



1

Análisis probabilístico en gestión de activos: **Caso de negocio y Estimación de beneficios**

Jorge Granada
CEO Knar Glonal LLC

2

Determinístico vs. Probabilístico



*"God does not
play dice"*

1927



*"Stop telling
God what to do"*

$$|P(a,b) - P(a,c)| \leq 1 + P(b,c)$$

John Stewart Bell



"El Universo es Probabilístico"

1964

1980

2022

..y entenderlo ,
toma tiempo



Toma de Decision en Activos Industriales

Aspecto	Enfoque Determinístico	Enfoque Probabilístico
Naturaleza del Problema	Fijo, predecible	Aleatorio, incierto
Entradas	Precisas, conocidas	Inciertas, probabilísticas
Salidas	Única, exacta	Rango, distribución
Complejidad del Modelo	Más simple	Más complejo

#CMCMéxico2025

 CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18^a EDICIÓN

5



Toma de Decision en Activos Industriales

Aspecto	Enfoque Determinístico	Enfoque Probabilístico
Robustez ante la Incertidumbre	Baja (sensible a errores en las entradas)	Alta (considera la variabilidad)
Toma de Decisiones	Resultados binarios	Basada en riesgo, probabilística
Aplicaciones	Sistemas controlados, bien definidos	Sistemas complejos, inciertos

#CMCMéxico2025

 CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18^a EDICIÓN

6

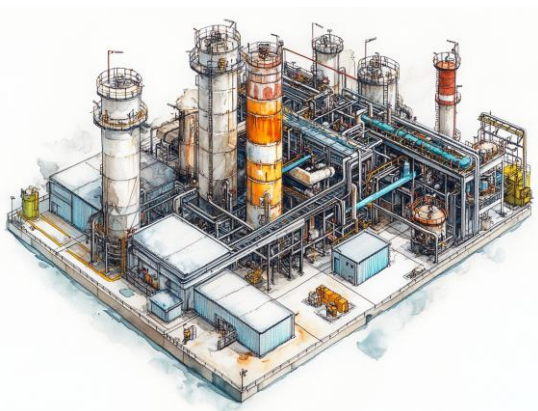
¿Es ...
realmente un
problema?



CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18^a
EDICIÓN

7

¿Cuándo es costo-efectivo + seguro realizar la próxima parada de planta?



- Consumo de combustible **variable**.
- Calidad de carga, **variable**
- Condición de Equipos, **variable** (temperatura- Arrhenius).
- Condición de Ejecución de Mantenimiento, **variable**.
- Vida acumulada, **variable**.

#CMCMéxico2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18^a
EDICIÓN

8



¿Cómo sincronizar el mantenimiento del equipo mayor con la dinámica del consumo de gas?

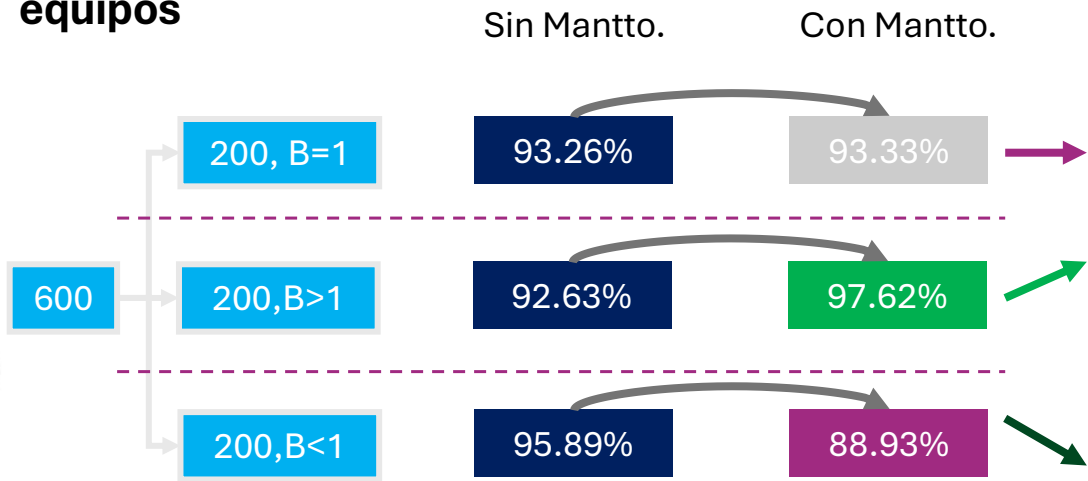


- Consumo de gas, **estacional y función del clima de la ciudad.**
- Utilización del Sistema de Compresión, **función de la condición variable del yacimiento.**
- Condición de Equipos, **combinación: nuevo + envejecido.**
- Clima en planta, **afecta procesos criogénicos de separación.**

