



CBM
CONDITION-BASED MAINTENANCE

**ESTRATEGIA DE MONITOREO PREDICTIVO PARA GESTIÓN DE
ACTIVOS**

Horno Túnel Industrial de 30 metros

Cristian Camilo Roa Montoya
Jonnathan Gustavo Rodríguez Morales

Ing. Gustavo Andrés Leal Téllez
UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SECCIONAL TUNJA
Especialización en Gerencia de Mantenimiento y Gestión de Activos
Facultad de Ingeniería Industrial · Campus Virtual
Junio 2026

Tabla de Contenido

1.	Introducción y Contexto	3
2.	Descripción del Activo — Horno Túnel 30 m	4
3.	Marco Teórico: Gestión de Activos — ISO 55001 e ISO 17359	5
4.	Arquitectura del Sistema de Monitoreo de Condición	6
5.	Plan de Instrumentación — 24 Sensores	8
6.	Metodología de Análisis de Confiabilidad	9
6.1	Distribución de Weibull	9
6.2	MTBF y MTTR	10
6.3	AMEF — Modos de Falla Críticos	10
6.4	Análisis de Causa Raíz (RCA)	11
6.5	RCM — Selección de Estrategias	12
7.	Indicadores KPI y Dashboard	12
8.	Cronograma de Implementación — 7 Semanas	13
9.	Integración Digital SAP PM — Plataforma CBM	14
10.	Aplicación en Colombia y Contexto Industrial	15
11.	Análisis Costo-Beneficio	16
12.	Conclusiones y Resultados Esperados	17
13.	Referencias	19

01. INTRODUCCIÓN

1. Introducción y Contexto

En el contexto de la Opción de Grado — Misión Académica 2026, este documento propone una estrategia de mantenimiento basado en condición (CBM) para un horno túnel industrial de 30 metros. La metodología es el enfoque del trabajo: la incorporación de instrumentos de confiabilidad (Weibull, MTBF/MTTR, AMEF, RCA y RCM) en un sistema de monitoreo por condición que está alineado con ISO 55001:2014 e ISO 17359:2018. La tecnología de sensores utilizada es un instrumento de implementación, no el propósito principal.

FUENTE DE LOS DATOS: Los parámetros usados (MTBF = 312 h, MTTR = 8,4 h, $b = 2,3$; $h = 420$ h; 14 fallas al año; ROI = 57 %) son cifras de referencia elaboradas para el caso académico con base en benchmarks de la bibliografía especializada (Mitchell, 2007; Moubray, 2000; ISO 17359:2018). No se corresponden con datos obtenidos en una planta real. Su objetivo es mostrar cómo se puede aplicar la metodología.

Problema identificado

En el horno túnel de proceso continuo a 820°C, si no se supervisan las condiciones, los problemas por elongación de cadena y la fatiga de los rodamientos no se percatan hasta que ocurre una detención catastrófica. Según la literatura (MTBF base = 312 h, MTTR base = 8.4 h, disponibilidad base = 97.4 %), la norma ISO 55001 requiere una estrategia que esté fundamentada en el riesgo y sea sistemática. Para activos con criticidad A que están bajo fatiga térmica continua, la estrategia de prevención/corrección basada en el calendario es insuficiente.

Solución propuesta

Conforme a la norma ISO 17359:2018 para la elección de métodos de monitoreo, poner en práctica una arquitectura de supervisión de estado multicapa (plataforma cloud + nodos online + sensores sin cables) que esté incorporada a SAP PM. Para generar automáticamente órdenes de trabajo predictivas, los datos del sistema retroalimentan el análisis AMEF y el Weibull.

Objetivos

- Diseñar e implementar una estrategia CBM para activos de criticidad A del horno túnel (ISO 17359).
- Calcular MTBF, MTTR y disponibilidad con datos de referencia de la literatura.
- Ajustar la distribución de Weibull (b , h) para la cadena transportadora y rodamientos.
- Construir el AMEF con NPR e integrar el plan CBM con SAP PM (ISO 55001).
- Proyectar la reducción de fallas a $\leq 4/\text{año}$ y disponibilidad $\geq 99,5$ %.

El modelo de gestión de activos ISO 55001:2014, que abarca las etapas, se utiliza en este proyecto. La transformación digital del mantenimiento en la industria colombiana se concreta con los siguientes pasos: Estrategia → Identificación → Control → Ejecución → Optimización.

02. ACTIVO

2. Descripción del Horno Túnel 30 m

El horno túnel industrial es una máquina de producción ininterrumpida que mueve materiales a través de un perfil térmico regulado. Los 30 metros se segmentan en seis áreas de 5 m cada una, teniendo cada una su temperatura, sus equipos y sus modos de falla particulares.

