Universidad de Concepción | Facultad de Ingeniería
Universidad de Concepción

Análisis y propuestas de mejora de la eficiencia del sistema de vapor y condensado en la Planta Plywood de CMPC

Matias Ax'noil Fernandez Cea

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor guía:
Dr.-Ing. Cristian Alberto Cuevas B.

Septiembre 2026
Concepción, Chile

© 2026 Matias Ax'noil Fernandez Cea

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Resumen

Esta memoria desarrolla una evaluación técnico-económica del sistema de vapor y condensado de la Planta Plywood de CMPC y establece una cartera priorizada de intervenciones para mejorar su eficiencia y confiabilidad. El trabajo integra revisión de P&ID, levantamiento en terreno, termografía infrarroja, registros HMI/SCADA, datos de producción y modelos térmicos, termodinámicos y mecánicos. La evaluación comprende dos líneas internas de suministro, tres estaciones de atemperación, consumidores principales, drenajes, retorno, soportación, instrumentación y un catastro de 128 trampas de vapor.

El diagnóstico identificó 63 m de cañerías con aislación ausente o deficiente, 14 válvulas sin mantos térmicos y 11 trampas clasificadas como deficientes: cinco abiertas o con paso interno y seis cerradas o con drenaje insuficiente. También verificó que ninguno de los tres atemperadores dispone del tramo recto mínimo de 6 m que establece el manual de referencia, y documentó una señal de caudal de inyección que requiere normalización, descargas térmicamente activas en AK1, un apoyo deformado y discrepancias entre montaje y planos. La integración de estos hallazgos permitió definir intervenciones específicas y criterios de aceptación para cada problema.

El modelo superficial cuantificó pérdidas térmicas de 237 kW. La aislación de cañerías y los mantos removibles presentan un potencial modelado de recuperación de 3.649 t/año de vapor equivalente, valorizado en 39.010 USD/año. Los escenarios paramétricos de AK1 y trampas abiertas aportan una referencia adicional de 3.032 t/año y 32.416 USD/año. El potencial integrado de referencia alcanza 6.682 t/año y 71.427 USD/año, con separación explícita entre resultados modelados y escenarios dependientes de diámetros efectivos. Esta evaluación fundamenta la secuencia de inversión y define umbrales económicos para orientar la medición de las descargas.

Los registros de enero a junio de 2026 establecieron una línea base de consumo específico aparente de 974 kg de vapor por cada metro cúbico de chapa. La normalización energética integrada sitúa el indicador en 963 kg/m³, equivalente a una reducción referencial de 11 t por cada 1.000 m³. Durante el estudio se ejecutó el recambio de trampas y se formalizó la identificación de 42 puntos de presión en los planos oficiales. El análisis elaborado y validado por CMPC registra, tras el recambio, disminuciones de la desviación estándar de presión de 90 % en Línea 1 y 71 % en Línea 2, y de temperatura de 81 % y 49 %. La dispersión del consumo aumentó 20 % y 19 %; se distingue así la mayor estabilidad operacional de la estimación de ahorro.

La memoria vinculó el diagnóstico de terreno con cálculos reproducibles, propuestas de intervención y criterios de aceptación. Además de las acciones ejecutadas, estableció una cartera priorizada que distingue las medidas valorizadas de aquellas que requieren ingeniería o cotización adicional. El resultado entregado a la planta comprende una línea base energética documentada, una evaluación económica de prefactibilidad y una secuencia de intervención sustentada en recuperación energética y criticidad operacional.

Palabras clave: sistema de vapor, condensado, eficiencia energética, trampas de vapor, consumo específico.

Abstract

This thesis develops a technical and economic assessment of the steam and condensate system at CMPC's Plywood Plant and establishes a prioritized portfolio of interventions to improve efficiency and reliability. The work combines P&ID review, field surveys, infrared thermography, HMI/SCADA records, production data, and thermal, thermodynamic, and mechanical models. The assessment covers two internal supply lines, three desuperheating stations, major consumers, drains, condensate return, pipe supports, instrumentation, and an inventory of 128 steam traps.

The assessment identified 63 m of piping with missing or deficient insulation, 14 valves without removable covers, and 11 traps classified as deficient: five open or passing steam internally and six closed or unable to drain adequately. It also found that none of the three desuperheaters has the minimum 6 m straight run set by the reference manual, and documented an injection-flow signal requiring correction, thermally active discharges in AK1, a deformed pipe support, and discrepancies between the installed configuration and the drawings. Integrating these findings enabled specific interventions and acceptance criteria to be defined for each problem.

The surface model quantified thermal losses of 237 kW. Pipe insulation and removable valve covers provide a modeled recovery potential of 3,649 t/year of steam equivalent, valued at USD 39,010 per year. Parametric scenarios for AK1 and open traps provide an additional reference of 3,032 t/year and USD 32,416 per year. The integrated reference potential reaches 6,682 t/year and USD 71,427 per year, explicitly separating modeled results from scenarios dependent on effective diameters. This assessment supports investment sequencing and defines economic thresholds to guide discharge measurements.

Records from January to June 2026 established an apparent specific steam consumption baseline of 974 kg of steam per cubic meter of veneer. The integrated energy normalization places the indicator at 963 kg/m^3, equivalent to a reference reduction of 11 t per 1,000 m^3. During the study, steam traps were replaced and the identification of 42 pressure points was formalized in the official drawings. The analysis prepared and validated by CMPC records post-replacement reductions in pressure standard deviation of 90 % in Line 1 and 71 % in Line 2, and reductions in temperature standard deviation of 81 % and 49 %, respectively. Consumption dispersion increased by 20 % and 19 %; the assessment thus distinguishes greater operational stability from estimated savings.

The thesis linked field diagnosis with reproducible calculations, intervention proposals, and acceptance criteria. In addition to the completed actions, it established a prioritized portfolio distinguishing costed measures from those requiring further engineering or quotations. The delivered outcome comprises a documented energy baseline, a prefeasibility economic assessment, and an intervention sequence supported by energy recovery and operational criticality.
Keywords: steam system, condensate, energy efficiency, steam traps, specific consumption.

Índice general

Resumen **i**

Abstract **ii**

Índice de figuras **viii**

Índice de tablas **xi**

Glosario de símbolos **xiv**

1 Introducción **1**
1.1 Contextualización del problema 1
1.2 Objetivos 2
1.2.1 Objetivo general 2
1.2.2 Objetivos específicos 2
1.3 Metodología 2

2 Fundamentos técnicos y descripción del sistema **3**
2.1 Fundamentos técnicos 3
2.1.1 Sistema de vapor y condensado en procesos industriales 3
2.1.2 Condición del vapor: temperatura y calidad 3
2.1.3 Red principal de vapor y pérdidas térmicas 4
2.1.4 Soportación, dilatación térmica y pendiente de cañería 5
2.1.5 Atemperación de vapor y distancia de mezcla 5
2.1.6 Separación de humedad y arrastre de condensado 6
2.1.7 Trampas de vapor y drenaje de condensado 6
2.1.8 Golpe de ariete en sistemas de vapor-condensado 7
2.1.9 Retorno de condensado y vapor flash 7
2.1.10 Termografía y priorización económica de mejoras 7
2.1.11 Documentación técnica, P&ID y condición real instalada 8
2.2 Descripción del sistema de Planta Plywood 8
2.2.1 Descripción general 8
2.2.2 Suministro y distribución de vapor 9
2.2.3 Sistema de atemperación 10
2.2.4 Equipos consumidores 11
2.2.5 Sistema de retorno y aprovechamiento del condensado 11
2.2.6 Sistema de trampas y puntos de drenaje 12
2.2.7 Instrumentación y control 12
2.2.8 Documentación técnica del sistema 13
2.3 Alcance y limitaciones 13

3 Evaluación del sistema y propuestas de mejora **14**
3.1 Condición general y criterios de evaluación . . . 14
3.2 Soportación de cañerías . . . 14
3.2.1 Condición observada . . . 14
3.2.2 Análisis y alcance mecánico . . . 15
3.2.3 Propuesta y validación . . . 17
3.3 Pérdidas térmicas en cañerías y válvulas . . . 18
3.3.1 Condición observada . . . 18
3.3.2 Cuantificación . . . 19
3.3.3 Modelo superficial y trazabilidad . . . 20
3.3.4 Aislación, mantos y evaluación económica . . . 21
3.3.5 Evaluación económica y prioridad . . . 22
3.3.6 Especificación y verificación . . . 23
3.4 Condición térmica del vapor y riesgo de condensado libre . . . 23
3.4.1 Evidencia disponible . . . 23
3.4.2 Análisis termodinámico y límites . . . 26
3.5 Sistema de atemperación . . . 28
3.5.1 Condición observada . . . 28
3.5.2 Balance termodinámico . . . 29
3.5.3 Propuesta y pruebas de aceptación . . . 30
3.6 Drenaje de condensado y trampas de vapor . . . 32
3.6.1 Condición observada . . . 32
3.6.2 Evaluación de modos de falla . . . 33
3.6.3 Recambio, economía y mantenimiento . . . 34
3.7 Sector AK1 . . . 36
3.7.1 Condición observada . . . 36
3.7.2 Análisis paramétrico . . . 38
3.7.3 Normalización y economía referencial . . . 39
3.8 Separación de gotas y control de humedad . . . 41
3.8.1 Equipo cotizado y evaluación paramétrica . . . 42
3.8.2 Instalación y aceptación del separador . . . 42
3.9 Instrumentación, P&ID y montaje real . . . 42
3.9.1 Brechas documentales y de montaje . . . 42
3.9.2 Impacto funcional . . . 44
3.9.3 Normalización y formalización documental . . . 45
3.10 Consumo específico aparente de vapor . . . 47
3.10.1 Base operacional . . . 47
3.10.2 Resultados e interpretación . . . 47
3.10.3 Efecto proyectado . . . 49
3.11 Evaluación integrada y priorización . . . 50
3.11.1 Potencial energético por nivel de evidencia . . . 50
3.11.2 Diámetro de equilibrio: qué debe demostrar la medición . . . 51
3.11.3 Inversión y periodos de recuperación . . . 52
3.11.4 Priorización y campaña de verificación . . . 53
3.11.5 Síntesis y condiciones de cierre . . . 53
3.11.6 Matriz de cierre técnico y criterios de verificación . . . 54

4 Conclusiones **56**

Referencias **58**

A Respaldo del cálculo de dilatación térmica **60**
A.1 Evidencia del apoyo inspeccionado 60
A.2 Curva de expansión térmica empleada 61
A.3 Desarrollo del cálculo 61
A.4 Modo de falla de un tramo con restricción axial 62
A.5 Solicitación de un apoyo fijo por fricción acumulada 63

B Respaldo del cálculo de atemperación mediante EES **64**
B.1 Capturas del modelo 64
B.2 Balance y variables 65
B.3 Verificación con IAPWS-IF97 66

C Respaldo termográfico de pérdidas en válvulas **67**
C.1 Secuencia de cálculo y verificación 67
C.2 Válvula 1 68
C.3 Válvula 2 69
C.4 Válvula 3 70
C.5 Válvula 4 71
C.6 Válvula 5 71
C.7 Válvula 6 72
C.8 Válvula 7 72
C.9 Válvula 8 73
C.10 Válvula 9 73
C.11 Válvula 10 74
C.12 Válvula 11 74
C.13 Válvula 12 75
C.14 Válvula 13 75
C.15 Válvula 14 76
C.16 Referencia de válvula con manto térmico 76

D Respaldo termográfico de pérdidas en cañerías y sector AK1 **77**
D.1 Criterio de cálculo para cañerías 77
D.2 Cañerías sin aislación por diámetro 77
D.2.1 Cañería de 1 1/2 pulgadas 77
D.2.2 Cañería de 2 pulgadas 78
D.2.3 Cañería de 4 pulgadas 78
D.2.4 Cañería de 6 pulgadas 79
D.2.5 Cañería de 8 pulgadas 79
D.2.6 Cañería de 10 pulgadas 80
D.2.7 Cañería de 12 pulgadas 80
D.2.8 Cañería de 16 pulgadas 81
D.3 Comparación térmica de superficies 81
D.4 Evidencia complementaria del sector AK1 83
D.5 Trampas del pipe rack: contraste entre operación y falla 84

E Inventarios complementarios del diagnóstico **86**
E.1 Inventario de válvulas sin manto térmico 86

E.2 Temperaturas registradas en aireadores del sector AK1 87

F Sensibilidades y datos complementarios de la evaluación 88
F.1 Desglose del escenario base de aireadores AK1 88
F.2 Sensibilidad de trampas abiertas 88
F.3 Sensibilidad de condensado no evacuado 88

G Respaldo técnico y económico de las propuestas 89
G.1 Priorización de aislación de cañerías 89
G.2 Costos de mantos térmicos para válvulas 91
G.3 Sensibilidad del potencial térmico 91
G.4 Lista de datos para selección de atemperador 92
G.5 Desglose económico del proyecto AK1 93
G.6 Recambio y mantenimiento de trampas 93
G.7 Datos del separador y umbral económico 94
G.8 Conciliación económica de prefactibilidad 94
G.9 Criterios de aceptación detallados por medida 94
G.10 Cotizaciones de respaldo documental 97

H Sensibilidad de la descarga a la fase y a la referencia energética 102
H.1 Modelo y propiedades 102
H.2 Datos de entrada 102
H.3 Convención energética común 103
H.4 Sensibilidad e interpretación 103

I Frontera de medición y alcance del balance de masa 104
I.1 Definición del volumen de control 104
I.2 Por qué las pérdidas cuantificadas no explican la diferencia 104
I.3 Interpretación admisible 105
I.4 Condiciones para un balance de masa completo 105

J Carga térmica transitoria de un tramo representativo 106
J.1 Balance y supuestos 106
J.2 Resultados por diámetro 106
J.3 Aplicación ilustrativa 106
J.4 Aplicación al drenaje y limitaciones 107

K Estimación idealizada de sobrepresión por movimiento de condensado 108
K.1 Modelo y parámetros 108
K.2 Sensibilidad a la variación de velocidad 108
K.3 Interpretación y límites 109

L Participación en el programa de certificación DS 10 110
L.1 Contexto normativo 110
L.2 Rol desempeñado 110
L.3 Estado consolidado del programa 111
L.4 Aporte al levantamiento de instrumentación 111
L.5 Otras actividades ejecutadas 112
L.6 Brechas identificadas y secuencia propuesta 112

L.7 Delimitación respecto del alcance de la memoria . . . 112

M Comparación operacional posterior al recambio de trampas 113
M.1 Condiciones y estadística descriptiva . . . 113
M.2 Cambios observados . . . 113
M.3 Interpretación y alcance de la validación . . . 114
M.4 Registro gráfico original . . . 115

N Registro fotográfico de daños y fugas asociados a condensado 117
N.1 Daño en radiadores de secadores . . . 117
N.2 Fuga en codo de la sala de vapor, Línea 1 . . . 118
N.3 Línea de drenaje hacia la descarga "sauna" . . . 119
N.4 Curvatura de una línea de aireación del sector AK1 . . . 120
N.5 Uso del registro y trazabilidad del diagnóstico . . . 121

O Propuesta de medición de condensado en la línea de vapor 122
O.1 Magnitud que se desea conocer . . . 122
O.2 Punto propuesto y frontera de medición . . . 122
O.3 Montaje de la estación de aforo propuesta . . . 122
O.4 Balance de masa e interpretación del resultado . . . 124
O.5 Alternativa de medición de vapor húmedo en línea . . . 124
O.6 Campaña, aceptación y uso económico . . . 125

P Información complementaria de la evaluación 127
P.1 Soportación de cañerías . . . 127
P.2 Pérdidas térmicas en cañerías y válvulas . . . 128
P.3 Condición térmica del vapor . . . 128
P.4 Sistema de atemperación . . . 131
P.5 Drenaje de condensado y trampas de vapor . . . 134
P.6 Sector AK1 . . . 135
P.7 Separación de gotas . . . 138
P.8 Instrumentación y P&ID . . . 138
P.9 Consumo específico aparente . . . 139
P.10 Evaluación integrada y cierre . . . 140

Q Registro previo a la corrección de señales de atemperación 142
Q.1 Tendencia de temperatura TIT2114 . . . 142
Q.2 Tendencia de presión PIT2116 . . . 142

Índice de figuras

2.1 Esquema general de generación, distribución, uso y recuperación en un sistema de vapor y condensado . . . 3
2.2 Diagrama entalpía–temperatura de las regiones de agua y vapor . . . 4
2.3 Disposición típica de trampas de vapor en una línea principal con pendiente 1:100 y puntos de drenaje cada 30 a 50 m . . . 7
2.4 Esquema general del sistema de vapor y condensado de Planta Plywood . . . 9
2.5 Diagrama simplificado del sistema de vapor y condensado de Planta Plywood 10

3.1 Condición observada del apoyo y detalle constructivo de referencia . . . 15
3.2 Evidencia termográfica representativa de superficies expuestas en la red principal . . . 19
3.3 Pérdida actual modelada y condición aislada de referencia . . . 22
3.4 Coexistencia de vapor sobrecalentado y condensado libre estratificado . . . 25
3.5 Evidencia representativa del sector AK1 . . . 37
3.6 Comparación entre disposición actual y modificación propuesta en AK1 . . . 40
3.7 Comparación del drenaje del separador VC1-SEP-009 . . . 44
3.8 Comparación del P&ID antes y después de incorporar manómetros y TAG . 46
3.9 Evolución mensual del consumo específico aparente de vapor . . . 48
3.10 Comparación de los totalizadores acumulados de CELPAC y Plywood . . . 49
3.11 Consumo específico mensual observado y reducción equivalente referencial . . 50
3.12 Potencial energético anual y recuperación simple por medida . . . 51

A.1 Registro visual y termográfico del apoyo deformado . . . 60
A.2 Curva de expansión térmica utilizada para acero al carbono . . . 61

B.1 Interfaz ilustrativa del modelo EES . . . 64
B.2 Modelo EES de la Línea 2 . . . 64
B.3 Modelos EES de las dos etapas de Línea 1 . . . 65

C.1 Válvula V1: Línea 2, cuerpo de 50 cm, 233,9 °C . . . 68
C.2 Válvula V2: Línea 2, cuerpo de 30 cm, 156,6 °C . . . 69
C.3 Válvula V2 (continuación): Línea 2, cuerpo de 30 cm, 156,6 °C . . . 69
C.4 Válvula V3: Línea 1, cuerpo de 30 cm, 236,3 °C . . . 70
C.5 Válvula V3 (continuación): Línea 1, cuerpo de 30 cm, 236,3 °C . . . 70
C.6 Válvula V4: Línea 2, cuerpo de 50 cm, 224,3 °C . . . 71
C.7 Válvula V5: Línea 2, cuerpo de 50 cm, 250,1 °C . . . 71
C.8 Válvula V6: Línea 2, cuerpo de 50 cm, 239,4 °C . . . 72
C.9 Válvula V7: Línea 1, cuerpo de 50 cm, 147,6 °C . . . 72
C.10 Válvula V8: Línea 2, cuerpo de 50 cm, 209,0 °C . . . 73
C.11 Válvula V9: Línea 2, cuerpo de 30 cm, 240,3 °C . . . 73
C.12 Válvula V10: Línea 2, cuerpo de 50 cm, 223,6 °C . . . 74

C.13 Válvula V11: Línea 1, cuerpo de 47 cm, 239,5 °C 74
C.14 Válvula V12: Línea 1, cuerpo de 32 cm, 229,4 °C 75
C.15 Válvula V13: Línea 1, cuerpo de 47 cm, 228,2 °C 75
C.16 Válvula V14: Línea 1, cuerpo de 40 cm, 209,6 °C 76
C.17 Condición superficial de referencia con manto térmico instalado 76

D.1 Registro termográfico de cañería de 1 1/2 pulgadas sin aislación 77
D.2 Registro termográfico de cañería de 2 pulgadas sin aislación 78
D.3 Registro termográfico de cañería de 4 pulgadas sin aislación 78
D.4 Registro termográfico de cañería de 6 pulgadas sin aislación 79
D.5 Registro termográfico de cañería de 8 pulgadas sin aislación 79
D.6 Registro termográfico de cañería de 10 pulgadas sin aislación 80
D.7 Registro termográfico de cañería de 12 pulgadas sin aislación 80
D.8 Registro termográfico de cañería de 16 pulgadas sin aislación 81
D.9 Referencia adicional de válvulas sin manto térmico 81
D.10 Referencias de cañerías de vapor sin aislación térmica 82
D.11 Referencias de cañerías de vapor sin aislación térmica 82
D.12 Referencias de cañerías con aislación térmica 83
D.13 Termografías de trampas de vapor del sector AK1 83
D.14 Termografías de la línea de drenaje de condensado del sector AK1 84
D.15 Evidencia visual de fallas observadas en el sector AK1 84
D.16 Termografías del pipe rack 85

G.1 Extracto de cotización del proyecto AK1 97
G.2 Cotización del separador de gotas Línea 2/AK1, QT-5606.2602.0603-Rev.00 . 98
G.3 Cotización de diez trampas termodinámicas TD62M, QT-5606.2602.9213-Rev.00 99
G.4 Cotización de la trampa de flotador y termostática FT44-32 TV, QT-5606.2603.2701-Rev.00 100
G.5 Cotización del servicio de aislación térmica 101

M.1 Dispersión posterior normalizada a la condición anterior igual a 100 114
M.2 Línea 1: presión y temperatura antes y después 115
M.3 Línea 2: presión y temperatura antes y después 116

N.1 Daños y recambio de radiadores 118
N.2 Fuga en un codo de 90° con conexiones bridadas de la sala de vapor, Línea 1 119
N.3 Línea de drenaje hacia la descarga “sauna” 120
N.4 Curvatura de una línea de aireación y válvula de AK1 121

O.1 Esquema funcional de aforo del drenaje del separador 123
O.2 Ubicación conceptual de un medidor especializado en la sección principal . . 125

P.1 Secuencia funcional para normalizar el apoyo deformado 127
P.2 Acciones del modelo local deslizante 127
P.3 Pantalla de secadores del sistema de control, 29 de enero de 2026 129
P.4 Pantalla de distribución de vapor del sistema de control, junio de 2026 . . . 130
P.5 Atemperador VC1-ENF-601 de la Línea 2 instalado en Planta Plywood . . . 132
P.6 Tramo recto disponible aguas abajo de los atemperadores de la Línea 1 . . . 132
P.7 Selección de instrumentos del lazo de temperatura de la atemperación 133

P.8 Secuencia de decisión para normalizar la atemperación 133
P.9 Sensibilidad de la pérdida estimada para las cinco trampas abiertas 135
P.10 Sensibilidad de la pérdida estimada al diámetro efectivo de fuga en AK1 . . 136
P.11 Pantalla de proceso del secador AK1, 2 de julio de 2026 136
P.12 Tendencias de temperatura por zona del secador AK1, 2 de julio de 2026 . . 137
P.13 Función propuesta del separador de gotas en la Línea 2 138
P.14 Comparación del consumo específico aparente con la normalización energética integrada 139

Q.1 Temperatura TIT2114 antes de la corrección 142
Q.2 Presión PIT2116 antes de la corrección 142

Índice de tablas

3.1 Idealizaciones mecánicas y límites de interpretación. 17
3.2 Secuencia de ejecución y evidencia requerida en soportación. 18
3.3 Parámetros generales y origen de la cuantificación térmica. 20
3.4 Pérdidas actuales reconstruidas mediante balance superficial. 20
3.5 Comparación con el escenario de superficies aisladas de referencia. 22
3.6 Evaluación económica referencial de las mejoras térmicas. 23
3.7 Secuencia recomendada para las intervenciones térmicas. 23
3.8 Registros representativos de presión y temperatura en la red, agrupados por margen de sobrecalentamiento 24
3.9 Condensado potencial local y humedad equivalente. 27
3.10 Distancias levantadas aguas abajo de cada atemperador. 28
3.11 Resultados del modelo EES de atemperación. 30
3.12 Decisión recomendada para cada condición de atemperación. 31
3.13 Comparación de alternativas para el punto de 2,5 m. 31
3.14 Distribución de trampas registradas y unidades deficientes por sector. 32
3.15 Resultado base para las cinco trampas abiertas o con paso interno. 33
3.16 Tratamiento diferenciado de los modos de falla de trampas. 34
3.17 Evaluación económica resumida del recambio. 35
3.18 Programa mínimo de mantenimiento y metas. 36
3.19 Síntesis de evidencias del sector AK1. 37
3.20 Condiciones utilizadas para los siete aireadores de AK1. 38
3.21 Sensibilidad de la pérdida total estimada en los aireadores AK1. 39
3.22 Evaluación técnico-económica resumida del proyecto AK1. 40
3.23 Barreras para controlar condensado libre y humedad arrastrada. 41
3.24 Sensibilidad económica del separador a un ahorro equivalente verificado, con 8.400 h/año. 42
3.25 Brechas documentales y funcionales consolidadas. 43
3.26 Criticidad técnica de las brechas entre documentación y terreno. 45
3.27 Consumo específico aparente mensual por línea. 47
3.28 Resumen acumulado del periodo evaluado. 48
3.29 Potencial anual según nivel de evidencia; totales calculados antes del redondeo. 50
3.30 Escenarios paramétricos de referencia, separados del modelo térmico. 50
3.31 Diámetro efectivo mínimo que justifica cada inversión según el periodo de recuperación exigido. 52
3.32 Inversión y recuperación simple de las medidas cuantificadas. 52
3.33 Hoja de ruta recomendada. 53
3.34 Indicadores de verificación antes-después. 53
3.35 Matriz final de resultados, medidas y evidencia requerida. 55

A.1 Síntesis de la evaluación mecánica del tramo representativo. 62

A.2 Comparación formal entre Euler y fluencia para longitudes efectivas adoptadas. 62
A.3 Fricción acumulada idealizada mediante $F = \mu w L$. 63

B.1 Verificación independiente de cada caso con IAPWS-IF97 66

C.1 Secuencia de cálculo y verificación aplicada a las válvulas sin manto térmico. 67

D.1 Secuencia de cálculo aplicada a los tramos de cañería sin aislación. 77

E.1 Válvulas sin manto térmico identificadas en la red principal. 86
E.2 Trazabilidad de áreas, temperaturas y pérdidas en válvulas. 86
E.3 Registro termográfico de aireadores del sector AK1. 87

F.1 Pérdida estimada por sector para deff = 3 mm. 88
F.2 Pérdida potencial para cinco trampas según diámetro efectivo. 88
F.3 Escenarios para seis trampas cerradas o con drenaje insuficiente. 88

G.1 Resultado por diámetro de la aislación propuesta. 89
G.2 Datos superficiales y resultados por diámetro. 89
G.3 Correspondencia entre los valores adoptados y las celdas de la planilla de levantamiento. 90
G.4 Materiales de aislación: cantidades y costos unitarios adoptados. 91
G.5 Partidas conservadas de la cotización y presupuesto adaptado. 91
G.6 Costos unitarios e inversión referencial. 91
G.7 Sensibilidad determinista del potencial térmico; no son intervalos de confianza. 92
G.8 Información mínima para solicitar selección al proveedor. 92
G.9 Componentes e inversión del proyecto AK1. 93
G.10 Suministro cotizado para las 11 trampas. 93
G.11 Plan detallado de inspección de trampas. 93
G.12 Resumen de la cotización del separador de Línea 2. 94
G.13 Conversión común utilizada para el subconjunto cuantificable. 94
G.14 Condición funcional requerida para el apoyo intervenido. 95
G.15 Indicadores de cierre para aislación y mantos térmicos. 95
G.16 Pruebas de aceptación del sistema de atemperación. 95
G.17 Criterios de aceptación posterior en AK1. 96
G.18 Requisitos mínimos de selección por punto. 96
G.19 Criterios de aceptación del separador de gotas. 96

H.1 Propiedades de entrada y flujo crítico para los dos estados idealizados. . . . 102
H.2 Comparación de fase con referencia energética común. 103
H.3 Sensibilidad al diámetro con la misma referencia energética. 103

I.1 Ubicación de cada pérdida respecto de la frontera de medición. 105

J.1 Condensado teórico por 100 m, geometría de referencia *Schedule* 40. 106
J.2 Caudal medio de calentamiento del tramo representativo de 500 m, NPS 12 *Schedule* 80. 107

K.1 Geometrías *Schedule* 40 y velocidades de referencia. 108
K.2 Incremento ideal de presión con $a = 968$ m/s y $\rho = 840$ kg/m^3. 108

L.1 Estado consolidado del programa DS 10 al cierre del seguimiento documentado. 111

L.2 Puntos de instrumentación regularizados en ingeniería base. 111

M.1 Medias y desviaciones estándar de las ventanas disponibles 113
M.2 Cambio de dispersión y nivel medio 113

O.1 Alternativas de observación y medición del condensado. 122
O.2 Condiciones para aceptar una medición de condensado. 126