#CMCMéxico2025



Simula el desempeño probabilístico de tus equipos



#CMCMéxico2025

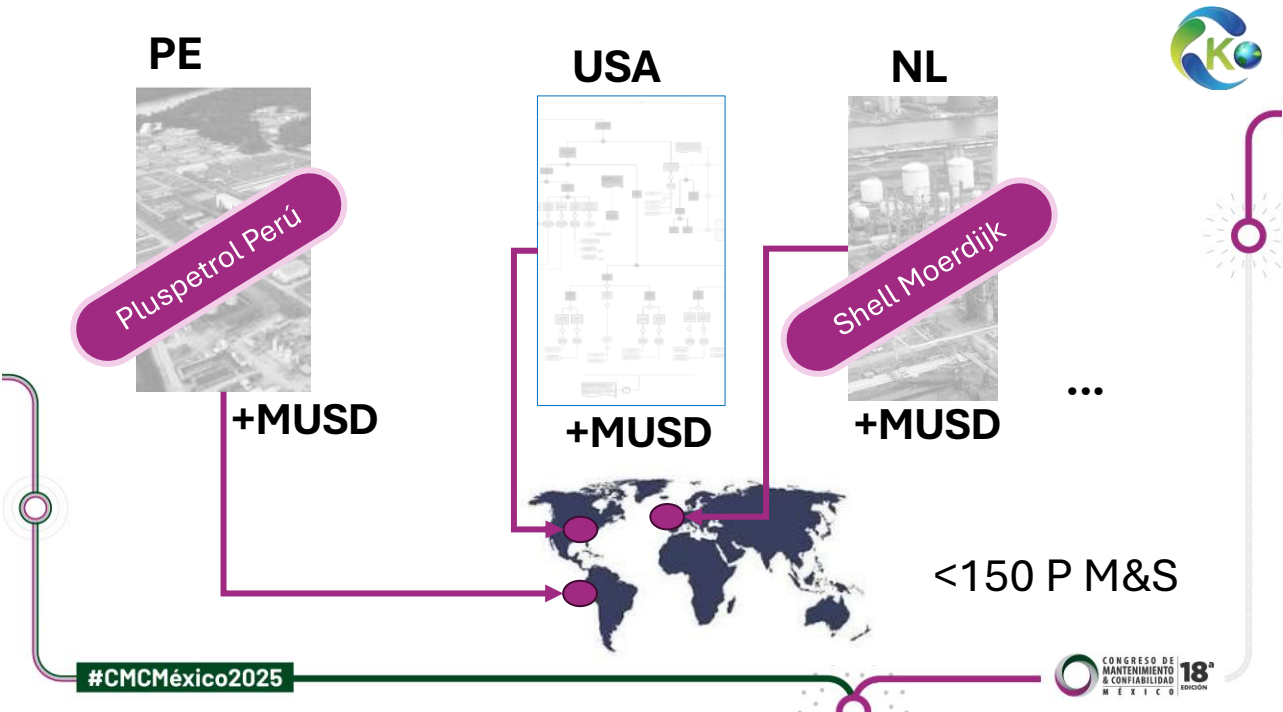


¿Qué Oportunidades Brinda el abordaje Probabilístico de la Gestión de Activos?

