



28° CONGRESO INTERNACIONAL DE
MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS



EXPO
MANTENER
2026



Caso de éxito: Premio nacional a la Eficiencia energética 2024 otorgado por UPME.

Evaluación de Inversión de una Planta CHP- Central Trigeneración de Energía a partir de la metodología de Análisis de Costo de Ciclo de Vida (LCC) Norma ISO 15663

Arif José Eslait Barrios, *M.Sc.* & Leidy Urquijo Pastrana, *M.Sc.(c)*

24 de Abril de 2026

22 | 23 | 24 | ABRIL

Primera Fase: **Ganadores** del premio Categoría Empresa de Servicios Energéticos



— 10° PREMIO A LA —
**EFICIENCIA
ENERGÉTICA**

Un reconocimiento al compromiso y las acciones adelantadas en materia de eficiencia energética en los últimos tres años.

60 Iniciativas Postuladas

39 Empresas participantes

14 Empresas Finalistas



— 12° PREMIO A LA —
**EFICIENCIA
ENERGÉTICA**

Un reconocimiento al compromiso y las acciones adelantadas en materia de eficiencia energética en los últimos tres años.

Segunda Fase: **Postulados** del premio Categoría Empresa de Servicios Energéticos

Fecha de la posible entrega:
29 de mayo 2026

Proyecto trigeneración Unibol en cifras:

-15.566

Ton/año CO₂e
Emisiones Evitadas

77%

Eficiencia Global
del Ciclo

-18,8%

Consumo específico
de gas

+ 417

Personas durante
Construcción



El **punto central de esta ponencia** no es el premio obtenido por la UPME. El punto central **es la metodología** que permitió tomar **una mejor decisión de inversión** y luego comprobarla en la operación.



Primera Fase: **Ganadores** del premio Categoría Empresa de Servicios Energéticos



— 10° PREMIO A LA —
**EFICIENCIA
ENERGÉTICA**

Un reconocimiento al compromiso y las acciones adelantadas en materia de eficiencia energética en los últimos tres años.

60 Iniciativas Postuladas

39 Empresas participantes

14 Empresas Finalistas



— 12° PREMIO A LA —
**EFICIENCIA
ENERGÉTICA**

Un reconocimiento al compromiso y las acciones adelantadas en materia de eficiencia energética en los últimos tres años.

Segunda Fase: **Postulados** del premio
Categoría Empresa de Servicios Energéticos

Fecha de la posible entrega:
29 de mayo 2026

Proyecto trigeneración Unibol en cifras:

-15.566

Ton/año CO₂e
Emisiones Evitadas

77%

Eficiencia Global
del Ciclo

-18,8%

Consumo específico
de gas

+ 417

Personas durante
Construcción



El **punto central de esta ponencia** no es el premio obtenido por la UPME. El punto central **es la metodología** que permitió tomar **una mejor decisión de inversión** y luego comprobarla en la operación.





L
C
C

Análisis del costo de ciclo de vida

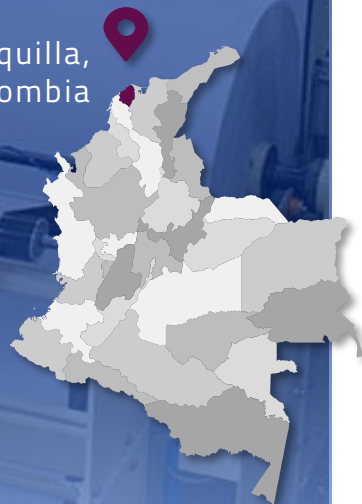
Evaluación Central de trigeneración de energía

Caso de estudio de eficiencia energética

La nueva central de trigeneración Promisol

Es una ruta hacia la eficiencia energética y confiabilidad en el suministro de energía eléctrica y térmica del Usuario

Barranquilla,
Colombia



Desafíos del proyecto

Características Iniciales del Usuario:



Deficiencias en la calidad del servicio de ambas fuentes EE.

5.3 MWh
Máxima demanda eléctrica

584 TR (demanda) / 660 TR instaladas
Sistema basado en chillers eléctricos con alto consumo energético

Carbón + Gas natural + Red eléctrica + Diésel (respaldo)

14 Ton/h
Demanda Vapor saturado media presión

Operación en Monitoreo **limitado**

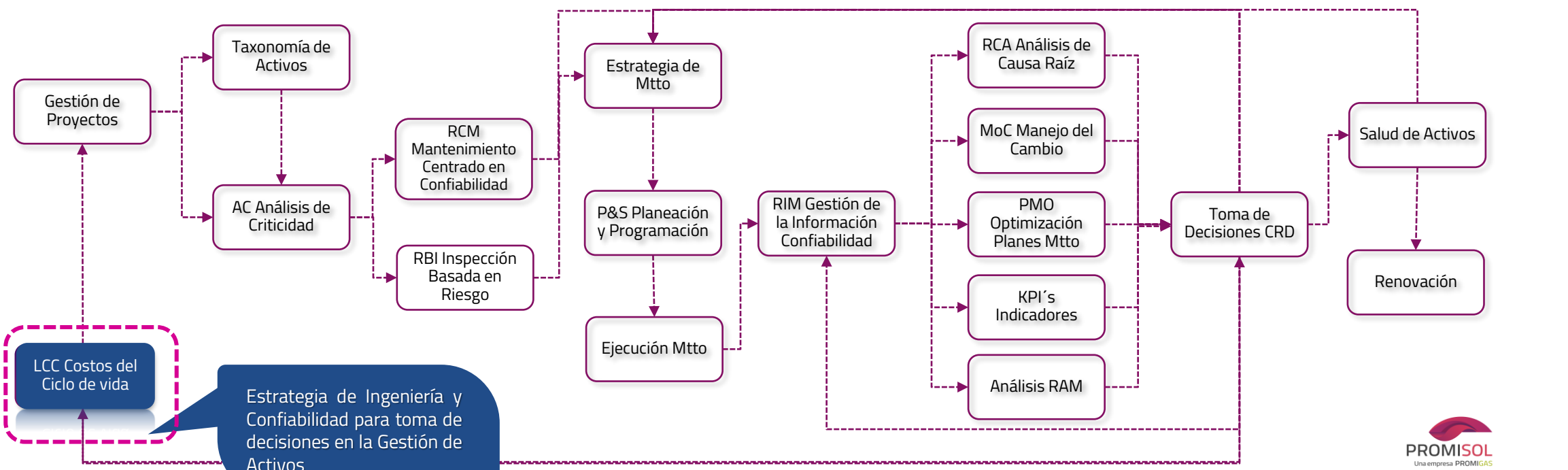
Refrigerantes de alto potencial de calentamiento global (**R22 / R410A**).



El **problema era estratégico** no operativo, no era comprar un equipo. El problema era **garantizar energía útil, vapor, frío y confiabilidad a menor costo total** y con menor huella de carbono.”

Modelo de Mantenimiento y Confiabilidad

Incorporación Operación y Mantenimiento Desincorporación



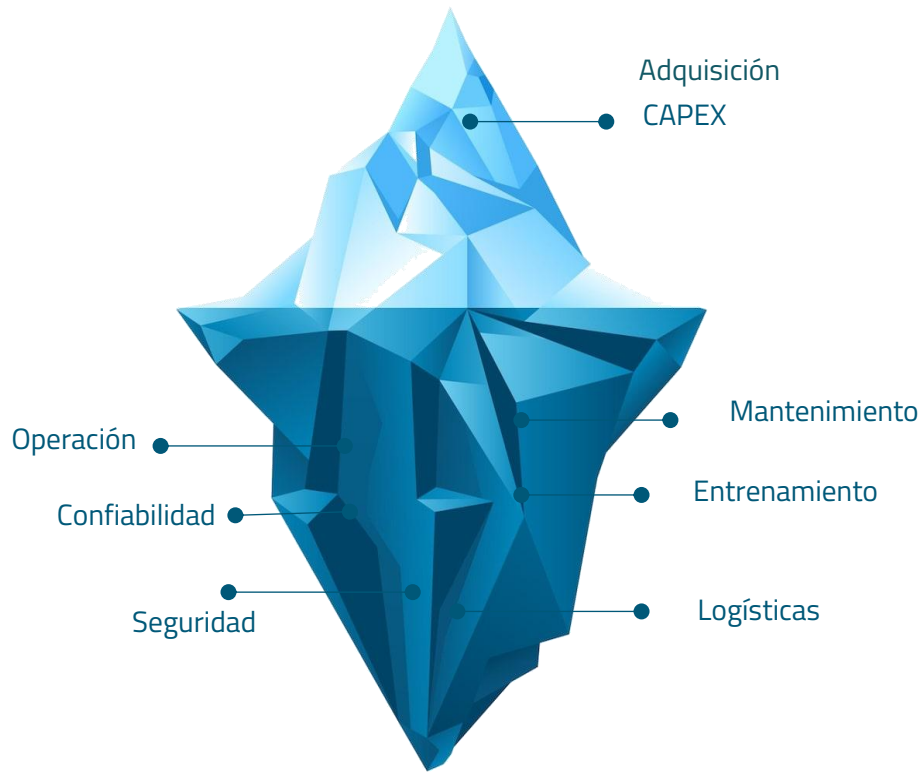
Entregas de valor

- Disponibilidad**
- Eficiencias**
- Cumplimiento**
- Confiabilidad**
- Sostenibilidad**

