- Efecto de las fallas (\$, demanda, etc.)

Cuál método de valoración de confiabilidad utilizar?

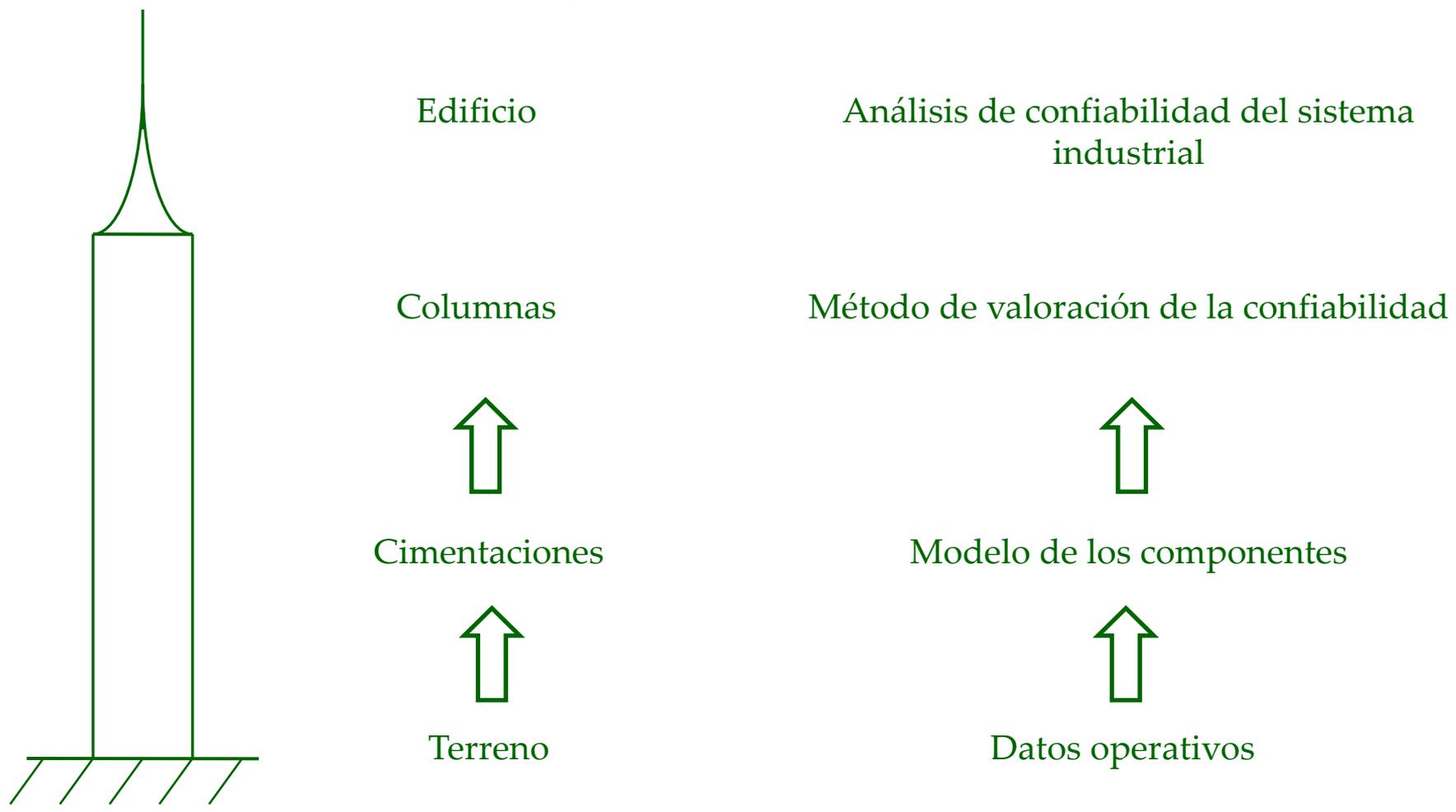
1. Condiciones operativas de los componentes:

- Modos de falla de los componentes
- Modos de falla común
- Proceso de fallas y reparación son estacionarios?