P.1 Sensibilidad a la emisividad de las cañerías aisladas, con temperaturas fijas y mantos sin modificar. 128
P.2 Sensibilidad de la evaluación térmica al costo unitario de vapor. 128
P.3 Resumen de exposición térmica identificada en la red principal. 128
P.4 Evidencias utilizadas para evaluar el riesgo de condensado libre. 129
P.5 Comparación presión-temperatura en puntos representativos, con identificación del instrumento de origen. 131
P.6 Matriz integrada de factores que afectan la condición efectiva del vapor. . . . 131
P.7 Instrumentación relevante para el diagnóstico de atemperación. 134
P.8 Estado y tipología de las trampas registradas. 134
P.9 Clasificación funcional de las trampas deficientes. 134
P.10 Alcance y resultado esperado del recambio de trampas. 135
P.11 Transformación funcional del sistema AK1. 138
P.12 Flujo de formalización documental de referencia. 138
P.13 Alcance de la normalización del drenaje. 139
P.14 Comparación funcional del drenaje del separador VC1-SEP-009. 139
P.15 Información utilizada para evaluar el desempeño operacional. 139
P.16 Síntesis final de decisión, inversión y efecto esperado. 140
P.17 Criterio de aceptación y evidencia asociada por medida propuesta. 140
P.18 Evidencias mínimas para el cierre técnico de las propuestas. 141

Glosario de símbolos

Símbolos y abreviaturas utilizados en la memoria

Símbolo	Definición	Unidad
Símbolos latinos		
A	Área efectiva de fuga o área superficial expuesta	m^2
a	Velocidad de propagación de la onda de presión	m/s
b	Brazo del momento sobre la cabeza del apoyo	m
C_d	Coeficiente de descarga	–
$c_{p,\text{acero}}$	Calor específico del acero al carbono	kJ/(kg K)
c_{pl}	Calor específico del líquido saturado	kJ/(kg K)
D_e	Diámetro exterior de la cañería	m
D_i	Diámetro interior de la cañería	m
d_{eff}	Diámetro efectivo de fuga	mm
E	Módulo de elasticidad del acero	Pa
e	Excentricidad de la carga vertical respecto del eje del apoyo	m
F	Fuerza de fricción transmitida al apoyo	kN
F_y	Componente lateral de la fuerza sobre la cabeza del apoyo	kN
G	Flujo másico crítico por unidad de área	kg/(m^2 s)
H_{eq}	Humedad equivalente	%
h	Coeficiente de transferencia de calor por convección	W/(m^{2}K)
h_f, h_g	Entalpía específica de líquido y vapor saturados	kJ/kg
h_{fg}	Calor latente de vaporización	kJ/kg
h_{op}	Horas anuales de operación	h/año
I_{base}	Consumo específico aparente de referencia	t/m^3
I_v	Consumo específico aparente de vapor	t/m^3
K	Módulo de compresibilidad del líquido	Pa
k	Coeficiente isentrópico del vapor	–
L	Longitud inicial o longitud expuesta de tubería	m
L_s	Separación tributaria entre apoyos	m
M_e	Momento por excentricidad de la carga vertical	kN m
M_f	Momento por fricción sobre la cabeza del apoyo	kN m
M_{tot}	Momento local total sobre el apoyo	kN m
$\dot{m}$	Caudal másico	kg/s o kg/h
$\dot{m}_{\text{cond}}$	Condensado generado o no evacuado	kg/h
$\dot{m}_{\text{eq}}$	Vapor equivalente perdido	kg/h
m_{tubo}	Masa metálica de la cañería	kg
m_v	Masa de vapor registrada	t
N	Carga vertical sobre el apoyo	kN
P_1	Presión absoluta aguas arriba	Pa
$\dot{Q}_{\text{actual}}$	Pérdida térmica actual	W o kW
$\dot{Q}_{\text{post}}$	Pérdida térmica posterior a la mejora	kW
$\dot{Q}_{\text{red}}$	Potencia térmica reducible	kW
$\dot{Q}_{\text{servicio}}$	Carga térmica asociada al tramo o equipo	kW
q'	Flujo de calor por unidad de longitud	W/m
R	Constante específica del vapor de agua	J/(kg K)
$R_{\text{cond,pared}}$	Resistencia conductiva de la pared	m K/W
$R_{\text{conv,int}}$	Resistencia convectiva interna	m K/W
$R_{\text{conv-rad,ext}}$	Resistencia externa por convección y radiación	m K/W
R_{tot}	Resistencia térmica total por unidad de longitud	m K/W
$r_{\text{int}}, r_{\text{ext}}$	Radios interior y exterior de una capa	m

Símbolo	Definición	Unidad
s	Factor de escala aplicado al diámetro efectivo	–
T_1	Temperatura absoluta aguas arriba	K
T_i	Temperatura del fluido interno	K
T_s	Temperatura superficial en el balance exterior	°C
T_∞	Temperatura del aire en el balance superficial	°C
T_{os}	Temperatura radiante media de los alrededores	°C
t	Espesor de pared de la cañería	m
t_{cal}	Tiempo de calentamiento en puesta en marcha	min
V_{chapa}	Volumen de chapa producido	m^3
v_{l0}	Volumen específico del líquido aguas arriba	m^3/kg
v_{lg}	Diferencia de volumen específico entre vapor y líquido	m^3/kg
w	Peso lineal de la cañería con aislación y vapor	N/m
Símbolos griegos		
α	Coeficiente de expansión térmica lineal	$^\circ\text{C}^{-1}$
ΔL	Expansión térmica lineal	m
ΔP_{ef}	Diferencia de presión efectiva para descarga	bar
Δp	Sobrepresión transitoria por golpe de ariete	bar
ΔT	Diferencia de temperatura entre montaje y operación	°C
Δv	Variación de velocidad del tapón de líquido	m/s
ε	Emisividad superficial	–
θ	Ángulo de desalineación respecto de la expansión	°
μ	Coeficiente de fricción estático acero–acero	–
ρ	Densidad del fluido	kg/m^3
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$
ω	Parámetro omega de Leung para descarga bifásica	–

1 Introducción

1.1 Contextualización del problema

En los sistemas industriales que utilizan vapor como medio de transferencia de calor, el desempeño global no depende solo de la generación: también lo determinan la distribución, el acondicionamiento, el control, el drenaje y el retorno de condensado a lo largo de toda la red. La Planta Plywood de CMPC opera un sistema de este tipo, del que dependen sus secadores de chapa, sus prensas y el acondicionamiento térmico de la madera. Cuatro condiciones lo hacen particularmente sensible: la extensión de sus líneas, la presencia de tres estaciones de atemperación, la coexistencia de vapor y condensado dentro de la misma red y la dependencia del suministro proveniente de Planta Celulosa Pacífico. Sobre esas condiciones actúan los fenómenos que se describen a continuación.

El primero de esos fenómenos corresponde a las pérdidas térmicas durante el transporte. Aunque la red esté aislada, siempre existe transferencia hacia el ambiente, y la magnitud crece cuando hay tramos descubiertos, aislación deteriorada o válvulas sin manto térmico. En líneas extensas esa disipación consume el margen de sobrecalentamiento y favorece la formación de condensado, de modo que su efecto no se agota en el costo energético directo: también degrada la condición del vapor que llega a los equipos.

Esa degradación se manifiesta como humedad o gotas arrastradas junto al flujo, que reducen la energía útil disponible, introducen inestabilidad térmica en secadores y prensas y exigen drenaje y separación adecuados. El arrastre no siempre se elimina con drenajes gravitacionales, porque parte del líquido viaja suspendido y no decanta al fondo de la cañería. A ello contribuye la atemperación cuando el condensado inyectado no alcanza a atomizarse, mezclarse y evaporarse antes de un codo, una derivación o un sensor, condición que depende de la atomización, la presión diferencial y la longitud recta disponible.

El condensado que sí se forma debe retirarse oportunamente mediante trampas, drenajes y líneas de retorno. Las trampas defectuosas producen dos efectos opuestos e igualmente perjudiciales: abiertas dejan escapar vapor vivo, y cerradas impiden la evacuación y permiten que el líquido se acumule en puntos bajos, reduciendo la sección útil de paso. Esa acumulación incrementa el riesgo de golpe de ariete, en el que masas de agua aceleradas por el vapor impactan accesorios y equipos con esfuerzos capaces de dañar soportes, uniones y componentes.

A lo anterior se suman dos condiciones estructurales. La expansión térmica de las líneas exige apoyos, guías y puntos fijos que absorban el alargamiento; si el trazado queda restringido o mal soportado, los esfuerzos se transmiten a codos, bridas y equipos, y la pérdida de pendiente genera zonas de acumulación. Por último, las diferencias entre la documentación de diseño y el montaje real —reducciones no documentadas, cambios de espesor de pared, manómetros ausentes del P&ID e instrumentación sin identificador— dificultan el diagnóstico y pueden alterar la interpretación operacional del sistema.

En conjunto, los fenómenos descritos muestran que el problema no puede atribuirse a una única causa ni abordarse solamente desde la falla de componentes individuales: se trata de una condición sistémica en la que las pérdidas térmicas, la atemperación, el arrastre y la acumulación de condensado, las solicitaciones mecánicas por expansión y las limitaciones de instrumentación interactúan entre sí. Ese enfoque integrado coincide con el de la literatura sobre eficiencia de sistemas de vapor industriales (Salimi et al., 2023), con estudios previos del sector papelero y forestal latinoamericano (Jaramillo Ortiz, 2010; Escobar Brandell, 2013) y con las guías de buenas prácticas de la región (Chemonics International Inc. y Consultoría

y Servicios en Tecnologías Eficientes, 2011). Bajo este marco, el estudio se justifica como un diagnóstico integral que identifica las fuentes de ineficiencia energética, operacional y económica de la red y sustenta propuestas de mejora para la planta.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar la eficiencia y confiabilidad del sistema de vapor y condensado de la Planta Plywood de CMPC, identificando pérdidas, deficiencias operacionales y oportunidades de mejora.

1.2.2 Objetivos específicos

OE1. Establecer la condición actual de la red de vapor y condensado, considerando red, equipos, instrumentación y documentación disponible.

OE2. Diagnosticar las principales deficiencias asociadas a pérdidas térmicas, calidad de vapor, atemperación, drenaje, trampas y soportación.

OE3. Cuantificar el impacto energético y económico de las deficiencias detectadas en el sistema.

OE4. Proponer mejoras técnicas orientadas a reducir pérdidas, mejorar la gestión del condensado y aumentar la confiabilidad operacional.

1.3 Metodología

La metodología se estructura en función de los objetivos y compara la documentación disponible, la condición real instalada en terreno y el comportamiento efectivo del sistema durante la operación. El trabajo se organiza en cuatro etapas. La primera delimita el alcance físico y funcional de la red y contrasta planos P&ID, antecedentes de proyectos previos, registros operacionales, cotizaciones y documentación de equipos.

La segunda corresponde al levantamiento en terreno, orientado a verificar la configuración real. Comprende la identificación de líneas, reducciones, cambios de diámetro nominal y de espesor de pared —la serie *Schedule* del estándar ASME B36.10M, que fija el espesor para un mismo diámetro exterior—, válvulas, manómetros, trampas, drenajes y soportes, con registro fotográfico y termográfico. Incluye además la actualización de la representación del sistema en AutoCAD con los componentes observados que no figuraban en los planos originales.

La tercera desarrolla el diagnóstico por subsistema. Las pérdidas térmicas de cañerías y válvulas expuestas se evalúan a partir de termografía, geometría y condiciones de operación; la atemperación, mediante un modelo termodinámico en EES y la verificación de la distancia de mezcla; el drenaje y las trampas, clasificando las unidades defectuosas entre fallas abiertas, asociadas a pérdida de vapor, y fallas cerradas o con drenaje insuficiente, asociadas a retención de condensado. El sector AK1 se trata como caso específico para diferenciar vapor vivo, vapor flash y condensado, y los aspectos mecánicos mediante la expansión térmica de tramos representativos y la condición real de apoyos, guías y pendientes.

La cuarta etapa cuantifica e integra: calor disipado, vapor equivalente perdido, costo operativo anual y, cuando corresponde, periodo simple de recuperación de las inversiones. Sobre esa base se identifican las brechas del sistema y se formulan las propuestas de mejora.

2 Fundamentos técnicos y descripción del sistema

2.1 Fundamentos técnicos

2.1.1 Sistema de vapor y condensado en procesos industriales

En procesos industriales, el vapor se utiliza como medio de transporte de energía térmica debido a su capacidad para entregar calor de forma controlada en equipos ubicados a distintas distancias del punto de suministro. Un sistema de vapor y condensado debe entenderse como un circuito integrado compuesto por la generación o suministro de vapor, la red de distribución, los equipos consumidores, los drenajes, las trampas de vapor, la recuperación de condensado y la instrumentación de control.

Esta mirada sistémica es fundamental para el diagnóstico de redes complejas, ya que una desviación local puede afectar severamente el desempeño global. Una pérdida térmica, una trampa defectuosa, una mala evacuación de condensado o una condición inadecuada de atemperación pueden traducirse en menor disponibilidad de vapor útil, variaciones de temperatura, mayor consumo energético y riesgos operacionales. Los manuales de eficiencia recomiendan analizar estos sistemas como un conjunto interdependiente, ya que las mejoras en una parte de la red modifican el comportamiento fluido-dinámico de las demás (U.S. Department of Energy, 2012).

La Figura 2.1 ilustra esta organización en cuatro áreas y la posición relativa de sus componentes.

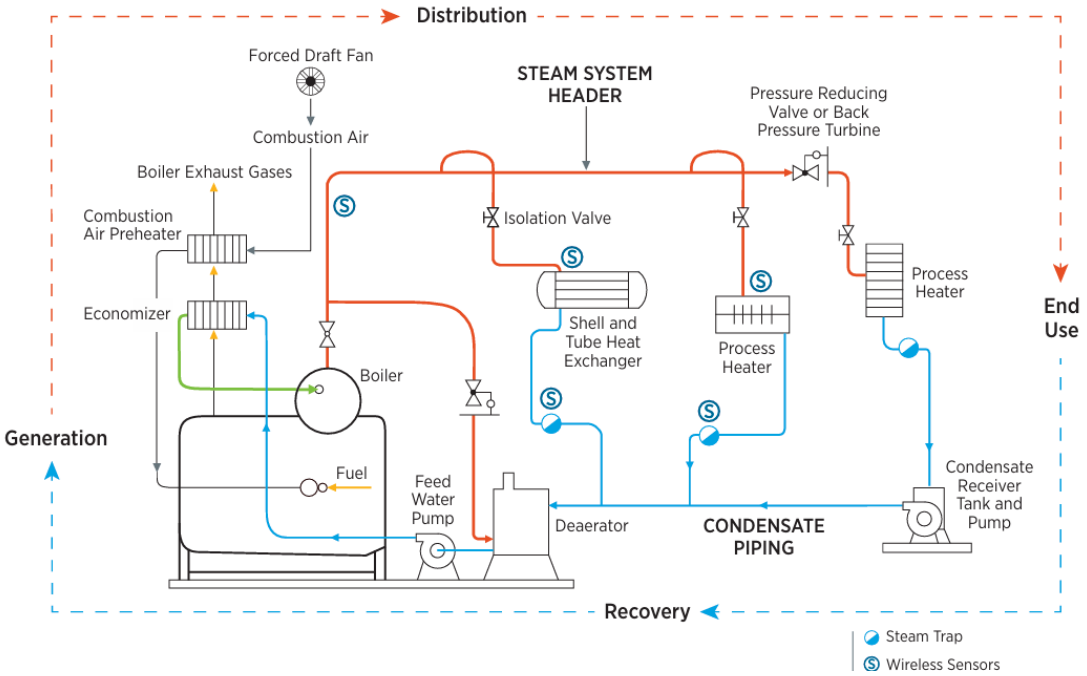


Figura 2.1. Esquema general de generación, distribución, uso y recuperación en un sistema de vapor y condensado. Fuente: EZ-pdh (s. f.), sobre el esquema de cuatro áreas de U.S. Department of Energy (2012).

2.1.2 Condición del vapor: temperatura y calidad

En una fase simple, presión y temperatura permiten determinar el estado termodinámico del agua. En una mezcla saturada en equilibrio ambas son dependientes y se requiere otra propiedad, como la calidad del vapor, para establecer la proporción de fases. La calidad —denominada también título y designada x— corresponde a la fracción másica de vapor en

la mezcla, de modo que $x = 1$ representa vapor seco saturado y $x = 0$ líquido saturado; ambos términos se emplean indistintamente en esta memoria. Una red puede transportar vapor seco, mezcla húmeda o vapor sobrecalentado con gotas fuera de equilibrio. La presencia de líquido reduce la energía transportada por unidad de masa y favorece la acumulación en líneas y equipos.

En los sistemas de distribución, la reducción de presión mediante válvulas reguladoras (PRV) ocurre a través de un proceso de estrangulamiento aproximadamente isentálpico. Dependiendo de la condición inicial del vapor, esta reducción de presión puede mejorar su calidad o generar una condición levemente sobrecalentada aguas abajo. En redes interconectadas la calidad del vapor se aborda como condición límite crítica en el punto de suministro, evaluando indicios indirectos de humedad o arrastre a partir de los registros de temperatura del sistema de control y de la evidencia termográfica en terreno.

Es importante señalar que la temperatura por sí sola no confirma directamente la calidad del vapor, pero permite identificar desviaciones respecto a la condición de saturación esperada y justificar análisis complementarios sobre el funcionamiento de las estaciones de trampeo y separación de humedad.

La Figura 2.2 sitúa estas condiciones sobre el diagrama de fases del agua.

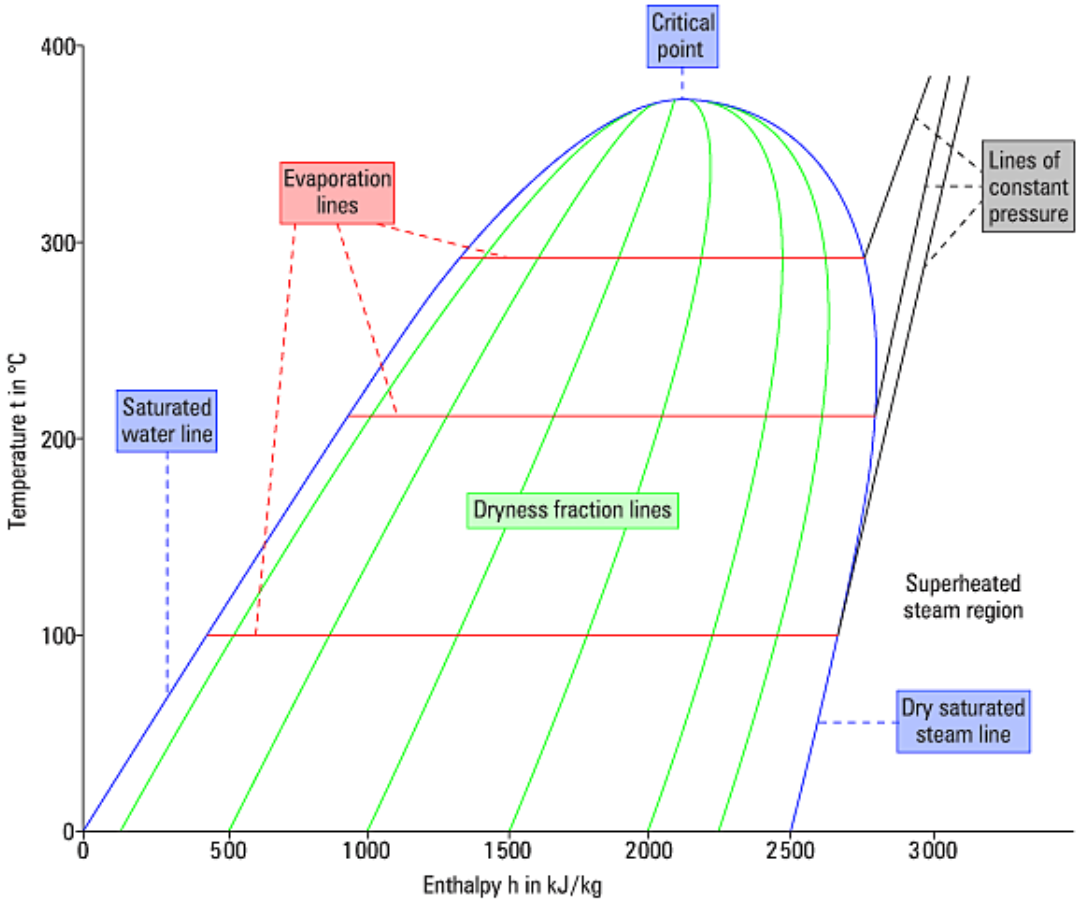


Figura 2.2. Diagrama entalpía–temperatura de las regiones de agua y vapor. Fuente: Spirax Sarco (s. f.-a), *What is steam?*, figura 2.2.3.

2.1.3 Red principal de vapor y pérdidas térmicas

Durante el transporte por cañerías, el vapor pierde energía hacia el ambiente a través de las superficies calientes de las tuberías, válvulas y accesorios (Spirax-Sarco S.A., s. f.). Estas pérdidas térmicas aumentan cuando existen tramos sin aislación, aislación deteriorada

o válvulas sin mantos térmicos removibles. Además del costo energético directo asociado a la disipación, la pérdida de calor favorece la condensación prematura dentro de la línea, lo que incrementa la carga sobre los drenajes.

La aislación térmica permite disminuir la temperatura superficial expuesta y reducir el flujo de calor hacia el entorno por mecanismos de convección y radiación. En redes de vapor, las válvulas y bridas suelen ser puntos críticos porque muchas veces quedan descubiertas para facilitar labores de operación o mantenimiento. Al respecto, el Departamento de Energía de Estados Unidos señala que la aislación de superficies calientes reduce las pérdidas de energía y ayuda a mantener la presión adecuada en los equipos de planta, y recomienda evaluar la aislación de superficies calientes, especialmente aquellas sobre 49 °C (U.S. Department of Energy, 2006).

2.1.4 Soportación, dilatación térmica y pendiente de cañería

Las cañerías de vapor trabajan a temperaturas elevadas, por lo que experimentan una dilatación térmica significativa respecto a su condición de montaje. Si el diseño estructural de la línea no cuenta con apoyos deslizantes, guías, anclajes o grados de libertad adecuados, la expansión puede generar desplazamientos no deseados, transmisión de esfuerzos mecánicos sobre los soportes, pérdida de alineamiento y deformaciones permanentes en terreno.

La soportación también influye directamente en la evacuación del condensado. Una línea deformada por estrés térmico pierde su pendiente original y forma concavidades donde el líquido se acumula. Esto reduce el área efectiva para el flujo de vapor y aumenta la probabilidad de ocurrencia de transitorios hidráulicos. Por ello, la evaluación de la soportación no debe limitarse exclusivamente a la integridad mecánica estructural, sino que debe analizarse por su relación directa con el drenaje y la confiabilidad operacional de la red (Spirax Sarco, s. f.-b).

2.1.5 Atemperación de vapor y distancia de mezcla

El proceso de atemperación (o desobrecalentamiento) permite reducir la temperatura del vapor mediante la inyección controlada de agua o condensado, de manera que el flujo resultante alcance una condición termodinámica compatible con los requerimientos del proceso. Para que el sistema funcione correctamente y evite el daño a los componentes, el líquido inyectado debe atomizarse, mezclarse y evaporarse en su totalidad dentro de la línea antes de llegar a codos, válvulas, sensores o derivaciones.

La distancia disponible aguas abajo del atemperador es un criterio geométrico y termodinámico relevante. Si el equipo se ubica demasiado cerca de una perturbación geométrica, la mezcla térmica puede no completarse y dejar líquido libre que viaja a alta velocidad dentro de la tubería. La validación técnica de un atemperador debe abordarse desde dos enfoques: el modelamiento termodinámico del proceso de absorción de calor y la verificación de las limitaciones físicas de montaje recomendadas por la industria.

Criterios de distancia declarados por los fabricantes

La literatura técnica entrega tres referencias de distinta naturaleza. La primera es una regla de proporción: la longitud de evaporación se estima entre 10 y 20 diámetros de tubería y depende del tamaño de gota, de la velocidad del vapor y de la presión (Spirax Sarco Chile Ltda., 2026b). La segunda es un rango de práctica de 2,5 a 7,5 m de tramo recto, según el tipo de atemperador, la presión, la temperatura, el caudal y el grado de atomización (Spirax Sarco, Inc., 2004), consistente con la documentación de otros fabricantes (Celeros Flow Technology, s. f.; Emerson, s. f.).

La tercera es un mínimo de montaje. El manual de instalación del atemperador de área

variable VAD de Spirax Sarco establece un tramo recto de al menos 6 m antes de un codo y recomienda proteger ese codo frente a la erosión; fija además que el sensor de temperatura se instale a no menos de 12 m aguas abajo del equipo, o directamente en el punto de consumo para un control óptimo, y que la presión del agua de inyección supere a la del vapor en más de 5 bar (Spirax Sarco, s. f.-d).

Esta memoria adopta el mínimo de 6 m del manual de Spirax Sarco como criterio de evaluación, por ser el único expresado como un valor verificable en terreno con una sola medición; las otras dos referencias se conservan como contraste. La distancia se mide entre el plano de inyección y la tangente del primer accesorio que interrumpe el flujo recto.

2.1.6 Separación de humedad y arrastre de condensado

El arrastre ocurre cuando la fase gaseosa del vapor transporta físicamente gotículas de condensado o humedad en suspensión a altas velocidades. Esta anomalía puede originarse en deficiencias del bloque de generación de vapor, en las pérdidas térmicas acumuladas en la red, en drenajes insuficientes o en procesos de mezcla incompletos de atemperación. Cuando la fase líquida avanza con el vapor, puede reducir la eficiencia de transferencia de calor y aumentar el desgaste erosivo de componentes internos.

Los separadores de gotas (tipo impacto o ciclónicos) se utilizan para remover mecánicamente la humedad libre del flujo antes de que este ingrese a consumidores críticos. Su aplicación debe considerar el perfil de instalación, el caudal másico, la caída de presión admisible y la descarga continua del condensado separado mediante una trampa apropiada. Adicionalmente, en las redes de retorno donde convergen condensado presurizado y vapor flash, pueden generarse flujos bifásicos e inestabilidades hidráulicas, por lo que la segregación oportuna de las fases es una condición relevante para la seguridad operacional (Spirax-Sarco Limited, 2005).

2.1.7 Trampas de vapor y drenaje de condensado

Las trampas de vapor se definen técnicamente como válvulas automáticas autoactuadas, cuya función es descargar el condensado y los gases incondensables del sistema, cerrándose frente al paso de vapor vivo (TLV Co., Ltd., s. f.-a). Su correcta selección e instalación dependen de las condiciones del servicio, la presión diferencial operativa, la tasa de condensación y el tipo de descarga requerido.

Los modos de falla se agrupan, de forma práctica, en fallas “abiertas” y “cerradas”. Una trampa abierta permite el paso de vapor vivo hacia el retorno o el ambiente. El impacto neto depende del destino de esa energía y de su recuperación; no toda fuga interna equivale a una pérdida atmosférica. Una trampa cerrada retiene condensado en el equipo o la línea, reduciendo la capacidad de transferencia térmica e incrementando la probabilidad de acumulación de líquido. Por ello, el diagnóstico de trampas debe integrar funcionamiento, drenaje y frontera energética.

La Figura 2.3 muestra la disposición recomendada de pendiente y puntos de drenaje en una línea principal.

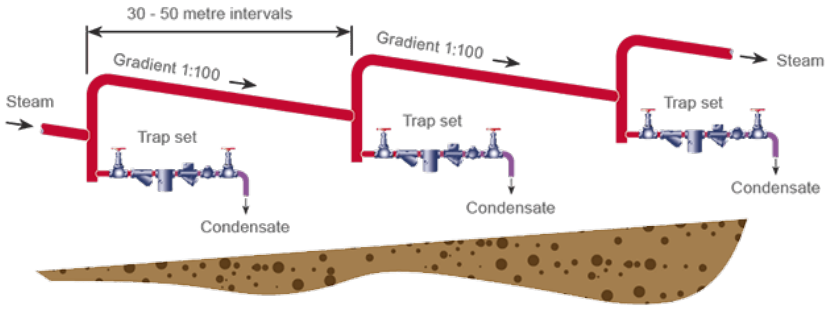


Figura 2.3. Disposición típica de trampas de vapor en una línea principal con pendiente 1:100 y puntos de drenaje cada 30 a 50 m. Fuente: Spirax Sarco (s. f.-b), *Steam mains and drainage*, figura 10.3.1.

2.1.8 Golpe de ariete en sistemas de vapor-condensado

El golpe de ariete se asocia al desplazamiento brusco de masas de condensado a alta velocidad dentro de la tubería. Este transitorio hidráulico puede originarse por dos mecanismos principales: el arrastre mecánico de tapones de agua que impactan contra un cambio de dirección (codos o válvulas), o el choque térmico provocado por el colapso súbito (implosión) de bolsones de vapor flash al interactuar con corrientes de condensado subenfriado (Spirax-Sarco Limited, 2005).