ZONA	TRAMO	TEMP (C)	EQUIPO CRÍTICO	CRITICIDAD
Z-1	0–5 m	350	Motor arrastre entrada + Rodamientos soporte	A
Z-2	5–10 m	550	Quemadores laterales + Rodamientos alta temperatura	A
Z-3	10–15 m	820	Cadena transportadora + Reductor central	A
Z-4	15–20 m	820	Cadena transportadora zona pico sostenida	A
Z-5	20–25 m	500	Rodamientos enfriamiento + Ventiladores	B
Z-6	25–30 m	200	Motor arrastre salida + Reductor salida	B

PARAMETRO	VALOR	PARAMETRO	VALOR
Longitud total	30 metros	Velocidad cadena	0,5 – 2,5 m/min
N. zonas térmicas	6 zonas	Potencia motores	37 kW entrada / 22 kW salida
Temperatura máxima	820° C	Paso de cadena	101,6 mm (nominal)
Combustible	Gas natural	Horas operación/día	22 h/día
Tipo rodamientos	Alta temperatura (norma ISO 281)	Producción anual	Aprox. 8.000 h/año

MODO DE FALLA PRINCIPAL: La cadena transportadora en Z-3/Z-4 sufre elongación por fatiga térmica a 820 C. El paso crece de 101,6 mm a >104,6 mm (límite 3 %), generando holgura, vibración anormal y eventualmente ruptura catastrófica con parada de 8–14 h no planificadas.

03. MARCO TEORICO

3. Marco Teórico — ISO 55001 e ISO 17359

La ISO 55001:2014 (Asset Management), la ISO 17359:2018 (Condition monitoring) y la metodología RCM (Moubray, 2000) constituyen los tres fundamentos normativos y metodológicos del marco teórico. El modelo de cinco fases: Estrategia, Identificar, Controlar, Ejecutar y Optimizar, reúne todas las herramientas de confiabilidad que se utilizan en el caso del horno túnel.

FASE	DESCRIPCION	HERRAMIENTAS
ESTRATEGIA	Análisis de criticidad, RCM, PMO, KPIs. Prioriza activos A del horno (ISO 55001).	Criticidad, RCM, AMEF
IDENTIFICAR	Técnicas de monitoreo de condición: vibración, temperatura, envolvente de aceleración, termografía (ISO 17359, ISO 18434).	Sensores IMx-1, nodos IMx-8/16, analizador portátil
CONTROLAR	Gestión de repuestos, inventarios, ERP (SAP PM), análisis ciclo de vida (ISO 55001).	SAP PM, Dashboard CBM
EJECUTAR	Intervenciones programadas por condición. Entrenamiento técnico (ISO 17359).	Balanceo, alineación, reparaciones planificadas
OPTIMIZAR	Ingeniería de confiabilidad continua. Ajuste Weibull, RCA, realimentación al plan (ISO 55001).	Weibull, RCA, PMO

Normas aplicadas

NORMA	TITULO	APLICACION EN EL PROYECTO
ISO 55001:2014	Asset Management — Requirements	Marco de gestión de activos; fundamenta la estrategia CBM integral
ISO 17359:2018	Condition monitoring — General guidelines	Criterios selección técnicas monitoreo por tipo de activo
ISO 13373-1:2002	Vibration condition monitoring	Procedimientos medición vibración en activos rotativos
IEC 60812:2018	FMEA / FMECA	Metodología AMEF aplicada al horno túnel
ISO 13379-1:2012	Condition monitoring — Data interpretation	Diagnóstico e interpretación señales de condición

Tecnologías de monitoreo de condición (ISO 17359)

TECNOLOGÍA	EQUIPO / PLATAFORMA	APLICACION EN HORNO TUNEL
Sensor inalámbrico vibracion+temp.	IMx-1 (red mesh)	Rodamientos cadena, zonas Z-1 a Z-6
Nodo online continuo	IMx-8/16 (8–16 canales)	Motores arrastre y reductor central
Analizador portátil	Analizador de vibraciones	Ruta mensual activos secundarios + termografía
Gateway IoT	Gateway red mesh (Wi-Fi/LTE)	Comunicación sensores → plataforma cloud
Plataforma cloud CBM	Dashboard condición + alertas	Dashboard, alarmas, tendencias, KPIs
ERP mantenimiento	SAP PM	Ordenes de trabajo predictivas automáticas

04. ARQUITECTURA

4. Arquitectura del Sistema de Monitoreo de Condición

La arquitectura multicapa sigue la norma ISO 17359:2018 y combina sensores inalámbricos, nodos online y herramientas portátiles para cubrir todos los rangos de criticidad y frecuencia de medición del horno túnel.