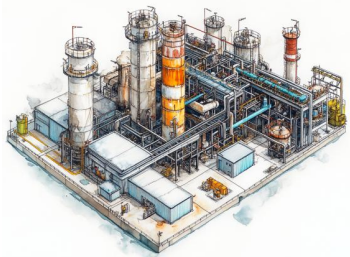


CONGRESO DE MANTENIMIENTO & CONFIABILIDAD MEXICO 18^a EDICION

11



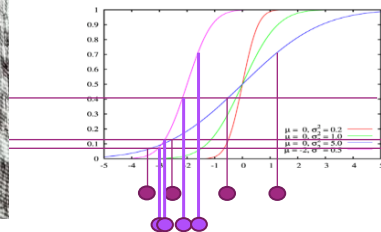
12



Activo Real



**Modelamiento
& Simulación**



**Toma de Decisión
basada en
Pronóstico
pertinente**

#CMCMéxico2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18^a
EDICIÓN

13

**Cómo se
diferencia el
Pensamiento
Determinístico
del Probabilístico**



Edwin Ledderhof  1st
Senior Process Engineer at Shell Nederland Chemie

*“¿Vienes a hacer el modelo que
necesitamos, o el modelo que sabes
hacer?”*

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18^a
EDICIÓN

14



Toma de Decision en Activos Industriales



Determinístico



Probabilístico

#CMCMéxico2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18ª
EDICIÓN

15

Toma de Decision en Activos Industriales



Determinístico

Los elementos sobre los que decidimos
... están aislados.
... no cambian en el tiempo
... no los afectan las perturbaciones externas
... se simplifican por sus promedios

Nuestros métodos analíticos.
... son simples listados de pasos.
... suma, resta, multiplicación y división

#CMCMéxico2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18ª
EDICIÓN

16



Toma de Decision en Activos Industriales



Probabilístico

Los elementos sobre los que decidimos
 ... están ~~aislados~~ interconectados
 ... ~~no cambian~~ cambian en el tiempo
 ... ~~no~~ si los afectan las perturbaciones externas
 ... ~~se simplifican~~ se describen de manera completa

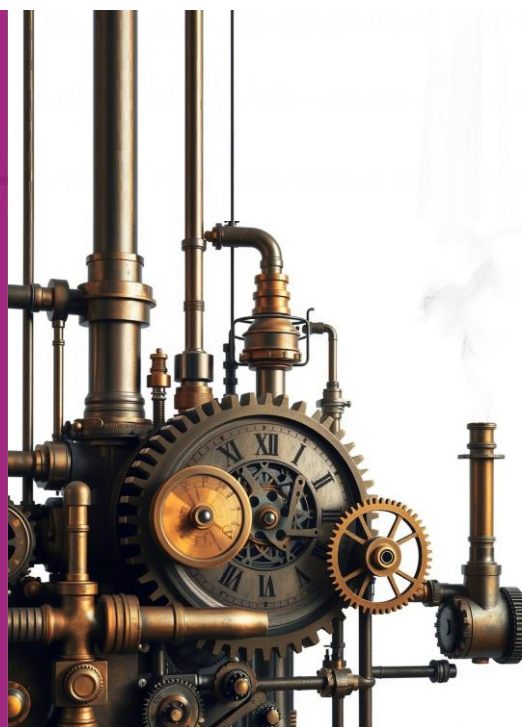
Nuestros métodos analíticos.
 ... son ~~simples listados~~ modelamiento y simulación
 ... ~~suma, ..~~ Los recursos matemáticos más aptos
 que existan

#CMCMéxico2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18ª
EDICIÓN

17

Situaciones
inherentemente
probabilísticas
en nuestro
contexto
industrial



CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18ª
EDICIÓN

18



1. Programación del Mantenimiento Predictivo



- Los fallos de los equipos inherentemente inciertos
- Factores : Desgaste, patrones de uso, condiciones ambientales y defectos de fabricación.



- Momento óptimo para realizar mantenimientos basándose en la probabilidad de fallo
- Usa modelos de confiabilidad (p. ej., análisis de Weibull o cadenas de Markov).

#CMCMéxico2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
MÉXICO 18^a
EDICIÓN

19



2. Gestión de Inventario de Repuestos



Demanda de repuestos fluctúa →

- fallos aleatorios de los equipos
- variaciones en los programas de producción.



Nivel óptimo de inventario

- Distribución de Poisson
- Simulaciones de Monte Carlo
- Riesgos de desabastecimiento y exceso de stock.