Este fenómeno relaciona pendientes deformadas, fallas de trampas, pérdidas térmicas y drenaje insuficiente. Una *pierna de drenaje*, o pozo de goteo, es una derivación vertical descendente que recoge condensado desde el fondo de la línea y lo conduce a una estación de trampa. Su diámetro debe permitir la captura del líquido y su parte inferior retener sedimentos. No basta una conexión pequeña ni existe una profundidad universal de 1,5 diámetros: por ejemplo, Spirax Sarco recomienda para líneas hasta DN100 un pozo del mismo diámetro y al menos 100 mm de profundidad (Spirax Sarco, s. f.-b). Su dimensionamiento y mantenimiento reducen la acumulación que puede ser acelerada durante transitorios.

2.1.9 Retorno de condensado y vapor flash

El condensado recuperado conserva una fracción considerable de la entalpía original del vapor y está constituido por agua de alta pureza previamente desmineralizada y tratada. Su recolección y bombeo hacia la planta de generación representan beneficios directos al disminuir el consumo de combustible, volumen de agua de reposición (make-up) y dosificación de reactivos químicos.

Durante el drenaje, cuando el condensado a alta presión y temperatura es descargado por una trampa hacia una línea de retorno de menor presión, una fracción de este líquido se evapora instantáneamente al absorber su propio calor sensible. Este fenómeno se denomina vapor flash (o revaporizado) y su consideración es relevante, porque el flujo bifásico resultante exige mayor diámetro en las líneas de retorno para evitar contrapresiones restrictivas. El monitoreo de las tasas de retorno permite detectar desviaciones asociadas a pérdidas, drenajes no controlados o problemas de recuperación, y las guías internacionales lo consideran un indicador fundamental de la eficiencia global de un proceso térmico (U.S. Department of Energy, 2012).

2.1.10 Termografía y priorización económica de mejoras

La termografía infrarroja radiométrica es una herramienta de ensayo no destructivo esencial para identificar anomalías térmicas en superficies calientes, diagnosticar fallas en el recubrimiento aislante y verificar operativamente el ciclaje de estaciones de trampeo. Metodo-

lógicamente, la termografía infrarroja alcanza su mayor utilidad técnica cuando se combina con inspecciones geométricas y modelos empíricos de transferencia de calor.

La priorización de los proyectos de optimización energética exige traducir estos gradientes de temperatura en impactos operacionales y económicos. Esta metodología transforma las temperaturas observadas en indicadores normalizados de potencia térmica disipada, vapor equivalente perdido y costos de generación. Cuando se dispone de cotizaciones de inversión, como mantos térmicos, aislación de cañerías, trampas de vapor o separadores de gotas, es posible complementar el análisis mediante indicadores de rentabilidad simples, como el periodo de recuperación simple (*payback*).

2.1.11 Documentación técnica, P&ID y condición real instalada

Los Diagramas de Tuberías e Instrumentación (P&ID) representan la configuración funcional del proceso, incluyendo líneas de proceso, equipos, válvulas de corte, instrumentación, lazos de control y conexiones relevantes. En el entorno industrial, la fidelidad de esta documentación es un pilar fundamental para diagnosticar anomalías, planificar intervenciones mecánicas, ejecutar modificaciones y administrar bloqueos seguros de energía.

Cuando un plano P&ID pierde sincronía con el estado real de la planta, se degrada la trazabilidad operacional. Componentes instalados que no aparecen en el plano, bypass no registrados, reducciones de cañería, cambios de diámetro, cambios de Schedule, o instrumentación local carente de identificación unívoca (TAG) dificultan el análisis hidráulico y energético. La gestión del cambio exige reflejar toda modificación en la documentación, de modo que los planos representen la condición As-Built y cada elemento disponga de identificación unívoca conforme a la simbología normalizada (International Society of Automation, 2024). La contrastación planimétrica es, por tanto, una etapa metodológica necesaria.

2.2 Descripción del sistema de Planta Plywood

2.2.1 Descripción general

Planta Plywood utiliza vapor como fuente principal de energía térmica en distintas etapas del proceso productivo, principalmente en el secado de chapa, prensado de tableros y acondicionamiento térmico de la madera. El vapor es suministrado desde Planta Celulosa Pacífico (CELPAC) e ingresa a Plywood mediante dos líneas principales de alimentación, denominadas Línea 1 y Línea 2.

Ambas líneas ingresan mediante ramales independientes y distribuyen vapor hacia grupos específicos de consumidores, de acuerdo con la configuración operacional de la planta. La red está compuesta por cañerías principales y secundarias, válvulas de aislamiento y control, estaciones de atemperación, separadores, instrumentos de presión y temperatura, puntos de drenaje y trampas de vapor.

El condensado generado en los equipos consumidores y en la red de distribución es evacuado mediante estaciones de trampeo y conducido hacia líneas colectoras. Posteriormente, parte de su energía térmica es aprovechada internamente y la fracción correspondiente es retornada hacia Planta Celulosa Pacífico.

El sistema analizado comprende la red interna desde los puntos de ingreso de vapor a Planta Plywood hasta los principales consumidores térmicos y el sistema interno de retorno de condensado. El tramo externo comprendido entre Planta Celulosa Pacífico y el límite de entrada a Plywood no forma parte de la descripción detallada, debido a la falta de antecedentes suficientes sobre su configuración y condición operacional.

La Figura 2.4 resume la configuración descrita y delimita el alcance considerado.

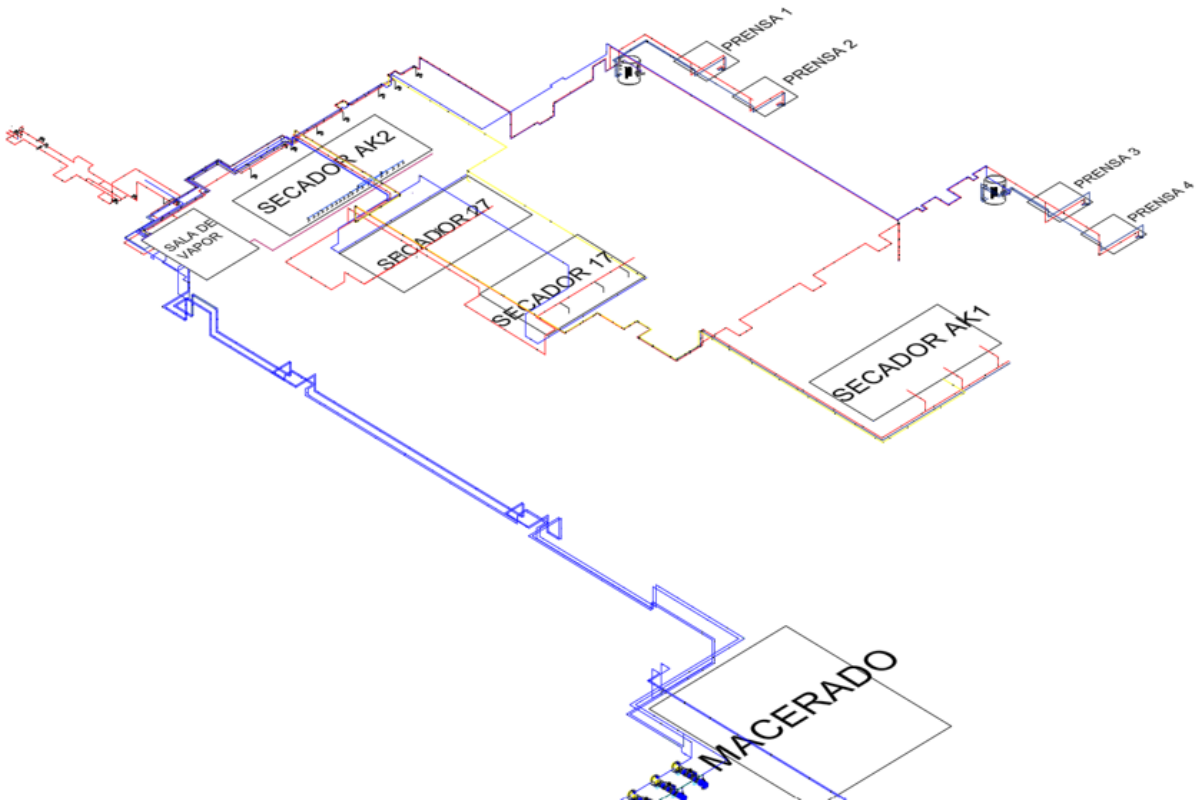


Figura 2.4. Esquema general del sistema de vapor y condensado de Planta Plywood: sala de vapor, secadores 17, 27, AK1 y AK2, prensas 1 a 4 y macerado. Fuente: elaboración propia a partir del P&ID y levantamiento en terreno.

2.2.2 Suministro y distribución de vapor

El vapor proveniente de Planta Celulosa Pacífico ingresa a Plywood por medio de dos líneas principales. Cada una posee una configuración independiente y abastece distintos sectores del proceso.

En los puntos de ingreso se dispone de válvulas de aislamiento, válvulas de control e instrumentos destinados al monitoreo de presión y temperatura. Desde estas líneas principales se originan ramales que conducen el vapor hacia los distintos consumidores.

La distribución se realiza mediante cañerías instaladas principalmente sobre una parrilla de tuberías (*pipe rack*), desde donde se derivan conexiones hacia secadores, prensas, sala de vapor y otros equipos de proceso. En diferentes puntos de la red se incorporan drenajes, trampas y accesorios destinados a evacuar el condensado generado durante la operación.

La Figura 2.5 ordena esa configuración: muestra las dos líneas desde el punto de ingreso hasta sus consumidores, las válvulas de temperatura de la atemperación (TV-2112A y TV-2112 en la Línea 1 y TV-6001 en la Línea 2), los instrumentos que entregan las condiciones de cada tramo y el retorno hacia los estanques de condensado. Las distancias disponibles aguas abajo de cada punto de inyección se evalúan en la Sección 3.5.

Línea 1

La Línea 1 abastece a los secadores 17 y 27, las prensas 1 y 2 y los consumidores ubicados en la sala de vapor. Su recorrido incluye dos estaciones de atemperación destinadas a acondicionar la temperatura del vapor antes de su distribución hacia los equipos.

En la sala de vapor, esta línea dispone además de un separador de gotas, cuya función es separar parte del líquido arrastrado por la corriente antes de que el vapor continúe hacia los consumidores conectados aguas abajo.

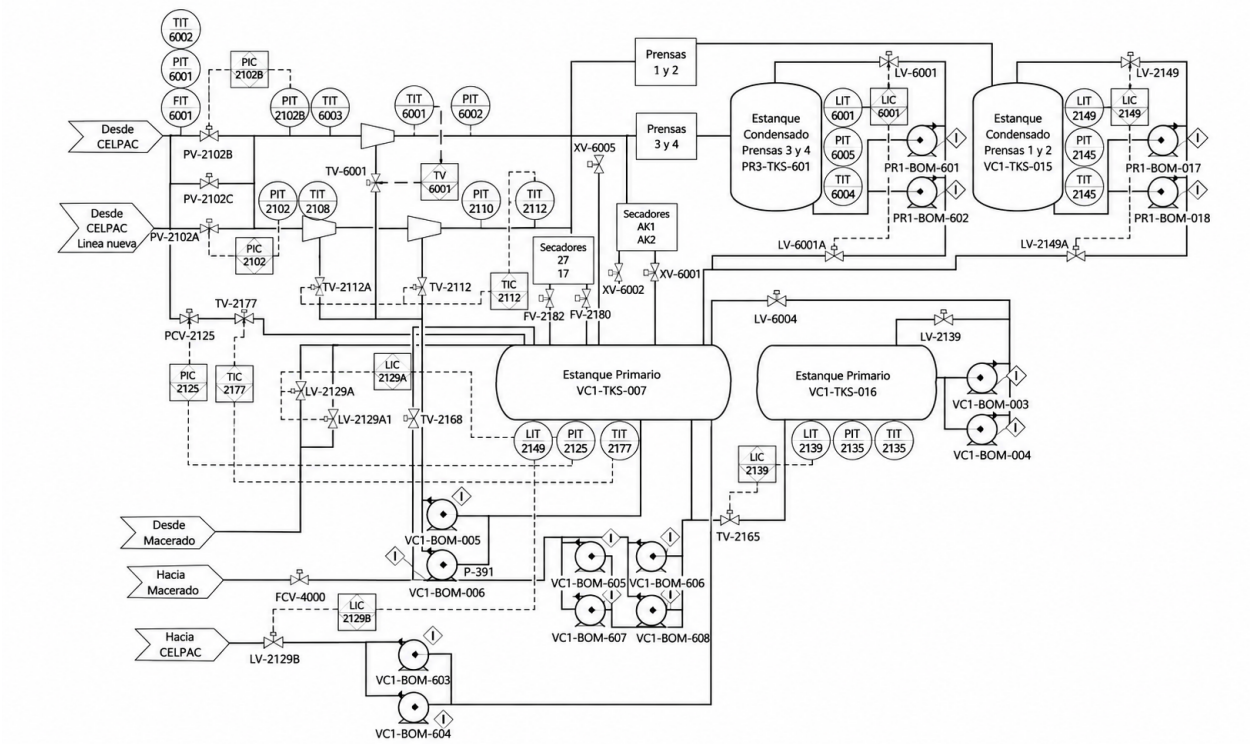


Figura 2.5. Diagrama simplificado del sistema de vapor y condensado de Planta Plywood: líneas de suministro desde CELPAC, válvulas de control y de atemperación, instrumentación de presión, temperatura y caudal, consumidores y estanques de condensado. Fuente: elaboración propia a partir del P&ID y del levantamiento en terreno.

Desde la línea principal se generan diferentes ramales de alimentación. Cada ramal dispone de elementos de aislamiento, regulación e instrumentación, además de puntos de drenaje para evacuar el condensado formado durante la operación y en condiciones transitorias.

Línea 2

La Línea 2 suministra vapor a los secadores AK1 y AK2 y a las prensas 3 y 4. Esta línea dispone de una estación de atemperación y de válvulas destinadas a regular las condiciones del vapor enviado hacia los consumidores.

La distribución hacia AK1 y AK2 se realiza mediante ramales independientes. A lo largo del recorrido existen puntos de drenaje, válvulas e instrumentos de presión y temperatura que permiten supervisar las condiciones de operación.

La asignación de las prensas 1 y 2 a la Línea 1 y de las prensas 3 y 4 a la Línea 2 se adopta a partir de los antecedentes disponibles y debe considerarse preliminar hasta su confirmación en el P&ID oficial controlado.

2.2.3 Sistema de atemperación

El sistema dispone de tres estaciones de atemperación: dos asociadas a la Línea 1 y una correspondiente a la Línea 2. Estas estaciones utilizan condensado presurizado como fluido de inyección para reducir la temperatura del vapor antes de su distribución hacia los consumidores.

El principio de operación consiste en inyectar una cantidad controlada de líquido dentro de la corriente de vapor. El líquido debe absorber energía del vapor y evaporarse completamente durante el recorrido disponible aguas abajo, con lo que la temperatura se reduce hasta alcanzar la condición requerida por el proceso.

Cada estación dispone de una válvula de inyección, instrumentación de temperatura y elementos de control asociados. La señal de temperatura se utiliza para regular el caudal de condensado inyectado y mantener el vapor dentro del rango operacional definido.

Las condiciones de instalación, medición y desempeño de estas estaciones se analizan en la Sección 3.5.

2.2.4 Equipos consumidores

Los principales consumidores térmicos considerados en la descripción del sistema son los secadores de chapa, las prensas y el sistema de macerado. Estos equipos reciben energía mediante vapor o a través del aprovechamiento de la energía térmica contenida en el condensado recuperado.

Secadores de chapa

Los secadores utilizan vapor para aportar la energía necesaria para reducir el contenido de humedad de la chapa de madera. El vapor es conducido hacia los elementos calefactores internos, donde transfiere calor al proceso y condensa.

La planta dispone de los secadores 17 y 27, asociados a la Línea 1, y de los secadores AK1 y AK2, conectados a la Línea 2.

Una vez transferida la energía, el condensado generado debe ser retirado de los equipos mediante puntos de drenaje y trampas de vapor. Desde estos puntos es conducido hacia las líneas colectoras del sistema de retorno.

Debido a que los secadores concentran una parte relevante de la demanda térmica de la planta, posteriormente se analiza la relación entre el vapor utilizado y el volumen de chapa producido.

Prensas

Las prensas utilizan vapor como fuente de energía térmica durante el proceso de conformación y prensado de los tableros. El vapor es distribuido hacia los equipos mediante ramales internos, mientras que el condensado generado durante la transferencia de calor es evacuado mediante estaciones de trampeo.

El condensado proveniente de las prensas es conducido hacia un estanque de recepción y posteriormente incorporado al sistema general de retorno. En este estudio, las prensas se consideran como parte de la descripción general del sistema, sin desarrollar un análisis específico de su desempeño térmico.

Sistema de macerado

El sistema de macerado cumple la función de acondicionar térmicamente la madera antes de etapas posteriores del proceso productivo.

Parte del calor requerido es aportado mediante el intercambiador MA-ICA-076, el cual aprovecha la energía térmica contenida en el condensado recuperado. De esta manera, una fracción de la energía disponible se utiliza internamente antes del retorno del condensado hacia Planta Celulosa Pacífico.

El sistema se encuentra conectado con los estanques de condensado y con la red general de retorno.

2.2.5 Sistema de retorno y aprovechamiento del condensado

El condensado generado en secadores, prensas y puntos de drenaje de la red es conducido mediante líneas colectoras hacia los estanques primario y secundario ubicados en la sala de vapor. Estos equipos permiten recibir y acumular el condensado proveniente de los distintos consumidores, administrar su utilización interna y gestionar su posterior retorno

hacia Planta Celulosa Pacífico.

Parte de la energía térmica del condensado recuperado es aprovechada en el sistema de macerado mediante el intercambiador MA-ICA-076, aportando calor al proceso de acondicionamiento de la madera. El condensado destinado al retorno hacia Planta Celulosa Pacífico es impulsado mediante las bombas VC1-BOM-603 y VC1-BOM-604.

El caudal de retorno es regulado en función del nivel del estanque primario mediante el transmisor LIT-2149, el controlador LIC-2129B y la válvula LV-2129B.

El retorno se incorpora de forma descriptiva al alcance del sistema. Esta memoria no audita el cumplimiento contractual ni cuantifica un porcentaje global de recuperación, porque no dispone de registros simultáneos suficientes de suministro y retorno. Su evaluación requiere conciliar las respectivas fronteras y ventanas de medición.

Los antecedentes disponibles presentan una discrepancia entre las numeraciones 2149 y 2129 para este lazo. En consecuencia, los TAG LIT-2149, LIC-2129B y LV-2129B se mantienen como identificación preliminar y su homologación forma parte de la revisión documental propuesta.

2.2.6 Sistema de trampas y puntos de drenaje

El sistema de vapor y condensado dispone de 128 trampas de vapor registradas, distribuidas en drenajes de líneas, equipos consumidores, separadores y otros puntos donde se requiere evacuar condensado sin permitir el paso continuo de vapor. Por tipo, 104 son de flotador, 18 termodinámicas y 6 termostáticas; su distribución por sector se presenta en la Tabla 3.14. Las trampas de flotador se utilizan principalmente en servicios con generación continua o variable de condensado. Las trampas termodinámicas se encuentran asociadas principalmente a drenajes de líneas, mientras que las trampas termostáticas se utilizan en puntos específicos según las características del servicio.

Cada punto de trampeo puede incluir, además de la trampa, válvulas de aislamiento, filtro, válvula de retención y línea de descarga. La configuración varía de acuerdo con el equipo, la presión de operación y el destino del condensado.

La condición funcional de las trampas registradas, sus limitaciones y las propuestas de normalización se presentan en la Sección 3.6.

2.2.7 Instrumentación y control

La red dispone de instrumentos para medir y controlar variables relevantes del sistema, principalmente presión, temperatura y nivel.

Los indicadores y transmisores de presión permiten conocer las condiciones de operación en las líneas principales y en determinados ramales. Los sensores de temperatura se utilizan para supervisar el estado térmico del vapor, particularmente antes y después de las estaciones de atemperación y en los puntos de ingreso a consumidores relevantes.

La información operacional se encuentra disponible, según el instrumento, de manera local o mediante sistemas HMI y SCADA. Estos sistemas permiten registrar tendencias y consultar valores históricos de variables seleccionadas.

En el sistema de retorno, la instrumentación de nivel permite controlar la acumulación de condensado en los estanques y regular su impulsión hacia Planta Celulosa Pacífico.

La identificación definitiva de los instrumentos corresponde a los TAG aprobados en la documentación oficial. Los códigos incorporados durante el levantamiento se trataron como propuestos hasta su revisión documental; la serie asignada a los 42 puntos de presión completó ese trámite durante el estudio, mientras que el resto conserva carácter preliminar.

2.2.8 Documentación técnica del sistema

La principal documentación utilizada para representar la red corresponde al diagrama de proceso, instrumentación y control del sistema (CMPC Maderas S.A., s. f.), complementado con los antecedentes del proyecto original del área 210: balance general de vapor y condensado (CADE-AMEC, 2006a), manual de operación (CADE-AMEC, 2006b), especificación técnica del sistema de atemperación (CADE-AMEC, 2006c) y filosofía de control (Parés y Álvarez, 2012).

Estos documentos contienen la representación de líneas, válvulas, equipos, instrumentos, puntos de drenaje y conexiones principales. El levantamiento se complementa con un mapeo físico que representa la ubicación de los principales equipos, líneas, instrumentos y puntos de drenaje observados en terreno.

Las actualizaciones desarrolladas durante este estudio se consideran preliminares mientras no completen la revisión y aprobación formal de las áreas responsables de ingeniería, operación y mantenimiento; la única que completó ese procedimiento es la identificación de los 42 puntos de presión.

2.3 Alcance y limitaciones

El estudio abarca la red interna comprendida entre los puntos de ingreso de vapor a Planta Plywood, los principales consumidores térmicos y el sistema interno de drenaje y retorno de condensado. No incluye un levantamiento equivalente del tramo externo entre Planta Celulosa Pacífico y el límite de Plywood ni un análisis integral de flexibilidad de toda la red. De manera acotada sí se incorpora el análisis mecánico localizado del apoyo deformado asociado a ese tramo de alimentación, por su relación directa con la pendiente, el drenaje y la confiabilidad del sistema interno; esa evaluación no amplía el balance energético ni constituye una verificación de flexibilidad de la línea externa. La información utilizada corresponde a la documentación, campañas de terreno, termografías y registros operacionales disponibles durante el desarrollo de la memoria; por ello, las comparaciones entre variables no siempre representan mediciones simultáneas.

La presión y la temperatura caracterizan la fase vapor en los puntos instrumentados, pero no determinan la calidad ni el inventario de condensado libre. Las descargas de AK1 y trampas se evalúan paramétricamente porque no se midieron la fase ni el diámetro efectivo; el separador tiene beneficio pendiente de verificación. El Anexo O desarrolla una propuesta de instrumentación, aún no implementada. Las actualizaciones de P&ID son propuestas *red-line* hasta su emisión controlada, salvo los 42 puntos de presión cuya identificación completó ese trámite. Los niveles de evidencia del Capítulo 3 se conservan en la evaluación económica.

3 Evaluación del sistema y propuestas de mejora

3.1 Condición general y criterios de evaluación

La evaluación integra revisión documental, inspección, levantamiento dimensional, termografías, registros HMI/SCADA y modelos de cálculo. Para cada problema se presenta la evidencia, se examina el mecanismo físico y se cuantifica su efecto cuando los datos lo permiten. A partir de ese diagnóstico se formula la intervención y su criterio de aceptación.

Para mantener la trazabilidad se distinguen tres niveles de evidencia. Los resultados calculados o modelados utilizan condiciones levantadas y un modelo físico directo; los paramétricos evalúan la sensibilidad a una variable no medida; y los cualitativos fundamentan intervenciones por seguridad, confiabilidad o control. Cada nivel responde a una decisión diferente: dimensionar una oportunidad, establecer un umbral de medición o corregir una condición funcional. Las proyecciones económicas se distinguen del ahorro medido, cuya verificación requiere comparación posterior bajo condiciones equivalentes.

Todos los resultados anuales se expresan sobre una base común de 8.400 h/año, aplicada a las pérdidas térmicas y a los escenarios de AK1 y trampas. En la evaluación económica se utiliza un costo de 10,69 USD/t de vapor equivalente, tomado junto con las 8.400 h/año del informe de aislación de la planta (Eleukon Global, 2021), y se presentan periodos simples de recuperación individuales según el alcance de cada cotización. El potencial integrado combina estas oportunidades bajo una misma referencia temporal; su materialización requiere comprobar independencia de beneficios, condiciones de descarga y aprovechamiento energético.

3.2 Soportación de cañerías

3.2.1 Condición observada

Durante la inspección de la línea principal de vapor de 12 pulgadas se observaron apoyos deformados, pérdida de alineamiento e inclinación local de la cañería. Para el cálculo se adopta un tramo representativo de 500 m, que no constituye un levantamiento del tramo externo excluido del alcance. El hallazgo más representativo corresponde a un apoyo cuya cabeza presenta deformación lateral y contacto excéntrico con el patín de la tubería. También se identificaron diferencias entre la orientación de ciertos apoyos instalados y el detalle constructivo disponible.

Evidencia mecánica y efecto funcional

La condición observada es compatible con una transferencia no prevista de esfuerzos durante la expansión térmica. Los apoyos móviles y las guías deben permitir el desplazamiento longitudinal previsto y restringir los movimientos incompatibles con el trazado. Una orientación desfavorable, una superficie de deslizamiento deteriorada o una restricción local pueden introducir cargas laterales y redistribuir esfuerzos hacia la estructura, la tubería y los soportes contiguos. La inspección visual no permite verificar por sí sola el estado tensional completo de la línea, pero sí justifica cuantificar la expansión térmica y revisar la disposición funcional de los apoyos.

La inspección confirmó, además, un hecho determinante para el análisis: el patín se encuentra soldado a la cabeza del apoyo. El detalle constructivo define un apoyo deslizante, de modo que la unión soldada suprime el grado de libertad longitudinal previsto y convierte el punto en una restricción axial no contemplada en el diseño. Esta observación modifica la naturaleza del problema, porque el esfuerzo que llega al soporte deja de estar gobernado por

la fricción del contacto y pasa a estarlo por la expansión térmica impedida.

El detalle S-12 disponible establece un apoyo tipo shoe para tuberías de 10 a 12 pulgadas, con una superficie de contacto y una orientación definidas. La comparación con terreno muestra que el patín no se encuentra apoyado de manera uniforme sobre la cabeza del soporte y que la deformación se concentra en un costado. Esta geometría es coherente con una fuerza lateral aplicada con excentricidad respecto del eje resistente. No se observaron, en el punto documentado, dispositivos que permitan verificar directamente cuánto desplazamiento fue absorbido por apoyos adyacentes ni el estado de los puntos fijos de toda la línea.

La Figura 3.1 documenta la condición del apoyo y el detalle constructivo de referencia.

La pérdida de nivelación también tiene una consecuencia hidráulica. La pendiente de una línea de vapor facilita el escurrimiento del condensado hacia bolsillos y estaciones de drenaje; si la geometría se altera, pueden formarse puntos bajos no previstos. La retención de condensado en estos sectores aumenta la posibilidad de arrastre hacia codos, válvulas o equipos y, bajo condiciones transitorias, puede contribuir a eventos de golpe de ariete, cuya magnitud se acota en el Anexo K. Por ello, el hallazgo se considera una brecha mecánica con efecto potencial sobre el drenaje y la confiabilidad operacional. El cálculo de expansión, carga, fricción y momento se desarrolla en el apartado de análisis de esta sección y su procedimiento completo se detalla en el Anexo A.

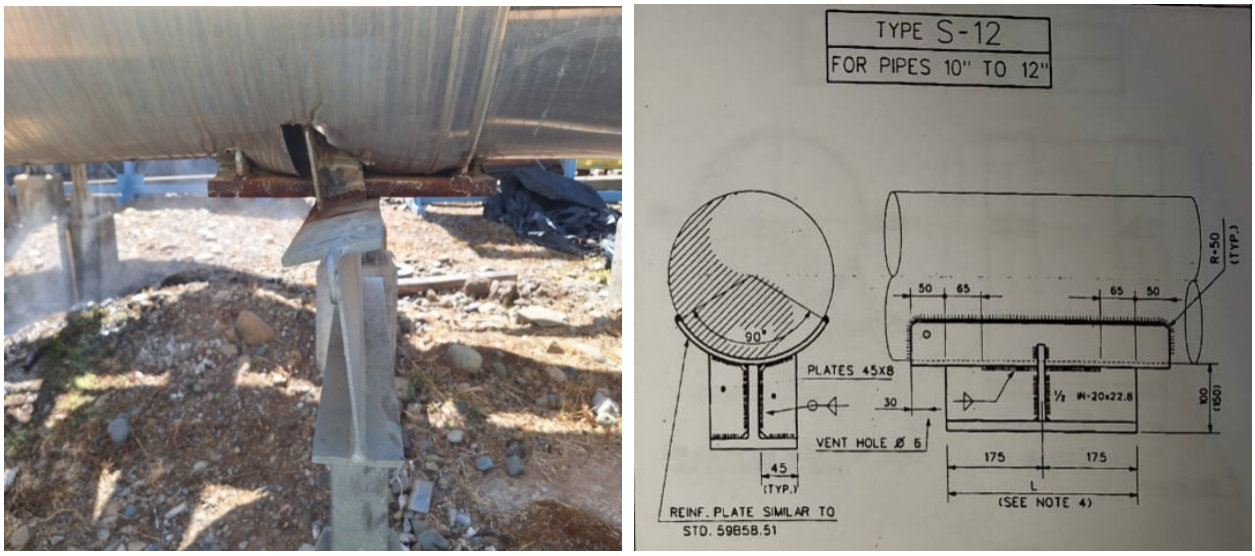


Figura 3.1. Condición observada del apoyo y detalle constructivo de referencia. A la izquierda, deformación y apoyo excéntrico; a la derecha, orientación prevista para soporte tipo S-12. Fuente: elaboración propia a partir de levantamiento y plano disponible.