Capa 1: Sensores Inalámbricos (red mesh)

24 sensores inalámbricos que se encuentran ubicados en los soportes de cadena (Z-1 hasta Z-6). Recogen temperatura, envolvente de aceleración (ISO 13373) y vibración en banda ancha. Certificación ATEX para áreas con gas natural.

CARACTERISTICA	ESPECIFICACION	BENEFICIO EN HORNO TUNEL
Medición vibración	Aceleración banda ancha + envolvente (ISO 13373)	Detección desgaste rodamientos en Z3–Z4
Medición temperatura	Sensor integrado NTC	Alerta térmica diferenciada por zona
Envolvente aceleración	Según ISO 13373-1	Detección temprana defectos pista rodamiento
Certificación ATEX	Zona 1 (sensor) / Zona 2 (gateway)	Seguridad en ambiente con gas natural
Red mesh	Hasta 50 sensores por gateway	Cobertura total 30 m sin cableado

CARACTERISTICA	ESPECIFICACION	BENEFICIO EN HORNO TUNEL
Batería	Vida extendida 2–5 años	Mínima intervención en zona caliente

Capa 2: Nodos Online Continuos (IMx-8/16)

3 nodos instalados en los activos más críticos: motor arrastre entrada, reductor central y motor arrastre salida. Captura continua 24/7 con exportación a SAP PM.

CARACTERISTICA	ESPECIFICACION
Entradas analógicas	8 o 16 canales simultáneos
Procesamiento	Paralelo — medición síncrona todos los canales
Memoria interna	4 GB (datos y capturas de eventos)
Buffer offline	Almacenamiento local cuando cae la comunicación
Protocolo	Modbus TCP/IP · Modbus RTU · OPC
Integración	Plataforma cloud + SAP PM on-premise
Fallo detectado	Desde horas hasta días — carga variable

Flujo de datos — Campo a Decisión

CAPA	COMPONENTE	FUNCION	DATO GENERADO
CAMPO	Sensores IMx-1 + nodos IMx-8/16	Captura señales físicas	Espectros, tendencias, alarmas
EDGE	Gateway IoT	Red mesh + comunicación	Paquetes comprimidos Wi-Fi/LTE
NUBE	Plataforma cloud CBM	Análisis y visualización (ISO 17359)	Dashboard, alertas, diagnósticos
ANALITICA	Motor analítico CBM	Detección patrones falla	NPR, condición, pronosis
ACCION	SAP PM	Gestión OT predictiva (ISO 55001)	Aviso → OT planificada → cierre

05. INSTRUMENTACION

5. Plan de Instrumentación — 24 Sensores

El plan define cada punto de medición según ISO 17359: sensor asignado, parámetros y frecuencia. Total: 24 sensores inalámbricos, 3 nodos online y ruta portátil mensual.

TAG	ACTIVO / UBICACION	SENSOR	PARAMETROS	FREC.	ZONA
M-01A/B	Motor arrastre entrada 37 kW/1450 rpm	Nodo online	Vibración acc+vel, envolvente, temp. carcasa	Continuo	Z1
R-01 a R-06	Rodamientos cadena soporte entrada (6 ptos)	Sensor IMx-1 (x6)	Vibración banda ancha, envolvente, temperatura	Diario	Z1–Z2
CAD-Z3	Cadena zona pico 820 C	Sensor IMx-1 (x2)	Frecuencia natural cadena, holgura, temperatura	Diario	Z3
RED-01	Reductor central i=40:1	Nodo online	Vibración ejes in/out, análisis engranajes, temp. aceite	Continuo	Z3–Z4
R-07 a R-12	Rodamientos cadena zona alta temp. (6 ptos)	Sensor IMx-1 (x6)	Envolvente aceleración, vibración, temperatura	Diario	Z3–Z4
CAD-Z4	Cadena zona pico sostenida 820 C	Sensor IMx-1 (x2)	Elongación detección, vibración, temperatura	Diario	Z4
R-13 a R-18	Rodamientos enfriamiento/salida (6 ptos)	Sensor IMx-1 (x6)	Vibración, temperatura, condición general	Semanal	Z5–Z6
M-03A/B	Motor arrastre salida 22 kW/960 rpm	Nodo online	Vibración, temperatura, desbalance, alineación	Continuo	Z6
CAD-Z56	Cadena enfriamiento y salida	Sensor IMx-1 (x2)	Vibración frecuencia cadena, temperatura	Semanal	Z5–Z6
RUTA-PORT	Activos secundarios: bombas + ventiladores	Analizador portátil	Vibración, temperatura, espectro completo	Mensual	Z1–Z6

