

Análisis probabilístico en gestión de activos:

Caso de negocio y Estimación de beneficios

Jorge Granada
CEO Knar Global LLC



1

Determinístico vs. Probabilístico



"God does not play dice"



"Stop telling God what to do"

1927

2

John Stewart Bell



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

1964

1980

2022

#CMCColombia2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
COLOMBIA 2^a
EDICIÓN

3

John Stewart Bell



“El Universo es Probabilístico”

1964

1980

2022

..y entenderlo ,
toma tiempo

#CMCColombia2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
COLOMBIA 2^a
EDICIÓN

4



Toma de Decisión 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

#CMCColombia2025



5



Toma de Decisión 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

#CMCColombia2025



6



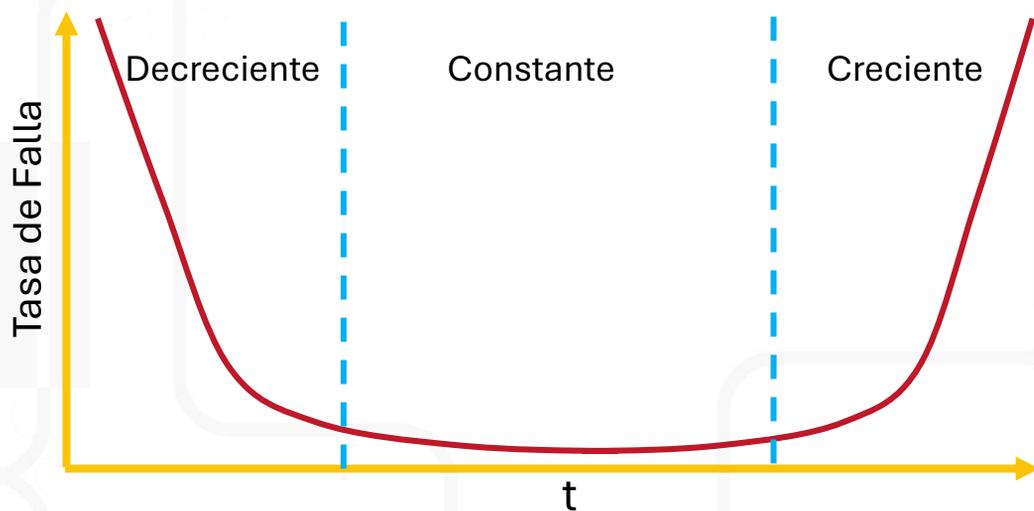
¿Es ...
realmente un
problema?



CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
COLOMBIA 2^ª
EDICIÓN

7

Nuestra “Curva de la Bañera” es Probabilística



#CMCColombia2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
COLOMBIA 2^ª
EDICIÓN

8

Estar ocupado es distinto de estar logrando algo!



9

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



10



NL



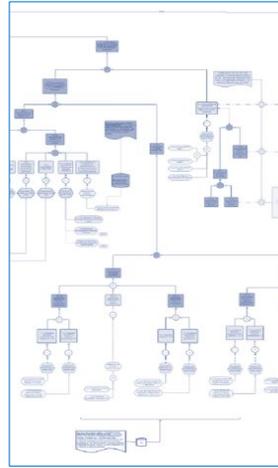
+MUSD

PE



+MUSD

EC



+MUSD+LTO

...

#CMCColombia2025



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?”





Toma de Decisión en Activos Industriales



Determinístico



Probabilístico

#CMCColombia2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
COLOMBIA 2^a
EDICIÓN

13

Toma de Decisión 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

#CMCColombia2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
COLOMBIA 2^a
EDICIÓN

14



Toma de Decisión 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.