El diagnóstico no sustituye un análisis de flexibilidad conforme a un código de diseño de tuberías: demuestra que el desplazamiento térmico esperado no es despreciable, lo relaciona con la deformación observada y establece la necesidad de revisar apoyos, guías, puntos fijos y pendientes. El soporte documentado se prioriza porque combina tres efectos: deformación visible, restricción confirmada del desplazamiento térmico por la unión soldada y alteración potencial de la pendiente.

3.2.2 Análisis y alcance mecánico

El apoyo inspeccionado presenta deformación y una restricción del deslizamiento previsto. La pregunta que debe responder este análisis no es cuánta fuerza recibió ese apoyo —dato que no se midió y que no puede deducirse de la inspección—, sino si el desplazamiento térmico que la línea debe acomodar es compatible con la soportación existente. Ese es el

resultado que ordena toda la sección y se enuncia al cierre.

Origen de las tres idealizaciones empleadas

Se contrastan tres idealizaciones derivadas de fricción de Coulomb, equilibrio de fuerzas y compatibilidad de deformaciones. Permiten explicar la importancia de las condiciones de borde sin confundirlas con cargas medidas:

a) Fricción local. Es el caso de diseño habitual de un apoyo deslizante: la línea se mueve sobre la zapata y el apoyo recibe la fuerza de roce $F = \mu N$, donde $N = wL_s$ es el peso que le corresponde según su longitud tributaria. Es la hipótesis que el propio detalle S-12 supone al especificar un apoyo tipo *shoe* y, por lo tanto, la condición prevista por el diseño.

b) Fricción acumulada. La suma $F = \mu wL$ supone contactos movilizados en un mismo sentido sobre una longitud tributaria del anclaje. No es la reacción automática de cualquier apoyo trabado: requiere verificar qué contactos transmiten carga y hacia dónde.

c) Restricción axial perfecta. Al imponer deformación total nula, $\sigma/E + \alpha\Delta T = 0$, se obtiene la magnitud $|\sigma| = E\alpha\Delta T$. Este caso ideal omite la flexibilidad del trazado; si supera la fluencia, deja de ser válida la respuesta puramente elástica.

Las tres idealizaciones distinguen los mecanismos de transmisión de carga; no forman cotas universales ni determinan por sí solas la causa del daño.

Condiciones adoptadas

Se adopta una longitud representativa de 500 m para estudiar expansión acumulada. No corresponde al tramo externo de aproximadamente 300 m entre totalizadores, utilizado en el balance de medición: son fronteras diferentes y sus extremos deben confirmarse en el levantamiento de flexibilidad. La temperatura de operación es 268 °C y se adopta 20 °C como referencia del estado sin restricción, valor convencional de montaje a falta de registro de la temperatura efectiva de instalación. La elección no es crítica: desplazarla ±10 °C sitúa la tensión de restricción ideal entre 571 y 619 MPa, rango que en todos los casos supera la fluencia de referencia.

Los 12,8 °C de la Sección 3.3 son una referencia ambiental anual tomada de Eleukon Global (2021), no la temperatura registrada de montaje. Para dilatación interesa la diferencia respecto del estado inicial sin tensión. Por ello se mantienen 20 °C como hipótesis explícita y se evalúa su sensibilidad, sin sustituirlos por el promedio ambiental.

$$\Delta L = \alpha L \Delta T = 12 \times 10^{-6} \times 500 \times 248 = 1{,}488 \text{ m}. \tag{3.1}$$

La geometría completa debe acomodar ese desplazamiento; no se aplica íntegramente a un apoyo. La longitud tributaria de cada apoyo es $L_s = 3{,}9$ m, igual a la separación media entre apoyos levantada en terreno, y en un vano de esa longitud la expansión libre es 11,6 mm. Para el caso deslizante se adoptan $w = 1.459$ N/m, $\mu = 0{,}30$, $\theta = 90^\circ$, $b = 0{,}30$ m y $e = 0{,}025$ m:

$$N = wL_s = 1.459 \times 3{,}9 = 5{,}69 \text{ kN}, \qquad F_y = \mu N \operatorname{sen}\theta = 1{,}71 \text{ kN}, \tag{3.2}$$

$$M_{\text{local}} = F_y b + Ne \simeq 0{,}65 \text{ kN m}. \tag{3.3}$$

La distancia L_s define el peso que soporta el apoyo; el brazo del momento es b, no L_s. Con $\mu = 0{,}20$–$0{,}30$, F_y varía entre 1,14 y 1,71 kN y el momento entre 0,48 y 0,65 kN · m.

La orientación modifica la componente transversal, pero sin geometría resistente ni material certificados no puede concluirse si este momento causa plastificación. Las acciones del modelo local deslizante se representan en la Figura P.2 del Anexo P.

Tabla 3.1. Idealizaciones mecánicas y límites de interpretación.

Caso	Resultado referencial	Alcance
Apoyo deslizante	$F_y = 1{,}71$ kN; $M = 0{,}65$ kN · m	Fricción local con $L_s = 3{,}9$ m bajo la geometría y el contacto adoptados.
Fricción acumulada en 250 m	$\mu w L = 109{,}4$ kN	Requiere movilización coherente de los contactos; no es carga comprobada.
Restricción axial perfecta	$E\alpha\Delta T = 595{,}2$ MPa	Resultado elástico ideal con $E = 200$ GPa.
Fuerza elástica formal	$\sigma A \approx 9.998$ kN	Con $A = 0{,}0168$ m² de la sección de 12 pulgadas; no admisible como carga real al exceder el dominio elástico.

Los 240 MPa de fluencia de referencia para A106 Grado B se utilizan solo como contraste conceptual, sin acreditar el material instalado ni una capacidad a temperatura. La tensión elástica ideal supera ese valor: esto invalida la hipótesis de respuesta puramente elástica, no demuestra que el apoyo haya recibido 9.998 kN ni que su capacidad haya sido excedida en una razón determinada. La flexibilidad del trazado, los anclajes, las holguras, la fricción y una eventual plastificación redistribuyen las acciones.

Resultado principal de la evaluación mecánica

El resultado principal es una demanda de expansión libre de 11,6 mm por vano de 3,9 m, equivalente a 1,49 m para la longitud representativa de 500 m. La restricción observada impide el deslizamiento previsto y justifica revisar la compatibilidad del montaje. El desplazamiento efectivo y las reacciones dependen de la flexibilidad, los anclajes y las holguras; no se deduce del modelo que todo el alargamiento ocurra ni que la dilatación sea la única causa de la deformación. La propuesta actúa sobre el tramo completo: restituir deslizamiento, guía, alineamiento y pendiente tras verificar su configuración, en vez de limitarse a sustituir la pieza dañada.

El Anexo A detalla la sensibilidad a la longitud restringida y a la esbeltez; no sustituye una verificación de flexibilidad y resistencia conforme al código aplicable, ASME B31.3 (American Society of Mechanical Engineers, 2024).

3.2.3 Propuesta y validación

La propuesta no consiste en reforzar la cabeza deformada, sino en eliminar la causa que transforma el desplazamiento longitudinal en carga lateral. Primero se requiere verificar si el punto corresponde a apoyo móvil, guía o punto fijo dentro de la filosofía global de la línea.

Antes de intervenir se requiere levantar el censo de apoyos del tramo afectado de la Línea 2, clasificando cada uno según su función real —fijo, guía o deslizante— y contrastándola con el detalle constructivo. Deben registrarse separación, holguras y rigidez de las restricciones para analizar la redistribución de cargas, la resistencia y la estabilidad. La separación entre apoyos, por sí sola, no determina el modo de falla. Sin ese levantamiento y su análisis de flexibilidad no puede establecerse cuánto desplazamiento se liberará al corregir cada punto.

Con el análisis aprobado, la corrección puede incluir retirar uniones no previstas que suprimen el deslizamiento y restituir la función de los apoyos. La secuencia debe definirse

sobre el conjunto: liberar una restricción aislada puede redistribuir acciones hacia elementos vecinos. Los trabajos requieren detención, aislamiento, despresurización, enfriamiento y un procedimiento de soporte temporal y liberación de cargas aprobado por ingeniería. Antes de actuar debe verificarse que los apoyos vecinos y los puntos fijos legítimos admitan los desplazamientos y cargas previstos.

La intervención mínima considera inspección dimensional y de soldaduras, reemplazo del elemento con deformación permanente, realineamiento del patín con el sentido de expansión y recuperación de una superficie de contacto estable. Cuando el punto deba permitir movimiento, se recomienda un apoyo deslizante correctamente orientado; una placa de baja fricción o un rodillo solo se seleccionará después de comprobar carga, temperatura, recorrido y compatibilidad con la aislación. La secuencia funcional propuesta para la normalización se detalla en el Anexo P (Figura P.1).

Implementación y validación mecánica

Una marca de referencia sobre la placa de deslizamiento permite registrar el desplazamiento durante arranque y régimen. La pendiente debe comprobarse topográficamente en los sectores donde la deformación pueda crear un punto bajo.

La aceptación posterior exige ausencia de deformación progresiva, estabilidad transversal, contacto adecuado entre patín y apoyo, desplazamiento axial coherente con el ciclo térmico y soldaduras sin indicaciones visibles. Si el levantamiento muestra cargas redistribuidas o recorrido insuficiente, debe realizarse un análisis de flexibilidad conforme al código de tuberías aplicable antes de definir geometría y materiales.

Tabla 3.2. Secuencia de ejecución y evidencia requerida en soportación.

Etapa	Actividad	Evidencia de cierre	Responsable sugerido
1. Levantamiento	Cotas, función de apoyos, holguras y estado de soldaduras	Plano y registro fotográfico	Mecánica / ingeniería
2. Diseño	Definir apoyo, guía o punto fijo y material de deslizamiento	Memoria o detalle aprobado	Ingeniería
3. Montaje	Reemplazar, alinear y recuperar pendiente	Protocolo dimensional	Mantenimiento
4. Validación	Comparar condición fría y caliente	Desplazamiento y ausencia de deformación	Operación / inspección

El beneficio de esta intervención se evalúa por la restitución del deslizamiento previsto, la conservación de pendientes y el control de solicitaciones sobre el apoyo. La ingeniería de detalle definirá el alcance y su inversión. Los criterios de aceptación son mecánicos y operacionales; el payback energético queda fuera de esta evaluación porque requiere una relación cuantificada con consumo o fugas.

3.3 Pérdidas térmicas en cañerías y válvulas

3.3.1 Condición observada

La red principal transporta el vapor hacia secadores, prensas y otros consumidores mediante dos líneas de distribución. Durante el recorrido se identificaron tramos sin aislación, sectores con aislación deteriorada y componentes de gran superficie expuestos al ambiente. El levantamiento registró aproximadamente 62,8 m de cañería con aislación faltante o deficiente y 14 válvulas sin manto térmico removible. Las temperaturas superficiales de estas válvulas se ubicaron entre 147,6 °C y 250,1 °C; el resumen de la exposición identificada se detalla en

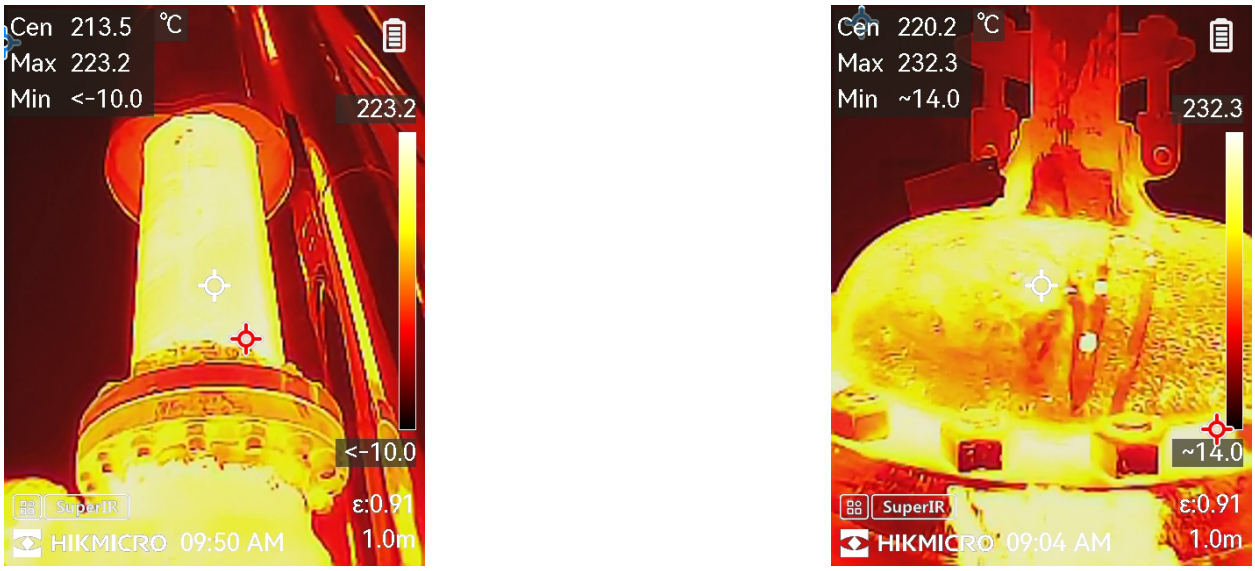


Figura 3.2. Evidencia termográfica representativa de superficies expuestas en la red principal. A la izquierda, tramo sin aislación; a la derecha, válvula sin manto térmico. Fuente: elaboración propia.

la Tabla P.3 del Anexo P.

Distribución y alcance del levantamiento térmico

De las 14 válvulas expuestas, ocho se ubican en la Línea 2 y seis en la Línea 1. Los diámetros de cuerpo levantados se encuentran aproximadamente entre 30 y 50 cm, por lo que corresponden a superficies relevantes aun cuando su longitud axial sea menor que la de los tramos rectos. En las cañerías, la longitud total de 62,8 m reúne segmentos de distintos diámetros y condiciones de aislación. La ubicación, longitud y temperatura de cada tramo se conservan en las planillas de cálculo y en el registro termográfico.

Las imágenes fueron obtenidas con la cámara configurada con una emisividad de 0,91, siguiendo los procedimientos generales de medición termográfica de la norma ISO 18434-1 (International Organization for Standardization, 2008). La termografía confirma la existencia de superficies calientes expuestas y permite comparar condiciones relativas; la cuantificación de la pérdida requiere además geometría, temperatura representativa, convección, radiación y horas de operación. El inventario de válvulas se detalla en el Anexo E y el registro termográfico en los Anexos C y D. La Figura 3.2 presenta termografías representativas de las superficies expuestas.

En vapor sobrecalentado, una pérdida térmica reduce primero el margen entre la temperatura real y la de saturación a la presión local, y solo al agotarlo aparece condensación. Por eso las superficies expuestas se tratan como pérdidas energéticas modeladas y el condensado asociado como una equivalencia potencial, evaluada en la Sección 3.4. Si además existen trampas cerradas, puntos bajos o drenajes deficientes, una fracción del condensado generado puede permanecer en la red y aumentar el riesgo operacional.

3.3.2 Cuantificación

La reconstrucción utiliza las temperaturas superficiales del levantamiento y un balance exterior estacionario. Esas temperaturas no se introducen como si fuesen la del fluido en una red de resistencias, porque ello contabilizaría dos veces la caída térmica entre fluido y superficie.

Tabla 3.3. Parámetros generales y origen de la cuantificación térmica.

Parámetro	Valor	Procedencia y alcance
Ambiente, T_∞	12,8 °C	Promedio anual del informe de aislación (Eleukon Global, 2021, p. 9).
Convección exterior, h	10 W/(m² K)	Hipótesis efectiva; sin registro de viento.
Emisividad, ε	0,91	Configuración de la cámara termográfica.
Calor latente, h_{fg}	1.831 kJ/kg	Convención común de vapor equivalente.
Operación, h_{op}	8.400 h/año	Base anual del informe de aislación (Eleukon Global, 2021).
Valorización	10,69 USD/t	Costo unitario de vapor (Eleukon Global, 2021, p. 11).

3.3.3 Modelo superficial y trazabilidad

Para cañerías se usa $A = \pi D_e L$ y para válvulas el área equivalente levantada. Con temperaturas absolutas solamente en el término radiativo:

$$\dot{Q} = A\left[h(T_s - T_\infty) + \varepsilon\sigma\left((T_s + 273{,}15)^4 - (T_{os} + 273{,}15)^4\right)\right]. \tag{3.4}$$

Aquí T_s es la temperatura superficial, T_∞ la del aire y T_{os} la temperatura radiante media de los alrededores, todas en °C. Se adopta $T_{os} = T_\infty = 12{,}8$ °C por falta de una medición independiente de los alrededores; la igualdad es una hipótesis del modelo, no una identidad física. Con $\sigma = 5{,}670374419 \times 10^{-8}$ W/(m² K⁴), $\dot{Q}$ resulta en W. Las longitudes se separan entre vapor y condensado. Cuando comparten un diámetro se aplica la temperatura representativa de ese grupo a ambos servicios, aproximación del inventario y no medición individual de cada tramo.

El registro termográfico se detalla en los Anexos C y D. Las Tablas E.2 y G.2 entregan las entradas por elemento. La trazabilidad documental de las temperaturas se detalla en el Anexo G: se conservan los promedios de la planilla de levantamiento, que no deben reconstruirse promediando solamente las fotografías ilustrativas.

$$\dot{m}_{\text{eq}} = \frac{3600\dot{Q}_{\text{kW}}}{1831}, \qquad m_{\text{eq,anual}} = \frac{8400\dot{m}_{\text{eq}}}{1000}. \tag{3.5}$$

Tabla 3.4. Pérdidas actuales reconstruidas mediante balance superficial.

Elemento	kW	kg/h eq.	t/año eq.	USD/año eq.
Cañerías	154,71	304,2	2.555,1	27.314
Válvulas	81,93	161,1	1.353,1	14.465
Total	236,64	465,3	3.908,2	41.779
Solo elementos de vapor	180,43	354,7	2.979,8	31.854

La pérdida actual reconstruida es 236,64 kW: 180,43 kW corresponden a elementos que transportan vapor y 56,21 kW a líneas de condensado. Esta separación identifica dos mecanismos de intervención: limitar la pérdida de energía de la fase vapor y conservar la entalpía del retorno. La primera fracción puede expresarse como equivalente de condensación una vez agotado el sobrecalentamiento; la segunda representa enfriamiento de líquido. Ambas son magnitudes energéticas, distintas de un aforo de masa que abandone la planta.

La aislación de cañerías concentra 65,38 % de la pérdida actual. Los diámetros de 12, 10 y 6 pulgadas reúnen 82,63 % de la disipación en cañerías. Las 14 válvulas aportan 81,93 kW, de los cuales 53,50 kW corresponden a Línea 2.

Sobrecalentamiento consumido por las superficies expuestas

La pérdida no se manifiesta solo como costo: antes de producir condensado consume el margen de sobrecalentamiento que la red transporta. Esa pérdida de margen es la magnitud que conecta esta sección con la condición del vapor evaluada en la Sección 3.4, y se obtiene del balance de energía de la corriente:

$$\Delta T_{\text{sup,consumido}} = \frac{\dot{Q}_{\text{vapor}}}{\dot{m}_{\text{vapor}}\, c_p}. \tag{3.6}$$

Los registros de enero a junio de 2026 totalizan 312.811,5 t en 181 días (Tabla 3.28), equivalentes a $312.811{,}5/(181\times24) = 72{,}01$ t/h. Para 22 bar(a) y 230 °C, IAPWS-IF97 entrega $c_p = 2{,}907$ kJ/(kg K). Con $\dot{Q}_{\text{vapor}} = 180{,}43$ kW, se obtiene $\Delta T = 180{,}43/[(72{,}01/3{,}6) \times 2{,}907] = 3{,}10$ °C. Este es un equivalente energético global referido al caudal de entrada, no una caída de temperatura medida en un secador; excluye la pérdida de los elementos que ya transportan condensado.

La comparación muestra que la disipación evaluada puede ser relevante frente a los pequeños márgenes de sobrecalentamiento aguas abajo (Tabla P.5). Para predecir la reducción en un consumidor específico deben asignarse las pérdidas y el caudal a su ramal. El cálculo fundamenta la conservación del margen térmico mediante aislación, sin atribuir los 3,10 °C a todos los secadores ni localizar por sí solo el comienzo de la condensación.

3.3.4 Aislación, mantos y evaluación económica

Se propone instalar lana mineral de 50 mm, protegida por aluminio de 0,5 mm, en los 62,8 m identificados, y mantos removibles en las 14 válvulas. La condición posterior se aproxima mediante las temperaturas superficiales de referencias aisladas del levantamiento: 18,5–35,0 °C en cañerías y 28,0 °C en mantos. Se emplea $D_{\text{ext,ais}} = D_e + 0{,}101$ m para las cañerías y se conserva el área equivalente del cuerpo para los mantos, aproximación que deberá comprobarse con sus dimensiones finales.

El desempeño se estima por comparación con superficies aisladas de referencia, no mediante una predicción de la temperatura exterior a partir de conductividad y temperatura del fluido. El potencial calculado corresponde al cumplimiento de dichas condiciones superficiales y no se deduce del espesor propuesto por sí solo.

Emisividad del revestimiento de aluminio

El valor $\varepsilon = 0{,}91$ es la configuración de la cámara y la hipótesis de cálculo; no es una propiedad medida del revestimiento de aluminio, cuya emisividad es bastante menor. Para evaluar su efecto, la Tabla P.1 del Anexo P varía la emisividad de las cañerías aisladas manteniendo las temperaturas, el estado actual y los mantos: con temperaturas fijas, una emisividad menor reduce la pérdida posterior y aumenta el potencial en hasta 1,6 %, de modo que mantener 0,91 no favorece el resultado.

Como la lectura termográfica sobre superficies metálicas reflectantes también depende de la emisividad y de la radiación reflejada, la temperatura del revestimiento deberá comprobarse en la recepción con sonda de contacto o con un blanco de alta emisividad, registrando la emisividad y la temperatura aparente reflejada (FLIR Systems, s. f.).

Tabla 3.5. Comparación con el escenario de superficies aisladas de referencia.

Elemento	Actual [kW]	Referencia [kW]	Reducción [kW]	Reducción [%]
Cañerías	154,71	11,83	142,88	92,4
Válvulas	81,93	3,85	78,08	95,3
Total	236,64	15,68	220,96	93,4

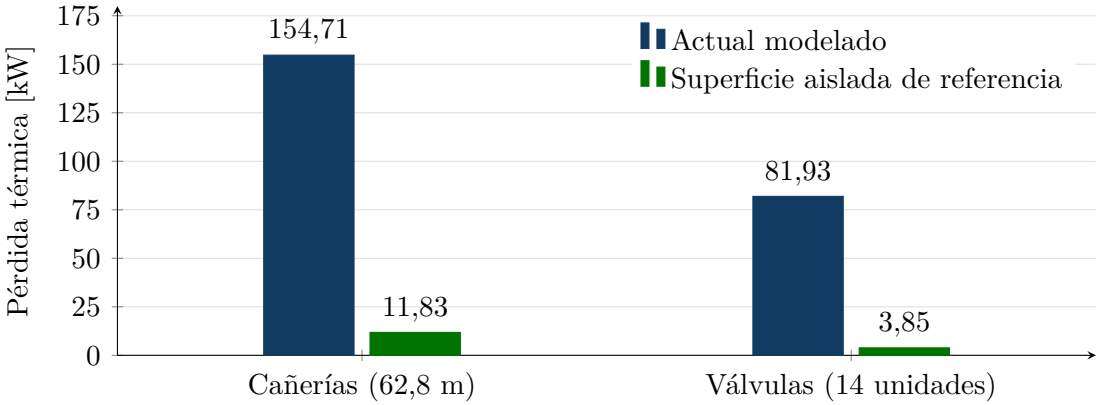


Figura 3.3. Pérdida actual modelada y condición aislada de referencia. La comparación mantiene la misma base ambiental y separa cañerías de válvulas. Fuente: elaboración propia.

3.3.5 Evaluación económica y prioridad

Con $\dot{Q}_{\text{red}} = \dot{Q}_{\text{actual}} - \dot{Q}_{\text{ref}}$ se obtiene un potencial térmico de 220,96 kW, equivalente a 3.649,22 t/año. Su valorización a 10,69 USD/t es 39.010,20 USD/año. La conservación de entalpía del condensado no implica una reducción idéntica en el vapor comprado; ese beneficio depende del aprovechamiento posterior del retorno.

Origen del costo unitario de vapor

El costo unitario de 10,69 USD/t y la base de 8.400 h/año se adoptan del informe de aislación de la línea de condensados de Planta Plywood (Eleukon Global, 2021, p. 11). No se calcularon a partir de un balance de generación ni corresponden a una tarifa contractual actual verificada. Se utilizan uniformemente como referencia económica histórica, cuya actualización requiere antecedentes del área de energía.

El costo no participa del cálculo físico: la cadena es $\dot{Q}$ [kW] $\rightarrow$ $\dot{m}_{\text{eq}}$ [kg/h] mediante $h_{fg} = 1.831$ kJ/kg $\rightarrow$ $m_{\text{eq,anual}}$ [t/año] mediante 8.400 h/año, y solo en el último paso se multiplica por el costo unitario. Un cambio de tarifa reescala todos los beneficios en la misma proporción y no altera el orden de prioridad técnica entre medidas. Como el valor es de 2021, se evaluó una variación de $\pm 20\,\%$ (Tabla P.2, Anexo P): con 8,55 USD/t la aislación de cañerías se recupera en 9,2 meses y los mantos en 17,8 meses; con 12,83 USD/t, en 6,2 y 11,8 meses. Ambas medidas conservan periodos de recuperación inferiores a dieciocho meses en todo el rango ensayado, y su orden relativo no cambia. La decisión de aislar no depende, por tanto, del valor exacto de la tarifa. El costo unitario debe confirmarse con el área de energía de CMPC antes de una aprobación definitiva de inversión, junto con las cotizaciones actualizadas.

Composición de la inversión en aislación

La inversión de cañerías corresponde a 14.741.857 CLP, reexpresados a 950 CLP/USD. Esa cifra no es el total de una oferta comercial, sino un presupuesto adaptado a las longitudes efectivamente levantadas, y se compone de dos partes.

Tabla 3.6. Evaluación económica referencial de las mejoras térmicas.

Medida	CAPEX [USD]	Beneficio [USD/año]	Meses
Aislación de cañerías	15.517,74	25.225,58	7,4
Mantos en válvulas	16.325,89	13.784,62	14,2

La primera son los materiales. La cotización original de Emyserv Ltda. incluía una partida de materiales de 5.570.000 CLP asociada a un alcance distinto del inventario de esta memoria. Esa partida se reemplazó por el costo de los materiales que corresponden a los 62,8 m levantados, calculado como $\sum L_i c_i$ con las longitudes por diámetro de la Tabla G.2 y los costos unitarios por metro de la Tabla G.4, lo que arroja 1.920.596,90 CLP.

La segunda son las partidas de ejecución de la misma cotización, que se conservan sin modificación: mano de obra 5.376.000 CLP, equipos y servicios 3.352.400 CLP, gastos generales 1.694.000 CLP y utilidades 2.398.860 CLP, con un subtotal de 12.821.260 CLP. La suma de ambas partes es 14.741.856,90 CLP, que se redondea a 14.741.857 CLP y equivale a 15.517,74 USD.

La asignación por diámetro de la Tabla G.1 distribuye el subtotal conservado en proporción al costo de materiales de cada grupo, mediante $I_i = M_i\,(1 + 12.821.260/1.920.596{,}90)$. Se trata de una adaptación presupuestaria de prefactibilidad, no de una nueva oferta del contratista para este alcance. En mantos se conserva el presupuesto referencial de un proyecto previo. El Anexo G detalla prorrateo, cantidades, sensibilidad y alcance comercial.

Tabla 3.7. Secuencia recomendada para las intervenciones térmicas.