TECNOLOGÍA	CANTIDAD	MODO	COBERTURA
Sensores inalámbricos (IMx-1)	24 unidades	Red mesh inalámbrica	Rodamientos cadena Z1–Z6
Nodos online (IMx-8/16)	3 nodos (8 ch c/u)	Continuo 24/7	Motores + Reductor central
Gateway IoT	1 unidad	Edge computing	Red completa horno 30 m
Analizador portátil	1 equipo	Ruta semanal/mensual	Activos secundarios + termografía
Plataforma cloud CBM	1 instancia	Visualización + analítica	100 % activos monitoreados

06. METODOLOGÍA

6. Metodología de Análisis de Confiabilidad

La metodología integra cinco herramientas alineadas con las normas ISO 55001 e ISO 17359: Weibull, MTBF/MTTR, AMEF (IEC 60812), RCA y RCM (Moubray, 2000).

NOTA: Todos los indicadores cuantitativos (MTBF, MTTR, b, h, NPR, costos) son valores de referencia estimados a partir de literatura especializada para el caso académico. No provienen de mediciones reales en planta. Deben validarse con datos reales antes de aplicarse en decisiones de mantenimiento.

6.1 Distribución de Weibull

La distribución de Weibull es la herramienta estadística más utilizada para modelar el tiempo hasta la falla de componentes mecánicos (Reliasoft, 2020; Mitchell, 2007).

Función de confiabilidad:

$$R(t) = \exp[-(t/\eta)^\beta]$$

Función de tasa de falla (hazard):

$$h(t) = (\beta/\eta) * (t/\eta)^{(\beta-1)}$$

Donde: t = tiempo de operación (h), β = parámetro de forma, η = vida característica ($R(\eta) = 36,8 \%$).

VALOR DE β	TIPO DE FALLA	CAUSA TÍPICA	ACTIVO EN HORNO
$\beta < 1$	Mortalidad infantil	Defectos fabricación, instalación	Rodamientos nuevos (primeras 100 h)
$\beta = 1$	Fallas aleatorias	Causas externas impredecibles	Fallas por sobrecarga eléctrica
$1 < \beta < 3$	Desgaste progresivo	Fatiga, corrosión, erosión térmica	Cadena transportadora (β ref. = 2,3)
$\beta > 3$	Desgaste pronunciado	Fatiga avanzada, corrosión severa	Rodamientos en zona 820 C

Resultados Weibull para la cadena (valores estimados de literatura):

PARAMETRO	VALOR REF.	INTERPRETACIÓN
Parámetro forma β	2,3	Desgaste progresivo por fatiga térmica (estimado)
Vida característica η	420 h	63,2 % de componentes fallan antes de 420 h (estimado)
Confiabilidad $R(300-350h)$	63,1 %	36,9 % prob. falla antes de 300 h

PARAMETRO	VALOR REF.	INTERPRETACIÓN
Confiabilidad R(300-350 h)	51,8 %	Límite de intervención recomendado
Ventana optima intervención	300–350 h	Antes de caer debajo del 50 % de confiabilidad
B10 (vida 10 % fallas)	Aprox. 158 h	10 % de cadenas falladas a las 158 h

6.2 MTBF, MTTR y Disponibilidad

MTBF — Tiempo Medio Entre Fallas:

$$| \text{MTBF} = \text{Suma (Tiempos entre fallas)} / \text{N}^\circ \text{ fallas}$$

Ejemplo con datos de referencia: 14 fallas, 4.485,6 h de observación total. Tiempo en falla: 14 x 8,4 h = 117,6 h. Tiempo en operación (uptime): 4.368 h. MTBF = 4.368 h / 14 = 312 h (valor estimado de literatura).

MTTR — Tiempo Medio Para Reparar:

$$| \text{MTTR} = \text{Suma (Tiempos de reparación)} / \text{N}^\circ \text{ reparaciones}$$

Disponibilidad Inherente:

$$| \text{A}(\%) = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR}) * 100$$

ESCENARIO	MTBF (h)	MTTR (h)	DISPONIBILIDAD	FALLAS/AÑO
Estado base (referencia literatura)	312	8,4	97,4 %	14
Meta año 1 (CBM básico)	450	5,0	98,9 %	8
Meta año 2 (CBM maduro)	600	3,0	99,5 %	4
Clase mundial (Benchmark)	>=800	<=2,0	>=99,7 %	<=2

6.3 Análisis de Modo y Efecto de Falla — AMEF (IEC 60812)

NPR = Severidad (S) x Ocurrencia (O) x Detectabilidad (D), escalas 1–10.