#CMCMéxico2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
MÉXICO 18^a
EDICIÓN

20

3. Planificación de Inspecciones Basadas en Riesgo (RBI)



Degradación de los activos (corrosión, fatiga):

- Es estocástica
- F() condiciones operativas inciertas.



Priorizar inspecciones para activos de alto riesgo utilizando evaluaciones de riesgo probabilísticas (PRA) que cuantifiquen la probabilidad y consecuencias de fallos.

#CMCMéxico2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18^a
EDICIÓN

21

4. Optimización del Consumo Energético



Demanda / Suministro de energía están sujetos a:

- Cargas de producción fluctuantes ->P ,
- Condiciones climáticas ->P, y
- Disponibilidad de la red -P.



Optimizar el uso de energía utilizando modelos probabilísticos para predecir picos de demanda e integrar fuentes renovables con salidas variables.

#CMCMéxico2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18^a
EDICIÓN

22



5. Decisiones de Inversión de Capital



- Retornos futuros de inversiones en nuevas tecnologías o infraestructura son inciertos
- Condiciones del mercado $\rightarrow P$,
- Rendimiento operativo $\rightarrow P$.



Usar modelos financieros probabilísticos (p. ej., simulaciones de Monte Carlo) para evaluar el valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR) bajo varios escenarios.

#CMCMéxico2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18^a EDICIÓN

23



Otros ejemplos

- Planificación de Capacidad de Producción.
- Extensión de Vida vs. Reposición de Equipos.
- Evaluación de Seguridad.
- Cumplimiento Ambiental y Gestión de Emisiones.
- Exploración de capacidad de cadena de suministro.
-

#CMCMéxico2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18^a EDICIÓN

24

**Pero, si siempre
lo hemos hecho
así...**



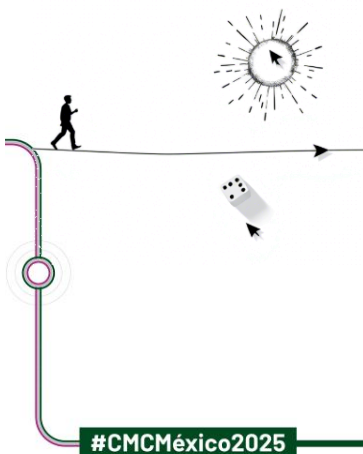
CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18^a
EDICIÓN

25

Riesgos asociados a la sobre-simplificación



- Estimación inadecuada de Riesgo.
- Desconocimiento de eventos de rara ocurrencia, pero altamente críticos.
- Poca efectividad de las decisiones de mantenimiento y gestión de activos.
- Muy baja capacidad de acierto en decisiones estratégicas.
- Desgaste organizacional.
- Sobrecostos y frustración



#CMCMéxico2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18^a
EDICIÓN

26



Barreras para la adopción del pensamiento probabilístico



Resistencia Cultural.

Falta de “Juego” a nivel internacional.

Recursos de Educación No Disponible.

Complejidad percibida y barreras cognitivas

Cortoplacismo.

“Normitis” o uso mal entendido de las normas.

#CMCMéxico2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18^a
EDICIÓN

27

Herramientas Fundamentales en el Mundo Probabilístico



CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18^a
EDICIÓN

28



Modelos de Probabilidad

- Representan una Variable de Interés
- Se adaptan a los datos disponibles: ¡Aprenden!
- Generan nuevos datos a partir de su estructura: ¡Generativos!
- La incertidumbre es inherente; no fallan, sino que abrazan la aleatoriedad.
- Evolucionan cuando reciben más datos: ¡Mutantes!

#CMCMéxico2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
MÉXICO 18ª
EDICIÓN

29



Simulación de Monte Carlo

- Usa modelos probabilísticos como fundamento.
- Genera “clones” que replican el comportamiento real.
- Base de Exploración escenarios posibles de manera sistemática.
- Permite cuantifica riesgos y oportunidades con precisión.
- Su poder predictivo está comprobado en innumerables aplicaciones.