Orden	Intervención	Criterio
1	Cañerías de 12 y 10 pulgadas	Mayor potencial y menor recuperación simple del inventario.
2	Mantos de válvulas de Línea 2	Mayor concentración de disipación en válvulas.
3	Cañerías de 6, 16 y 4 pulgadas	Completar los tramos de mayor aporte remanente.
4	Válvulas de Línea 1 y tramos menores	Continuidad térmica y eliminación de puntos expuestos.

3.3.6 Especificación y verificación

Antes de comprar se comprobarán diámetro exterior, longitud neta, temperatura de diseño, estado superficial, interferencias y necesidad de desmontaje. Los mantos deben permitir acceso a actuadores, prensaestopas y puntos de inspección. El revestimiento de cañerías debe impedir ingreso de agua sin bloquear el desplazamiento de los apoyos móviles.

La recepción incluirá termografía en operación comparable, emisividad contrastada mediante referencia superficial apropiada, condiciones ambientales registradas y revisión de continuidad de aislación. Las temperaturas posteriores y horas efectivas permitirán actualizar el beneficio de cada intervención. El Anexo G complementa este procedimiento con una sensibilidad determinista de convección, emisividad, temperatura y área, que identifica las variables más relevantes para el control del resultado.

3.4 Condición térmica del vapor y riesgo de condensado libre

3.4.1 Evidencia disponible

Los registros de presión y temperatura muestran vapor sobrecalentado en varios puntos de la red. Sin embargo, esta condición describe principalmente la fase vapor en la ubicación

del instrumento y no permite descartar condensado libre acumulado en el fondo de la tubería, bolsillos, derivaciones o puntos bajos. En una red real pueden coexistir vapor sobrecalentado y líquido no equilibrado cuando existen transitorios, arrastre desde aguas arriba, pérdidas térmicas o evacuación insuficiente.

Registros operacionales disponibles

Los valores representativos recopilados muestran, en general, menores presiones y temperaturas en los consumidores que en el ingreso. Cada registro procede de un transmisor identificado del sistema de control, cuyo TAG se indica en la Tabla 3.8 para que la procedencia de cada cifra sea verificable en el HMI. Las mediciones corresponden a registros operacionales disponibles y no necesariamente fueron capturadas en un mismo instante; en consecuencia, se utilizan para caracterizar el orden de magnitud y seleccionar puntos de análisis, pero no como un ensayo termodinámico simultáneo de toda la red.

La Tabla 3.8 agrupa los puntos según el margen de sobrecalentamiento disponible, $\Delta T_{\text{sup}} = T_{\text{medida}} - T_{\text{sat}}(P_{\text{abs}})$, cuyo cálculo se desarrolla más adelante con las propiedades de saturación de IAPWS-IF97. La agrupación ordena la lectura: los tres bloques corresponden al ingreso, a la zona intermedia posterior a la atemperación y a la llegada a los consumidores.

Tabla 3.8. Registros representativos de presión y temperatura en la red, agrupados por margen de sobrecalentamiento.

Punto de registro	Instrumentos P / T	P [barg]	T [°C]	ΔT_{sup} [°C]
Margen amplio: ingreso y salida de válvulas principales				
Línea 1, entrada a Plywood	PIT2101 / TIT2101	23,8	252,4	+28,8
Línea 1, salida de válvula principal	PIT2102 / TIT2108	22,2	247,8	+27,8
Línea 2, entrada a Plywood	PIT6001 / TIT6002	25,0	242,9	+16,8
Línea 2, salida de válvula principal	PIT2102B / TIT6003	22,5	235,2	+14,5
Margen reducido: aguas abajo de la atemperación				
Línea 1, salida de atemperación	PIT2110 / TIT2112	21,3	225,4	+7,4
Línea 1, llegada a secador 27	PIT318P4 / TIT318R5	20,2	222,5	+7,1
Línea 1, llegada a secador 17	P (in) / Temp, HMI secador	20,1	220,0	+4,9
Próximo a saturación				
Línea 2, llegada a secador AK2	PIT2103 / TIT6005	21,6	219,0	+0,3

La identificación de los instrumentos se respalda con dos pantallas del sistema de control que se detallan en el Anexo P: la de distribución de vapor (Figura P.4), con los transmisores del ingreso, de la salida de las válvulas principales y de la atemperación de la Línea 1, y la de secadores (Figura P.3), con los de llegada a los consumidores. En ambas cada valor aparece junto al TAG del transmisor que lo entrega. La pantalla de secadores pertenece a un instante distinto del de los registros tabulados, por lo que sus valores no coinciden dígito a dígito con la tabla; su función es acreditar la existencia, la ubicación y la identificación de la instrumentación utilizada.

Las presiones de sala de control se expresan en barg y deben convertirse a presión absoluta antes de consultar propiedades termodinámicas. Los registros muestran, en general, menores márgenes de sobrecalentamiento en los consumidores: los 14,5 a 28,8 °C del ingreso

contrastan con 4,9–7,4 °C aguas abajo de la atemperación y una condición próxima a saturación en AK2 (+0,3 °C). Al no ser registros simultáneos, no describen una caída monótona de una misma corriente.

En terreno se observaron drenajes significativos en las trampas de ingreso a Plywood, una línea que se mantiene cerrada por riesgo de inundación y antecedentes de daño en radiadores de secadores compatibles con presencia de condensado o eventos hidráulicos, cuyo registro fotográfico se detalla en el Anexo N. Asimismo, el diseño incorpora un separador de gotas en la Línea 1, lo que confirma que la remoción de humedad fue considerada dentro de la filosofía del sistema. Estas evidencias, resumidas en la Tabla P.4 del Anexo P, sustentan un diagnóstico de riesgo de condensado no completamente controlado, pero no permiten determinar la calidad del vapor ni el caudal proveniente de CELPAC.

La Figura 3.4 representa esquemáticamente esta coexistencia entre fases y la posición del transmisor respecto del condensado acumulado en el fondo.

El diagnóstico se limita al sistema comprendido desde la entrada de Plywood, porque no se dispone de instrumentación de drenajes ni de un levantamiento equivalente de los aproximadamente 300 m aguas arriba. En consecuencia, el análisis diferencia entre condición presión–temperatura, condensado potencial local y evidencia indirecta de humedad. La procedencia y magnitud del condensado deberán validarse mediante mediciones controladas en trampas, drenajes o separadores.

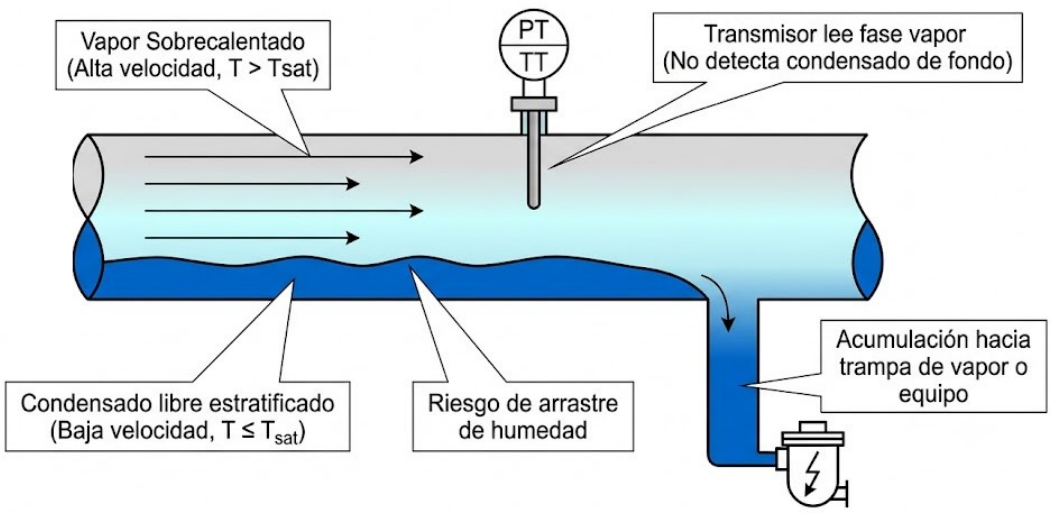


Figura 3.4. Esquema conceptual de coexistencia entre vapor sobrecalentado y condensado libre estratificado. El transmisor de presión y temperatura lee la fase vapor y no detecta el condensado acumulado en el fondo, que escurre hacia la trampa o el equipo. Esquema sin escala: las proporciones dibujadas no representan fracciones de masa o volumen medidas. Fuente: elaboración propia.

Límite para determinar la calidad

La calidad del vapor solo se define de manera directa para una mezcla saturada líquido-vapor en equilibrio. Cuando la fase medida se encuentra sobrecalentada, asignar un valor de calidad a partir de presión y temperatura sería conceptualmente incorrecto. Además, un transmisor instalado en la parte superior o lateral de la línea puede registrar la fase vapor sin detectar el líquido estratificado en el fondo. Por estas razones, el diagnóstico utiliza los conceptos de condición térmica, margen de sobrecalentamiento y riesgo de condensado libre, y reserva la calidad medida para una futura campaña con instrumentación específica.

La cantidad drenada en el ingreso tampoco puede asignarse completamente a CELPAC.

El condensado observado puede incluir inventario acumulado durante detenciones, condensación de arranque, pérdidas en el trayecto, drenaje de puntos conectados o arrastre desde aguas arriba. Para separar estos aportes se requiere estabilizar la operación, medir cada descarga durante un periodo definido y sincronizarla con caudal, presión y temperatura de vapor. La ausencia de esa medición se conserva como una limitación central del estudio, no como evidencia contraria a la presencia observada de condensado.

3.4.2 Análisis termodinámico y límites

Esta sección integra presión, temperatura, pérdidas térmicas, atemperación y drenaje para cuantificar el aporte local potencial de condensado y reconocer los mecanismos que pueden generarlo, retenerlo o arrastrarlo.

Margen de sobrecalentamiento

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{man}} + 1{,}013, \qquad \Delta T_{\text{sup}} = T_{\text{medida}} - T_{\text{sat}}(P_{\text{abs}}). \tag{3.7}$$

El margen de cada punto de la Tabla 3.8 se obtiene con estas expresiones; el cálculo fila por fila, con la presión absoluta y la temperatura de saturación, se detalla en la Tabla P.5 del Anexo P. Cada fila conserva el TAG del par de transmisores que entregó la lectura, de modo que el resultado sea verificable punto por punto en el sistema de control. Las temperaturas de saturación provienen de la formulación industrial IAPWS-IF97 (International Association for the Properties of Water and Steam [IAPWS], 2012) evaluadas a la presión absoluta de cada punto, y no de una tabla redondeada.

Los puntos de entrada mantienen un margen de 14,5 a 28,8 °C, pero este disminuye aguas abajo hasta 4,9–7,1 °C en la llegada a los secadores de Línea 1 y hasta 0,3 °C en AK2. Una lectura presión-temperatura positiva caracteriza la fase vapor donde está instalado el sensor; no descarta líquido estratificado en el fondo de la tubería o acumulado en puntos bajos.

Alcance y verificabilidad de esta comparación El margen calculado de 0,3 °C en AK2 no acredita un sobrecalentamiento estable. Su interpretación requiere comprobar tres aspectos de la adquisición.

Primero, deben verificarse la ubicación relativa y representatividad de PIT2103 y TIT6005. La pantalla identifica instrumentos distintos, pero no cuantifica la caída de presión entre sus tomas. Una captura registra 22,5 barg y 218,5 °C, combinación que entrega $\Delta T_{\text{sup}} = -2{,}2$ °C y no representa vapor en equilibrio a una misma presión y temperatura. La diferencia puede involucrar ubicación, desfase, respuesta instrumental o contacto del sensor con líquido; no prueba por sí sola cuál es la causa. Si la presión se mide aguas arriba, una caída entre tomas podría reducir el margen calculado, pero su magnitud debe medirse.

Segundo, la incertidumbre instrumental requiere rangos, certificados y condiciones de instalación. No se asigna una banda numérica a partir de exactitudes típicas sin esos antecedentes. La propagación puede estimarse como $u_{\Delta T} = \sqrt{u_T^2 + [(dT_{\text{sat}}/dP)u_P]^2}$ para entradas independientes, complementándola con los efectos de ubicación y respuesta. La proximidad a saturación exige resolver esos factores antes de interpretar diferencias de décimas de grado.

Tercero, los registros no son simultáneos: provienen de instantes distintos de operación normal y no de un ensayo sincronizado. Permiten reconocer menores márgenes térmicos en los consumidores, pero no fijar un estado instantáneo ni reconstruir una caída monótona a lo largo de la red.

Los registros respaldan una reducción del margen aparente hacia los consumidores y una condición próxima a saturación en AK2. No demuestran su agotamiento en todos los secadores ni permiten calcular la fracción líquida. La medición simultánea en una misma sección, propuesta en el Anexo O, permite convertir esta identificación de riesgo en una verificación termodinámica local.

Condensado potencial generado dentro de Plywood

Al considerar solo los elementos que transportan vapor, la energía perdida puede expresarse como condensado potencial una vez consumido el margen de sobrecalentamiento:

$$\dot{m}_{\mathrm{cond,pot}} = \frac{\dot{Q}_{\mathrm{vapor}}\, 3600}{h_{fg}}. \tag{3.8}$$

Tabla 3.9. Condensado potencial local y humedad equivalente.

Fuente	Pérdida [kW]	Condensado potencial [kg/h]	Condensado [t/año]	Interpretación
Cañerías de vapor	98,49	193,7	1.626,7	Aporte distribuido
Válvulas de vapor	81,93	161,1	1.353,1	Aporte localizado
Total local	180,43	354,7	2.979,8	Equivalencia energética local
Humedad equivalente	—	0,3547 t/h	—	No es calidad medida

El resultado de 354,7 kg/h es una equivalencia con el calor latente convencional adoptado, no condensado medido ni concentrado en un único punto. Parte del líquido puede evacuarse, redistribuirse o ser arrastrado. Los totales se calculan antes del redondeo. El dimensionamiento del drenaje requiere además propiedades locales, contrapresión y carga de arranque; esta equivalencia solo orienta su orden de magnitud.

$$H_{\mathrm{eq}} = \frac{\dot{m}_{\mathrm{cond,pot}}}{\dot{m}_{\mathrm{vapor}}}\, 100. \tag{3.9}$$

No se calcula un porcentaje de humedad ni una calidad, porque no existe una muestra bifásica que permita aplicar $x = m_v/(m_v + m_l)$. La comparación presión–temperatura caracteriza la fase en el punto del sensor, pero no determina la fracción líquida en la red.

Integración de factores y límite aguas arriba

Los factores que afectan la condición efectiva del vapor —pérdidas térmicas, atemperación, trampas cerradas y abiertas, drenaje del separador, soportación y suministro externo— se ordenan según su influencia en la Tabla P.6 del Anexo P.

El balance energético comienza en la entrada de Plywood; no se dispone de mediciones de líquido del tramo externo. Para la red interna, el balance de fase líquida debe considerar arrastre de entrada, inyección, condensación, evaporación, drenaje y variación de inventario. Con M_ℓ como masa acumulada:

$$\dot{m}_{\ell,\mathrm{sal}} = \dot{m}_{\ell,\mathrm{ent}} + \dot{m}_{\mathrm{iny}} + \dot{m}_{\mathrm{cond}} - \dot{m}_{\mathrm{evap}} - \dot{m}_{\mathrm{dren}} - \frac{dM_\ell}{dt}. \tag{3.10}$$

La descarga observada y los antecedentes de daño justifican evaluar el drenaje, pero no permiten asignar una masa de líquido al suministro externo. Los 354,7 kg/h son una equivalencia térmica del inventario evaluado, no un límite superior del condensado total ni una medición de los términos de este balance. La cuantificación requiere fronteras y registros

simultáneos; el Anexo O desarrolla la propuesta de aforo y sus correcciones.

3.5 Sistema de atemperación

3.5.1 Condición observada

La planta dispone de tres atemperadores que acondicionan el vapor procedente de CELPAC antes de su distribución: dos equipos en la Línea 1 y uno en la Línea 2. La reducción de temperatura se realiza mediante inyección de condensado caliente. Para que el proceso sea efectivo, el líquido debe atomizarse, mezclarse y evaporarse antes de alcanzar cambios de dirección, sensores o derivaciones. El desempeño depende, por tanto, del balance energético y de la instalación física, la presión diferencial, la atomización y la instrumentación disponible.

En la Línea 1 se identifican un atemperador de menor capacidad y otro de mayor capacidad, instalados en serie dentro de la ruta de acondicionamiento. La Línea 2 dispone de un único atemperador antes de la distribución hacia AK1 y AK2. Esta configuración permite responder a caudales y temperaturas de entrada distintos, pero también hace que una desviación de medición o una evaporación incompleta tenga consecuencias sobre más de un consumidor. El condensado de inyección proviene del circuito de la planta y se encuentra a una presión superior a la del vapor, condición necesaria para introducirlo a través de la boquilla.

Distancia disponible de mezcla

El levantamiento mostró distancias reducidas entre los puntos de inyección y el primer codo aguas abajo. Estas distancias no demuestran por sí solas una evaporación incompleta, porque el requerimiento depende del tipo de boquilla, tamaño de gota, velocidad del vapor y condiciones de operación. No obstante, constituyen una restricción geométrica que debe contrastarse con las especificaciones del fabricante y con la dinámica real de mezcla.

Las longitudes al primer codo se midieron en terreno con huincha y con distanciómetro láser, contrastando ambos métodos, desde el plano de inyección hasta la tangente del primer codo; las distancias al drenaje son aproximaciones del recorrido de la línea. El registro fotográfico acotado de la Línea 1 y la vista del atemperador de la Línea 2 se detallan en el Anexo P (Figuras P.6 y P.5).

Tabla 3.10. Distancias levantadas aguas abajo de cada atemperador.

Línea	TAG	Al primer codo	A la trampa siguiente	Faltante para 6 m
1	VC1-ENF-008 (mayor)	2,5 m	≈ 18 m	3,5 m
1	VC1-ENF-008A (menor)	4,0 m	≈ 18 m	2,0 m
2	VC1-ENF-601	4,2 m	≈ 8 m	1,8 m

La última columna compara cada distancia con el mínimo de 6 m de tramo recto antes de un codo que fija el manual del atemperador de área variable de Spirax Sarco (s. f.-d). Ninguno de los tres puntos alcanza ese mínimo, y el más desfavorable dispone de menos de la mitad. La regla de 10 a 20 diámetros exigiría entre 3,0 y 6,0 m para la línea de 12 pulgadas: el atemperador mayor, con 2,5 m, queda incluso bajo el extremo inferior.

En Línea 2 se informa una estación de trampeo a unos 8 m; en Línea 1, el recorrido indicado hasta la trampa es de unos 18 m y atraviesa la sala de vapor hacia los secadores 27 y 17. Como en esa ruta existe un separador con drenaje, los 18 m no deben interpretarse como una longitud sin ninguna extracción de condensado. La ubicación de su descarga y la relación con la trampa indicada deben quedar diferenciadas en el plano conforme a obra. La

capacidad efectiva de captura se aborda en la Sección 3.8.

La condición más restrictiva corresponde al atemperador mayor de la Línea 1, con 2,5 m hasta el primer codo, que es además el que inyecta 1.423 de los 1.434 kg/h de esa línea según el modelo EES desarrollado más adelante. Si la pulverización o el tiempo de residencia fueran insuficientes, las gotas podrían impactar la pared, acumularse en el cambio de dirección o continuar aguas abajo como humedad arrastrada; confirmarlo requiere una medición específica.

El mismo manual pide ubicar el sensor de temperatura a no menos de 12 m aguas abajo del equipo o en el punto de consumo. El control permite seleccionar el sensor local (TIT2112 en Línea 1 y TIT6001 en Línea 2) o el del consumidor (TIT318R5 en el secador 27 y TIT6005 en AK2); en el registro del 24 de febrero de 2026 estaban seleccionados los sensores de consumidor, que corresponden a la ubicación recomendada (Anexo P, Figura P.7). Las distancias exactas entre cada inyección y su sensor no se levantaron y quedan como dato pendiente para la selección con el fabricante.

Instrumentación y comportamiento operacional

Durante el levantamiento inicial se identificaron anomalías en las señales TIT2114 y PIT2116. Según los antecedentes de la intervención, ambas fueron corregidas durante el estudio; las capturas previas se conservan en el Anexo Q. La traza de temperatura es prácticamente plana y la de presión presenta cambios de nivel y dispersión, sin que las imágenes permitan separar por sí solas fallas instrumentales de perturbaciones reales. Aguas abajo, TIT318R5 en Línea 1 y TIT6005 en Línea 2 registraron variaciones térmicas. En AK2, la tendencia de TIT6005 registrada el 8 y 9 de marzo de 2026 abarca aproximadamente 219–226 °C; sus mínimos alcanzan la banda de saturación de referencia de 218,7–220,7 °C para 21,6–22,5 barg. Estas oscilaciones justifican revisar la respuesta del lazo, pero no demuestran que el retardo del sensor sea su causa. Las señales caracterizan la llegada al consumidor, no la evaporación completa junto a la inyección.

La principal brecha pendiente corresponde al caudal de condensado inyectado. El flujómetro disponible indica valores próximos a 15 t/h, magnitud que no resulta coherente con el balance preliminar ni con las condiciones observadas, por lo que su señal no se considera representativa. Esta limitación impide verificar directamente si existe sobreinyección o subinyección y reduce la trazabilidad del lazo. En los apartados siguientes se determina el caudal teórico mediante un modelo en EES y se plantea recuperar la medición y revisar la geometría de mezcla. La condición de cada señal y su uso en el diagnóstico se resumen en la Tabla P.7 del Anexo P.

La revisión conjunta muestra una diferencia entre contar con un sistema operando y disponer de trazabilidad suficiente para verificarlo. Las temperaturas aguas abajo confirman que existe reducción térmica, pero no permiten conocer el caudal real pulverizado ni demostrar que la totalidad del condensado se evaporó antes de los codos. Por esta razón, la condición actual se clasifica como operativa con brechas de medición y de instalación, no como una falla termodinámica demostrada.

3.5.2 Balance termodinámico

El balance de cada estación se formula para mezcla directa adiabática entre vapor sobrecalentado y agua presurizada:

$$\dot{m}_v h_e + \dot{m}_c h_c = (\dot{m}_v + \dot{m}_c) h_s, \qquad \dot{m}_c = \dot{m}_v \frac{h_e - h_s}{h_s - h_c}. \tag{3.11}$$

El modelo se desarrolló y resolvió en EES (F-Chart Software, s. f.), que evalúa las entalpías del vapor y del agua con sus funciones internas de propiedades termodinámicas a partir de la presión absoluta y la temperatura de cada corriente. Se utiliza agua de inyección a 26,1 bar(a) y 175,9 °C. No se fuerza un margen fijo de temperatura: se conservan las temperaturas de salida de los casos registrados, se desprecia el calor perdido en la zona inmediata de mezcla y se verifica el balance de masa. La Tabla 3.11 resume las entradas y los resultados del modelo; sus pantallas se detallan en el Anexo B (Figuras B.2 y B.3).

Tabla 3.11. Resultados del modelo EES de atemperación.

Caso	Vapor [kg/h]	Entrada [bar(a) / °C]	Salida [bar(a) / °C]	h_e [kJ/kg]	h_s [kJ/kg]	h_c [kJ/kg]	Inyección [kg/h]
L1, mayor	39.700	21,5 / 247,6	21,0 / 219,9	2.889	2.815	745,2	1.423
L1, menor	41.123	21,0 / 219,9	20,5 / 218,7	2.815	2.814	745,2	11,1
L2	26.800	22,5 / 235,4	22,0 / 222,3	2.851	2.816	745,2	454,3

El modelo establece una demanda de referencia de 1.423 kg/h en el atemperador mayor de la Línea 1 (primera etapa), 11,1 kg/h en el menor (segunda etapa) y 454,3 kg/h en Línea 2, bajo las entradas puntuales. Estos resultados proporcionan valores de contraste para revisar dosificación y medición. La suma de 1.888,4 kg/h se comparará con la señal global cercana a 15 t/h una vez conciliadas escala, unidades, totalización, frontera y sincronización; esa conciliación es necesaria para diagnosticar sobreinyección o subinyección.

Las razones de inyección son 3,58 % para L1 mayor, 0,027 % para L1 menor y 1,70 % para L2. En la serie de la Línea 1, la salida del atemperador mayor, 41.123 kg/h, es la entrada del menor. La baja demanda de la segunda etapa es coherente con una función de ajuste fino. El balance define la demanda térmica, mientras la evaporación completa se verifica mediante la geometría y el comportamiento de mezcla. Las distancias de 2,5 a 4,2 m deben contrastarse con boquilla, presión diferencial, velocidad, tamaño de gota y recomendación del fabricante, complementando la temperatura aguas abajo con observación de drenaje y fase.

Para comprobar que el resultado no depende de la herramienta, el mismo balance se recalculó con la formulación industrial IAPWS-IF97 (International Association for the Properties of Water and Steam [IAPWS], 2012), tratando el agua de inyección como líquido comprimido a 26,1 bar(a). Se obtienen 1.443, 9,7 y 464 kg/h (Tabla B.1, Anexo B), es decir, diferencias de 1,4 % en el atemperador mayor y de 2,2 % en la Línea 2. En el menor la diferencia relativa es mayor porque su salto entálpico es inferior a 1 kJ/kg, pero su magnitud absoluta, 1,4 kg/h, es despreciable frente al total de la línea. Los valores adoptados en esta memoria son los del modelo EES.

3.5.3 Propuesta y pruebas de aceptación

La propuesta busca que el condensado inyectado se atomice, evapore y mezcle antes de alcanzar un codo, derivación o sensor. El balance establece la demanda térmica y la revisión geométrica identifica dónde actuar; la normalización de la señal de caudal y la verificación de evaporación completan el criterio de aceptación.

La secuencia de decisión se detalla en el Anexo P (Figura P.8). La alternativa preferente es reubicar el punto de inyección hasta disponer de los 6 m de tramo recto, porque corrige la restricción geométrica sin depender de una tecnología más compleja. El proveedor debe confirmar la distancia de mezcla y evaporación para cargas mínima, normal y máxima.

Tabla 3.12. Decisión recomendada para cada condición de atemperación.

Punto	Distancia al codo	Caudal EES	Decisión inicial	Condición para aceptar
L1, mayor	2,5 m	1.423 kg/h	Priorizar reubicación	Tramo recto de 6 m o evaporación garantizada por el proveedor
L1, menor	4,0 m	11,1 kg/h	Verificar selección y sensor	Evaporación demostrada por proveedor
L2	4,2 m	454,3 kg/h	Verificar o reubicar	Cumplimiento para cargas mínima y máxima

Alternativas técnicas para restricción de espacio

Si la reubicación no es viable, se recomienda solicitar selección de un equipo de atomización avanzada, por ejemplo un sistema asistido por vapor, Venturi o tecnología equivalente. La mención de modelos comerciales constituye una referencia de preselección y no una especificación de compra. La decisión debe comparar tamaño de gota, rangeabilidad, caída de presión, consumo de vapor auxiliar, mantenimiento y distancia garantizada hasta el primer codo.

Tabla 3.13. Comparación de alternativas para el punto de 2,5 m.

Alternativa	Ventaja	Restricción	Decisión
Reubicar equipo actual	Elimina la limitación geométrica	Requiere espacio y modificación de línea	Primera opción
Atomización asistida por vapor	Gotas más finas y mayor rangeabilidad	Requiere vapor auxiliar y selección específica	Evaluar si no hay espacio
Atemperador Venturi	Favorece turbulencia y mezcla	Introduce caída de presión	Comparar con operación
Conservar disposición	Menor CAPEX inmediato	No demuestra evaporación antes del codo	No recomendable sin validación

La solicitud técnica debe incluir caudal de vapor mínimo, normal y máximo; presión y temperatura de entrada; temperatura objetivo y margen respecto de saturación; diámetro interior; presión, temperatura y caudal disponible de condensado; distancia al codo, sensor y primera derivación; orientación de la boquilla; y disponibilidad de vapor de atomización. Sin estos datos, una reducción declarada de distancia de mezcla no puede extrapolarse de manera defendible a Plywood.

La tubería aguas abajo debe permanecer aislada y libre de restricciones dentro de la zona definida. Si la geometría conserva codos cercanos, se debe comprobar que estos no reciben impacto de gotas y que existe drenaje en cualquier punto bajo. El sensor de control se ubicará después de la zona de mezcla estabilizada, evitando que una lectura local gobierne el lazo antes de completarse la evaporación.

La selección final requiere una oferta técnica garantizada por el proveedor; las hojas de datos, las referencias de fabricante y los criterios de comparación empleados se concentran en el Anexo G.

Recuperación de medición y validación

La primera acción operacional es reparar, calibrar o reemplazar el flujómetro de condensado. La nueva medición debe definir unidades, rango, frontera, sentido de flujo y correspondencia con cada atemperador. Después se registrarán de forma sincronizada caudal de vapor, caudal de inyección, presión y temperatura de ambas corrientes, apertura de válvula

y temperatura aguas abajo. Esto permitirá comparar la medición con el balance EES sin confundir señales de distintos instantes.