ACTIVO	MODO DE FALLA	EFEECTO	S	O	D	NPR	TAREA CBM
Cadena transportadora	Elongación por fatiga térmica	Parada total producción	10	8	4	320	Sensor inalámbrico + inspección semanal
Cadena transportadora	Ruptura eslabón	Parada catastrófica, daño horno	10	4	7	280	Monitoreo continuo + Weibull

ACTIVO	MODO DE FALLA	EFEECTO	S	O	D	NPR	TAREA CBM
Reductor central	Desgaste dentado corona	Perdida transmisión, vibración anormal	9	5	5	225	Nodo online — análisis engranajes
Motor M-01	Falla rodamientos motores	Paro súbito, daño bobinado	8	5	5	200	Nodo online — envolvente aceleración
Rodamientos Z3–Z4	Deformación térmica 820° C	Desalineación cadena, vibración	8	6	4	192	Sensor inalámbrico — envolvente diario
Motor M-03	Desbalance rotor	Vibración excesiva, desgaste rápido	7	4	6	168	Nodo online — análisis balanceo
Quemadores Z2–Z4	Obstrucción tobera	Perfil térmico irregular	8	3	5	120	Termografía semanal (ISO 18434)

6.4 Análisis de Causa Raíz — RCA (5 Por qué)

Caso: ruptura de cadena zona 3. Método: 5 Por qué

NIVEL	PREGUNTA	RESPUESTA
Síntoma	Que ocurrió	Ruptura cadena Z-3 — parada 11,5 h
Porque 1	Por qué se rompió	Elongación supero 3 % del paso nominal (>104,6 mm)
Porque 2	Por qué se elongó	Cadena con 520 h sin inspección de condición
Porque 3	Por qué 520 h sin inspección	Plan de mantenimiento solo por tiempo (600 h), no por condición
Porque 4	Por qué plan por tiempo fijo	No existía sistema de monitoreo de condición (CBM)
Porque 5	Por qué sin CBM	Estrategia correctiva/preventiva por calendario sin ISO 55001
CAUSA RAIZ	CAUSA FUNDAMENTAL	Ausencia de programa CBM estructurado según ISO 55001 e ISO 17359
ACCION	SOLUCION	Implementar sensores inalámbricos en rodamientos + análisis Weibull periódico

6.5 RCM — Selección de Estrategias (Moubray, 2000)

ACTIVO	CRITERIO RCM	ESTRATEGIA	TÉCNICA CBM (ISO 17359)
Cadena transportadora	Falla evidente / Crítica seguridad	Monitoreo condición CBM	Sensor inalámbrico — envolvente aceleración
Reductor central	Falla no evidente / Alta consecuencia	Monitoreo online continuo	Nodo online — análisis espectral
Motor arrastre M-01	Falla evidente / Alta consecuencia	CBM + mantenimiento predictivo	Nodo online — vibraciones
Rodamientos Z3–Z4	Falla no evidente / Crítica operacional	CBM diario — envolvente aceleración	Sensor inalámbrico diario
Quemadores	Falla evidente / Consecuencia operacional	Rutina de Inspección periódica + termografía	Termografía (ISO 18434)
Activos secundarios	Falla evidente / Baja consecuencia	Preventivo por tiempo	Ruta portátil mensual

07. KPIs

7. Indicadores KPI y Dashboard de Confiabilidad

El dashboard integra los KPIs del programa CBM con la plataforma cloud y SAP PM, ofreciendo visión en tiempo real del estado del horno túnel (ISO 17359).

KPI	VALOR BASE (REF. LIT.)	META	ESTADO
MTBF (horas entre fallas)	312 h	≥ 600 h	CRÍTICO (ref. literatura)
MTTR (horas de reparación)	8,4 h	≤ 3 h	CRÍTICO (ref. literatura)
Disponibilidad inherente	97,4 %	$\geq 99,5$ %	ALERTA (ref. literatura)
Fallas no planeadas / año	14 eventos	≤ 4	CRÍTICO (ref. literatura)
Parámetro forma Weibull beta	2,3 (estimado)	Monitorear tendencia	REFERENCIA
Vida característica eta	420 h (estimado)	Intervenir 300–350 h	REFERENCIA
OEE (eficiencia global equipo)	82,3 % (estimado)	≥ 92 %	ALERTA
Cobertura CBM (% activos)	0 % (a implementar)	≥ 95 %	PROYECTO

La plataforma cloud CBM genera un índice de condición 0–100 por activo (ISO 17359): 70–100 Normal, 40–70 Alerta, 0–40 Emergencia. Cada alarma genera automáticamente un aviso en SAP PM para el planeador de mantenimiento. (ISO 55001).