2. Calidad de la información operativa con la cual se construyeron los modelos de confiabilidad de los componentes

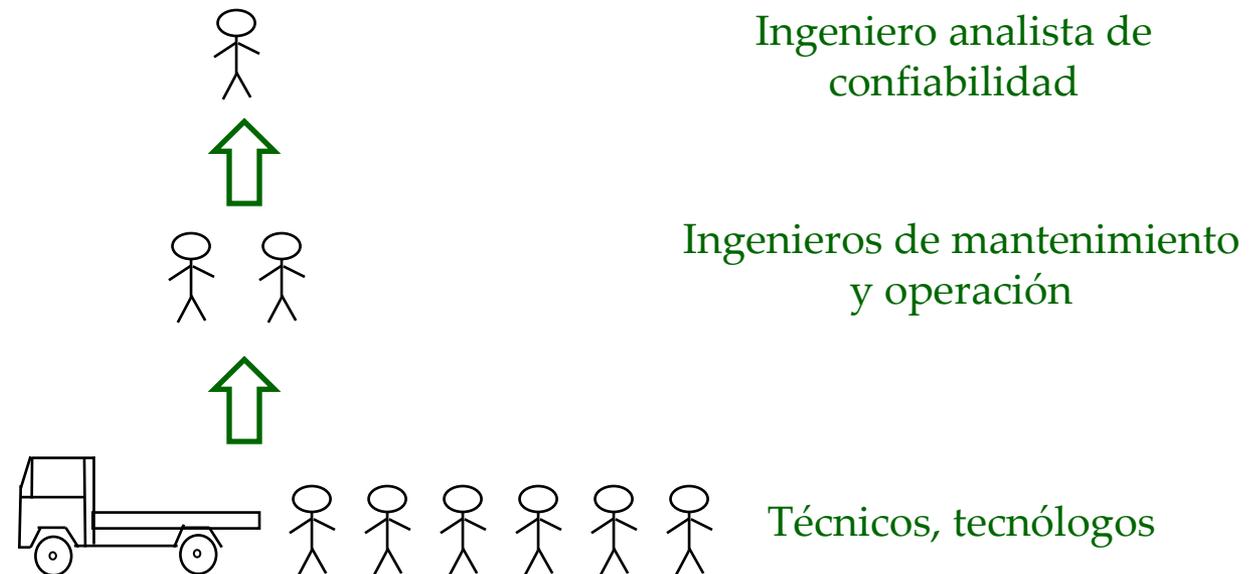
- Cuando no existen datos operativos o los existentes son insuficientes es costumbre tomar índices o modelos de confiabilidad de documentos técnicos
- Si los datos se obtienen de esta forma de nada sirve aplicar un método sofisticado de valoración de confiabilidad como cadenas de Markov o simulación de Montecarlo

Tener presente que la validez de los resultados y conclusiones que se obtengan del análisis de confiabilidad es directamente proporcional a la calidad de los datos operativos utilizados para construir los modelos de confiabilidad

