

Análisis de Costo de Ciclo de Vida (LCC) aplicado a la medición de caudal en hidrocarburos

Entidad: Equipos y Controles Industriales S.A. – Bogotá, Colombia

Correo: ecisales@eci.com.co Ciudad: Bogotá D.C., Colombia

Resumen

Este artículo presenta una metodología de Costo de Ciclo de Vida (Life Cycle Cost, LCC) para la selección, operación y renovación de sistemas de medición de caudal en hidrocarburos. El enfoque integra costos de adquisición, instalación, operación, mantenimiento, calibración y fin de vida, y los vincula con desempeños metrológicos (incertidumbre, repetibilidad y disponibilidad). Se propone un modelo paramétrico que permite comparar, bajo supuestos de servicio, tecnologías como medidores de desplazamiento positivo, turbina, ultrasónicos, Coriolis y diferencial de presión, incorporando ventanas de calibración, logística de intervención y riesgos de desvío metrológico. Se presenta una plantilla de caso para evaluación de alternativas y criterios de decisión orientados a gestión de activos (ISO 55000), con énfasis en reducción de OPEX y riesgos de pérdidas por medición. El resultado es una guía práctica para optimizar la inversión total, priorizando alto desempeño, mantenibilidad y confiabilidad a lo largo del ciclo de vida.

Palabras clave— LCC, costo de ciclo de vida, medición de caudal, hidrocarburos, gestión de activos, incertidumbre, calibración.

1. Introducción

La medición confiable de caudal en hidrocarburos es un habilitador económico y operativo crítico en producción, transporte y custodia. Decisiones basadas únicamente en el costo de adquisición pueden resultar subóptimas dada la incidencia de los costos recurrentes de mantenimiento, calibración, paradas, logística y riesgo por desvíos metrológicos. El análisis de Costo de Ciclo de Vida (LCC) ofrece una visión integral del costo total de propiedad (TCO), alineada con la gestión de activos y la evaluación de riesgos. Este trabajo resume un enfoque práctico de LCC aplicable a tecnologías de medición comunes en líquidos y gases de hidrocarburos, y provee una plantilla replicable para evaluación comparativa.

2. Marco conceptual y normativo

El LCC se define como la suma descontada de todos los costos incurridos por un activo desde su adquisición hasta su disposición final. En medición de caudal, el desempeño metrológico (incertidumbre expandida, repetibilidad, deriva) y la disponibilidad del sistema condicionan los costos operativos y de riesgo. El marco normativo relevante incluye buenas prácticas de metrología de flujo (p.ej., API MPMS, ISO 5167, ISO 10790, ISO 17089, OIML R117) y lineamientos de gestión de activos (ISO 55000).

3. Alcance y supuestos

El enfoque cubre sistemas de medición en líneas de proceso y transferencia de custodia para líquidos y gases de hidrocarburos. Se asume operación estable dentro del rango del medidor,

calidad de acondicionamiento de flujo conforme a norma, y disponibilidad de servicios (energía, comunicaciones). Los costos se expresan en moneda constante y se descuentan a una tasa r equivalente al costo de capital de la organización. Cuando no exista información histórica, se recomienda emplear rangos o escenarios y análisis de sensibilidad.

4. Modelo de Costo de Ciclo de Vida (LCC)

El costo total de ciclo de vida se calcula como:

$$LCC = CAPEX + \sum_{t=1..N} [(OPEX_t + M_t + CAL_t + RISK_t) / (1 + r)^t] + D_t$$

donde: CAPEX = adquisición e instalación; OPEX = costos de operación; M = mantenimiento; CAL = calibración; RISK = costos esperados por desviaciones metrológicas (pérdidas/ajustes); D = desmantelamiento/fin de vida; r = tasa de descuento; N = horizonte (años). Para cuantificar RISK se sugiere considerar probabilidad de desviación multiplicada por impacto económico por error de medición.

4.1. Estructura de costos y drivers

- Adquisición: medidor, acondicionamiento de flujo, instrumentos auxiliares, software.
- Instalación y puesta en marcha: obra, integración SCADA/PLC, FAT/SAT.
- Operación: energía, licencias, supervisión.
- Mantenimiento: repuestos, mano de obra, logística, ventanas de intervención.
- Calibración/verificación: laboratorio/in situ, patrones, trazabilidad y transporte.
- Fin de vida: retiro, disposición, actualización tecnológica.
- Riesgo por medición: pérdidas por balances, penalizaciones contractuales, re-medicación.

4.2. Indicadores de desempeño

- Incertidumbre expandida ($k=2$) y error máximo permitido.
- Disponibilidad del sistema (% tiempo operativo).
- Mantenibilidad (MTTR) y confiabilidad (MTBF) del conjunto.
- Capacidad de diagnóstico y verificación en línea (p.ej., perfiles acústicos, verificación interna).
- Frecuencia de recalibración y costo logístico asociado.