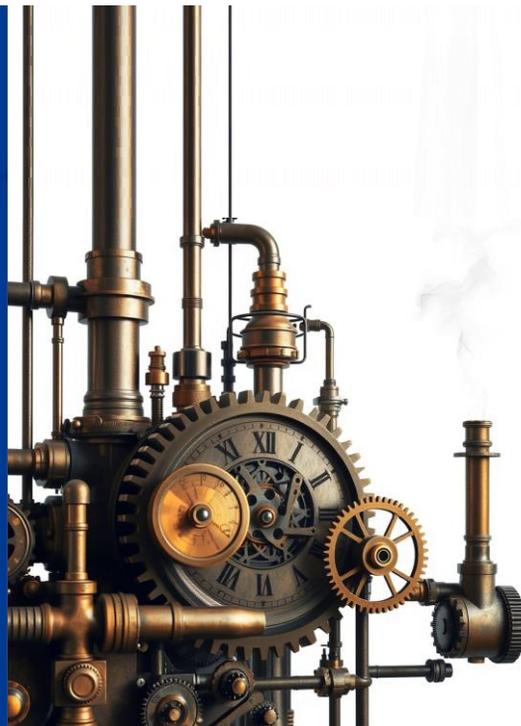
... son ~~simples~~ ~~listados~~ **modelamiento y simulación**
 ... ~~suma,~~ **.. Los recursos matemáticos más aptos que existan**

#CMCColombia2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
COLOMBIA 2^a
EDICIÓN

15

Situaciones
inherentemente
probabilísticas en
nuestro contexto
industrial



CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
COLOMBIA 2^a
EDICIÓN

16



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).

#CMCColombia2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
COLOMBIA 2^a
EDICIÓN

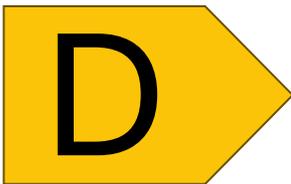
17

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.

#CMCColombia2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
COLOMBIA 2^a
EDICIÓN

18



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.

#CMCColombia2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
COLOMBIA 2^{da}
EDICIÓN

19

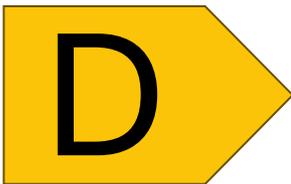


4. Optimización del Consumo Energético



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.

#CMCColombia2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
COLOMBIA 2^{da}
EDICIÓN

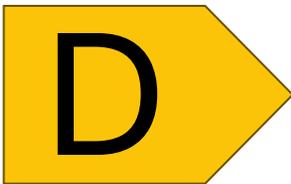
20



5. Decisiones de Inversión de Capital



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

#CMCColombia2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
COLOMBIA 2^a
EDICIÓN

21



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.
-

#CMCColombia2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
COLOMBIA 2^a
EDICIÓN

22

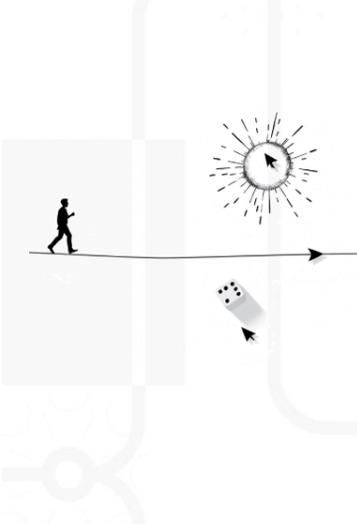


Pero, si siempre lo hemos hecho así...



23

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

#CMCColombia2025



24

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.

#CMCColombia2025

CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
COLOMBIA 2^a
EDICIÓN

25

Herramientas Fundamentales en el Mundo Probabilístico



CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
COLOMBIA 2^a
EDICIÓN

26



Modelos de Probabilidad

- Representan una Variable de Interés
- 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!

#CMCColombia2025



27



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.