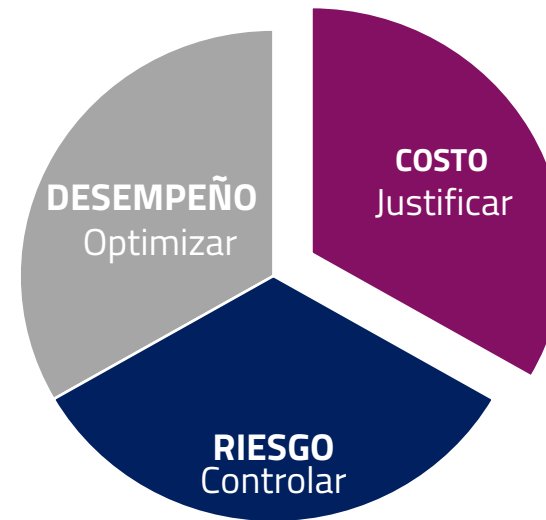
La principal lección de este caso es que cuando **mantenimiento, confiabilidad y gestión de activos** participan **desde el diseño**, la inversión deja de ser una apuesta y se convierte en una **decisión trazable, técnica y financieramente defendible.**



Análisis del **costo del ciclo de vida** de los activos **LCC**



Estrategia de Ingeniería y Confiabilidad para toma de decisiones en la **Gestión de Activos**



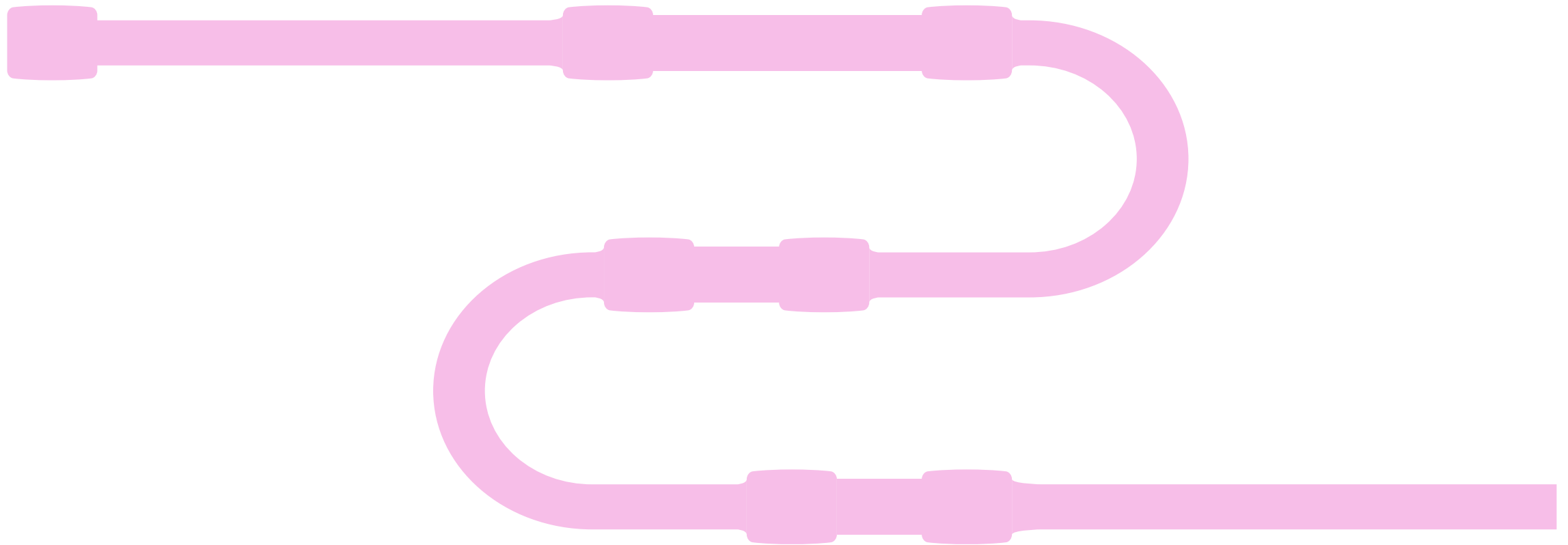
Una correcta Gestión de Activos no solo optimiza **COSTOS**...
...también reduce **RIESGOS** y mejora el **DESEMPEÑO** de manera significativa.



Este no es un caso de ahorro aislado. Es un caso de creación simultánea de valor **económico, técnico y ambiental**.



Marco normativo del modelo LCC

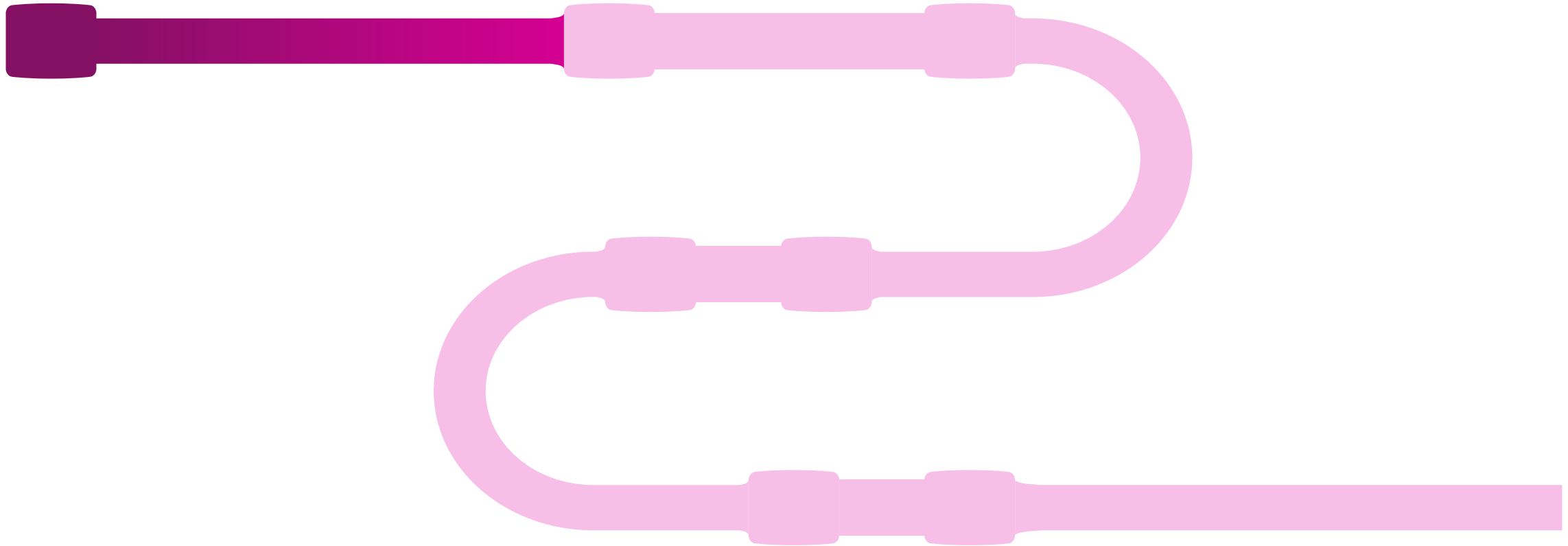




Marco normativo del modelo LCC



El modelo se fundamenta en estándares internacionales de costo de ciclo de vida y gestión de activos para soportar decisiones de inversión.

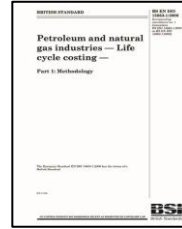




Marco normativo del modelo LCC



El modelo se fundamenta en estándares internacionales de costo de ciclo de vida y gestión de activos para soportar decisiones de inversión.