5. Tecnologías de medición y consideraciones LCC

5.1. Desplazamiento positivo (PD)

Alta exactitud en líquidos limpios a caudales moderados. Se usan preferiblemente en líquidos viscosos. Componentes móviles implican desgaste y recalibraciones más frecuentes. Vulnerables a sólidos y variaciones de viscosidad; requieren sistemas de filtración by-pass para mantenimiento en operación continua. No tiene información de diagnóstico.

5.2. Turbina

Buen desempeño en líquidos limpios a caudales moderados. Componentes móviles implican desgaste y recalibraciones más frecuentes. Vulnerables a sólidos y en general líquidos de baja viscosidad. Fallas catastróficas en caso de presencia de gas. El sistema de filtración es vital y no tiene posibilidad de diagnóstico.

5.3. Ultrasónicos (gas y líquidos)

Sin partes móviles, baja caída de presión y capacidad de diagnóstico; adecuados para grandes diámetros y custodia. Requieren perfiles de flujo estables (tramos rectos/condicionadores), cuidado en instalación

y verificación periódica; LCC favorecido por baja intervención.

5.4. Coriolis

Alta exactitud y medición directa de masa y densidad; excelente para rangos amplios y variaciones de fluido. Excelente desempeño en líquidos viscosos. Sin requerimiento de tramos rectos en la instalación. Diámetros grandes incrementan CAPEX. Medidores de tubo recto simplifican montaje; calibración exigente por tener pulsos elaborados.

5.5. Diferencial de presión (placa orificio/Venturi)

Bajo CAPEX y amplia aplicabilidad con normas maduras (ISO 5167). Mayor caída de presión y sensibilidad a condiciones de instalación; OPEX asociable a energía de bombeo/compresión y a verificación de elementos primarios.

6. Metodología de evaluación LCC

Paso 1: Definir misión del sistema y requisitos metrológicos (rango, incertidumbre, medio, presión/temperatura).

Paso 2: Identificar alternativas tecnológicas viables y configuración (línea, acondicionamiento, instrumentación).

Paso 3: Modelar estructura de costos por alternativa (CAPEX, OPEX, M, CAL, RISK, D) y horizonte N.

Paso 4: Estimar parámetros por fuentes internas/externas; documentar supuestos y bandas de variación.

Paso 5: Descontar flujos a tasa r ; calcular LCC y métricas complementarias (NPV, TCO por unidad medida).

Paso 6: Ejecutar sensibilidad (uno-a-la-vez) y escenarios (optimista/base/pesimista).

Paso 7: Seleccionar alternativa con mínimo LCC sujeto a requisitos y riesgos aceptables.

7. Plantilla de caso

- Contexto: tipo de fluido, rango de caudal, condiciones de operación, criticidad.
- Requisitos: incertidumbre máxima, disponibilidad mínima, normativas aplicables.
- Alternativas: PD / Ultrasónico / Coriolis / DP
- Supuestos de costos: CAPEX, costos unitarios de energía, horas de intervención, logística, tarifas de calibración.
- Riesgo por medición: probabilidad de desvío x impacto económico por unidad de error.
- Resultados: LCC por alternativa, análisis de sensibilidad, riesgos residuales.
- Decisión: justificación técnica y económica.

Figura de referencia

Fig. 1: Arquitectura Típica de Sistema de Medición y Puntos de Costo a lo Largo del Ciclo de Vida



Fig 1. Arquitectura típica de sistema de medición y puntos de costo a lo largo del ciclo de vida.

Tabla comparativa (plantilla)

Tabla I. Comparativo cualitativo LCC por tecnología (ejemplo de estructura).

- Criterios: CAPEX | Intervenciones/año | Ventana de calibración | Caída de presión | Diagnóstico en línea | LCC estimado.

8. Discusión

Los resultados de LCC deben interpretarse junto con el riesgo operacional y contractual. Tecnologías con mayor CAPEX pueden ofrecer menor riesgo por medición y menor OPEX, reduciendo el TCO. La verificabilidad en línea y la capacidad de diagnóstico tienden a ampliar ventanas de calibración y a disminuir intervenciones, con impacto positivo en disponibilidad.

9. Conclusiones

El enfoque LCC permite decisiones de selección y renovación de medidores más robustas y alineadas a la gestión de activos. Se recomienda institucionalizar la plantilla de evaluación, mantener trazabilidad de supuestos y actualizar parámetros con datos operativos para retroalimentar el ciclo de vida.

Referencias

- [1] ISO 55000, Gestión de activos — Visión general, principios y terminología.
- [2] IEC 60300-3-3, Dependability management — Application guide — Life cycle costing.
- [3] API MPMS, Manual of Petroleum Measurement Standards (capítulos aplicables a medición de flujo).
- [4] ISO 5167, Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices.
- [5] ISO 10790, Measurement of fluid flow in closed conduits — Guidance to the selection, installation and use of Coriolis meters.
- [6] ISO 17089, Measurement of fluid flow in closed conduits — Ultrasonic meters for gas.

[7] OIML R117, Measuring systems for liquids other than water.