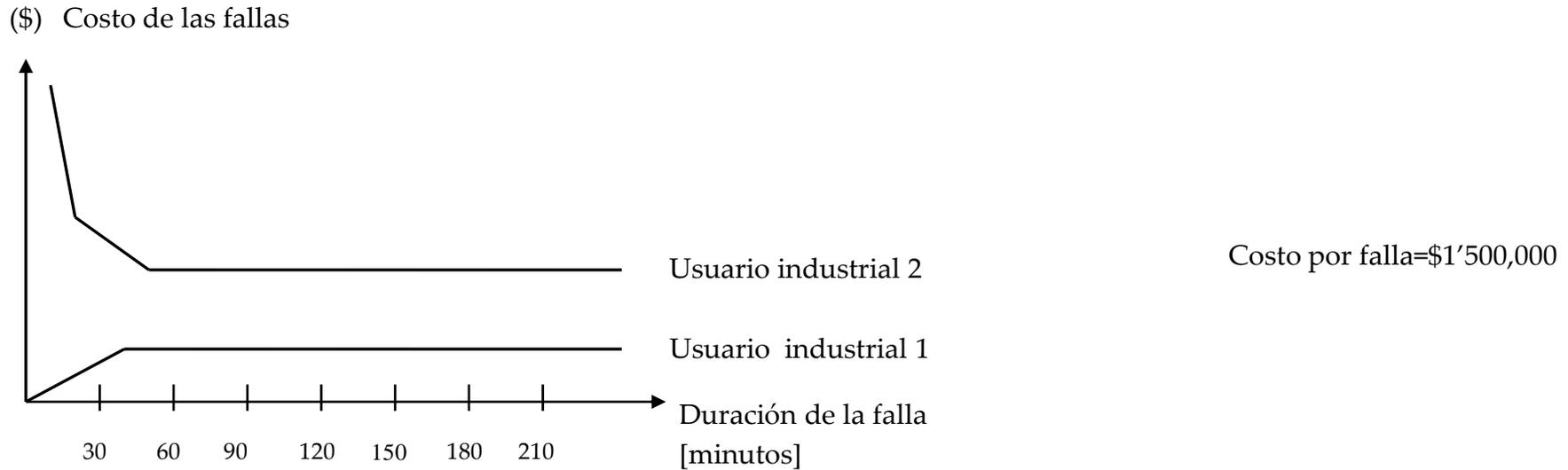


Así, se debe instruir a todo el personal involucrado en la operación del sistema, ingenieros, tecnólogos y técnicos sobre la importancia de llevar registros detallados tanto de los componentes como de los mantenimientos realizados.

La falta de información completa y correcta impide realizar un completo análisis de la confiabilidad lo que a su vez impide tomar sobre una base objetiva medidas correctivas para el mejoramiento del sistema.



6. Costo de la confiabilidad

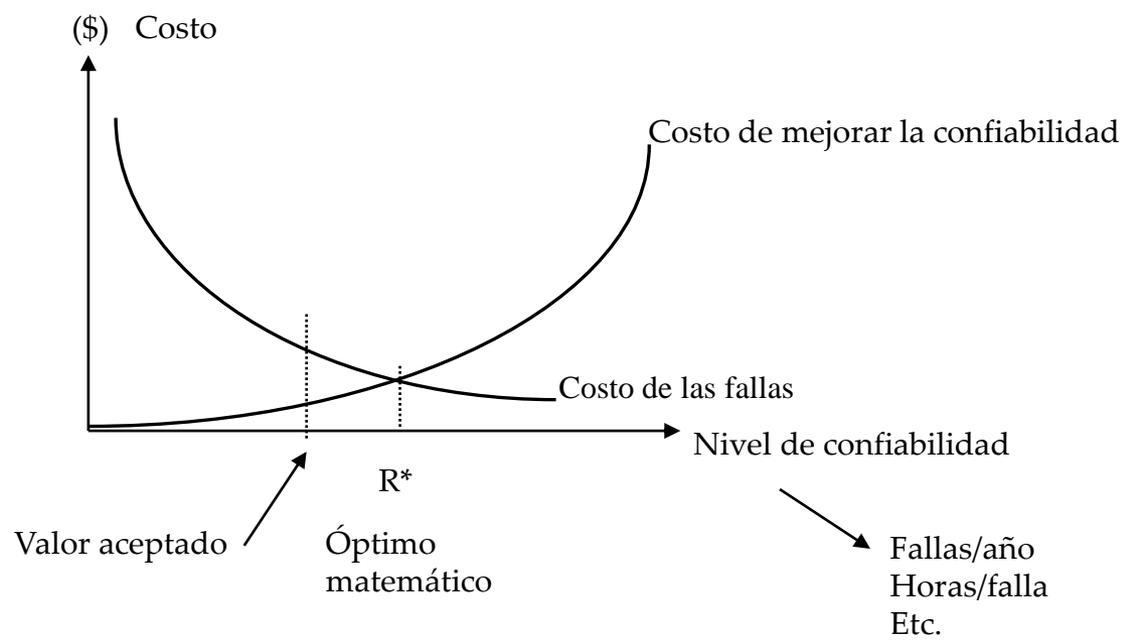


Es necesario establecer el costo de las fallas en el sistema industrial:

- En algunos casos, se establece el costo según la duración de la falla
- En otros casos, se establece un costo por falla ya que su duración no afecta los costos

Con el costo de las fallas se establece el valor óptimo de inversión en confiabilidad, es decir:

Beneficios de mejorar la confiabilidad \geq Costo de mejorar la confiabilidad



7. Referencias

- [1] C. J. Zapata, Confiabilidad en Ingeniería, Universidad Tecnológica de Pereira, 2011
- [2] C. J. Zapata, Confiabilidad de Sistemas Eléctricos, Universidad Tecnológica de Pereira, 2011
- [3] C. J. Zapata, Análisis Probabilístico y Simulación, Universidad Tecnológica de Pereira, 2011

Para preguntas, comentarios o solicitud de material adicional, enviar un
mensaje a:

cjzapata@utp.edu.co