ISO 15663:2006
*Petroleum and natural gas industries —
Life cycle costing*

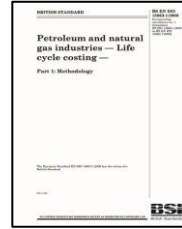
1



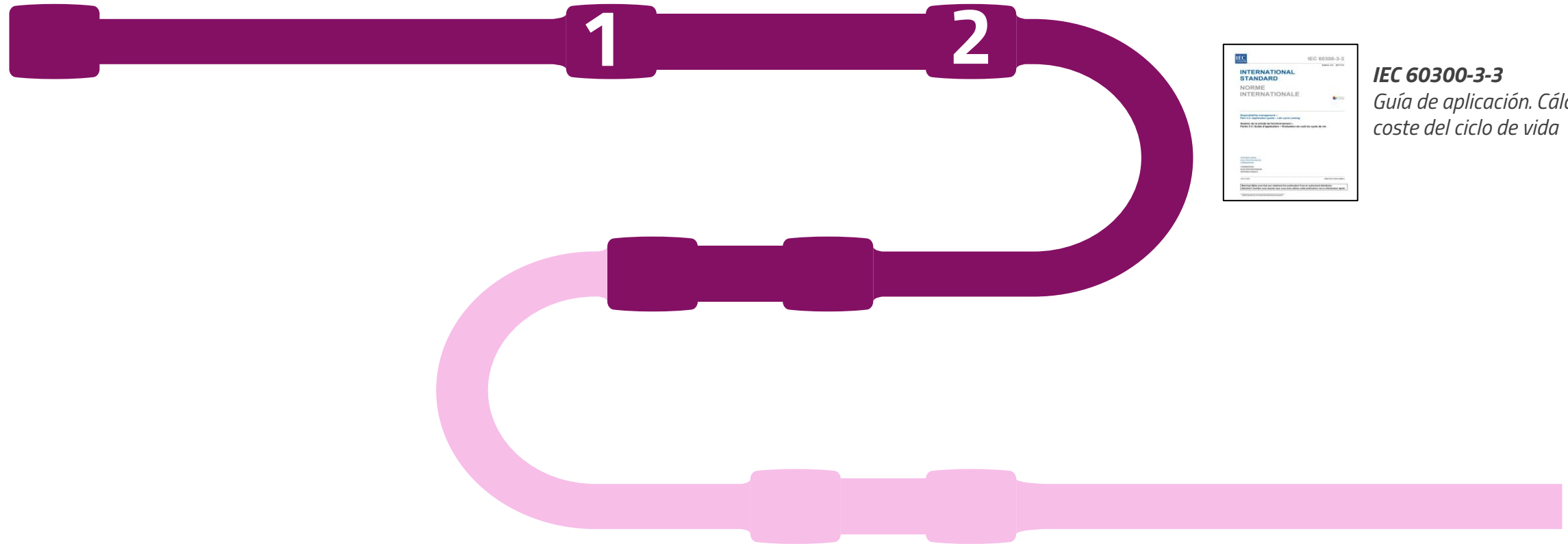
Marco normativo del modelo LCC



El modelo se fundamenta en estándares internacionales de costo de ciclo de vida y gestión de activos para soportar decisiones de inversión.



ISO 15663:2006
Petroleum and natural gas industries — Life cycle costing



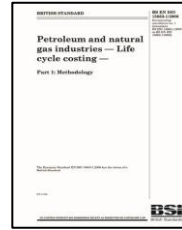
IEC 60300-3-3
Guía de aplicación. Cálculo del coste del ciclo de vida



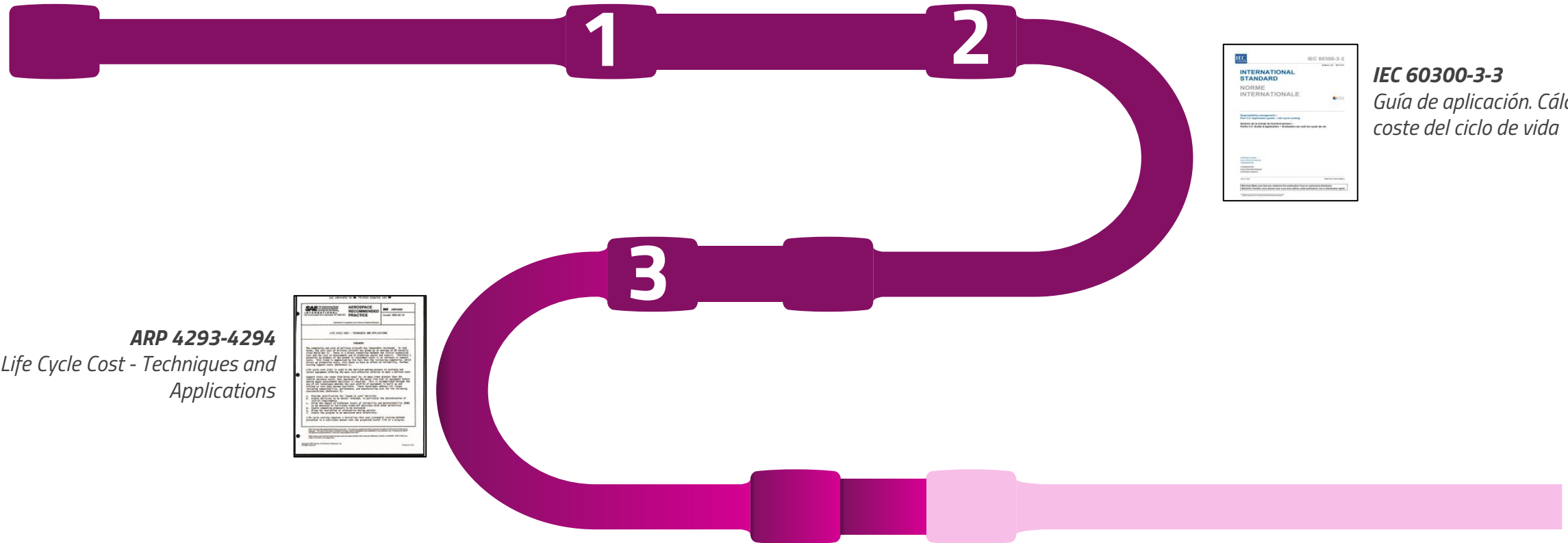
Marco normativo del modelo LCC



El modelo se fundamenta en estándares internacionales de costo de ciclo de vida y gestión de activos para soportar decisiones de inversión.



ISO 15663:2006
Petroleum and natural gas industries — Life cycle costing



IEC 60300-3-3
Guía de aplicación. Cálculo del coste del ciclo de vida

ARP 4293-4294
Life Cycle Cost - Techniques and Applications

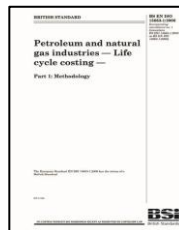




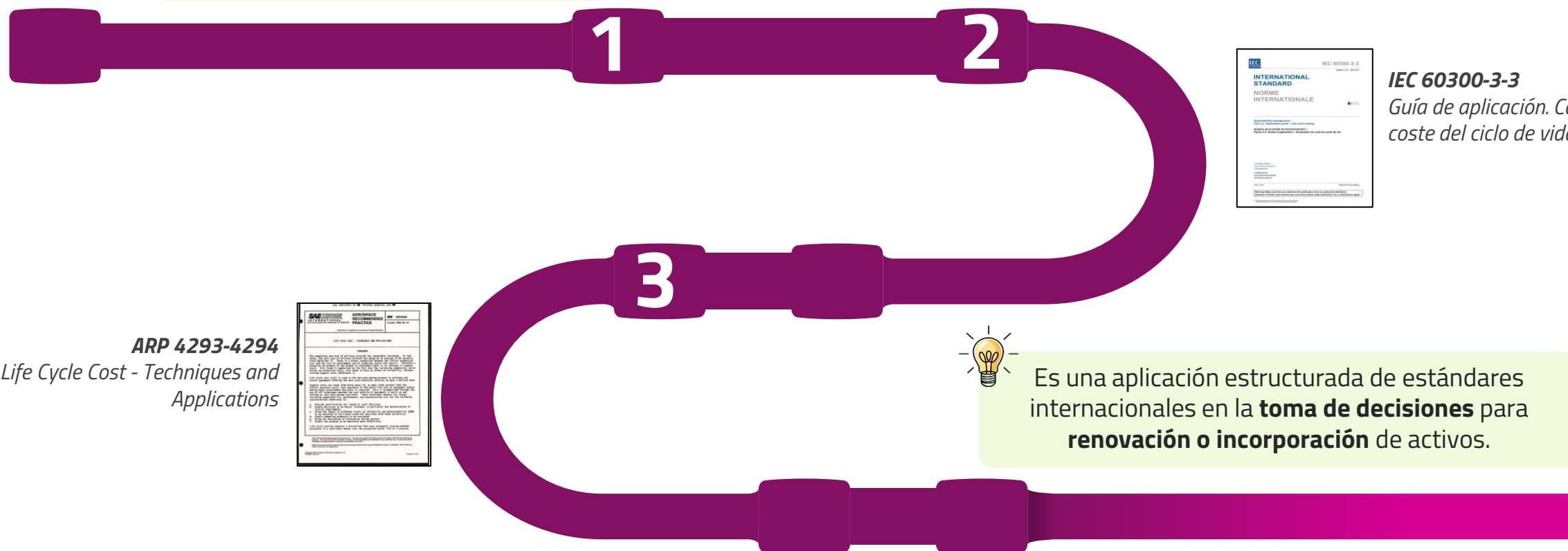
Marco normativo del modelo LCC



El modelo se fundamenta en estándares internacionales de costo de ciclo de vida y gestión de activos para soportar decisiones de inversión.