#CMCColombia2025

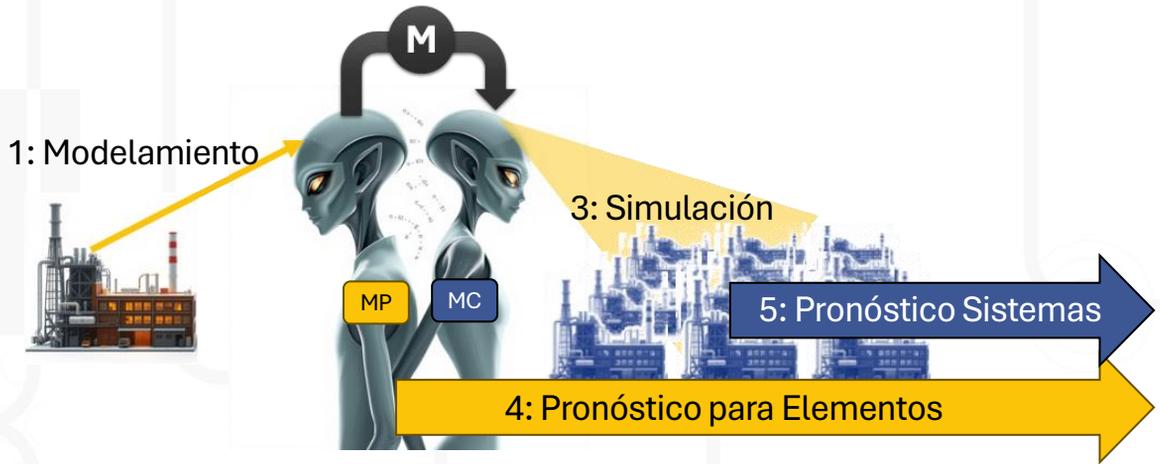


28



Modelamiento y Simulación de Elementos

2: Modelo: Ecuación de Probabilidad



#CMCColombia2025



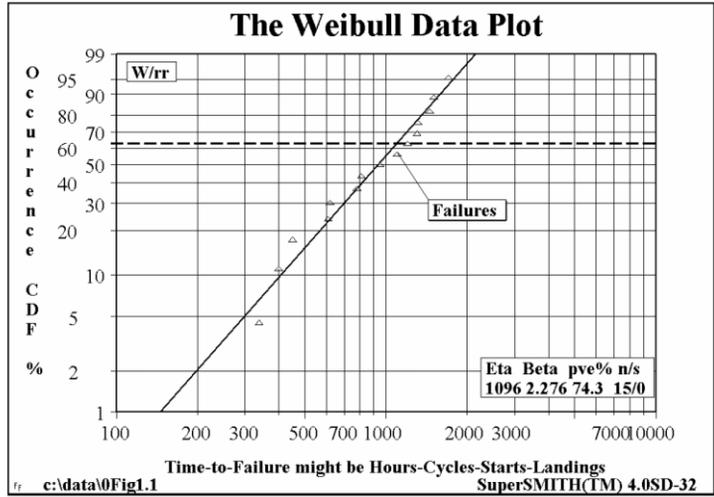
Plasticidad y predicción ... por esto escuchamos tanto de la Distribución de Weibull





Modelamiento y Predicción usando Weibull

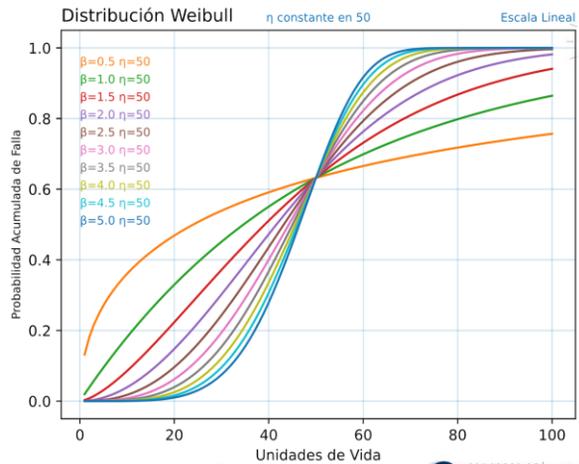
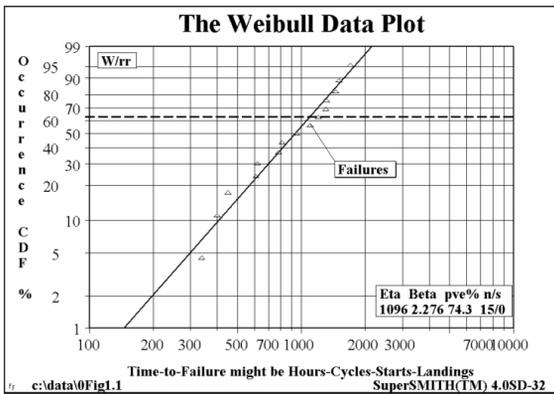
MTBF. vs