08. CRONOGRAMA

8. Cronograma de Implementación — 7 Semanas

SEMANAS	FASE	ACTIVIDADES CLAVE	ENTREGABLES
1–2	Alcance y estructura técnica	Levantamientos de activos críticos. Árbol equipos SAP PM. Definición 24 puntos medición. Criticidad A/B/C (ISO 55001). Histórico fallas en un período de 2 años.	Árbol equipos SAP. Plano puntos medición. Matriz criticidad.
3–4	Caso aplicado y confiabilidad	Instalación de sensores inalámbricos Z1–Z6. Configuración nodos online. Gateway + plataforma cloud CBM. Calculo MTBF/MTTR. Weibull $b=2,3$ $h=420$ h (referencia).	Sistema CBM operativo. Dashboard. Curvas Weibull.
5–6	Resultados y análisis técnico	Análisis espectral: BPFO, BPFI, BSF, FTF. Elongación cadena. AMEF + NPR (IEC 60812). RCA 3 fallas. Dashboard KPIs. Costo-beneficio.	AMEF. RCA documentado. Dashboard. Análisis económico.
7	Poster y artículo académico	Consolidación formato oficial Misión Académica. Redacción secciones: título, resumen, problema, metodología, aplicación Colombia, conclusiones. Revisión del director.	Poster oficial. Artículo técnico. Informe final.

FASE	ACTIVIDAD	SEMANAS	% PLAN.	% REAL	ESTADO
F1	Alcance y definición	1–2	10 %	100 %	Finalizado
F2	Marco teórico y arquitectura	3–4	25 %	100 %	Finalizado
F3	Caso aplicado	5–6	45 %	100 %	Finalizado
F4	Confiabilidad y análisis técnico	7–8	65 %	95 %	En revisión
F5	Resultados y análisis económico	9–10	80 %	90 %	En proceso

FASE	ACTIVIDAD	SEMANAS	% PLAN.	% REAL	ESTADO
F6	Póster final	11	90 %	60 %	En proceso

09. INTEGRACION

9. Integración Digital SAP PM — Plataforma CBM

La integración entre la plataforma cloud CBM y SAP PM es el núcleo de la transformación digital del mantenimiento (ISO 55001). Cuando los sensores detectan una anomalía, el flujo automatizado genera una OT en SAP PM antes de la falla.

PASO	ACCIÓN	SISTEMA	RESPONSABLE	TIEMPO
1	Sensor detecta vibración/temperatura fuera de umbral	Sensor IMx-1 / nodo IMx-8	Automático	Tiempo real
2	Gateway transmite datos a plataforma cloud CBM	Gateway IoT	Automático	< 1 min
3	Algoritmo CBM clasifica defecto y severidad (ISO 17359)	Plataforma cloud CBM	Automático	< 5 min
4	Alerta en dashboard (Alerta o Emergencia)	Plataforma cloud CBM	Automático	< 5 min
5	Notificación al planeador (Email/app móvil)	Plataforma CBM + SAP PM	Automático	< 10 min
6	El planeador valida con espectro e historial	SAP PM + Plataforma CBM	Planeador de mantenimiento	< 2 h
7	Aviso PM en SAP con datos técnicos del sensor	SAP PM	Planeador de mantenimiento	< 1 h
8	Aviso → Orden de Trabajo planificada	SAP PM	Planeador de mantenimiento	< 4 h
9	Intervención programada con stock verificado	SAP PM MM	Planeador + Almacén	1–3 días
10	Técnico ejecuta intervención con base en datos guía obtenidos	SAP PM + Plataforma CBM	Técnico	Programado
11	Cierre OT + actualización historial activo	SAP PM	Técnico + Supervisor	Post-intervención
12	Realimentan de datos con análisis Weibull y AMEF	Herramienta CBM	Ing. confiabilidad	Mensual

BENEFICIO CLAVE: El tiempo entre detección de anomalías e intervenciones planificadas es de 1–7 días, eliminando las paradas de emergencia de 8,4 h y reemplazándolas por intervenciones programadas de 2–3 h con todos los recursos disponibles (ISO 55001).

10. APLICACIÓN EN COLOMBIA

10. Aplicación en Colombia y Contexto Industrial

La aplicabilidad de la estrategia CBM propuesta se sustenta en el contexto industrial colombiano, donde el mantenimiento predictivo representa una brecha crítica. Según la ANDI (2022), el 68 % de las plantas industriales del país no cuenta con programas formales de monitoreo de condición.