ISO 15663:2006
Petroleum and natural gas industries — Life cycle costing



IEC 60300-3-3
Guía de aplicación. Cálculo del coste del ciclo de vida

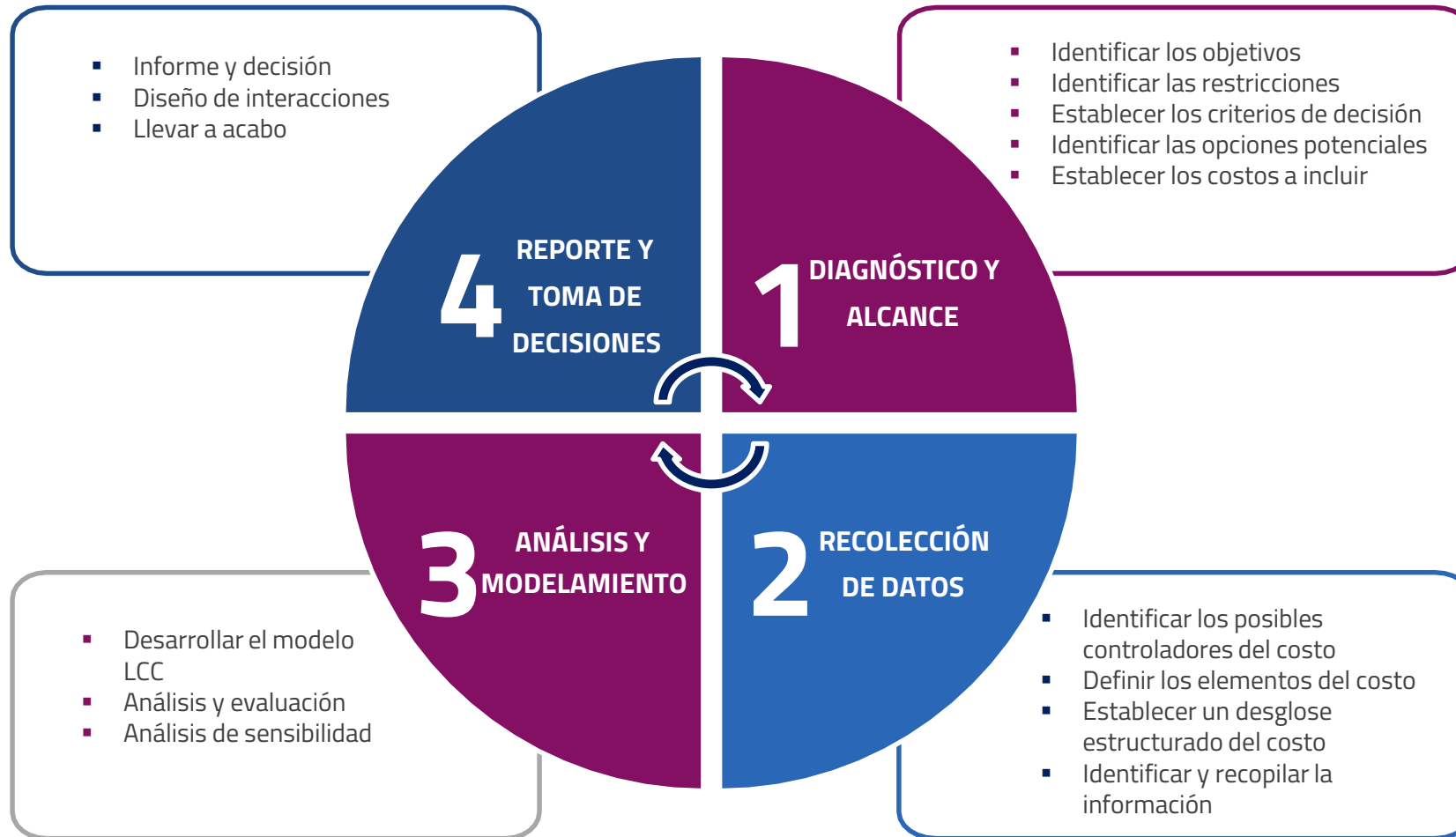
ARP 4293-4294
Life Cycle Cost - Techniques and Applications



Es una aplicación estructurada de estándares internacionales en la **toma de decisiones** para **renovación o incorporación** de activos.

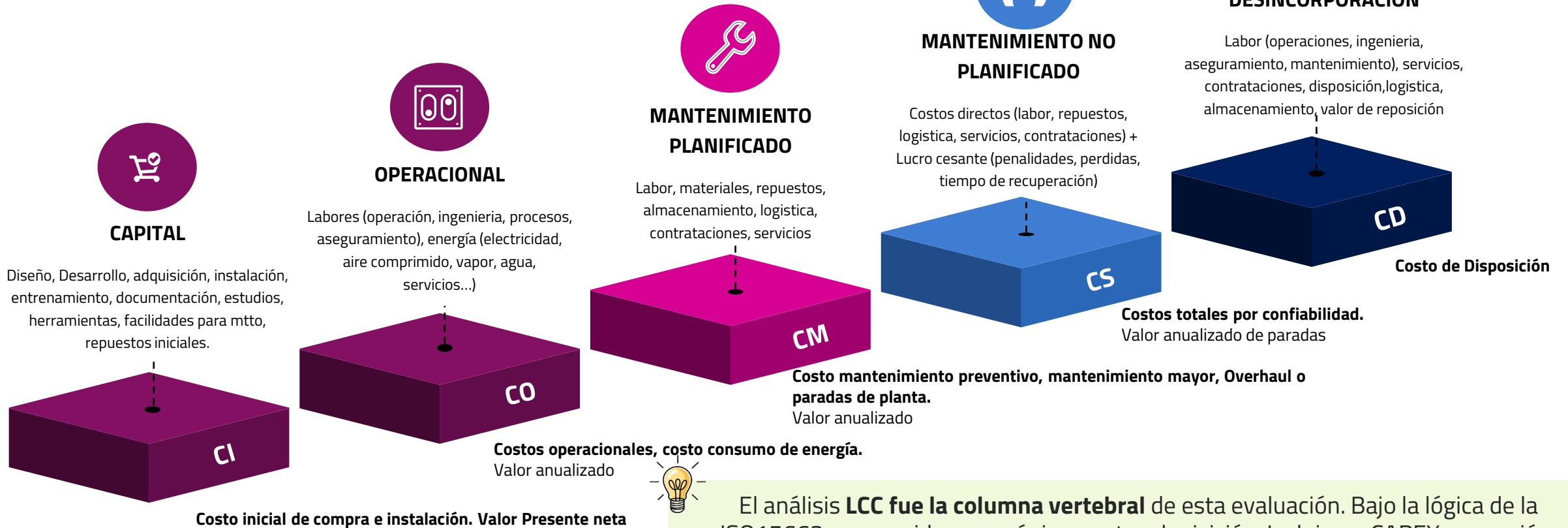


Etapas del análisis de Costo de Ciclo de Vida



Tipos de costos A lo largo del Ciclo de vida

$$LCC = C_i + C_o + C_m + C_s + C_d$$



El análisis **LCC** fue la **columna vertebral** de esta evaluación. Bajo la lógica de la ISO15663, no consideramos únicamente adquisición. Incluimos CAPEX, operación, mantenimiento, confiabilidad y disposición final, porque el **costo real** del activo se manifiesta **a lo largo de toda su vida útil**.



Método de evaluación Económica y financiera de costo de ciclo de vida

RESTRICCIONES PARA EL DISEÑO

Para el análisis y el diseño de la solución, se tuvieron en cuenta las restricciones del sistema

	Potencia mínima garantizada	6,3MW
	Demanda vapor garantizada	14 T/h
	Toneladas de refrigeración objetivo	160 TR
	Gas Natural disponible	2 MPCD
	Bajas emisiones de carbono	↓CO2eq
	Área planta trigeneración	1.380 m²
	Disponibilidad	95%
	Confiabilidad	Alta confiabilidad Requerida del sistema
	Tarifa EE, Vapor y Agua Helada	Inferior

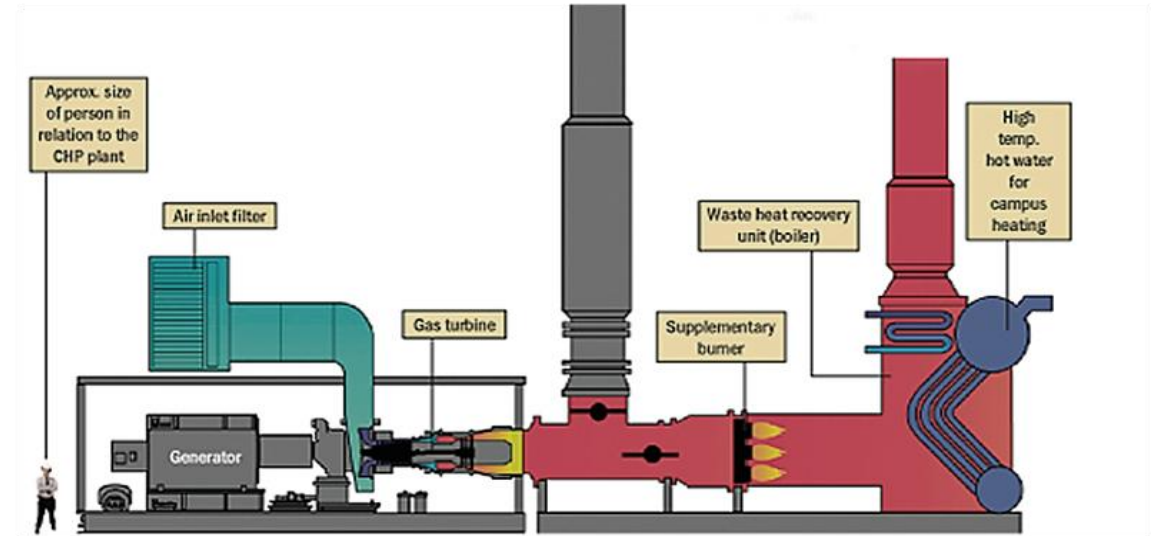


ALTERNATIVAS EVALUADAS

Con base en las consideraciones y restricciones expuestas, se evalúan diferentes alternativas técnicas, equipos y tecnologías:



Lo innovador no fue solo la **tecnología instalada**, sino el criterio con el que se justificó la inversión.