#CMCColombia2025



Modelamiento y Predicción usando Weibull

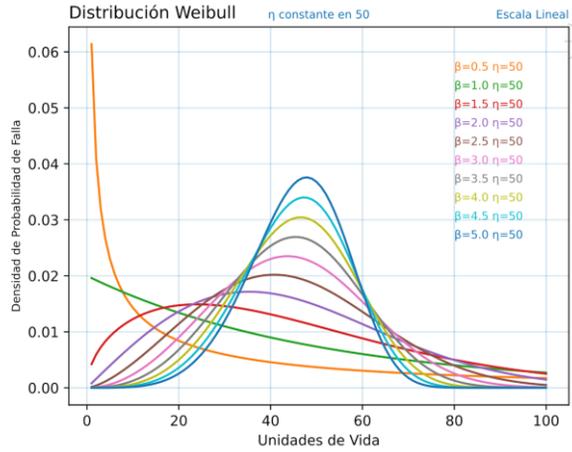
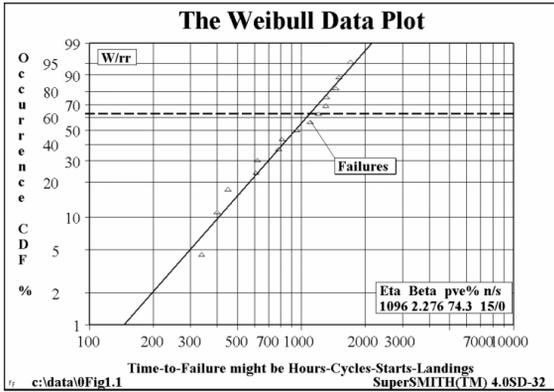


#CMCColombia2025





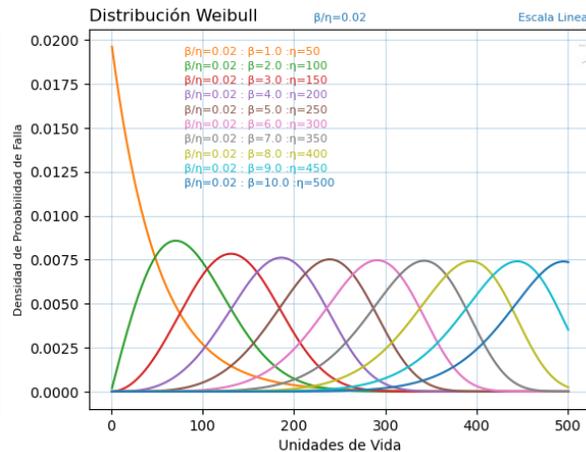
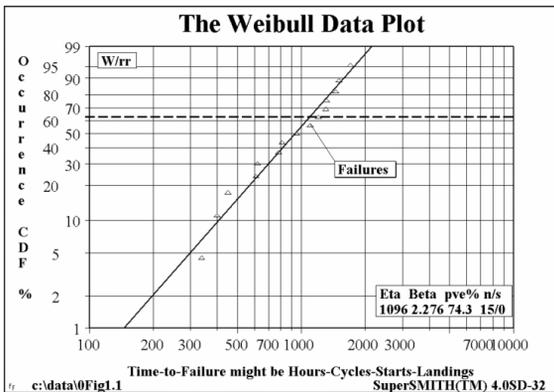
Modelamiento y Predicción usando Weibull