#CMCMéxico2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
MÉXICO 18ª
EDICIÓN

30



Modelamiento y Simulación de Elementos

2: Modelo: Ecuación de Probabilidad

1: Modelamiento



3: Simulación



5: Pronóstico Sistemas

4: Pronóstico para Elementos

#CMCMéxico2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18^a EDICIÓN

31

**Plasticidad y
predicción ...**

**por esto
escuchamos
tanto de la
Distribución de
Weibull**



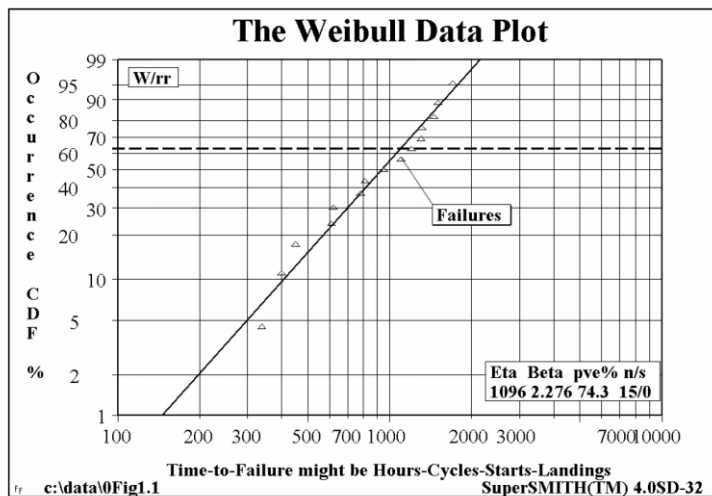
CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18^a EDICIÓN

32



Modelamiento y Predicción usando Weibull

MTBF. vs

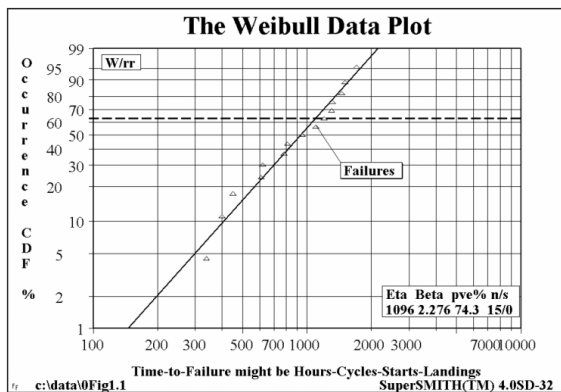


#CMCMéxico2025

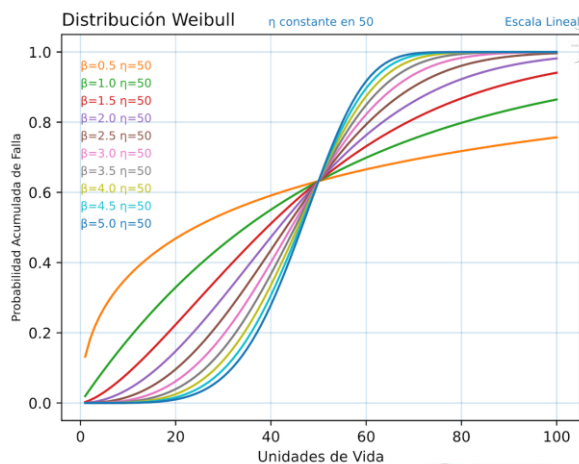
CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18ª
EDICIÓN

33

Modelamiento y Predicción usando Weibull



#CMCMéxico2025

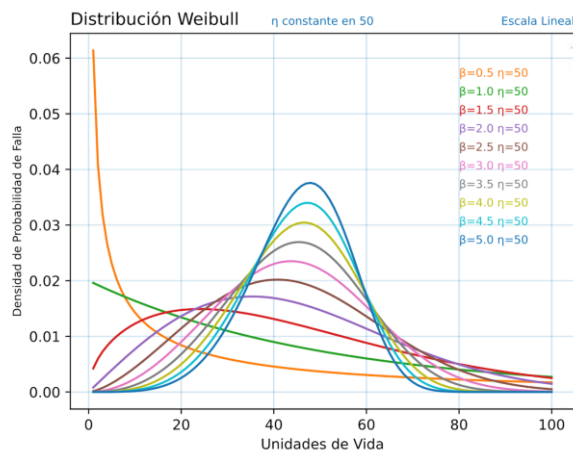
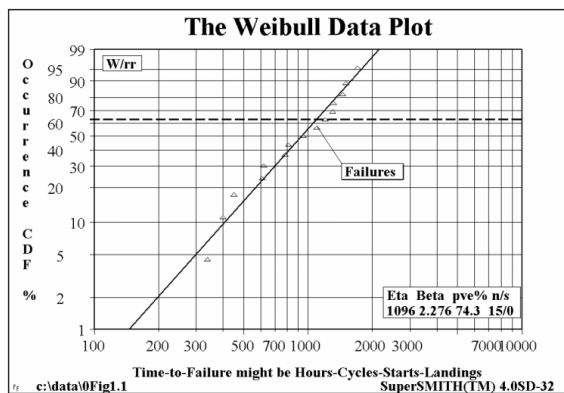


CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18ª
EDICIÓN

34



Modelamiento y Predicción usando Weibull

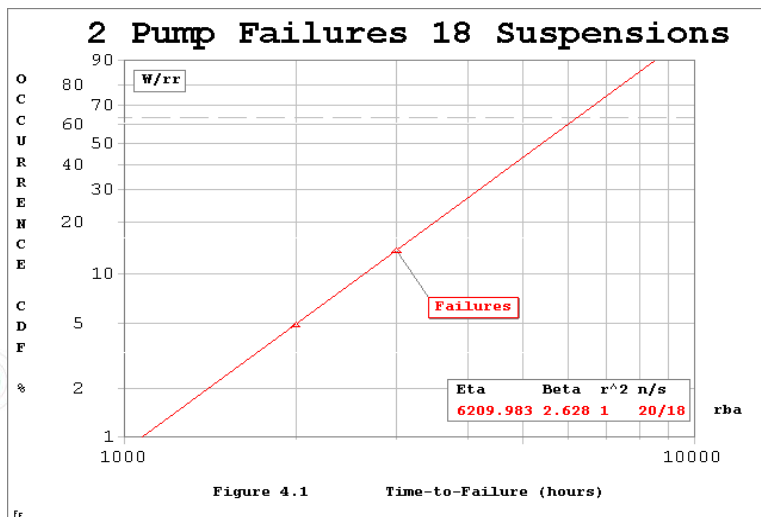


#CMCMéxico2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18^a EDICIÓN

35

Modelamiento y Predicción usando Weibull



Time (Hs)	Suspensions	Failures
1000	5	0
2000	4	1
3000	4	1
4000	5	0
N=		20
Actual Failures		2

$$\text{Expected Failures} = \sum_{i=1}^N F(t_i)$$

Time	Units	F(t)	n-fore
1000	5	8,30E-03	0,0415
2000	5	4,96E-02	0,248
3000	5	0,1373	0,6865
4000	5	0,27	1,35
Forecasted			2,326
Actual Failures			2

#CMCMéxico2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18^a EDICIÓN

36



Modelamiento y Predicción usando Weibull

$$\text{Failure Forecast} = \sum_{j=1}^s \left[\frac{F(t+u) - F(t)}{1 - F(t)} \right]$$

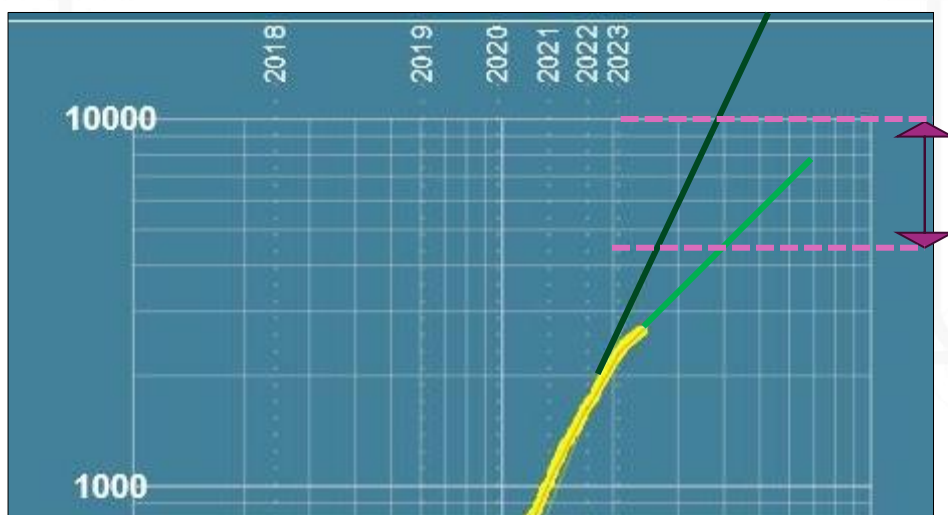
N	t	t + u	a=F(t+u)	b=F(t)	N(a-b)/(1-b)
5	1000	2000	.0496	.0082	.2087
4	2000	3000	.1374	.0496	.3695
4	3000	4000	.2700	.1374	.6149
5	4000	5000	.4321	.2700	1.110
				Total	2.30