La mejora se considera aceptada cuando el balance, la señal medida y la respuesta térmica son coherentes en distintos niveles de carga, sin oscilación sostenida de la válvula ni aumento anómalo de condensado aguas abajo. No se asigna ahorro directo en esta etapa: su beneficio verificable es recuperar control del proceso y reducir el riesgo de gotas o sobreinyección. Una reducción de consumo solo podrá incorporarse después de una campaña antes-después.

3.6 Drenaje de condensado y trampas de vapor

3.6.1 Condición observada

El catastro de Planta Plywood registró 128 trampas distribuidas en secadores, prensas, sala de vapor, túnel Traviesa, drenajes de línea y sectores AK1 y AK2. Su función es evacuar condensado y aire sin descargar vapor vivo en régimen normal. El levantamiento clasificó 117 unidades como operativas y 11 como no operativas o deficientes, equivalentes a aproximadamente 91 % y 9 % del total, respectivamente. Por tipo, 104 son de flotador, 18 termodinámicas y 6 termostáticas; la clasificación completa se detalla en la Tabla P.8 del Anexo P.

Distribución por sector

La mayor cantidad de trampas se concentra en los secadores 27, 17, AK2 y AK1, que reúnen 103 de las 128 unidades. Esta distribución responde al número de bancos o circuitos que requieren evacuación continua. Los sectores restantes incluyen drenajes de red y puntos que, aunque representan menos unidades, pueden afectar una línea completa cuando dejan de operar.

Tabla 3.14. Distribución de trampas registradas y unidades deficientes por sector.

Sector	Total registrado	No operativas o deficientes
Secador 27	34	1
Secador 17	31	2
Secador AK2	22	0
Secador AK1	16	0
Costado izquierdo AK2	10	5
Túnel Traviesa	7	1
Prensas	4	0
Sala de vapor	2	0
Drenaje secador AK1	2	2
Total	128	11

Las 11 unidades deficientes se distribuyen en el costado izquierdo de AK2 (5), secador 17 (2), drenaje de AK1 (2), túnel Traviesa (1) y secador 27 (1). La ubicación debe considerarse junto con el modo de falla: una trampa con paso interno produce una descarga energética, mientras que una trampa cerrada compromete la evacuación. El catastro individual con ubicación, tipo y observación constituye el respaldo de mantenimiento y no se reproduce en el cuerpo del informe.

Modos de falla e implicancias

Una trampa abierta o con paso interno descarga vapor hacia el retorno o el ambiente; el impacto energético neto depende de su destino y recuperación. Una trampa cerrada im-

pide evacuar condensado y favorece inundación, inestabilidad térmica y arrastre. El drenaje insuficiente puede asociarse a obstrucción, desgaste, presión diferencial inadecuada o selección deficiente. La inspección permite clasificar la condición observada, pero cuantificar su impacto requiere verificar la frontera, la presión de descarga y el diámetro efectivo o realizar un ensayo específico.

La clasificación se basa en el levantamiento disponible, observaciones operacionales y comportamiento térmico. No todas las unidades fueron sometidas a una medición simultánea de ultrasonido, temperatura aguas arriba y aguas abajo y presión diferencial. En consecuencia, la condición de cada trampa debe confirmarse antes del recambio y luego incorporarse a una rutina de inspección que permita distinguir vapor vivo, vapor flash y descarga normal de condensado caliente.

3.6.2 Evaluación de modos de falla

Los modos de falla se analizan por separado porque producen efectos distintos. La falla abierta puede descargar vapor equivalente; la falla cerrada retiene condensado y eleva el riesgo operacional sin constituir necesariamente una pérdida directa hacia el exterior. La clasificación funcional de ambos grupos se detalla en la Tabla P.9 del Anexo P.

Trampas abiertas o con paso interno

Se aplicó el mismo modelo de descarga crítica utilizado en AK1, con 23,21 bar(a), 220 °C, Cd = 0,62 y descarga hacia atmósfera. Como no se conoce la holgura real, el diámetro efectivo se trató como parámetro. Para la línea base se seleccionó 2 mm, una condición intermedia que evita atribuir a la trampa el diámetro completo de su conexión. Las trampas del recambio son de conexión NPS 1 (DN25), salvo una de 2 pulgadas destinada a carga continua (Anexo G). Respecto de ese diámetro nominal, 2 mm representan el 8 % del diámetro y el 0,64 % del área de paso; el rango de sensibilidad, de 1 a 5 mm, cubre entre el 4 y el 20 % del diámetro (Figura P.9, Anexo P). Como el orificio interno de descarga es menor que la conexión, la fracción referida a ese orificio es mayor; su dimensión corresponde a la ficha de cada modelo.

Tabla 3.15. Resultado base para las cinco trampas abiertas o con paso interno.

Hipótesis	Pérdida [kg/h]	Potencia equivalente [kW]	Vapor [t/año]	Costo [USD/año]
deff = 2 mm (8 % de DN25); 8.400 h/año	114,0	58,0	957,6	10.237

El resultado base es 114,0 kg/h de vapor equivalente, 58,0 kW, 957,6 t/año y 10.237 USD/año. La sensibilidad completa abarca desde 28,5 kg/h para 1 mm hasta 711,5 kg/h para 5 mm. Este rango confirma que la inspección funcional y la medición son indispensables antes de usar el resultado como ahorro contractual. La sensibilidad aplicada a las cinco trampas abiertas se representa en la Figura P.9 del Anexo P.

Trampas cerradas o con drenaje insuficiente

La masa que una trampa debe evacuar depende de la carga térmica del punto. En ausencia de esa información individual, se utilizó una relación paramétrica:

$$\dot{m}_{\text{cond}} = \frac{\dot{Q}_{\text{servicio}}\, 3600}{h_{fg}}, \qquad 1 \text{ kW} \approx 1{,}97 \text{ kg/h de condensado.} \tag{3.12}$$

Para una carga referencial de 25 kW por punto, cada trampa debería evacuar 49,2 kg/h. En seis puntos, el caudal no evacuado si todos los drenajes estuvieran bloqueados sería 294,9 kg/h, aproximadamente 328 L/h con una densidad de 900 kg/m³, o 2,36 t en ocho horas. Los totales se calculan antes del redondeo. El líquido puede redistribuirse, ser arrastrado o alcanzar otro drenaje; no se afirma que toda esa masa permanezca inmóvil.

La consecuencia principal es operacional: reducción de sección útil, inestabilidad de flujo, menor transferencia de calor, arrastre de gotas y solicitaciones hidráulicas sobre codos, válvulas, radiadores o soportes. Por ello, no se suma el escenario de 294,9 kg/h a las pérdidas directas de vapor ni se le asigna un costo de vapor vivo.

La sensibilidad del escenario es amplia: para 5 kW por punto, las seis trampas representarían 59,0 kg/h no evacuados; para 100 kW por punto, el valor alcanzaría 1.179,7 kg/h. Estos extremos no constituyen predicciones de operación, sino escenarios que muestran por qué la carga real debe levantarse antes de dimensionar o comparar capacidades. Durante el arranque, la demanda de drenaje puede ser mayor que en régimen estable; el Anexo J cuantifica esa carga transitoria para el calentamiento de la red desde condición fría.

Síntesis y limitaciones

El sistema presenta simultáneamente una pérdida energética potencial en cinco trampas y una brecha de drenaje en otras seis. La primera se incorpora como línea base paramétrica para el recambio; la segunda se utiliza para justificar criticidad, capacidad y mantenimiento. Antes de seleccionar cada trampa deben verificarse presión local, contrapresión, carga normal y de arranque, tipo de servicio, orientación y descarga.

Tabla 3.16. Tratamiento diferenciado de los modos de falla de trampas.

Modo de falla	Resultado de referencia	Interpretación	Uso posterior
Abierta o con paso interno	114,0 kg/h; 58,0 kW; 957,6 t/año	Pérdida energética potencial para deff = 2 mm	Ahorro paramétrico por recambio
Cerrada o drenaje insuficiente	294,9 kg/h para 25 kW por punto	Condensado potencial no evacuado; no es vapor perdido	Capacidad, confiabilidad y mantenimiento

La priorización debe considerar simultáneamente energía y consecuencia. Las trampas con paso interno requieren confirmación temprana porque su efecto se acumula durante todas las horas de operación. Las trampas cerradas, aun sin una descarga energética directa, pueden tener prioridad igual o mayor cuando protegen puntos bajos, equipos con serpentines o sectores donde se han observado golpes, inestabilidad térmica o daño de radiadores.

Los 114,0 kg/h y 294,9 kg/h provienen de hipótesis diferentes y no deben sumarse. La sensibilidad por diámetro y los escenarios de carga se detallan en el Anexo F.

3.6.3 Recambio, economía y mantenimiento

La intervención considera las 11 trampas clasificadas como deficientes: cinco abiertas o con paso interno y seis cerradas, bloqueadas o con capacidad insuficiente. El recambio debe normalizar la estación completa, incluyendo válvulas, filtro, trampa, orientación, pendiente y descarga. No se recomienda sustituir equipos únicamente por diámetro de conexión; cada modelo debe comprobar capacidad para presión diferencial, carga normal y carga de arranque. El alcance y el resultado esperado por modo de falla se detallan en la Tabla P.10 del Anexo P.

La cotización contempla diez trampas termodinámicas TD62M de 1 pulgada y una trampa de flotador y termostática FT44-32 TV de 2 pulgadas. Las termodinámicas se orientan a drenajes de línea; la trampa de flotador resulta más apropiada para carga continua. La

asignación definitiva por TAG se realizará después de verificar presión aguas abajo, contrapresión del retorno, factor de seguridad y recomendación del fabricante.

Inversión y evaluación económica

La inversión cotizada asciende a 26.295.942 CLP para diez trampas TD62M y 3.314,76 USD para una FT44-32 TV. Con el tipo de cambio de 887 CLP/USD utilizado en la cotización original, el suministro consolidado es 32.960,69 USD. Este monto no debe interpretarse como CAPEX instalado si no incluye fittings, juntas, retiro, mano de obra, pruebas y puesta en servicio.

Tabla 3.17. Evaluación económica resumida del recambio.

Concepto	Valor	Alcance
Inversión cotizada	32.960,69 USD	Suministro de 11 trampas
Pérdida evitable	114,0 kg/h	Cinco trampas; deff = 2 mm
Vapor equivalente	957,6 t/año	8.400 h/año
Ahorro referencial	10.237 USD/año	Costo de vapor = 10,69 USD/t
Payback simple	3,22 años / 38,6 meses	No monetiza beneficio de seis trampas cerradas

$$\text{Payback}_{\text{trampas}} = \frac{32.960{,}69}{10.236{,}74} = 3{,}22 \text{ años.} \tag{3.13}$$

El cálculo es deliberadamente conservador en alcance: toda la inversión se compara con el beneficio energético de solo cinco trampas. Las otras seis aportan confiabilidad al restituir drenaje y disminuir riesgo de condensado, golpe de ariete y pérdida de transferencia de calor, pero esos efectos no se monetizan. Si el suministro no incluye montaje, el payback instalado será mayor.

La intervención se ejecutó el 28 de julio de 2026. El análisis elaborado y validado por CMPC registra que la desviación estándar de presión disminuyó de 0,797 a 0,0763 bar en el Secador 27 (Línea 1) y de 0,534 a 0,153 bar en AK2 (Línea 2), equivalentes a 90,4 % y 71,3 %. La de temperatura bajó de 6,99 a 1,32 °C y de 1,41 a 0,715 °C. CMPC relaciona esta mayor estabilidad operacional con el recambio de trampas (CMPC Planta Plywood, 2026b). Las medias de consumo cambiaron +0,18 % y −0,64 %, mientras su dispersión aumentó 19,9 % y 18,6 %. El resultado respalda el valor funcional de la intervención; su interpretación y el seguimiento requerido para cuantificar ahorro se desarrollan en el Anexo M. Las 957,6 t/año y el payback de 3,22 años mantienen su base paramétrica.

La sensibilidad entre 1 y 5 mm y los escenarios de condensado no evacuado se detallan en el Anexo F; las cotizaciones y la asignación por TAG, en el Anexo G; y la estadística completa de la comparación antes–después, en el Anexo M.

Plan de mantenimiento y verificación

El recambio corrige la condición inicial, pero el beneficio solo se sostiene con inspección sistemática. Se propone una matriz por TAG que registre modelo, servicio, presión, fecha de instalación, última prueba, condición y acción. La termografía permite identificar patrones térmicos anómalos; el ultrasonido ayuda a distinguir descarga normal, paso continuo y ausencia de operación. Ambos métodos deben interpretarse según el principio de funcionamiento de la trampa.

Los indicadores de cierre son: cero trampas con soplado continuo, cero puntos sin descarga, 100 % de los equipos intervenidos identificados y 100 % de las inspecciones programadas

Tabla 3.18. Programa mínimo de mantenimiento y metas.

Actividad	Frecuencia	Meta	Registro
Inspección visual	Mensual en puntos críticos	Sin fugas, corrosión ni bloqueo visible	Lista por TAG
Termografía + ultrasonido	Trimestral	Sin paso continuo ni falta de descarga	Tendencia comparativa
Limpieza de filtros	Semestral o por condición	Sin obstrucción relevante	Orden de trabajo
Auditoría completa	Anual	100 % de trampas clasificadas	Matriz actualizada
Verificación postrecambio	En puesta en servicio	11 puntos operativos	Protocolo de aceptación

ejecutadas. Para las seis fallas cerradas se verificará además el comportamiento del equipo o línea protegido, buscando menor acumulación, estabilidad térmica y ausencia de golpes durante arranque y cambios de carga.

3.7 Sector AK1

3.7.1 Condición observada

El sector AK1 presenta una descarga visible de fluido caliente hacia el exterior, conocida operacionalmente como “sauna”. El levantamiento mostró que la condición no se limita a un solo componente, sino que involucra las trampas ubicadas al inicio del sector, los drenajes de la línea de vapor, siete líneas de aireación, válvulas manuales y una descarga común. La nube visible confirma una liberación de energía al ambiente, aunque su observación no permite diferenciar por sí sola vapor vivo, vapor flash y condensado caliente.

La distribución actual comprende un aireador asociado a la primera sección del secador, dos a la segunda y tres a la tercera, además de una séptima conexión tomada directamente desde el extremo de la línea de vapor. Las líneas confluyen hacia el sistema exterior junto con rutas de drenaje. Esta superposición dificulta atribuir la descarga visible a una única fuente y explica por qué el sector debe diagnosticarse como un subsistema integrado.

Evidencia termográfica y condición de los aireadores

Las líneas de aireación registraron temperaturas centrales entre 130,4 °C y 156,9 °C, con máximos entre 131,9 °C y 171,5 °C. El valor máximo se obtuvo en el aireador 7, conectado directamente al extremo de la línea de vapor. Las mediciones fueron realizadas con las válvulas manuales cerradas y los operadores indicaron que estas no forman parte de una maniobra habitual. La presencia de temperaturas elevadas aguas abajo es, por tanto, compatible con cierre no hermético o permanencia de fluido caliente.

La Figura 3.5 reúne la evidencia térmica; el Anexo N documenta la curvatura de una línea de aireación y el antecedente de paso por sus válvulas.

El conjunto de evidencias indica una separación funcional deficiente entre venteo, drenaje y evacuación de condensado. La descarga puede recibir aportes de más de una ruta y, por tanto, no debe atribuirse exclusivamente a los aireadores. El detalle de las siete mediciones se mantiene en el Anexo E. A continuación, la descarga se evalúa mediante escenarios de diámetro efectivo y se analiza la normalización con drenaje aéreo, estaciones de trampeo y eliminación de conexiones sin función operacional vigente.

Tabla 3.19. Síntesis de evidencias del sector AK1.

Hallazgo	Condición observada	Limitación
Descarga exterior	Nube continua de fluido caliente en el punto “sauna”	No determina composición ni caudal
Aireadores	7 líneas térmicamente activas con válvulas cerradas	La termografía no distingue fases
Aireador 7	Máximo de 171,5 °C y conexión directa a línea de vapor	La fuga efectiva requiere medición
Trampas y drenajes	Condición deficiente en el inicio y evacuación del sector	Se requiere evaluar cada ruta de descarga



Figura 3.5. Evidencia representativa del sector AK1. A la izquierda, descarga exterior tipo “sauna”; a la derecha, aireador 7 con temperatura máxima de 171,5 °C. Fuente: elaboración propia.

Interacción entre suministro, drenaje y venteo

Las trampas tomadas directamente desde la línea de alimentación constituyen la primera barrera para evacuar condensado sin perder vapor. Si una de ellas permanece abierta, el vapor puede ingresar al colector de descarga y aumentar la manifestación visible del “sauna”. Si permanece cerrada o descarga de forma insuficiente, el condensado puede continuar hacia el secador o acumularse en la línea. De manera simultánea, una válvula manual de aireador con paso interno puede aportar vapor o mezcla caliente desde el interior del equipo.

La evidencia confirma la anomalía, pero no su reparto por componente. Para cuantificar cada aporte sería necesario aislar ramales de manera controlada, verificar trampas mediante ultrasonido o medición de temperatura comparativa y medir el caudal de descarga. Esta limitación fundamenta el uso de una evaluación paramétrica en lugar de presentar la pérdida estimada como caudal medido.

Consecuencias observables

La condición actual implica pérdida de energía útil, menor confiabilidad del drenaje y exposición del entorno a vapor o fluido caliente. También dificulta la inspección del sector, porque una descarga permanente puede ocultar fugas adicionales y normalizar visualmente una condición anómala. Desde el punto de vista del proceso, la evacuación deficiente de condensado puede reducir la superficie efectiva de intercambio del secador y aumentar la variabilidad del calentamiento. Estos efectos se consideran beneficios esperados de la norma-

lización, pero deberán verificarse después de la intervención mediante presión, temperatura, consumo específico y ausencia de descarga continua.

3.7.2 Análisis paramétrico

Como la termografía no distingue entre vapor vivo, vapor flash, condensado caliente o mezcla bifásica, y no hay caudalímetros, la descarga se representó mediante un orificio equivalente y se evaluó como vapor equivalente perdido. El efecto de este supuesto de fase sobre el caudal y sobre el flujo energético se acota en el Anexo H.

Presiones y modelo de descarga

Tabla 3.20. Condiciones utilizadas para los siete aireadores de AK1.

Origen	Cantidad	Dato térmico	Presión aguas arriba [bar(a)]	Criterio
Sección 1	1	199,5 °C	15,36	Saturación a T registrada
Sección 2	2	198,3 °C	14,97	Saturación a T registrada
Sección 3	3	194,4 °C	13,77	Saturación a T registrada
Línea directa de vapor	1	22,2 barg	23,21	Presión de suministro medida

La descarga se considera hacia 1,013 bar(a). Para las relaciones de presión evaluadas existe flujo crítico, por lo que se aplicó el modelo de descarga compresible:

$$\dot{m} = C_d A P_1 \sqrt{\frac{k}{RT_1}} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}. \tag{3.14}$$

$$A = \frac{\pi d_{\text{eff}}^2}{4}. \tag{3.15}$$

La Ecuación 3.14 combina conservación de masa, energía y relaciones isentrópicas de gas ideal para una sección sónica; el factor C_d representa la desviación respecto de la tobera ideal (Çengel y Boles, 2019; NASA Glenn Research Center, s. f.). Para $k = 1{,}3$, el umbral $P_2/P_1 \leq [2/(k+1)]^{k/(k-1)}$ vale 0,546. A 23,21 bar(a), el flujo ideal permanece crítico hasta 12,67 bar(a) aguas abajo. La independencia del caudal respecto de la contrapresión solo vale dentro de ese régimen: su verificación sigue siendo necesaria en descargas conectadas a retornos presurizados. Este uso aproxima vapor como gas ideal y no equivale a un cálculo normativo de válvulas de seguridad según API 520 ni determina el área real de la fuga.

El coeficiente $C_d = 0{,}62$ corresponde al valor habitual de un orificio de borde vivo y absorbe la contracción de la vena fluida; $k = 1{,}3$ es el exponente isentrópico usual del vapor de agua en este rango de presión, y $R = 461{,}5$ J/(kg · K) su constante específica. El Anexo H contrasta esta hipótesis de vapor seco con la alternativa de una descarga bifásica en evaporación instantánea.

Las temperaturas por sección y la presión de la línea directa se leyeron en la pantalla de proceso del secador (Anexo P, Figuras P.11 y P.12). Las presiones de las secciones 1 a 3 son valores equivalentes derivados de la temperatura registrada bajo hipótesis de saturación, no mediciones de línea; solo la línea directa dispone de lectura manométrica. El diámetro de 1/2 pulgada de la línea no se usa como abertura de fuga: una válvula no hermética normalmente descarga a través de una holgura menor. Por ello se analizaron diámetros efectivos de 1, 2,

3 y 5 mm.

Resultados y escenario base

Tabla 3.21. Sensibilidad de la pérdida total estimada en los aireadores AK1.

deff	Pérdida total [kg/h]	Vapor equivalente [t/año]	Costo [USD/año]	Uso
1 mm	27,4	230,2	2.460	Límite inferior
2 mm	109,8	922,3	9.860	Sensibilidad
3 mm	247,0	2.074,8	22.180	Escenario base
5 mm	686,2	5.764,1	61.618	Condición severa

La misma sensibilidad se representa gráficamente en la Figura P.10 del Anexo P.

El escenario base de 3 mm se adopta como referencia intermedia dentro del rango de sensibilidad evaluado, sin calificarlo como conservador: ese juicio dependería de si se pondera masa, energía o inversión. Bajo esta hipótesis, las siete líneas totalizan 247,0 kg/h, equivalentes a 2.074,8 t/año y 22.180 USD/año para 8.400 h de operación. El aireador 7, conectado directamente al final de la línea de vapor, aporta 51,3 kg/h en este escenario y es el punto individual más crítico por su mayor presión aguas arriba.

La proporcionalidad con d_{eff}^2 explica el amplio rango: pasar de 1 a 5 mm multiplica el área por 25. El valor base es útil para evaluar económicamente la intervención, pero no debe describirse como caudal medido.

La comprobación requiere medir la descarga o realizar una prueba funcional individual. Las termografías completas se detallan en el Anexo D, y el desglose por sección y la sensibilidad, en el Anexo F.

3.7.3 Normalización y economía referencial

La propuesta para AK1 suprime las rutas no controladas de las siete líneas de aireadores y reemplaza el drenaje subterráneo por una línea aérea accesible; su estado actual se documenta en el Anexo N. Antes de eliminar conexiones, ingeniería y el fabricante del secador deben validar cómo se mantendrá la evacuación de aire y gases no condensables durante arranque y régimen. El nuevo arreglo incorpora estaciones de trampeo, aislamiento y retención, sin dejar una descarga permanente de vapor hacia la "sauna". El aireador 7 se prioriza por su conexión directa a la línea de vapor.

La modificación elimina funcionalmente las siete líneas de aireadores, reemplaza el drenaje subterráneo por una línea aérea de 55 m con cuatro estaciones de trampeo e incorpora válvulas check que evitan el retorno hacia los puntos; la comparación aspecto por aspecto se detalla en la Tabla P.11 del Anexo P. La Figura 3.6 compara la disposición actual con la modificación propuesta.

Inversión y efecto energético referencial

El proyecto contempla cuatro trampas TLV F53-21-DN25-SW de 1 pulgada, cuatro válvulas check CKF3M, seis válvulas de globo, soportes, línea aérea y trabajos de normalización. La inversión adoptada es el total de 18.520.950 CLP, con IVA incluido, confirmado para el alcance del proyecto y respaldado por el antecedente comercial de Servicios de Mantención Industrial Guerra e Hijo Ltda. (2026), reproducido en el Anexo G. No se adiciona nuevamente el presupuesto previo de componentes. A 950 CLP/USD equivale a 19.495,74 USD.

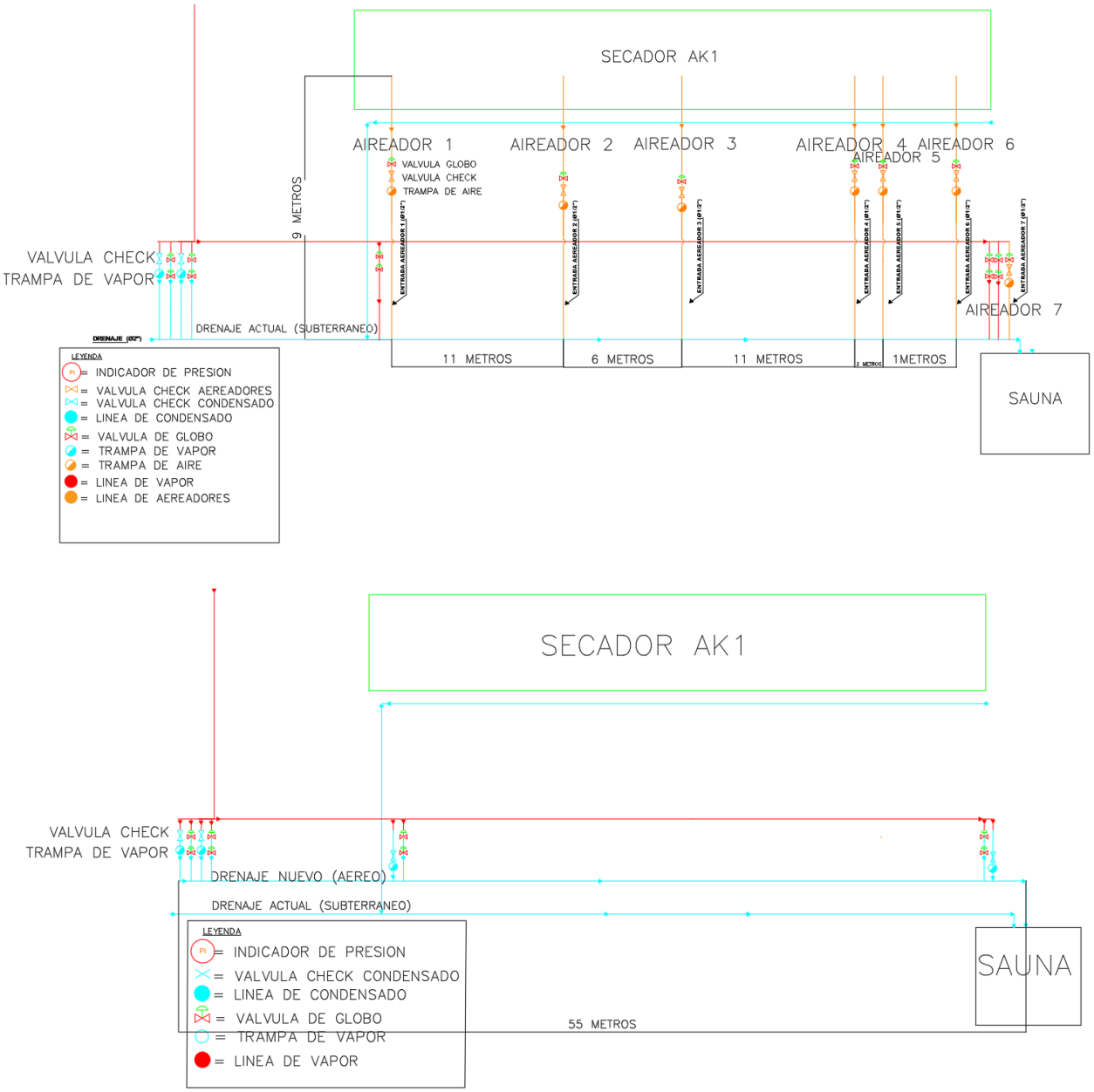


Figura 3.6. Comparación entre disposición actual y modificación propuesta en AK1. Arriba, disposición actual con los siete aireadores y el drenaje subterráneo; abajo, drenaje aéreo propuesto. Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.22. Evaluación técnico-económica resumida del proyecto AK1.

Concepto	Valor original	Valor referencial [USD]	Observación
Inversión total	18.520.950 CLP	19.495,74	IVA incluido; TC: 950 CLP/USD
Beneficio escenario base	2.074,8 t/año	22.180 USD/año	deff = 3 mm; 8.400 h/año

$$\text{Payback}_{\text{AK1}} = \frac{19.495{,}74}{22.179{,}61} = 0{,}879 \text{ años} \simeq 10{,}5 \text{ meses}. \tag{3.16}$$

El escenario base conserva el diámetro efectivo de 3 mm y representa 247,0 kg/h; por ello, el payback es referencial y debe recalcularse con la medición posterior. El desglose por aireador y la sensibilidad entre 1 y 5 mm se detallan en el Anexo F.

La inversión se justifica además por beneficios no monetizados: drenaje visible, reducción de retorno, mayor mantenibilidad y menor exposición a descargas de fluido caliente. Estos beneficios no se agregan al ahorro anual para evitar duplicar efectos que no han sido medidos.

Puesta en servicio y medición del resultado

Antes del montaje se verificará la capacidad de cada trampa con presión aguas arriba, contrapresión, carga normal y de arranque. La nueva línea aérea debe conservar pendiente continua, soportación compatible con expansión y puntos de inspección accesibles. La descarga hacia la "sauna" se mantendrá únicamente como destino controlado del drenaje, sin permitir que una línea de vapor descargue directamente al colector.