#CMCColombia2025



Modelamiento y Predicción usando Weibull

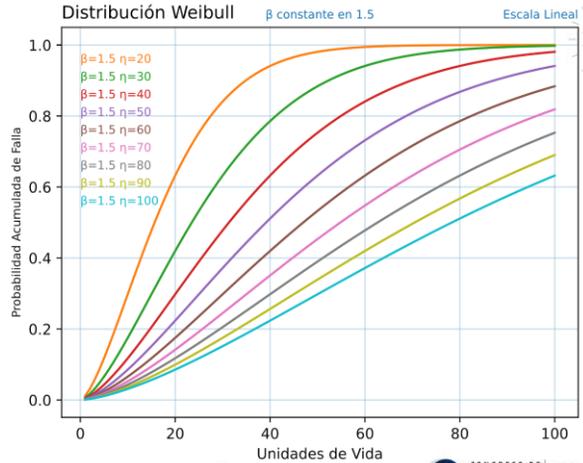
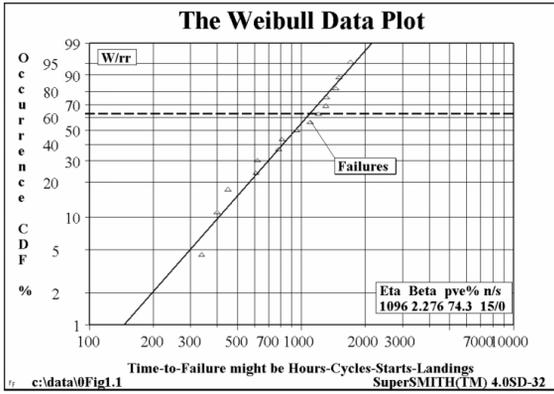