Source: University of Calgary, Catalog of CHP Technologies 2017.

Turbinas / motor

Solar Turbines

A Caterpillar Company

BERGEN
ENGINES
ON LAND. AT SEA.

SIEMENS
energy

WÄRTSILÄ

Calderas vapor

lointek

aitesa  **BOSCH**

RENTECH

**Cleaver
Brooks** 

Chiller de absorción



BROAD USA

 **TRANE**

 **YORK**



Desempeño Equipos Mayores

Turbogeneradores



ALTERNATIVA B

Potencia ISO	6,80	MW
Potencia Neta (MW)	5,93	MW
Disponibilidad Promedio	97%	%
Energía Neta Disponible	51.279	MWh/año
Heat Rate +1.5% @HHV	12.816	BTU/kWh HHV
Rendimiento @HHV	0,361	m3/kW
Eficiencia Eléc.	30,31%	%
Consumo Teorico Gas @Max	2.223	m3/h
Emisiones GEI Anual	35.556	Ton CO2 eq
Factor Emisión Cogeneración	0,314	Ton CO2 eq /kWh
Generación Bruta Vapor	13.613	Kg/h
Generación Neta Vapor	12.919	Kg/h
Eficiencia Global trigeneración	Hasta 78%	%

+ 8%
Generación neta

Solar Turbines

A Caterpillar Company

ALTERNATIVA A

Potencia ISO	6,30	MW
Potencia Neta (MW)	5,50	MW
Disponibilidad Promedio	97%	%
Energía Neta Disponible	47.508	MWh/año
Heat Rate +1.5% @HHV	12.285	BTU/kWh HHV
Rendimiento @HHV	0,346	m3/kW
Eficiencia Eléc.	31,32%	%
Consumo Teorico Gas @Max	1.974	m3/h
Emisiones GEI Anual	31.577	Ton CO2 eq
Factor Emisión Cogeneración	0,291	Ton CO2 eq /kWh
Generación Bruta Vapor	13.361	Kg/h
Generación Neta Vapor	12.679	Kg/h
Eficiencia Global trigeneración	Hasta 76%	%

↑ Con la incorporación del chiller se logra alcanzar condiciones **ISO** (15°C, 60% HR)

↓ **4.1%** Tasa de calor

↑ **Rendimiento**

↓ **11%** Emisiones GEI por consumo GN

↑ **7.7%** Eficiencia global



Desempeño Equipos Mayores

Chiller de absorción



ALTERNATIVA B

Modelo	YHAU-C-510TR
Potencia	510 TR
COP	1,4
Consumo vapor	1.488,2 kg/h
Flujo agua	984,0 gpm
	223,6 M3/h
Presión vapor	116,0 psi
Peso (ton)	17,1 ton
Tubería absor/eva	Cobre



BROAD USA

ALTERNATIVA A

Modelo	BS-200
Potencia	660 TR
COP	1,5
Consumo vapor	2.345,0 kg/h
Flujo agua	1.652,0 gpm
	375,0 M3/h
Presión vapor	120,0 psi
Peso (ton)	24,3 ton
Tubería absor/eva	Titanio



Ventaja económica

Broad: **491 USD/TR**

York: **762 USD/TR**



Material en **titanio** → **mayor resistencia a corrosión**



Mayor **vida útil del equipo**



Menor **riesgo de incrustaciones y fallas**



Mayor **robustez en operación real**



Menor **necesidad de mantenimiento correctivo**

COSTOS DE CAPITAL

Concepto y definición

- Investigación de mercado; concepción del producto y análisis de diseño;
- Preparación de la especificación de requisitos del producto.

Diseño y desarrollo

- Gestión de proyecto y planificación
- Ingeniería de diseño, incluyendo confiabilidad y mantenibilidad
- Documentación del diseño
- Pruebas y evaluación

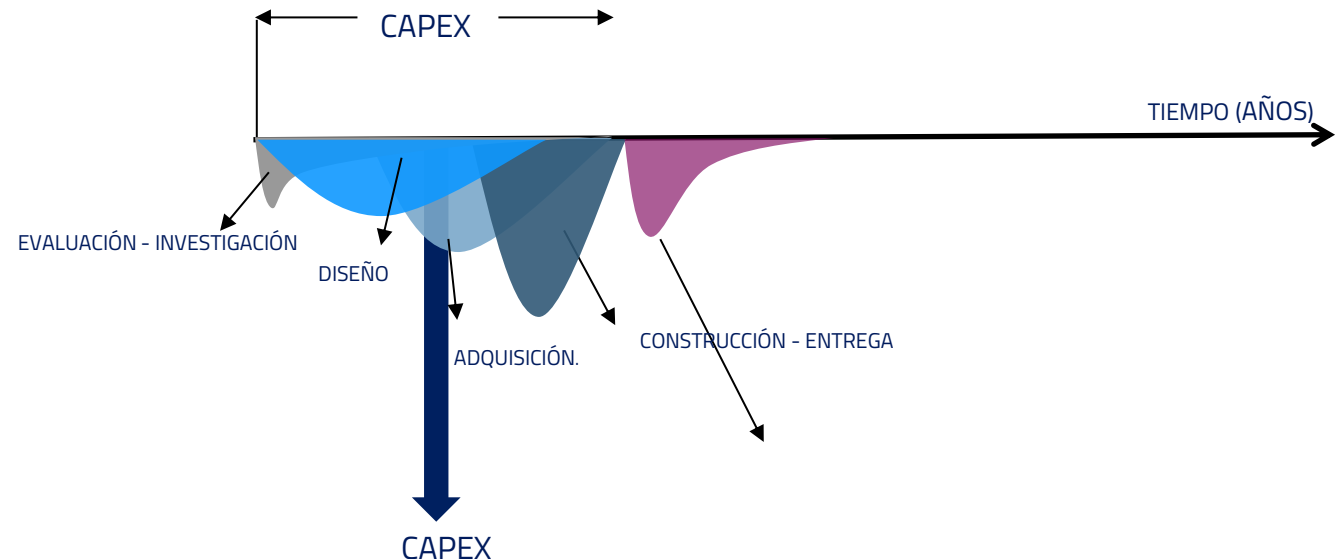
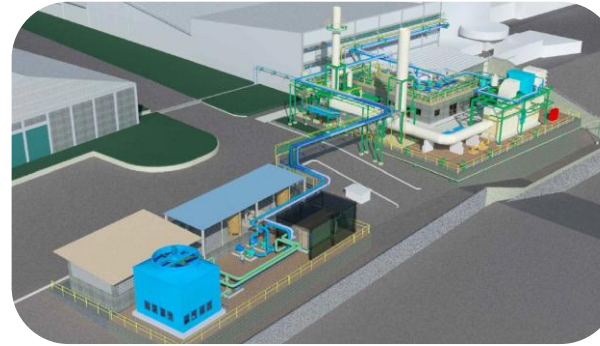
Fabricación e instalación

- Adquisición bienes y materiales
- Transporte y nacionalización
- Estudios y diseños
- Costo de construcción
- Costo de instalación
- Soporte y equipos de prueba especial
- Costo de puesta en servicio
- Entrenamiento, documentación
- Herramientas, facilidades para mto y repuestos críticos
- Costo de reinversión
- Impuestos, seguros, contingencias
- Gestión social, seguridad física



La **confiabilidad** desde la etapa

de **diseño** asegura que los costos no planeados serán los mínimos y así cumplir con el costo objetivo y sacar la mayor rentabilidad del activo.



COSTOS DE AOM

OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

a) Costes asociados a la operación

costes por formación inicial del personal, formación continua y mejoras
costes de mano de obra, consumibles
Consumo de energía
Costo de seguro