Para validar el ahorro se recomienda medir masa o volumen descargado durante periodos estables antes y después, distinguiendo condensado caliente, vapor flash y vapor vivo. La reducción térmica visible no debe transformarse automáticamente en toneladas de vapor. Si la medición real difiere del escenario de 3 mm, el beneficio y el payback se actualizarán con el caudal observado.

3.8 Separación de gotas y control de humedad

La estrategia para la humedad se organiza en tres barreras complementarias. La primera reduce generación local mediante aislación y mantos; la segunda recupera evacuación mediante trampas, drenajes y atemperación; la tercera protege al consumidor mediante separación de gotas. Esta jerarquía evita presentar el separador como sustituto de las causas aguas arriba. Debido a que la Línea 2 alimenta directamente al Secador AK1 y no dispone de un separador equivalente al de la Línea 1, se propone instalar el equipo antes del secador. La función propuesta para el equipo dentro de la Línea 2 se ilustra en la Figura P.13 del Anexo P.

Tabla 3.23. Barreras para controlar condensado libre y humedad arrastrada.

Nivel	Medidas	Función	Indicador
1. Prevención	Aislación y control de atemperación	Reducir generación o gotas no evaporadas	Pérdida térmica y caudal de inyección
2. Evacuación	Trampas y drenajes normalizados	Retirar condensado de la red	Estado funcional y descarga
3. Protección	Separador antes de AK1	Interceptar gotas remanentes	Condensado capturado

La ubicación final debe quedar aguas arriba de AK1 y después de una zona de flujo estabilizado, con espacio para soporte, inspección y drenaje. Si se instala aguas abajo del atemperador, se comprobará que no interfiera con la distancia de mezcla requerida. Una alternativa en la entrada de Plywood capturaría condensado proveniente de CELPAC, pero no controlaría el generado aguas abajo; por eso se prioriza la protección directa del consumidor.

3.8.1 Equipo cotizado y evaluación paramétrica

La cotización QT-5606.2602.0603-Rev.00 corresponde a un separador vertical tipo deflectores NPS 10 pulgadas, clase 600, con cuerpo ASTM A-285 Grado C y conjunto de drenaje compuesto por trampa, filtro, válvulas y retención. El valor neto es 70.000 USD y el total con IVA es 83.300 USD. La compatibilidad mecánica y de proceso debe confirmarse con presión de diseño, caudal, conexión existente, soporte y cargas en boquillas.

Tabla 3.24. Sensibilidad económica del separador a un ahorro equivalente verificado, con 8.400 h/año.

Ahorro equivalente [kg/h]	Recuperación [t/año]	Beneficio [USD/año]	Payback [años]	Interpretación
100	840	8.979,60	9,28	Ahorro hipotético
200	1.680	17.959,20	4,64	Ahorro hipotético
300	2.520	26.938,80	3,09	Ahorro hipotético
500	4.200	44.898,00	1,86	Ahorro hipotético

La función principal del separador es proteger AK1 mediante remoción de líquido. La sensibilidad económica utiliza 83.300 USD con IVA y permite evaluar qué reducción neta de suministro o recuperación energética justificaría la inversión, separada de los beneficios de otras medidas. El CAPEX de instrumentación y montaje pendiente se incorporará al cerrar el alcance. La masa capturada mide extracción, no ahorro de vapor; por ello no se adopta un payback base ni se utilizan los 354,7 kg/h de equivalencia térmica como caudal medido del separador.

Se propone instrumentar el drenaje exclusivo del separador: trampa, acondicionamiento que asegure líquido monofásico y caudalímetro másico con totalizador. El Anexo O define el montaje, el tratamiento del vapor flash y la alternativa de medición bifásica en línea; presión y temperatura por sí solas no cuantifican la fracción líquida. La campaña debe registrar simultáneamente caudal de vapor y régimen productivo para evaluar el beneficio.

3.8.2 Instalación y aceptación del separador

El separador debe instalarse verticalmente según la orientación del fabricante, con soporte independiente cuando corresponda y drenaje de diámetro suficiente. El conjunto debe incluir válvulas de aislamiento, filtro aguas arriba de la trampa, check para impedir retorno y una descarga sin contrapresión excesiva. El P&ID actualizado debe incorporar equipo, TAG, conexiones, drenaje e instrumentos antes de la puesta en servicio.

La eficacia se evaluará con presión y temperatura antes y después, masa drenada, condición de la trampa y comportamiento térmico de AK1. Una temperatura estable no basta para demostrar remoción de gotas; la evidencia principal será el condensado efectivamente separado y la disminución de síntomas aguas abajo bajo condiciones comparables.

3.9 Instrumentación, P&ID y montaje real

3.9.1 Brechas documentales y de montaje

La comparación entre P&ID y terreno permitió identificar brechas documentales y una diferencia funcional de montaje. La documentación disponible no representa completamente la instrumentación de presión instalada y, en el sector del separador VC1-SEP-009, la disposición observada de la línea 210-C02-6008-40 difiere de la filosofía dibujada. Estas diferencias afectan la trazabilidad de mediciones y pueden alterar la interpretación del drenaje.

Trazabilidad de manómetros

Se levantaron 42 manómetros con brechas documentales. Dieciséis estaban representados en el P&ID original sin TAG, mientras que 26 existían en terreno y no figuraban en el plano. Para ordenar el levantamiento se propuso la serie PI-DS-2601 a PI-DS-2642, que al momento del diagnóstico tenía carácter de propuesta de trabajo sujeta a revisión de ingeniería. Esa tramitación se completó durante el estudio, según se detalla más adelante.

Tabla 3.25. Brechas documentales y funcionales consolidadas.

Hallazgo	Cantidad o condición	Tipo	Impacto
Manómetros en P&ID sin TAG	16	Documental	Dificulta identificación entre plano y terreno
Manómetros en terreno ausentes del P&ID	26	Documental	Entrega una representación incompleta del sistema
Línea 210-C02-6008-40	Conexión distinta al P&ID	Funcional y documental	Puede modificar el drenaje del separador

Diferencia de montaje en el drenaje del separador

En el P&ID, la línea 210-C02-6008-40 se representa conectada aguas abajo del conjunto válvula-filtro-trampa. En terreno, la conexión se encuentra antes de dicho conjunto. La Tabla P.14 del Anexo P compara ambas disposiciones elemento por elemento. La configuración observada somete el tramo previo a la trampa a una carga adicional y es compatible con la acumulación detectada cuando se habilita la línea. El hallazgo no permite demostrar por sí solo el mecanismo hidráulico completo, pero sí establece que la operación real no coincide con la filosofía documentada y que el drenaje debe verificarse antes de normalizarlo.

La diferencia se clasifica como crítica respecto de las brechas exclusivamente documentales porque puede afectar la evacuación de condensado y la interpretación de una falla. Cada actualización se considera *red-line* de ingeniería mientras no complete su revisión, aprobación y emisión controlada.

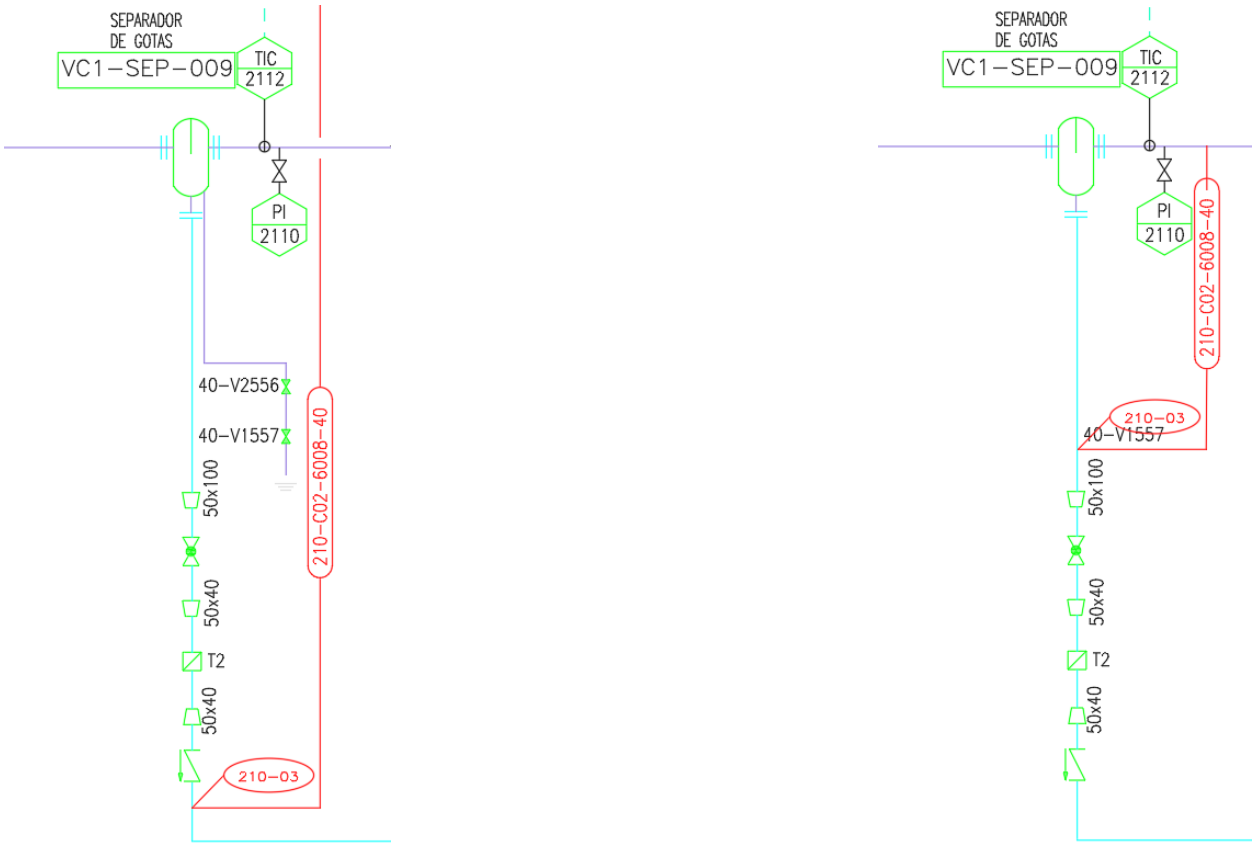


Figura 3.7. Comparación del drenaje del separador VC1-SEP-009. A la izquierda, disposición según P&ID; a la derecha, condición levantada en terreno. Fuente: elaboración propia a partir de documentación e inspección.

Implicancias para operación y mantenimiento

La ausencia de TAG o de representación gráfica impide relacionar con rapidez una lectura local con el tramo correspondiente y dificulta comparar presiones antes y después de válvulas, filtros, trampas y equipos. La brecha adquiere mayor importancia durante una falla, cuando el personal debe identificar puntos de aislamiento y verificar la presión remanente. La incorporación de los 42 instrumentos mejora la trazabilidad del levantamiento y completó el proceso formal de gestión documental, según se detalla más adelante.

En la conexión del separador, el riesgo no proviene únicamente de que el plano esté desactualizado. Si la ruta real permite acumulación antes de la trampa, una maniobra basada en el P&ID puede producir un comportamiento distinto al esperado. Por ello, la corrección propuesta debe integrar inspección de la trampa, limpieza del filtro, verificación de válvulas, confirmación de pendientes y actualización del plano as-built. Modificar solo el dibujo o solo la tubería dejaría incompleta la normalización.

3.9.2 Impacto funcional

El contraste documental identificó dos tipos de brecha: falta de trazabilidad en 42 manómetros y una diferencia funcional en la conexión de la línea 210-C02-6008-40 asociada al separador VC1-SEP-009. Este apartado no asigna una pérdida de energía sin medición; evalúa cómo la discrepancia afecta el diagnóstico, la capacidad de drenaje y la confiabilidad operacional.

Tabla 3.26. Criticidad técnica de las brechas entre documentación y terreno.

Hallazgo	Magnitud	Efecto	Criticidad
Manómetros en P&ID sin TAG	16	Identificación ambigua del punto	Media
Manómetros en terreno no dibujados	26	Documentación incompleta	Media-alta
Conexión 210-C02-6008-40 antes de la trampa	1 línea	Mayor carga sobre tramo previo y drenaje menos confiable	Alta
Posible inundación antes de la trampa	No medida	Compromiso del drenaje del separador	Alta

Efecto funcional del montaje

En el P&ID la derivación se incorpora aguas abajo del conjunto válvula–filtro–trampa; en terreno se conecta antes. La modificación altera la carga hidráulica que debe procesar la estación y puede disminuir el diferencial efectivo disponible:

$$\Delta P_{\text{ef}} = P_{\text{aguas arriba}} - P_{\text{aguas abajo}} - \Delta P_{\text{pérdidas}}. \tag{3.17}$$

Si el tramo previo se inunda o la contrapresión aumenta, la descarga de la trampa puede volverse intermitente o insuficiente. Como el separador debe retirar humedad y evacuarla de forma continua, una descarga inestable reduce su confiabilidad y puede devolver condensado a la red. La condición observada es compatible con ese mecanismo, pero no lo cuantifica porque faltan presión diferencial, caudal de condensado y registro continuo de descarga.

Resultado del análisis

La brecha de manómetros limita la trazabilidad, pero la conexión del drenaje representa el hallazgo de mayor criticidad funcional. El resultado defendible no es una cantidad de vapor perdida, sino la necesidad de normalizar la disposición, verificar la trampa y actualizar el P&ID como documento conforme a obra.

La cadena causal evaluada es la siguiente: la conexión aguas arriba incorpora una carga adicional al tramo previo; esa carga puede aumentar el nivel de condensado y la contrapresión; el diferencial efectivo de la trampa disminuye; y la descarga del separador puede volverse intermitente. El mecanismo es técnicamente plausible y consistente con la disposición observada, pero debe confirmarse con presión antes y después de la trampa, temperatura de descarga y observación de un ciclo completo.

Sin la actualización documental, una presión aparentemente normal puede corresponder a otro ramal y ocultar la condición que limita el drenaje; por ello, la corrección física y la actualización del P&ID deben validarse como una única intervención.

3.9.3 Normalización y formalización documental

La actualización documental formaliza 42 manómetros: 16 ya dibujados sin TAG y 26 existentes en terreno que no estaban representados. El rango PI-DS-2601 a PI-DS-2642 propuesto en el estudio fue revisado y aprobado por gestión documental, y los planos actualizados quedaron incorporados al repositorio oficial de la planta. La identificación de los 42 puntos es, por tanto, un resultado implementado y no una propuesta pendiente. Las demás actualizaciones planimétricas desarrolladas durante el estudio mantienen carácter de red-line técnico hasta completar el mismo procedimiento.

La Figura 3.8 contrasta el P&ID antes y después de incorporar los manómetros y sus TAG; el flujo de formalización seguido se detalla en la Tabla P.12 del Anexo P.

La mejora permite asociar cada presión con su punto real, reconstruir gradientes y

diagnosticar válvulas, trampas y equipos con una referencia común. Su beneficio se expresa como trazabilidad y reducción de error operativo; no se monetiza sin un historial de incidentes o tiempos de intervención comparable.

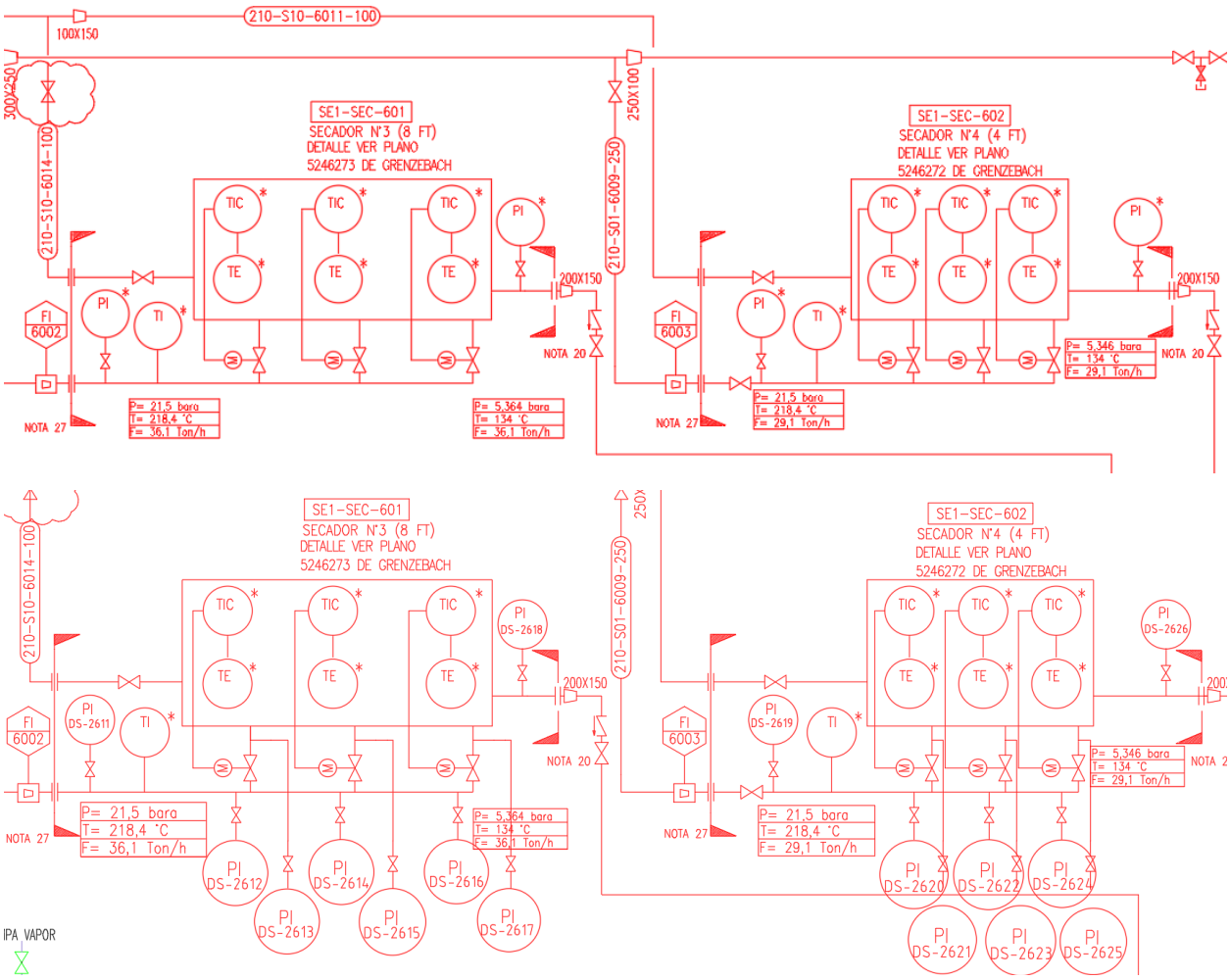


Figura 3.8. Comparación del P&ID antes y después de incorporar manómetros y TAG. Arriba, P&ID original; abajo, P&ID con los manómetros PI-DS incorporados. Fuente: elaboración propia.

Corrección del drenaje del separador VC1-SEP-009

La línea 210-C02-6008-40 se encuentra conectada en terreno antes del conjunto válvula–filtro–trampa, mientras que el P&ID disponible la representa después. La propuesta consiste en definir mediante ingeniería la disposición hidráulica correcta, modificar el montaje y emitir el plano conforme a la condición final. La corrección debe evitar que una carga adicional inunde el tramo previo o reduzca el diferencial efectivo de la trampa del separador.

La Figura 3.7 contrasta ambas disposiciones para el drenaje del separador, y el alcance de la normalización se detalla en la Tabla P.13 del Anexo P.

La puesta en servicio debe realizarse con aislamiento seguro, prueba de estanqueidad y observación de la descarga. La aceptación exige ausencia de retorno hacia VC1-SEP-009, evacuación estable sin soplado continuo y coincidencia entre terreno, TAG y P&ID.

Parte del levantamiento de manómetros y de la incorporación de puntos al P&ID se generó en el marco del programa de certificación normativa DS 10 desarrollado en planta, en el cual el autor tuvo a su cargo el control de avance. Esas actividades, su estado y su delimitación respecto del alcance de esta memoria se describen en el Anexo L.

3.10 Consumo específico aparente de vapor

3.10.1 Base operacional

Para establecer una línea base operacional se recopilaron los registros diarios de la planta entre el 1 de enero y el 30 de junio de 2026 (CMPC Planta Plywood, 2026a). La información vincula el vapor suministrado por CELPAC, el vapor registrado en Plywood y la producción de chapa de los centros asociados a las Líneas 1 y 2. La cobertura común comprende 181 días y permite calcular un indicador de consumo específico de vapor por volumen producido. Las fuentes, su resolución y su cobertura se detallan en la Tabla P.15 del Anexo P.

El indicador representa el desempeño global de cada línea y no el consumo exclusivo de un secador, porque los medidores pueden incluir otros consumidores. Del mismo modo, la diferencia entre CELPAC y Plywood corresponde a dos sistemas de medición independientes y no debe interpretarse directamente como pérdida sin conciliar calibración, ubicación, horarios de cierre y criterios de totalización. El procesamiento y la proyección se presentan a continuación; los registros diarios se mantienen como respaldo digital del estudio.

Preparación y alcance de la base operacional

La integración de las bases requirió homologar fechas, unidades y asignación de centros productivos. Los días sin producción, detenciones o registros incompletos deben distinguirse de la operación normal, ya que pueden alterar el cociente entre vapor y volumen de chapa. Por esta razón, el indicador mensual se construye con sumas de vapor y producción del mismo periodo, evitando promediar razones diarias con distinta ponderación.

La serie enero-junio de 2026 se utiliza como línea base previa a la implementación total de las mejoras. El valor proyectado no corresponde a un resultado ya medido después de las intervenciones, sino a una estimación basada en la energía recuperable de las medidas cuantificadas. La comprobación posterior deberá comparar periodos equivalentes y controlar, en la medida posible, producción, mezcla de productos, humedad inicial, disponibilidad de equipos y condiciones de operación.

3.10.2 Resultados e interpretación

El indicador se denomina aparente porque el vapor totalizado por línea puede incluir consumidores adicionales a los secadores y porque no se normalizó por humedad, espesor, especie, receta, detenciones ni carga efectiva.

$$I_v = \frac{m_{\text{vapor}}}{V_{\text{chapa}}}. \tag{3.18}$$

Tabla 3.27. Consumo específico aparente mensual por línea.

Mes	Línea 1 [t/m³]	Línea 2 [t/m³]	Total [t/m³]
Enero	0,959	0,833	0,897
Febrero	0,967	0,898	0,933
Marzo	0,939	0,946	0,943
Abril	0,949	1,074	1,011
Mayo	0,941	1,090	1,016
Junio	0,957	1,125	1,041
Ponderado	0,952	0,996	0,974

La Figura 3.9 muestra la evolución mensual del indicador en ambas líneas.

Tabla 3.28. Resumen acumulado del periodo evaluado.

Parámetro	Línea 1	Línea 2	Total
Vapor registrado [t]	154.213,5	158.598,0	312.811,5
Producción asociada [m³]	162.046,2	159.180,2	321.226,4
Consumo específico aparente [t/m³]	0,952	0,996	0,974

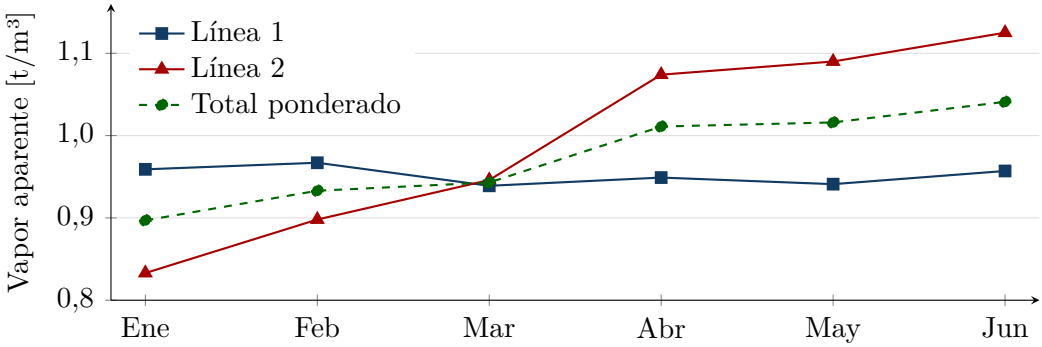


Figura 3.9. Evolución mensual del consumo específico aparente de vapor. Fuente: elaboración propia a partir de registros operacionales.

Interpretación de la tendencia

La Línea 1 se mantiene relativamente estable entre enero y junio, con una variación de −0,24 %. La Línea 2 aumenta desde 0,833 hasta 1,125 t/m³, equivalente a 35,15 %, y concentra la principal variación del indicador total, de 16,01 %. Las tres variaciones se calculan sobre cocientes mensuales sin redondear, a diferencia de los tres decimales presentados en la Tabla 3.27. El resultado identifica la Línea 2 como foco prioritario de seguimiento. La explicación de la tendencia deberá contrastar tanto las condiciones del vapor como producción, receta, humedad y disponibilidad.

$$\Delta I_v = \frac{I_{v,\text{junio}} - I_{v,\text{enero}}}{I_{v,\text{enero}}}\,100. \tag{3.19}$$

En el acumulado, la Línea 2 presenta 0,996 t/m³ frente a 0,952 t/m³ en la Línea 1, una diferencia relativa de 4,69 % calculada antes del redondeo. Esta comparación ponderada incorpora toda la masa de vapor y el volumen producido en el periodo, pero no corrige diferencias de producto, humedad o disponibilidad entre líneas.

El indicador es sensible tanto al numerador como al denominador. Puede aumentar por mayor uso de vapor, por menor producción durante partidas y detenciones, o por una combinación de ambos efectos. Por esa razón, la tendencia de la Línea 2 se considera una señal para profundizar el análisis y no una cuantificación automática de ineficiencia.

La validación posterior a las mejoras debería comparar periodos equivalentes y, cuando los datos estén disponibles, estratificar por espesor, especie, humedad inicial y final, receta, horas efectivas y volumen procesado. El valor mensual debe acompañarse con dispersión diaria y disponibilidad de los equipos para distinguir una mejora sostenida de una variación productiva.

Comparación de totalizadores

En el mismo periodo, CELPAC registró 319.493,1 t y Plywood 312.811,5 t. La diferencia de 6.681,6 t representa 2,09 % del total de CELPAC. Su identificación establece una tarea de conciliación de calibración, ubicación, desfases horarios, criterios de totalización y periodos efectivos. El balance de fronteras del Anexo I distingue el tramo entre medidores de la red

interna evaluada: las pérdidas aguas abajo del medidor de Plywood quedan fuera de la explicación de esa diferencia. La incertidumbre conjunta pendiente impide separar todavía error instrumental y fenómenos físicos del tramo intermedio. Por ello, la discrepancia se mantiene como indicador de conciliación y no se incorpora a las oportunidades energéticas ni al ajuste de diámetros efectivos.

La Figura 3.10 compara ambos totalizadores acumulados durante el periodo.

$$\Delta m_{\mathrm{rel}} = \frac{m_{\mathrm{CELPAC}} - m_{\mathrm{Plywood}}}{m_{\mathrm{CELPAC}}}\, 100 = 2{,}09\ \%. \tag{3.20}$$

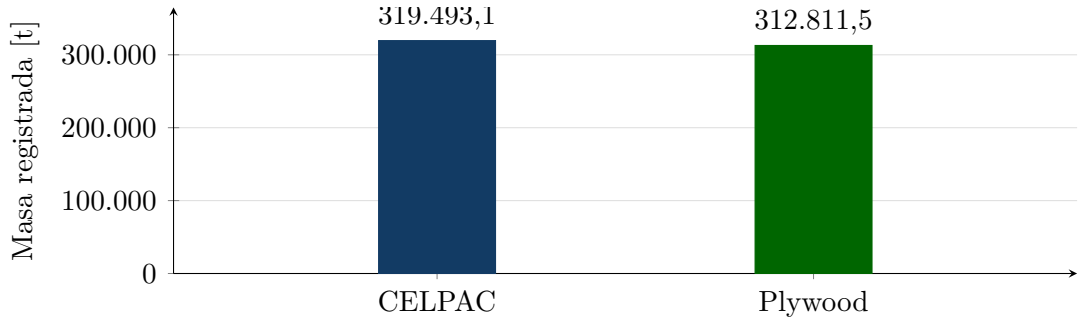


Figura 3.10. Comparación de los totalizadores acumulados de CELPAC y Plywood. Fuente: elaboración propia.

Línea base operacional

El valor ponderado adoptado como línea base es 0,973804 t/m³, redondeado a 0,974 t/m³. Esta referencia permite expresar en el apartado siguiente el efecto teórico de la energía recuperable sobre el consumo por unidad de producción. La proyección no se presenta como desempeño ya alcanzado y deberá validarse después de implementar las medidas, comparando periodos productivamente equivalentes.