#CMCMéxico2025

 CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18ª
EDICIÓN

37

Modelamiento y Predicción usando Crow-AMSAA



#CMCMéxico2025

 CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18ª
EDICIÓN

38

Composición y Propagación...

Del Modelo Probabilístico al Activo Digital



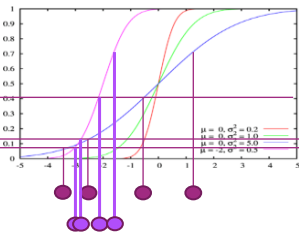
39

Desempeño de Sistemas: Composición Y Propagación

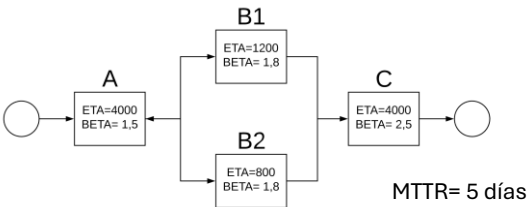


Monte Carlo

Generación de Set de Datos Aleatorios 1 y 2



Lógica de Dependencia



#CMCMéxico2025

40

Desempeño de Sistemas: Composición Y Propagación



Activo Digital

- Ventas / Renta
- Costo de Recursos Críticos
- Lucro Cesante / Pérdidas
- Culpabilidad (¿Dónde perdemos cuánto?)
- Costo de Pertenencia (TCO/LCC)
- Riesgo (Pronóstico de Eventos de Criticidad Baja / Media / Alta Esperados)
- KPI específicos
- Recomendaciones Operacionales
- Valoración de Sensibilidades

#CMCMéxico2025



Venta Interna de un Activo Digital



Venta Interna de un Activo Digital



Método



Ejemplo



Activo Digital

#CMCMéxico2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18ª
EDICIÓN

43

Venta Interna de un Activo Digital

Enfócate en las restricciones para la toma de decisiones y piensa en...



- Formulación Específica del Problema
- Condiciones de Alineamiento Estratégico.
- Condiciones Requeridas para la Solución.
- Costos Directos del Desarrollo del Activo Digital.
- Capacidad de Generación de Valor del Activo Digital.
- Retorno de Inversión
- Presentación de Caso de Negocio

#CMCMéxico2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18ª
EDICIÓN

44



1. Formulación explícita del Problema

Enfócate en las restricciones para la toma de decisiones y piensa en...



- Claridad en los Síntomas Observables
- Evaluación de la Multidimensionalidad del Problema
- Estimación de Urgencia y Riesgo
- Incertidumbre sobre las Causas Subyacentes
- Complejidad asociada a Interdependencias

#CMCMéxico2025



45



2. Identificación de las Condiciones de Alineamiento Estratégico

Enfócate en las restricciones para la toma de decisiones y piensa en...



- Relevancia Estratégica
- Alineación con Metas Financieras
- Alineación con Objetivos de Sostenibilidad
- Alineación con Metas de Seguridad
- Alineación con Metas de Competitividad

#CMCMéxico2025



46



3. Estructuración de las Condiciones Requeridas para la Solución

Enfócate en las restricciones para la toma de decisiones y piensa en...