b) Costes asociados al mantenimiento preventivo

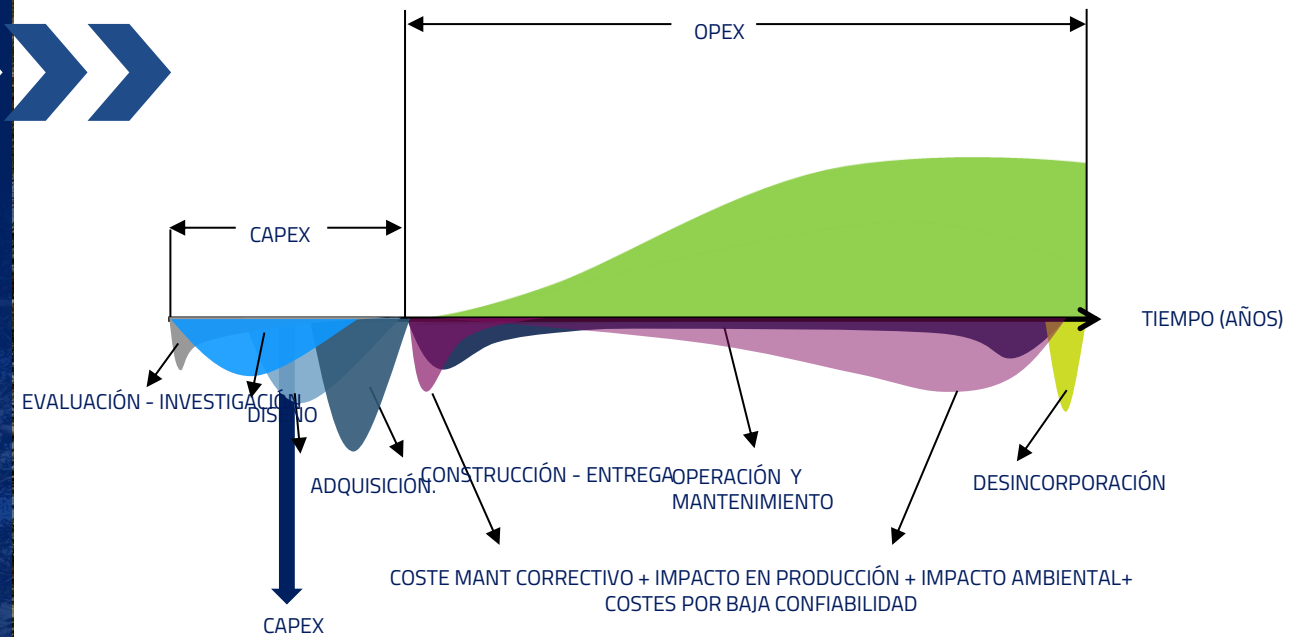
Costo mantenimiento preventivo, mantenimiento mayor, Overhaul o paradas de planta.
costes de adquisición de equipos de prueba y herramientas, repuestos y consumibles, consumo combustibles
almacenamiento, logística, contrataciones, servicios,
sustitución de piezas con vida limitada

c) Costes asociados al mantenimiento correctivo

Costos totales por confiabilidad, costes de consecuencias debido a pérdidas de producción o capacidad incluyendo costes por compensación y pérdidas de ingresos.
Lucro cesante (penalidades, perdidas, tiempo de recuperación)

DESINCORPORACIÓN

parada del sistema
retirada de servicio
desmontaje y retirada
reciclado o eliminación segura





Fuentes de **Información** y supuestos utilizados en **evaluación LCC**

Costo de inversión (CAPEX)

- Costos del **turbogenerador Solar** basados en la experiencia previa del montaje de siete unidades de capacidad similar.
- Cotización formal del **turbogenerador Siemens** para la capacidad requerida del proyecto.
- Cotizaciones de los **chillers York y Broad** obtenidas directamente de los proveedores.



Costo de Operación (OPEX)

- Costos de administración y operación estimados con base en la **experiencia de proyectos similares**.
- **Consumo de combustible** estimado a partir de fichas técnicas y del heat rate de los equipos.
- Cotizaciones de **costos operativos** para los chillers York y Broad.



Costos por confiabilidad y fallas

- **Modelación RAM** mediante **RCM Cost 4.0** y distribución **Weibull** y Handbook **Oreda**.
- Análisis de los siguientes indicadores:
 - **TPO** (tiempo Promedio Operativo).
 - **Tasa anual de fallas**.
 - **TPR** (tiempo promedio para reparar).
- **TPO/ TPR de Siemens:** suministrado por el fabricante
TPO/ TPR de Solar: estadísticas de fallas reales de **más de 20 años** en operación de sistemas similares.



Mantenimiento y repuestos

- Mantenimiento preventivo del turbogenerador, considerando RMS y consumo de lubricante.
- Stock de repuestos críticos para equipos **Solar** y **Siemens**.
- Referencias de benchmarking del U.S. Department of Energy para chillers York.



Contractual

- La rentabilidad del modelo está enmarcada en ese PPA a **16 años**.
- Facturación tres energéticos: energía eléctrica, vapor y frío.
- Modalidad Contractual: take or pay



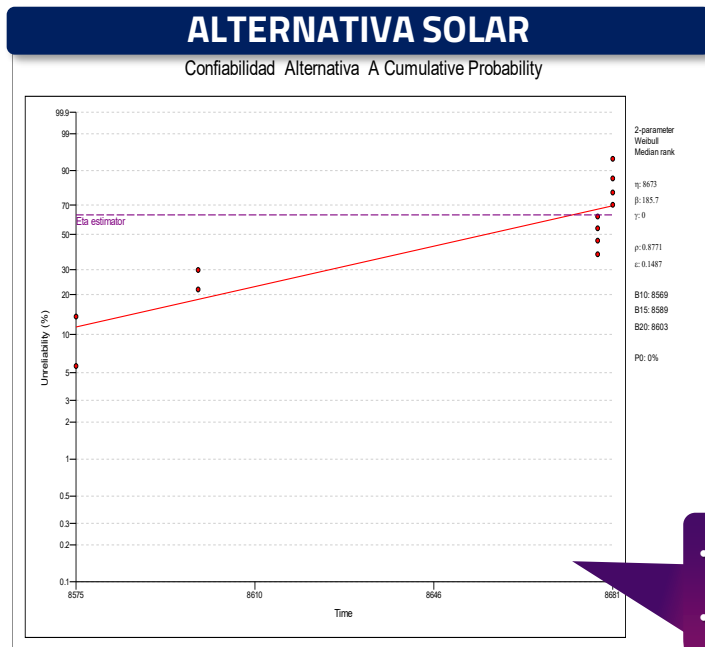
Caso real donde la ingeniería de mantenimiento y la gestión de activos cambiaron la lógica de inversión mediante **ISO 15663 + RAM + evidencia operativa**



Costos asociados a la **confiabilidad**

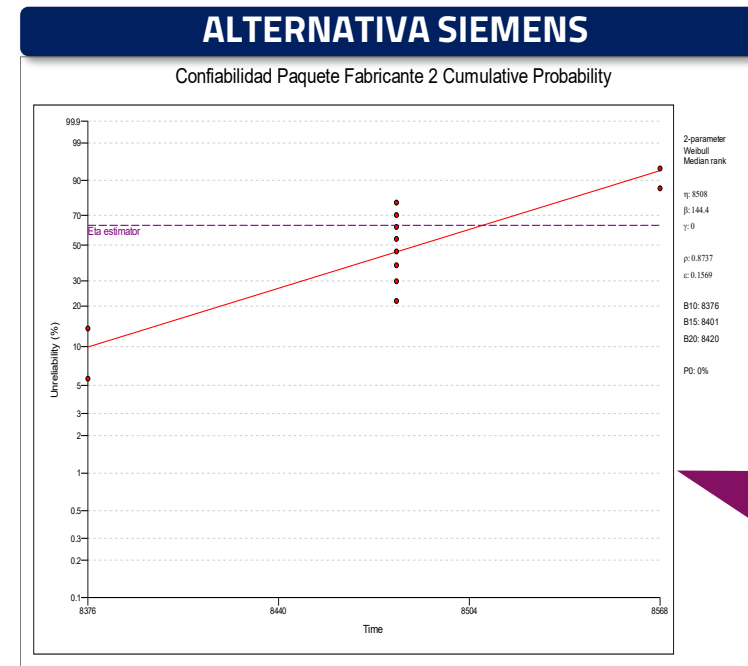
Se evaluaron los tiempos medios entre falla, los tiempos medios para reparar utilizando el modelo de tasa de distribución de fallas constante seleccionando (Weibull) a través del test de Kolmogorov que se ajustaba adecuadamente al comportamiento real de un conjunto de datos suministrados por los dos fabricantes de los equipos.

- ✓ **Modelo de tasa de fallos constante**
- ✓ **Modelo de Tasa de fallas determinístico**
- ✓ **Modelo de tasa de fallas por distribución Weibull**



- **TPO: 5.197**
- **Tasa anual de fallas: 1,69**
- **TPR: 6,5**

- Mayor factor de disponibilidad que la alternativa A
- Tiempos medios para reparar muy bajos



- **TPO: 3.418**
- **Tasa anual de fallas: 2,56**
- **TPR: 49**

- Menor factor de disponibilidad que la alternativa A
- Tiempos medios para reparar más altos que la Alternativa A.