#CMCColombia2025





Modelamiento y Predicción usando Weibull

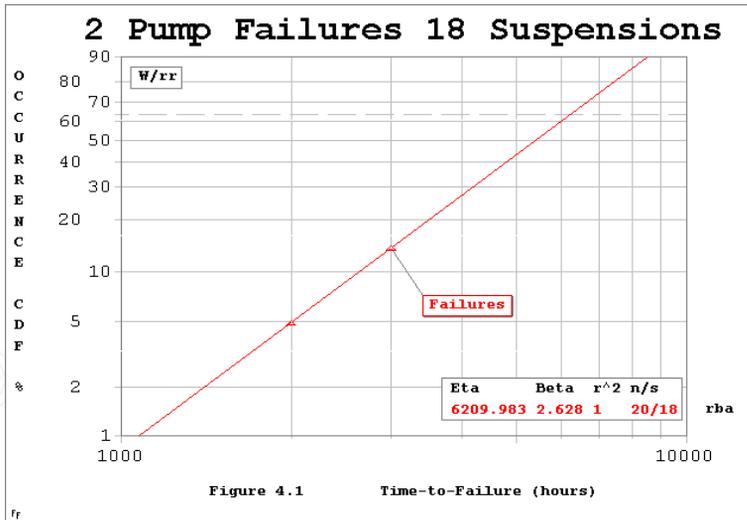


#CMCColombia2025



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

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

#CMCColombia2025



36



Modelamiento y Predicción usando Weibull

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

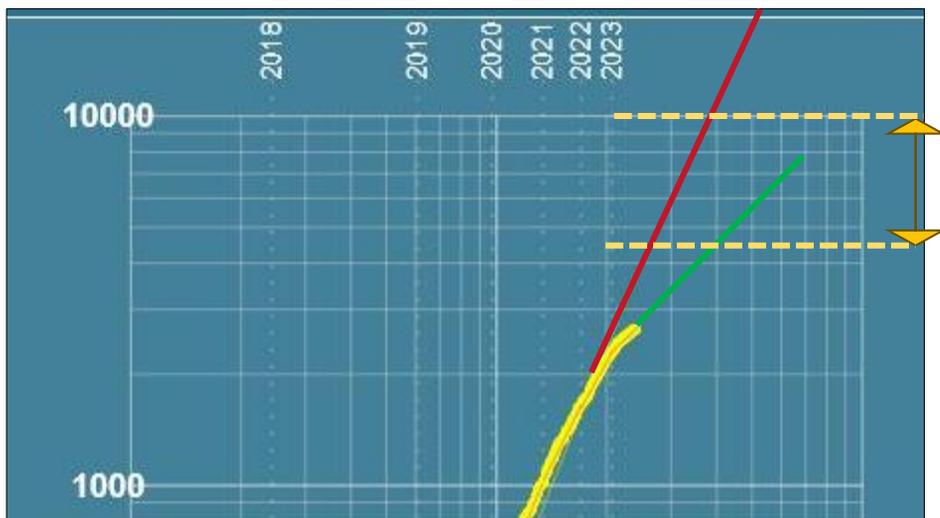
N	t	t + u	a=F(t+u)	b=F(t)	N(a-b)/(1-b)
5	1000	2000	.0496	.0082	.2087
4	2000	3000	.1374	.0496	.3695
4	3000	4000	.2700	.1374	.6149
5	4000	5000	.4321	.2700	1.110
				Total	2.30

#CMCColombia2025



37

Modelamiento y Predicción usando Crow-AMSAA



#CMCColombia2025



38



Composición y Propagación...

Del Modelo Probabilístico al Activo Digital

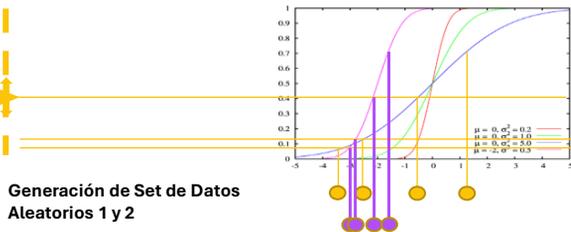


39

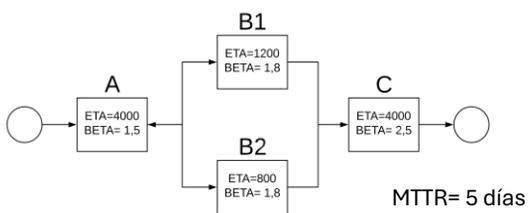
Desempeño de Sistemas: Composición Y Propagación