- Potencialidad para una Solución Integral
- Definición del Alcance del Activo Digital
- Identificación de Capacidades Funcionales del Activo Digital
- Integración con Sistemas Existentes
- Limitaciones del Alcance

#CMCMéxico2025



47

4. Estimación de Costos directamente Asociados al Desarrollo del Activo Digital



Enfócate en las restricciones para la toma de decisiones y piensa en...



- Costos de investigación,
- Modelamiento de Dependencias,
- Análisis de Datos,
- Desarrollo de modelos computacionales, logística, etc.

#CMCMéxico2025



48



5. Identificación de Riesgos y Formulación y Costeo de Acciones de Mitigación

Enfócate en las restricciones para la toma de decisiones y piensa en...



- Identificación de riesgos técnicos, financieros y culturales
- Formulación de acciones de mitigación
- Costeo de acciones de mitigación

#CMCMéxico2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18ª
EDICIÓN

49



6. Estimación de la Capacidad de Generación de Valor del Activo Digital

Enfócate en las restricciones para la toma de decisiones y piensa en...



- Identificación de beneficios tangibles e intangibles
- Cuantificación del impacto en confiabilidad operativa y sostenibilidad

#CMCMéxico2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18ª
EDICIÓN

50



7. Cálculo del Retorno de la Inversión

Enfócate en las restricciones para la toma de decisiones y piensa en...



- Determinación de costos y beneficios totales
- Cálculo del ROI
- Análisis de sensibilidad
- Período de recuperación de la inversión

#CMCMéxico2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18^a EDICIÓN

51



8. Presentación del Caso de Negocio

Enfócate en las restricciones para la toma de decisiones y piensa en...



- ¡No ser aburrido!
- Resumen ejecutivo
- Visualización de datos clave
- Respuestas a preguntas comunes
- Historias de éxito o pilotos
- Llamado a la acción

#CMCMéxico2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
MÉXICO 18^a EDICIÓN

52



53

Conclusiones

Concepto	Valor (\$)	Fórmula o Justificación
A. Determinación de los Costos Totales		
Costo Inicial de Desarrollo e Implementación	\$ 450,000	
Costo Anual Recurrente	\$ 45,000	Mantenimiento y soporte anual estimado.
Costo Total en Año 1	\$ 450,000	Costo inicial
Costo Total 2 Años	\$ 495,000	Costo inicial + (Costo anual recurrente × 1 años).
Costo Total en 3 Años	\$ 540,000	Costo inicial + (Costo anual recurrente × 2 años).
B. Determinación de los Beneficios Totales		
Ahorros Anuales en Costos Energéticos	\$ 300,000	Reducción del 20% en consumo energético (Paso 6).
Evitación de Multas Regulatorias	\$ 100,000	Multas potenciales evitadas por cumplimiento normativo (Paso 6).
Incremento de Ingresos por Mejora en Confiabilidad	\$ 200,000	Reducción del 30% en paradas no planificadas (Paso 6).
Beneficio Tangible Total Anual	\$ 600,000	
Beneficio Tangible Acumulado en 3 Años	\$ 1,800,000	Beneficio tangible anual × 3 años.
C. Cálculo del ROI		
Fórmula de ROI		$ROI = ((Beneficios\ Totales - Costos\ Totales) / Costos\ Totales) \times 100\%$
ROI al Final del Año 1	33.3%	
ROI al Final del Año 2	142%	
ROI al Final del Año 3	233%	
D. Análisis de Sensibilidad		
Escenario Optimista (Beneficios +10%)	\$ 660,000	Beneficios tangibles aumentan en un 10% ($\$600,000 \times 1.10$).
Escenario Pesimista (Beneficios -10%)	\$ 540,000	Beneficios tangibles disminuyen en un 10% ($\$600,000 \times 0.90$).
Escenario de Aumento de Costos (+15%)	\$ 517,500	Costo inicial aumenta en un 15% ($\$490,000 \times 1.15$).
ROI Optimista (Año 3)	267%	
ROI Pesimista (Año 3)	200%	
ROI con Aumento de Costos (+15%)	190%	

#CMCMéxico2025



54



Conclusión

La real diferencia entre
una decisión,
y una apuesta ,
es un pronóstico pertinente.

Los Activos Digitales te brindan estos
pronósticos,
pero exigen de ti,
Pensamiento Probabilístico.

#CMCMéxico2025