ANÁLISIS Y MODELAMIENTO

- Desarrollo del Modelo LCC
- Análisis y Evaluación de los Costos
- Análisis de Sensibilidad





Modelo Financiero

Cada uno de los elementos o categorías de los costos de ciclo de vida, deben ser modelados en términos financieros, para lo cual se utiliza la expresión

$$LCC = P + \sum \left[\frac{O}{(1+r)^t} \right]$$

$$P = C_i + C_o$$

$$O = C_m + C_s + C_d$$

r = tiempo analisis de vida util del activo

t = tasa de descuento



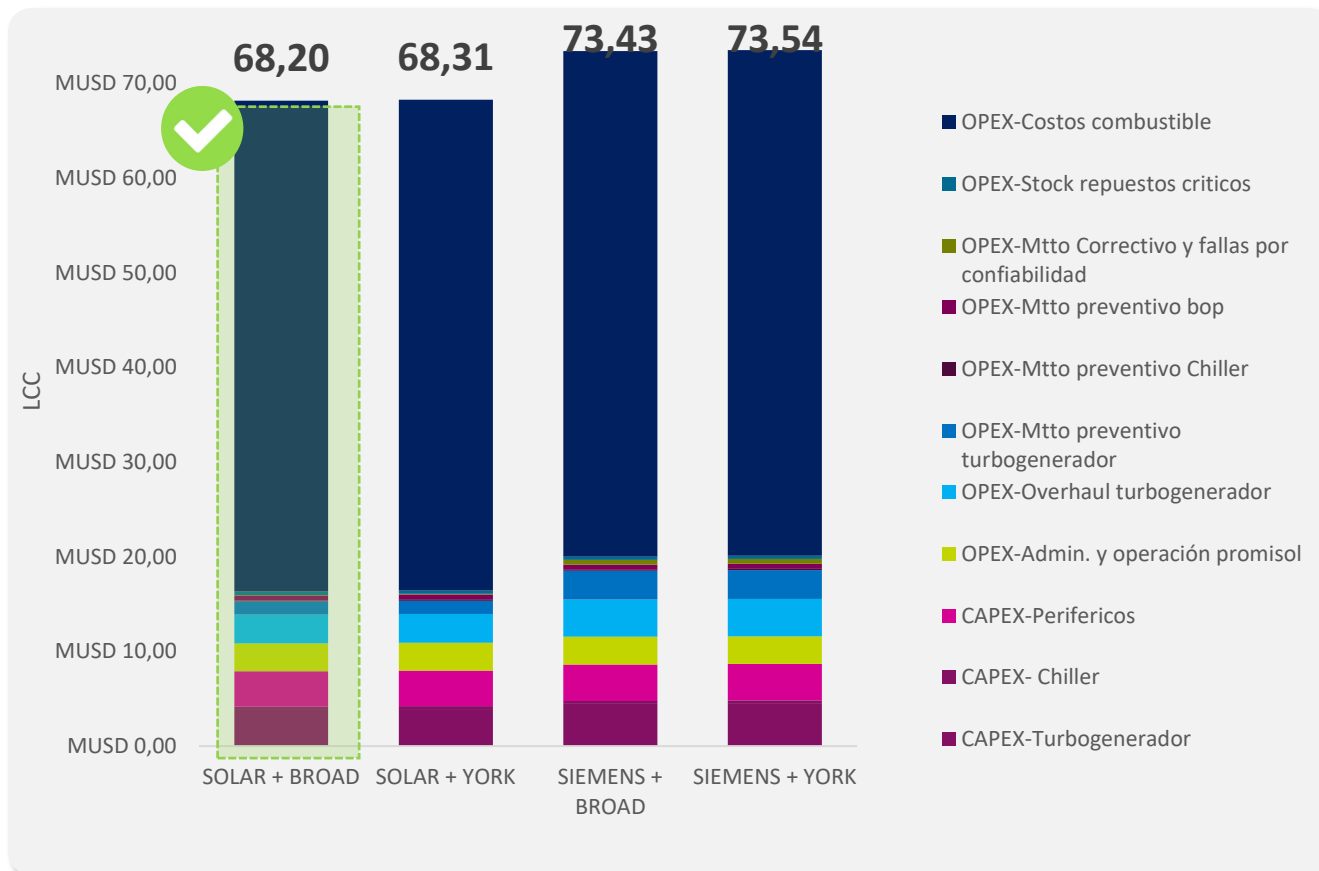
Este caso demuestra que la eficiencia energética por sí sola no basta; la decisión correcta surge cuando se integran **costo de ciclo de vida, confiabilidad y estrategia de activos.**





Comparación de Escenarios

Análisis de costo de ciclo de vida (LCC)



El escenario **Solar + Broad** presenta el menor LCC, con un valor aproximado de **MUSD 68.20**, siendo la alternativa más favorable en costo total.



Solar + York alcanza un LCC muy cercano de **MUSD 68.31**, por lo que la diferencia económica entre ambas opciones Solar es marginal.



La selección **Solar + Broad** se respalda en una ventaja tecnológica clara: el uso de titanio (vs. cobre en York), que ofrece mayor robustez, mejor desempeño operativo y menores costos de mantenimiento.



Los escenarios con **Siemens** resultan menos favorables, principalmente por mayor consumo de combustible, mayores costos de mantenimiento preventivo del turbogenerador y mayores costos de overhaul.



La decisión del proyecto está gobernada principalmente por la **selección del turbogenerador**, mientras que el impacto del chiller es secundario en el resultado global.



El **menor CAPEX** no necesariamente produce el mayor valor. Lo que importa es el costo total de propiedad y el desempeño real esperado del activo.



Análisis Económico

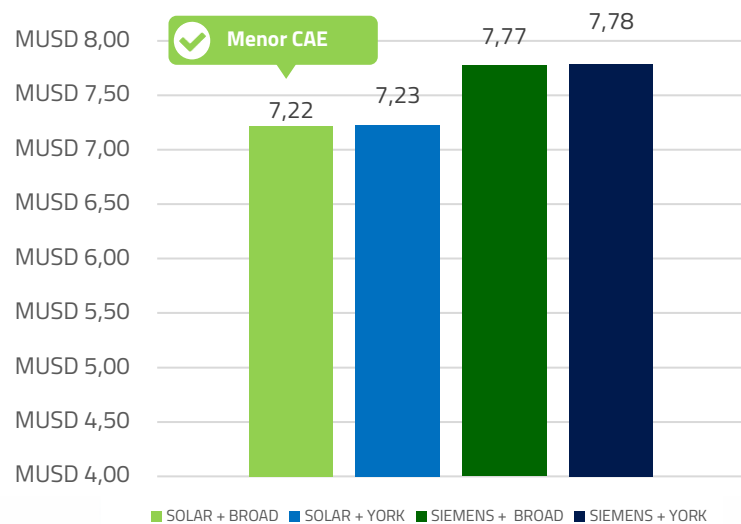
Resultados del análisis económico

El análisis integra desempeño técnico (RAM) y costo de ciclo de vida para comparar escenarios.



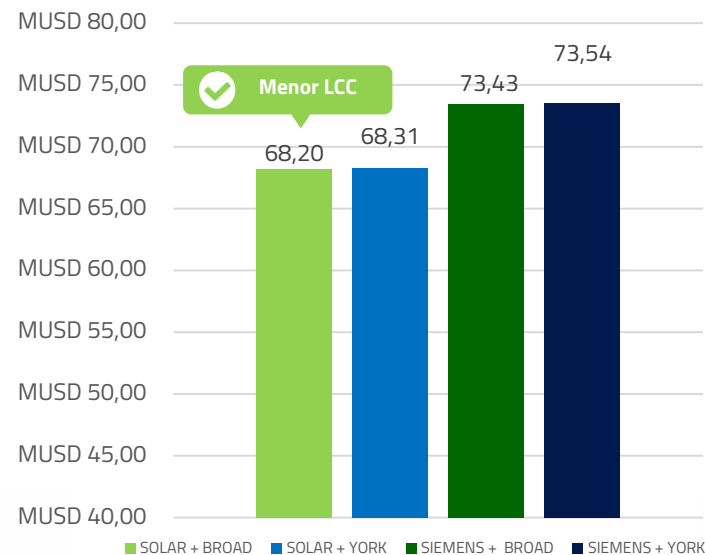
CAE

Costo Anual Equivalente



LCC

Costo de Ciclo de Vida



AHORROS DEL PROYECTO

Ahorro anual (CAE):

USD 551.351/Año

Vs. Escenario Siemens + York

Diferencia en LCC:

5,2 MUSD

Menor vs. Escenario Siemens + York

MENSAJE CLAVE



La gran enseñanza es que la gestión de activos crea valor cuando conecta **diseño, mantenimiento, finanzas y sostenibilidad en una sola decisión.**



Análisis Financiero

Principales resultados



Desde el punto de **vista técnico**, desde el punto de **vista económico**, y desde el punto de **vista operativo**, la alternativa seleccionada fue la que mejor protegía valor en el ciclo de vida.



Capex

Alternativa Solar+Broad

-8.6% ↓

Costos de Capital

Vs. Escenario Siemens + York



Costo LCC

Alternativa Solar+ Broad

-6.7% ↓

Costos de Capital

Vs. Escenario Siemens + york



Costos y Gastos

-30% ↓

Reducción de Costos
del **Usuario**



Horizonte

Fase Constructiva:

15 meses

Fase Operativa:

16 años



Energía/ Vapor

Energía eléctrica

53.532 MWh/año

Vapor saturado

71.250 Ton/año

Frío

660 TR (≈ 19 GWh_{th}/año)



Impuesto

- Beneficios Tributarios: Ley 1715 (Colombia)
 - ✓ Monto de inversión aprobado para beneficios:
\$ 32.431 MCOP
 - Exclusión de IVA
 - Exención de Aranceles
 - Depreciación acelerada de los activos
 - Deducción de Renta

¡Se decide ejecutar el proyecto!