Monte Carlo



Lógica de Dependencia



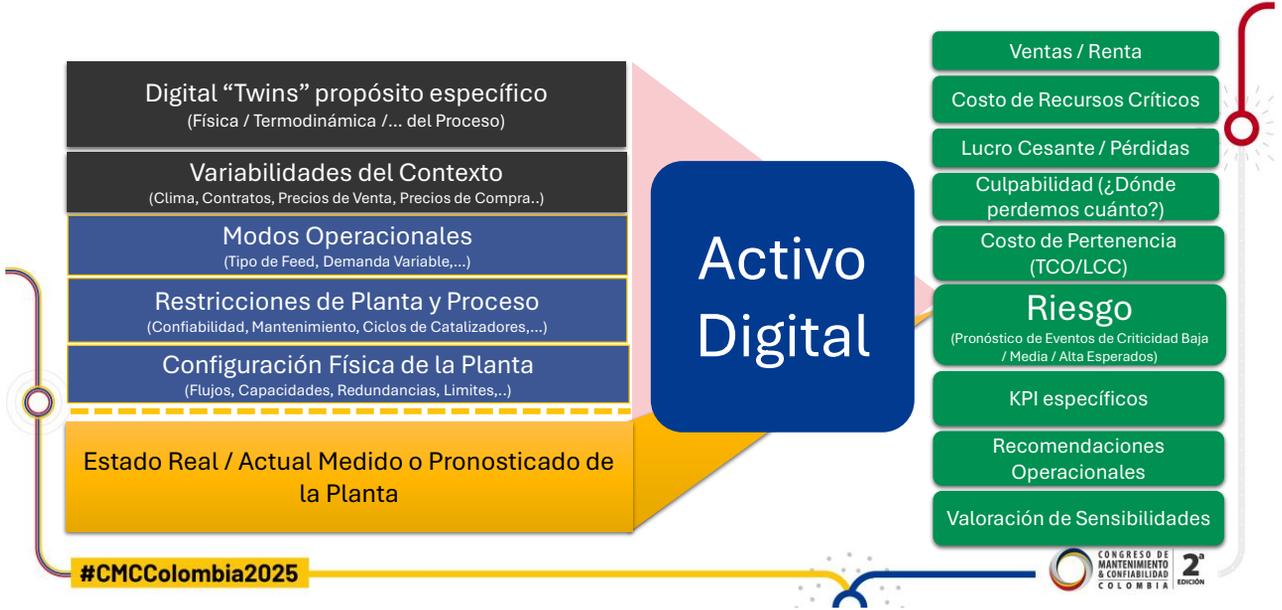
#CMCColombia2025



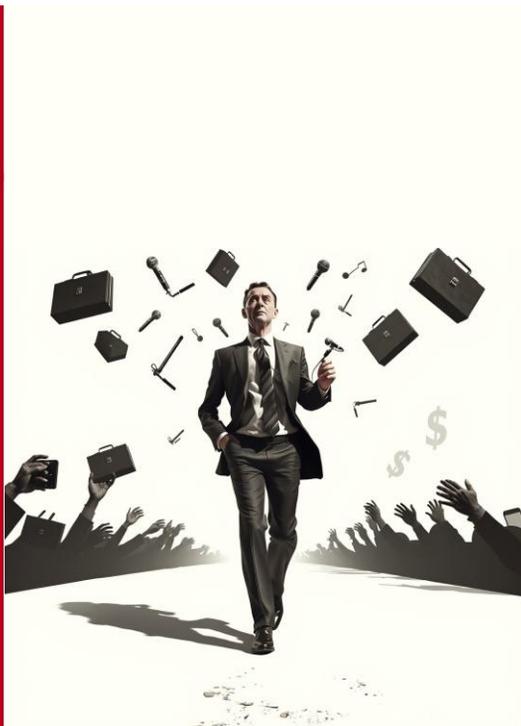
40



Desempeño de Sistemas: Composición Y Propagación



41



42



Venta Interna de un Activo Digital



Método



Ejemplo



Activo Digital

#CMCColombia2025



43



Venta Interna de un Activo Digital

- 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

#CMCColombia2025



44



Formulación explícita del Problema



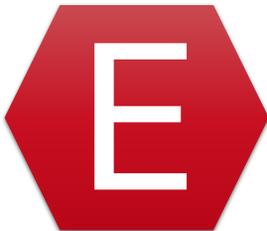
- Claridad en los Síntomas Observables
- Evaluación de la Multidimensionalidad del Problema
- Estimación de Urgencia y Riesgo
- Incertidumbre sobre las Causas Subyacentes
- Complejidad asociada a Interdependencias