Referentes académicos nacionales

AUTOR / INSTITUCIÓN	APORTE RELEVANTE	AÑO
Olarte, W. et al. — UTP (Rev. Ing. Industrial)	Demuestran que el CBM reduce costos de mantenimiento en 30 % en plantas de proceso continuo colombianas.	2010
García Palencia, O. — UPTC Tunja	Establece el monitoreo de vibración como la técnica de mayor ROI en activos rotativos industriales colombianos.	2012
Dunn, S. — Plant Maintenance Resource Center	CBM reduce costos entre 25–30 % frente al mantenimiento preventivo por calendario.	2005
Mitchell, J. — Physical Asset Management Handbook	Benchmarks internacionales de MTBF y disponibilidad para hornos de proceso continuo (fuente de los datos de referencia).	2007

Sectores industriales colombianos con potencial de replicación

SECTOR	REGIÓN	ACTIVO OBJETIVO	IMPACTO POTENCIAL
Cerámico (ladrillos, baldosas)	Nobsa y Sogamoso, Boyacá	Hornos túnel 20–40 m	120+ hornos; reducción correctiva 30 %
Siderúrgico	Belencito, Paz del Rio	Hornos de recocido y revenido	Disponibilidad crítica para proceso continuo
Agroindustrial (café, cacao)	Cundinamarca y Santander	Hornos de tostión y secado	Eficiencia energética + confiabilidad
Alimentos procesados	Bogotá, Valle del Cauca	Hornos de cocción continua	Inocuidad + disponibilidad +99 %

Impacto proyectado (estimados académicos — requieren validación)

MÉTRICA	VALOR BASE	PROYECCIÓN	NOTA
Fallas no planeadas/año	14 (ref. lit.)	<=4 (-71 %)	Estimado académico
Disponibilidad	97,4 % (ref. lit.)	99,5 % (+168 h/año)	Estimado académico

MÉTRICA	VALOR BASE	PROYECCIÓN	NOTA
MTTR	8,4 h (ref. lit.)	<=3 h	Estimado académico
Inversión estimada	—	\$272 M COP	Benchmark literatura
Ahorro proyectado	—	\$428 M COP/año	Benchmark literatura
Payback	—	7,6 meses	Estimado académico
ROI año 1	—	57 %	Estimado académico

ACLARACION: Todos los valores económicos y de confiabilidad son estimados construidos para el caso académico a partir de benchmarks de literatura (Dunn, 2005; Mitchell, 2007). Deben validarse con datos reales de planta antes de su uso en decisiones de inversión.

11. ANÁLISIS ECONÓMICO

11. Análisis Costo-Beneficio

TODOS LOS VALORES SON ESTIMADOS PARA EL CASO ACADEMICO a partir de benchmarks de literatura (Dunn, 2005; Mitchell, 2007). Deben validarse con datos reales de planta.

Costo de las fallas actuales (datos de referencia)

COMPONENTE	CÁLCULO	COSTO ANUAL (COP)
Perdida producción (14 fallas x 8,4 h x tarifa ref.)	14 x 8,4 h x \$2.500.000/h	\$294.000.000
Reparaciones de emergencia (mano de obra)	14 eventos x \$8.000.000	\$112.000.000
Repuestos no planeados (sobrepeso emergencia)	14 eventos x \$6.000.000	\$84.000.000
Daños colaterales (cadena, rodamientos, reductor)	Estimado literatura	\$45.000.000
COSTO TOTAL ESTIMADO		\$535.000.000 / año

Inversión estimada en el sistema CBM

ÍTEM	CANTIDAD	COSTO UNIT.	COSTO TOTAL
Sensores inalámbricos vibración + temperatura	24 unidades	\$4.500.000	\$108.000.000
Nodos online (8-16 canales)	3 unidades	\$18.000.000	\$54.000.000

ÍTEM	CANTIDAD	COSTO UNIT.	COSTO TOTAL
Gateway IoT	1 unidad	\$12.000.000	\$12.000.000
Analizador portátil vibraciones	1 equipo	\$35.000.000	\$35.000.000
Plataforma cloud CBM (anual)	1 año	\$25.000.000	\$25.000.000
Implementación CBM (servicio)	Servicio	\$30.000.000	\$30.000.000
certificación técnica ISO 17359 (4 personas)	certificación	\$8.000.000	\$8.000.000
INVERSION TOTAL AÑO 1			\$272.000.000

ROI y período de recuperación (estimados académicos)

MÉTRICA	CÁLCULO	RESULTADO
Ahorro anual proyectado (año 2)	535.000.000 - 107.000.000 (4 fallas)	\$428.000.000 / año
Inversión inicial (año 1)	Hardware + implementación + licencia	\$272.000.000
Período de recuperación	$272.000.000 / 428.000.000 \times 12$ meses	7,6 meses
ROI año 2	$(428 - 272) / 272 \times 100$	57 % en el primer año completo
ROI acumulado 3 años	$(3 \times 428 - 272) / 272 \times 100$	372 % sobre la inversión

11. CONCLUSIONES

11. Conclusiones y Resultados Esperados

La estrategia CBM propuesta para el horno túnel de 30 m integra herramientas de confiabilidad (Weibull, MTBF/MTTR, AMEF, RCA, RCM) bajo el marco normativo ISO 55001 e ISO 17359, constituyendo un aporte metodológico replicable en la industria colombiana.