CENTRAL DE TRIGENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA, TÉRMICA Y FRÍO



SERVICIO DE ENERGÍA INTEGRADA
PARA LA INDUSTRIA



EQUIPOS PRINCIPALES

Grupo turbogenerador a gas

TAURUS-65

Capacidad: 6.5MW condiciones ISO

Fabricante: Solar Turbine/Caterpillar

Caldera de generación de vapor Mixta

Capacidad: 14 ton/h, P:220 psig

Fabricante: Valtec Umisa

Chiller de Absorción

Capacidad: 660 TR

Fabricante: Broad

CASO DE ÉXITO

Mejoras en la eficiencia energética por Rendimiento combustible



62% → 77%
Eficiencia global del ciclo
Autogeneración → Trigeneración



16%
Incremento de potencia
de la turbina
(5.45-6.3 MW)



↓ **18,8%**
Consumo específico de
gas
(m³/kWh)



660 TR
Capacidad instalada de
refrigeración



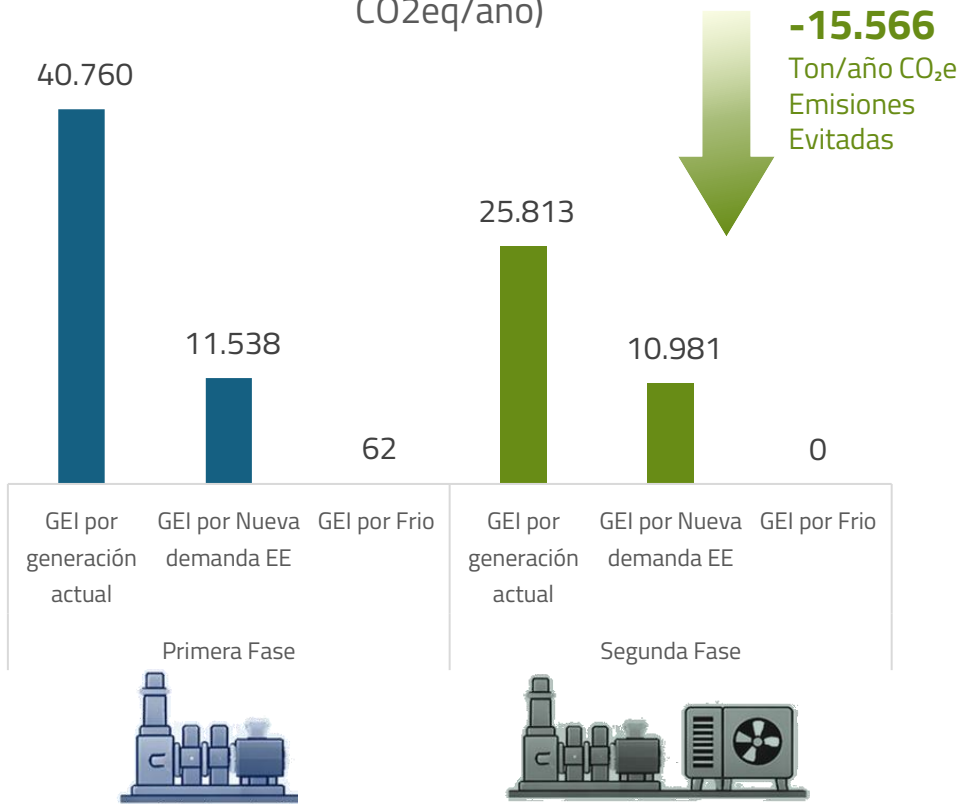
Ahorros

COP\$ 5.421 M/Año

*Por eficiencias suministro de energía eléctrica, térmica y climatización
por aumento de eficiencia y reducción de costos de combustibles y
eliminación del uso de diésel.*

Abatimiento Emisiones GEI

Emisiones de gases de efecto invernadero (Ton CO₂eq/año)



Logros

- La **reducción de emisiones** se logra principalmente por:
 - Mayor eficiencia** en generación eléctrica
 - Reducción** en consumo de combustibles líquidos (ACPM)
 - Eliminación** del uso de refrigerantes tipo R22
- La solución de **chiller de absorción** elimina emisiones asociadas al sistema de **enfriamiento eléctrico**





Incremento en la confiabilidad y disponibilidad del servicio

Incremento en demandas de energía y vapor



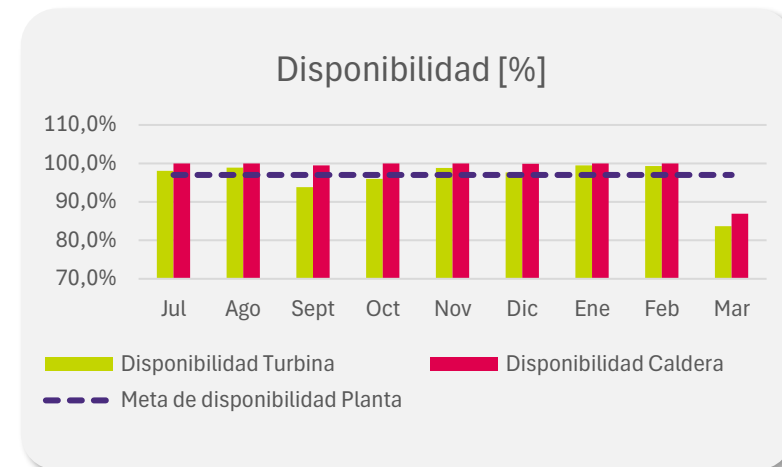
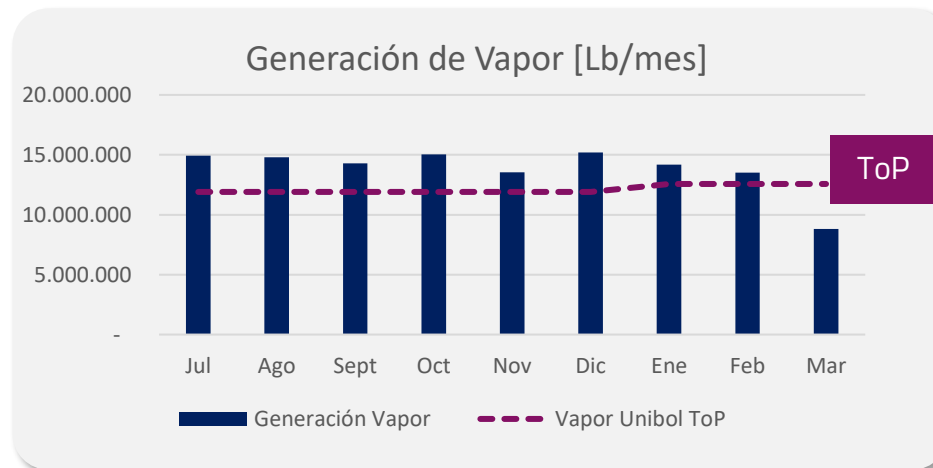
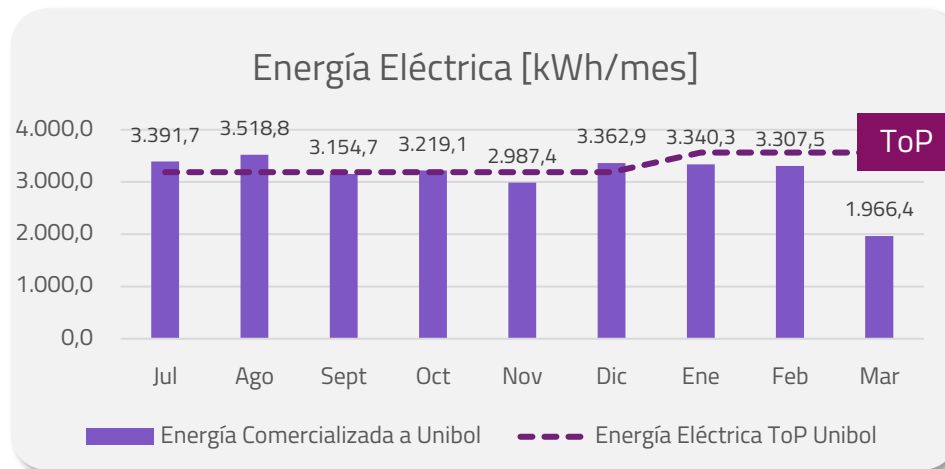
Por mayor **confiabilidad** en el suministro



Tasa de falla **44% menor**

Disponibilidad

98% en el 1er año
98.2% en el 2do año



La **mejora en confiabilidad** es un resultado económico tangible del proyecto.



BENEFICIOS GENERADOS PARA EL USUARIO

PARA EL CLIENTE

Eficiencia global del sistema: de **~28% a 77%**
Menor dependencia de la red y mayor continuidad operativa
Soporte al incremento de la producción de papel
-18,8% en consumo específico de gas
+16% en capacidad de generación eléctrica
-15.566 tCO₂e/año en emisiones GEI
660 TR de capacidad instalada de refrigeración
COP \$5.421 millones/año en ahorros estimados



Con este proyecto se garantiza un cambio positivo que impactará directamente en la Eficiencia Operativa de todos los activos.



BENEFICIOS GENERADOS

PARA LA EMPRESA

- Incremento en la comercialización de energía : ~ **\$ 8,671 millones** (Año 2025)
- Ampliación del portafolio de clientes de la compañía
- Habilitación de oportunidades de innovación en procesos industriales.
- Contribución a las metas de descarbonización empresariales y nacionales del PROURE.



Los beneficios del proyecto se reflejan simultáneamente en eficiencia, disponibilidad, costos y sostenibilidad.

La mayor contribución de este trabajo no es solo el proyecto ejecutado, sino una metodología replicable para tomar decisiones de inversión basadas en costo total, confiabilidad y sostenibilidad.

¡Gracias!

Arif Eslait Barrios

Director Técnico

Promisol

Arif.Eslait@promisol.co

3227861162