#CMCColombia2025



45

Identificación de las Condiciones de Alineamiento Estratégico



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

#CMCColombia2025



46



3. Estructuración de las Condiciones Requeridas para la Solución



- 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

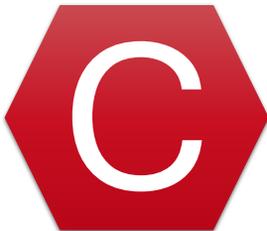
#CMCColombia2025



47



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



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

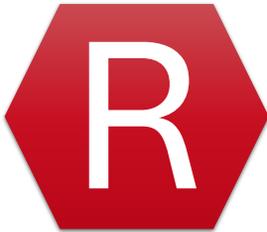
#CMCColombia2025



48



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



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

#CMCColombia2025



49



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



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

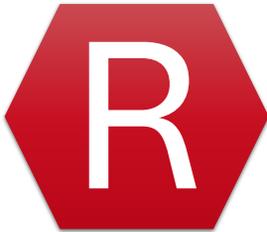
#CMCColombia2025



50



7. Cálculo del Retorno de la Inversión



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

#CMCColombia2025



51

8. Presentación del Caso de Negocio



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

#CMCColombia2025



52



53

Conclusiones

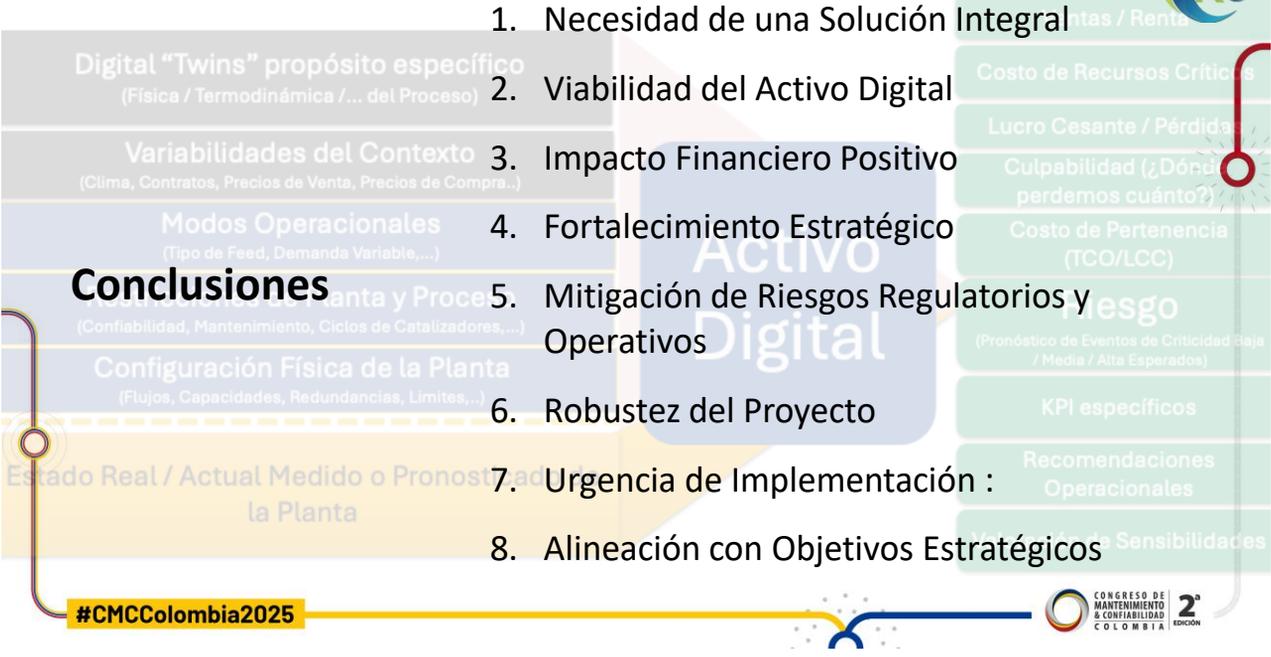
Concepto	Valor (\$)	Fórmula o Justificación
A. Determinación de los Costos Totales		
Costo Inicial de Desarrollo e Implementación	\$ 450.000	
Costo Anual Recurrente	\$ 45.000	Mantenimiento y soporte anual estimado.
Costo Total en Año 1	\$ 450.000	Costo inicial
Costo Total 2 Años	\$ 495.000	Costo inicial + (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 × 1.10).
Escenario Pesimista (Beneficios -10%)	\$ 540.000	Beneficios tangibles disminuyen en un 10% (\$600,000 × 0.90).
Escenario de Aumento de Costos (+15%)	\$ 517.500	Costo inicial aumenta en un 15% (\$490,000 × 1.15).
ROI Optimista (Año 3)	267%	
ROI Pesimista (Año 3)	200%	
ROI con Aumento de Costos (+15%)	190%	



#CMCColombia2025



54



55



56