1. Aporte metodológico central

La estrategia de Mantenimiento Basado en Condición (CBM) que estructuramos para el horno túnel de 30 metros es, ante todo, un aporte metodológico pensado para ser replicado en la industria nacional. Lo que hicimos fue tomar herramientas clásicas de confiabilidad (como Weibull, MTBF/MTTR, AMEF, RCA y RCM) y articularlas bajo el marco que exigen las normas ISO 55001 e ISO 17359.

2. Confiabilidad cuantificada (datos de referencia)

El verdadero corazón de este trabajo no radica en la marca o la tecnología de los sensores que se vayan a instalar, sino en la solidez del marco analítico. Integrar de manera estructurada el análisis Weibull, el AMEF y el RCA bajo los lineamientos ISO, nos deja un modelo de gestión robusto e ideal para equipos que sufren un estrés térmico tan severo.

3. Impacto proyectado (estimados académicos)

La metodología proyecta: fallas 14 $\rightarrow$ ≤ 4 /año (-71 %), disponibilidad 97,4 % $\rightarrow$ 99,5 %, MTTR 8,4 h $\rightarrow$ 3 h, ROI 57 % (payback 7,6 meses). Valores de referencia; requieren validación con datos reales.

4. Pertinencia para Colombia

El 68 % de las plantas industriales colombianas carece de CBM (ANDI, 2022). El sector cerámico de Boyacá/Cundinamarca (120+ hornos) y la siderurgia son los sectores de mayor impacto. García Palencia (UPTC) y Olarte et al. (UTP) respaldan reducción de costos de 25–30 % con CBM.

5. Normas ISO como hilo conductor

Lejos de un abordaje meramente referencial, el estándar ISO 17359 dictaminó la ruta técnica para discriminar y seleccionar las tecnologías de monitoreo pertinentes. Por su parte, la adopción de la ISO 55001 permitió estructurar la gestión del activo bajo un enfoque de mejora continua, garantizando que las fases de Estrategia, Identificación, Control, Ejecución y Optimización se integraran de manera coherente frente a la problemática industrial.

6. Contribución académica

El caso de estudio (curvas Weibull, AMEF, plan CBM, análisis costo-beneficio con aclaración del origen de datos) fortalece el componente técnico y cuantificable del poster y es apto para publicación en revista indexada de ingeniería de mantenimiento y gestión de activos.

12. Referencias

- [1] ISO 55001:2014. Asset Management — Management Systems — Requirements. Geneva: ISO.
 - [2] ISO 17359:2018. Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines. Geneva: ISO.
 - [3] ISO 13373-1:2002. Condition monitoring — Rotating machinery — Part 1: General guidelines. Geneva: ISO.
 - [4] ISO 13379-1:2012. Condition monitoring and diagnostics of machines — Data interpretation. Geneva: ISO.
 - [5] ISO 18434-1:2008. Thermography — General procedures. Geneva: ISO.
 - [6] IEC 60812:2018. Failure Modes and Effects Analysis (FMEA and FMECA). Geneva: IEC.
 - [7] Moubray, J. (2000). Reliability-Centered Maintenance RCM II (2a ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
 - [8] Mitchell, J. (2007). Physical Asset Management Handbook. London: Springer.
 - [9] Garcia Palencia, O. J. (2012). Gestión Moderna del Mantenimiento Industrial. Bogotá: Ediciones de la U — UPTC.
 - [10] Bloch, H. & Geitner, F. (2012). Machinery Failure Analysis and Troubleshooting (4a ed.). Waltham: Elsevier.
 - [11] Stamatis, D. H. (2003). Failure Mode and Effect Analysis (2a ed.). Milwaukee: ASQ Quality Press.
 - [12] Marquez, A. C. (2007). The Maintenance Management Framework. London: Springer.
 - [13] Olarte, W., Botero, M. & Canon, B. (2010). Importancia del mantenimiento industrial dentro de la gestión del mantenimiento. *Scientia et Technica*, 44, 354–358. Universidad Tecnológica de Pereira.
 - [14] Dunn, S. (2005). Condition Monitoring in the 21st Century. Plant Maintenance Resource Center.
 - [15] Reliasoft. (2020). Life Data Analysis Reference — Weibull++. Tucson: HBM Prenscia.
 - [16] ANDI. (2022). Encuesta de Transformación Digital en la Industria Colombiana. Bogotá: ANDI.
 - [17] Fabricante sensores inalámbricos IMx-1. (2024). Product Information — Sensores de monitoreo de condición. Referencia técnica de implementación.
 - [18] SAP SE. (2023). SAP PM — Plant Maintenance Application Help. Walldorf: SAP SE.
-