3.10.3 Efecto proyectado

Para comparar la línea base de 0,973804 t/m³ con una base anual de 8.400 h se anualiza el total observado de 312.811,5 t mediante el promedio de 181 días calendario: $m_{v,anual} = 312.811{,}5/(181\times24)\times8.400 = 604.884{,}12$ t/año. Se trata de una base común de comparación, diferente de las horas productivas efectivamente registradas. Se conservan seis decimales para reproducir el cálculo, mientras el resultado operacional se informa como 0,974 t/m³, sin atribuir esa precisión a los instrumentos.

Si todo el potencial integrado de referencia se transformara en vapor evitado en la misma frontera, el indicador sería:

$$I_{\mathrm{ref}} = I_{\mathrm{base}} \left(1 - \frac{m_{\mathrm{eq,anual}}}{m_{v,anual}}\right) = 0{,}963047\ \mathrm{t/m^3}. \tag{3.21}$$

La reducción referencial sería 1,10 %, equivalente a 114,99 USD por cada 1.000 m³ a 10,69 USD/t. Esta expresión entrega una referencia productiva para evaluar la cartera. Su contraste con el suministro real debe considerar el aprovechamiento de la entalpía conservada en el condensado y la verificación de los escenarios de descarga; por ello, el indicador proyectado se presenta como normalización energética. La comparación directa entre el indicador base y el normalizado se detalla en la Figura P.14 del Anexo P.

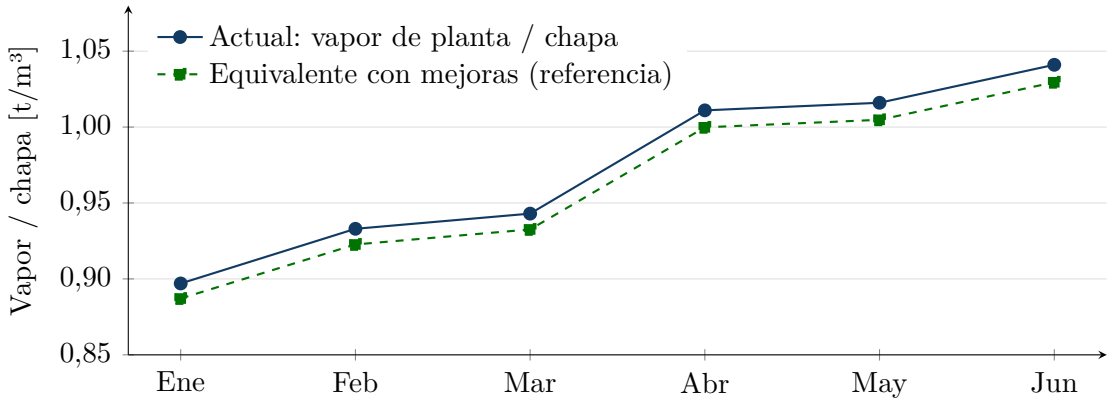


Figura 3.11. Consumo específico mensual observado y reducción equivalente referencial. La línea de proyección no representa una medición posterior. Fuente: elaboración propia.

El seguimiento propuesto permite evaluar tres respuestas: vapor por m^3, dispersión de las variables de suministro y comportamiento del drenaje. La comparación deberá controlar especie, espesor, humedad inicial y final, receta, carga, detenciones y horas efectivas, registrando caudal de vapor y condensado drenado. Esta estructura permite identificar en qué variable se materializa cada beneficio y relacionarlo con el desempeño productivo de Plywood.

3.11 Evaluación integrada y priorización

3.11.1 Potencial energético por nivel de evidencia

La evaluación integrada relaciona las oportunidades energéticas con la decisión de intervención. Las mejoras térmicas se cuantifican mediante el modelo superficial; AK1 y trampas se valorizan con escenarios paramétricos de descarga. Atemperación, separación de gotas, soportación e instrumentación completan la cartera mediante beneficios funcionales de control, drenaje, protección y trazabilidad, evaluados con criterios específicos de aceptación.

Tabla 3.29. Potencial anual según nivel de evidencia; totales calculados antes del redondeo.

Mejora	Vapor eq. [t/año]	Beneficio [USD/año]	Condición
Aislación de cañerías	2.359,74	25.225,58	Modelo superficial de referencia; 8.400 h/año.
Mantos en válvulas	1.289,49	13.784,62	Áreas equivalentes y superficie de referencia; 8.400 h/año.
Subtotal modelado	**3.649,22**	**39.010,20**	Mayor respaldo relativo; requiere termografía posterior.

Tabla 3.30. Escenarios paramétricos de referencia, separados del modelo térmico.

Mejora	Vapor eq. [t/año]	Beneficio [USD/año]	Supuesto crítico
Normalización AK1	2.074,8	22.179,6	$d_{\text{eff}} = 3$ mm; descarga crítica de vapor seco.
Recambio de trampas abiertas	957,6	10.236,7	$d_{\text{eff}} = 2$ mm; cinco unidades.
Subtotal paramétrico	**3.032,4**	**32.416,4**	Requiere medición de fase, presión y caudal.

El potencial integrado de referencia asciende a 6.681,62 t/año, equivalente a 71.426,56 USD/año a la tarifa adoptada. Esta magnitud permite expresar el alcance energético conjunto de las medidas y comparar su contribución. Su interpretación conserva la distinción entre modelo térmico y escenarios paramétricos: la materialización del conjunto exige verificar las descargas, el aprovechamiento energético y la independencia entre beneficios. La Figura 3.12 permite reconocer qué medidas concentran el potencial y cómo se relacionan con su recuperación simple.[1]

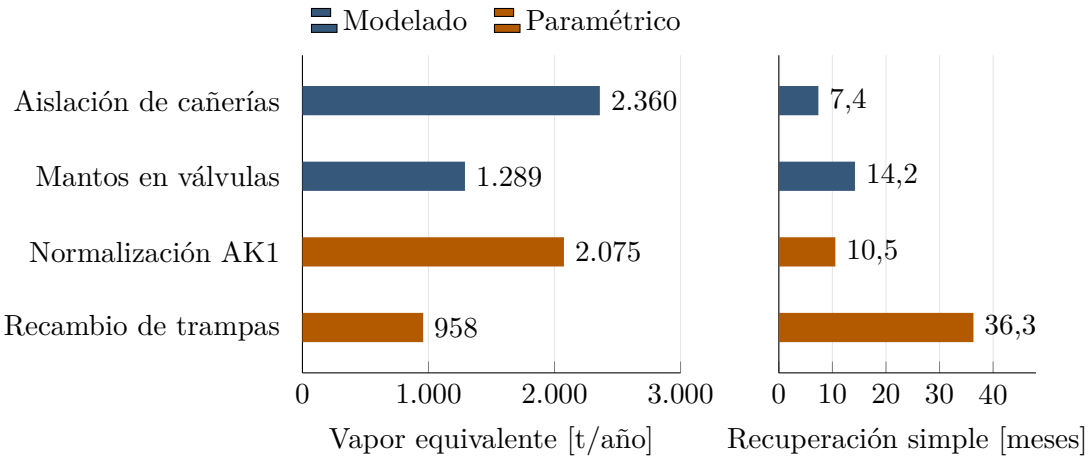


Figura 3.12. Potencial energético anual y recuperación simple por medida. Los resultados modelados y paramétricos se mantienen diferenciados; no se calcula payback global. Fuente: elaboración propia.

La siguiente decisión es específica para cada grupo: verificar superficie, emisividad, longitud ejecutada y horas efectivas en las medidas térmicas; y medir caudal, fase y presión de descarga en AK1 y trampas. Este seguimiento permite contrastar el potencial con el beneficio obtenido y consolidar resultados dentro de una misma frontera energética. La evaluación entrega así tanto una estimación de oportunidad como un criterio para comprobarla.

3.11.2 Diámetro de equilibrio: qué debe demostrar la medición

El componente paramétrico depende del diámetro efectivo de descarga, y como el flujo crítico es proporcional a la sección, el beneficio anual escala con d_{eff}^2. Adoptar un valor puntual obliga a defender una hipótesis que no fue medida. Conviene por eso invertir el planteamiento: en lugar de preguntar cuánto vale el diámetro, se determina qué valor debe superar para que la inversión resulte justificada. Igualando el beneficio anual a la inversión dividida por un periodo de recuperación objetivo se obtiene el *diámetro de equilibrio*

$$d_{\mathrm{eq}} = d_{\mathrm{ref}} \sqrt{\frac{I}{P\, B_{\mathrm{ref}}}}, \tag{3.22}$$

donde B_{ref} es el beneficio anual para d_{ref}, I la inversión y P el plazo exigido en años. Para trampas se conserva la base individual de 32.960,69 USD, y para AK1, 19.495,74 USD. El umbral evalúa el retorno energético bajo esos supuestos; las intervenciones por seguridad no dependen exclusivamente de él.

[1] El potencial anual y las 6.681,6 t de diferencia CELPAC–Plywood del semestre son magnitudes distintas, pese a su semejanza numérica. La primera suma oportunidades anualizadas de la red interna; la segunda compara dos totalizadores durante 181 días. El Anexo I delimita sus fronteras: las pérdidas aguas abajo del medidor de Plywood no explican la diferencia entre ambos medidores. Esta diferencia se mantiene fuera del potencial energético.

Tabla 3.31. Diámetro efectivo mínimo que justifica cada inversión según el periodo de recuperación exigido.

Payback exigido	Trampas	AK1	Lectura
2 años	2,54 mm	1,99 mm	Exigencia alta
3 años	2,07 mm	1,62 mm	Horizonte de referencia adoptado
5 años	1,60 mm	1,26 mm	Horizonte ampliado
10 años	1,13 mm	0,89 mm	Horizonte de largo plazo

Con un criterio de tres años, el umbral es 1,62 mm en AK1 y 2,07 mm en trampas. Estos valores orientan un ensayo de umbral mediante aforos representativos y ofrecen un criterio de aceptación definido antes de medir. No constituyen diámetros físicos acreditados: dependen del modelo, C_d, fase, contrapresión, horas y costo del vapor. La verificación debe estimar la incertidumbre del aforo para decidir si el beneficio supera el mínimo requerido.

Los 171,5 °C registrados aguas abajo de los aireadores con las válvulas cerradas acreditan actividad térmica, no un área de descarga, y el diámetro de conexión de una trampa no equivale al de su asiento en condición de falla. Por esa razón el potencial paramétrico se mantiene separado del modelado en toda la evaluación.

3.11.3 Inversión y periodos de recuperación

La comparación financiera reúne las medidas con inversión y beneficio expresables en una base común: 950 CLP/USD y 10,69 USD/t de vapor equivalente. Esta homogeneización permite contrastar oportunidades y preparar la secuencia de inversión. Las cotizaciones conservan sus fechas, alcances y tratamiento de IVA; los resultados corresponden a prefactibilidad y a recuperaciones individuales, mientras el presupuesto instalado completo se desarrolla al cerrar cada alcance.

Tabla 3.32. Inversión y recuperación simple de las medidas cuantificadas.

Medida	CAPEX [USD]	Beneficio [USD/año]	Meses	Observación
Aislación de cañerías	15.517,74	25.225,58	7,4	14.741.857 CLP; presupuesto adaptado de prefactibilidad.
Mantos en válvulas	16.325,89	13.784,62	14,2	Presupuesto unitario referencial.
Normalización AK1	19.495,74	22.179,61	10,5	Total con IVA; diámetro supuesto de 3 mm.
Recambio de trampas	30.994,70	10.236,74	36,3	Cinco descargas, $d_{\text{eff}} = 2$ mm; CAPEX reexpresado a TC 950.
Subtotal referencial	**82.334,07**	**71.426,56**	—	Cuatro medidas valorizadas; potencial condicionado.

El recambio de trampas es la única medida cuyo periodo difiere del de su evaluación individual: la Sección 3.6 informa 32.960,69 USD y 38,6 meses porque conserva el tipo de cambio de 887 CLP/USD de la cotización original, y al reexpresar el mismo suministro a 950 CLP/USD el CAPEX resulta 30.994,70 USD y el periodo 36,3 meses. Ambas describen la misma inversión y el mismo beneficio; solo cambia la moneda de referencia. Las demás medidas ya estaban en esta base.

El separador de gotas dispone de una cotización de 70.000 USD netos y 83.300 USD con IVA, evaluada por separado para protección de AK1 y mediante sensibilidad económica. La

instrumentación, la reubicación de atemperadores, la corrección de soportes, la actualización de P&ID y el montaje completo de trampas requieren completar alcance y presupuesto. La distinción entre CAPEX conocido y pendiente identifica la información comercial necesaria para convertir la prefactibilidad en una solicitud de inversión instalada.

3.11.4 Priorización y campaña de verificación

La implementación debe equilibrar criticidad y retorno. Las acciones inmediatas son aquellas que controlan riesgo: trampa y drenaje del separador, trampas cerradas en puntos críticos, soporte deformado y recuperación del caudal de atemperación. En paralelo pueden ejecutarse aislación y mantos por su corto periodo de recuperación. AK1 cuenta con proyecto adjudicado y debe validarse al entrar en servicio. El separador se mantiene condicionado a ingeniería y medición de captura.

Tabla 3.33. Hoja de ruta recomendada.

Etapa	Horizonte	Medidas	Criterio de avance
1. Control crítico	0–3 meses	Drenajes críticos, soporte y flujómetro; seguimiento de las trampas ya intervenidas	Riesgo contenido y medición disponible
2. Recuperación rápida	0–6 meses	Aislación y mantos	CAPEX aprobado y línea base registrada
3. Proyectos definidos	3–9 meses	AK1 y normalización P&ID/montaje	Puesta en servicio validada
4. Ingeniería adicional	6–12 meses	Atemperadores y separador Línea 2	Selección de proveedor y medición previa

Tabla 3.34. Indicadores de verificación antes-después.

Área	Indicador	Línea base	Evaluación posterior
Energía	Consumo específico aparente	0,973804 t/m³	Por línea y condición productiva comparable
Térmico	Pérdida en superficies intervenidas	236,64 kW	Termografía y modelo actualizado
Drenaje	Trampas operativas	117 de 128 (línea base preintervención)	100 % de los 11 puntos intervenidos
AK1	Descarga caliente	No medido; referencia paramétrica 247 kg/h	Caudal medido y fase identificada
Atemperación	Caudal de inyección	Señal no confiable	Medición calibrada y coherente con EES
Humedad	Condensado capturado	No medido	kg/h en separador o drenaje de control
Mecánico	Desplazamiento de apoyo	No medido	Comparación frío/caliente

La campaña debe utilizar periodos equivalentes y señales sincronizadas; sus resultados actualizarán ahorro, payback y prioridad.

3.11.5 Síntesis y condiciones de cierre

La cartera propuesta actúa sobre las causas y consecuencias identificadas. La aislación y los mantos reducen pérdidas térmicas; el recambio de trampas, AK1 y la corrección del separador restablecen evacuación; la normalización de atemperación mejora el control de la inyección; el separador de Línea 2 agrega una barrera final para AK1; y la corrección de

soportación y P&ID fortalece confiabilidad mecánica y trazabilidad. La decisión, la inversión disponible y el efecto esperado de cada propuesta se resumen en la Tabla P.16 del Anexo P.

El potencial energético integrado es 6.681,62 t/año y 71.426,56 USD/año, con una proyección de reducción del consumo específico aparente desde 0,973804 hasta 0,963047 t/m³. El subconjunto con CAPEX y beneficio expresados en una base monetaria común alcanza aproximadamente 82.334 USD; sus periodos de recuperación se mantienen individuales y no incluyen el separador ni intervenciones sin cotización definitiva.

El recambio ejecutado y los 42 puntos de presión formalizados representan avances de implementación; los indicadores antes–después de la Tabla 3.34 permiten seguir su desempeño y el de las medidas restantes.

El cierre de cada medida integra ejecución física, evidencia técnica, actualización documental y comparación operacional. El criterio de aceptación de cada medida y las evidencias mínimas para considerar completada la implementación se detallan en las Tablas P.17 y P.18 del Anexo P; el desglose por aspecto, con condición actual, acción y criterio individual, se conserva en la Sección G.9 del Anexo G. Este criterio separa la recepción física del reconocimiento de beneficios. Las medidas de seguridad y confiabilidad pueden cerrarse cuando cumplen su protocolo técnico, mientras que los ahorros deberán permanecer como potenciales hasta disponer de datos posteriores comparables. El cierre económico deberá evitar la suma de escenarios superpuestos y mantener identificadas las hipótesis paramétricas utilizadas en AK1, trampas y separación de humedad.

3.11.6 Matriz de cierre técnico y criterios de verificación

La evaluación se cierra vinculando los resultados obtenidos con las decisiones de intervención y sus criterios de aceptación. La Tabla 3.35 reúne esa trazabilidad: identifica qué condición se corrige, qué medida responde al diagnóstico y cómo se verificará su desempeño. La matriz convierte el análisis en un instrumento de preparación y seguimiento de los trabajos.

La matriz reúne aportes complementarios: las medidas térmicas cuentan con una comparación superficial que permite estimar recuperación y ordenar inversiones; AK1 y trampas disponen de escenarios y umbrales que orientan la medición de sus descargas; atemperación, soportación y separación de gotas se evalúan mediante balance, geometría, desplazamiento y extracción de líquido; y la documentación aporta trazabilidad verificable, con 42 puntos de presión ya formalizados. Para la etapa posterior, la tabla proporciona el protocolo de seguimiento, y la comparación en una misma frontera y bajo condiciones productivas equivalentes permitirá contrastar la referencia de 0,963047 t/m³ con el desempeño registrado.

Tabla 3.35. Matriz final de resultados, medidas y evidencia requerida.

Área	Línea base	Medida propuesta	Criterio de cierre
Térmica	236,64 kW en superficies evaluadas	Aislar 62,8 m y proteger 14 válvulas	Termografía comparable y pérdida residual cercana a 15,68 kW bajo la referencia modelada.
Condición del vapor	354,7 kg/h equivalentes de condensado potencial	Mejorar aislación, drenaje y separación de gotas	Medición de condensado y verificación de fase; no se asigna calidad por presión y temperatura solamente.
Atemperación	1.888,4 kg/h calculados en EES en tres casos	Calibrar caudal, revisar geometría y reubicar si corresponde	Balance de masa coherente en cargas mínima, normal y máxima.
AK1	Siete aireadores térmicamente activos	Sustituir descargas no controladas por drenaje aéreo y estaciones de trampa	Caudal y fase medidos en los puntos intervenidos, sin descarga permanente a la atmósfera.
Trampas	Cinco con paso interno y seis con drenaje insuficiente	Recambiar equipos y normalizar la estación completa	Inspección funcional, descarga normal y cero soplado continuo.
Soportación	Expansión libre: 11,6 mm por vano; 1,49 m en 500 m. Apoyo deformado	Restituir guía, deslizamiento, alineamiento y pendiente	Desplazamiento frío–caliente documentado y ausencia de trabamiento.
Desempeño	0,973804 t/m³ de vapor aparente	Validar por periodos productivos equivalentes	Consumo específico, humedad, espesor, receta y horas efectivas registrados conjuntamente.
Documentación	Discrepancias entre P&ID e instalación observada	Emitir plano conforme a obra y corregir la conexión crítica	TAG, sentido de flujo, drenaje e instrumentos verificados en terreno.

4 Conclusiones

La memoria estableció un diagnóstico técnico integrado del sistema de vapor y condensado de Planta Plywood y una cartera priorizada de intervenciones. La evaluación abarcó dos líneas principales, tres estaciones de atemperación y 128 trampas. Identificó aproximadamente 63 m de cañerías sin aislación efectiva, 14 válvulas sin manto, 11 trampas deficientes, drenajes inadecuados, líneas de aireación térmicamente activas en AK1, un apoyo deformado y 42 puntos de presión con brechas documentales. Este levantamiento entrega una base técnica común para mantenimiento, ingeniería y seguimiento operacional.

El análisis relacionó las deficiencias con sus mecanismos físicos: pérdida de energía superficial, acumulación de líquido y restricción del desplazamiento térmico. Distinguir cinco trampas abiertas o con paso interno de seis cerradas o con drenaje insuficiente orientó tratamientos diferentes. En soportación se identificó una restricción incompatible con la función deslizante prevista. La expansión libre calculada es aproximadamente 12 mm por vano de 3,9 m y 1,5 m para el tramo representativo de 500 m. El caso local deslizante entrega un momento referencial de 0,65 kN · m; la reacción del apoyo restringido requiere verificar la flexibilidad del conjunto. Estos resultados fundamentan restituir guía, deslizamiento y alineamiento, abordando el mecanismo de carga y no solo la deformación visible.

En atemperación, ninguno de los tres puntos de inyección dispone del tramo recto mínimo de 6 m que establece el manual de Spirax Sarco. El más desfavorable, el atemperador mayor de la Línea 1 con 2,5 m hasta el primer codo, concentra además 1.423 de los 1.434 kg/h de inyección calculada en esa línea. A ello se suman oscilaciones térmicas en AK2 cuyos mínimos alcanzan la banda de saturación de referencia. Por eso la revisión de la ubicación de la inyección y la recuperación de la medición de caudal encabezan la normalización de la atemperación.

La cuantificación térmica estableció pérdidas superficiales de 237 kW y una reducción modelada de 221 kW bajo la referencia aislada. La aislación y los mantos representan 3.649 t/año de vapor equivalente, valorizados en 39.010 USD/año. Su distribución fundamentó la prioridad de los diámetros de mayor disipación y las válvulas de Línea 2. Los escenarios paramétricos aportan 958 t/año en trampas abiertas y 2.075 t/año en AK1. El potencial integrado de referencia alcanza 6.682 t/año y 71.427 USD/año, manteniendo diferenciados el modelo térmico y los escenarios de descarga. Estas cifras de síntesis se presentan redondeadas; las tablas de evaluación conservan los valores de cálculo.

La evaluación económica convirtió la cuantificación en criterios de decisión. Para una recuperación simple de tres años, los diámetros de equilibrio son aproximadamente 1,6 mm en AK1 y 2,1 mm en trampas bajo las condiciones adoptadas. Estos umbrales orientan la medición para resolver la conveniencia energética de cada inversión. Los beneficios de control, protección y trazabilidad de atemperación, separación, soportación e instrumentación se evalúan mediante criterios funcionales, complementando la prioridad energética con seguridad y continuidad operacional.

El análisis de 181 días estableció una línea base de consumo específico aparente de 974 kg de vapor por cada metro cúbico de chapa y localizó en Línea 2 la principal variación mensual. La normalización integrada sitúa el indicador en 963 kg/m^3, una reducción referencial de aproximadamente 1,1 % o 11 t por cada 1.000 m^3. Esta expresión vincula la evaluación energética con el seguimiento productivo de Plywood. La diferencia CELPAC–Plywood de aproximadamente 6.682 t se conserva como resultado de conciliación metrológica pendiente, separado del potencial anual por corresponder a fronteras y periodos distintos.

El trabajo incorporó dos resultados de aplicación en planta: el recambio de trampas

y la formalización de 42 puntos de presión en los planos oficiales. El análisis elaborado y validado por CMPC registra, después del recambio, reducciones de la desviación estándar de presión de 90 % en Línea 1 y 71 % en Línea 2, y de temperatura de 81 % y 49 %. CMPC relaciona esta mayor estabilidad con la intervención. Las medias de consumo se mantuvieron próximas, con variaciones aproximadas de +0,2 % y −0,6 %, aunque su dispersión aumentó 20 % y 19 %. El resultado de planta respalda la utilidad operacional del drenaje; la memoria lo integra con su diagnóstico y plan de seguimiento.

Los resultados responden a los cuatro objetivos específicos: establecer la configuración, diagnosticar deficiencias, cuantificar impactos y formular mejoras priorizadas. El aporte de ingeniería reside en su integración: cada propuesta vincula condición inicial, explicación física, intervención y seguimiento. Esa continuidad permite utilizar la memoria para preparar trabajos, contrastar alternativas y documentar resultados.

El alcance conserva tres condiciones: beneficios térmicos modelados, descargas evaluadas paramétricamente y comparación posterior descriptiva. Confirmar ahorro global y calidad del vapor requiere mediciones específicas, condiciones productivas equivalentes y conciliación de fronteras; el tramo externo de unos 300 m y la recuperación global de condensado quedan fuera del balance cuantificado. Estas condiciones delimitan el uso de las cifras; el diagnóstico, los cálculos y las intervenciones documentadas constituyen los resultados alcanzados.

Para Plywood, la cartera articula dos frentes de trabajo complementarios: control de riesgos mediante drenaje, trampas, atemperación y soportación; y recuperación térmica mediante aislación y mantos. Sus mecanismos esperados son conservar energía útil, facilitar la evacuación de condensado y proteger los equipos consumidores. El seguimiento debe observar simultáneamente estabilidad de presión y temperatura, drenaje y consumo por producción, controlando humedad, espesor, receta y horas efectivas. Así, el beneficio de cada intervención puede reconocerse en la variable sobre la que actúa, sin reducir toda la evaluación a un único indicador de ahorro.

La Tabla 3.35 y la propuesta de instrumentación del Anexo O completan esa ruta de aplicación. El control físico verifica la corrección ejecutada; el energético contrasta la recuperación obtenida; y el productivo evalúa su reflejo en el proceso. En conjunto, la memoria entrega a Planta Plywood un diagnóstico respaldado, una cuantificación reproducible y una secuencia de intervención y seguimiento. Su contribución es transformar hallazgos dispersos en decisiones técnicas fundamentadas para mejorar el sistema de vapor y condensado.

Referencias

American Petroleum Institute. (2020). *API Standard 520, Part I: Sizing, selection, and installation of pressure-relieving devices—Sizing and selection* (10.ª ed.). API.

American Society of Mechanical Engineers. (2024). *ASME B31.3-2024: Process piping*. ASME.

CADE-AMEC. (2006a). *Balance general de vapor y condensado* (Documento N.º 2200-INF-210-IP-751, Rev. 1). Documento técnico interno preparado para C.M.P.C. Maderas S.A., Planta Mininco.

CADE-AMEC. (2006b). *Manual de operación: 210 – Vapor y condensado y macerado* (Documento N.º 2200-MOP-210-DC-750, Rev. B). Documento técnico interno preparado para C.M.P.C. Maderas S.A., Planta Mininco.

CADE-AMEC. (2006c). *Especificación técnica particular y antecedentes de cálculo del sistema de atemperación* (Documento N.º 2200-ETP-210-ME-751). Documento técnico interno preparado para C.M.P.C. Maderas S.A., Planta Mininco.

Celeros Flow Technology. (s. f.). *Copes-Vulcan SA-35 steam atomizing desuperheater* [Ficha técnica].

Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2019). *Termodinámica* (9.ª ed.). McGraw-Hill Education.

Chemonics International Inc., & Consultoría y Servicios en Tecnologías Eficientes, S.A. de C.V. (2011). *Guía de buenas prácticas en eficiencia energética para sistemas de vapor*. Programa de USAID de Excelencia Ambiental y Laboral para CAFTA-DR.

CMPC Maderas S.A. (s. f.). *Diagrama de proceso, instrumentación y control: Vapor y condensado* (Plano N.º 2330-A1-210-IP-001, Rev. 8J). P&ID interno de Planta Plywood.

CMPC Planta Plywood. (2026a). *Registros operacionales de consumo de vapor y producción de chapa, enero-junio de 2026* [Base de datos interna no publicada].

CMPC Planta Plywood. (2026b). [Análisis y gráficos internos de presión, temperatura y consumo de vapor antes y después del recambio de trampas del 28 de julio de 2026, Secador 27 y AK2]. Antecedentes internos no publicados facilitados para esta memoria.

Eleukon Global. (2021). *Informe aislación línea de condensados: CMPC Celulosa S.A., Factoría de Plywood* (Informe AISLA-CONDENSADOS v02, 20 de septiembre de 2021). Departamento de Ingeniería, Eleukon Global. Documento técnico interno preparado para CMPC.

Emerson. (s. f.). *Fisher Yarway 4300 TempLow steam desuperheater* [Ficha técnica].

Endress+Hauser. (2015). *Proline Prowirl F 200: Wet steam measurement application package* (SD01315D/06/EN/02.15). https://portal.endress.com/wa001/dla/5000930/7855/000/01/SD01315DEN_0215.pdf

Endress+Hauser. (2024). *Proline Prowirl F 200: Technical information* (TI01333D/EN/06.24). https://bdih-download.endress.com/file/b60b87ca3730b52a7848766084e83d4f/TI01333DEN_0624-00.pdf

Escobar Brandell, C. E. (2013). *Evaluación técnico económica calderas auxiliares y de biomasa CMPC Pacífico* [Informe de Habilitación Profesional, Universidad del Bío-Bío].

EZ-pdh. (s. f.). *Improving steam system performance quiz* [Material de educación continua en ingeniería]. EZ-pdh.com. https://ez-pdh.com/improving-steam-system-performance-quiz/

F-Chart Software. (s. f.). *EES: Engineering Equation Solver* [Software]. F-Chart Software.

FLIR Systems. (s. f.). *Thermographic measurement techniques*. https://support.flir.com/DSDownload/Assets/T810442-en-US_A4.pdf

International Association for the Properties of Water and Steam. (2012). *Revised release on the IAPWS industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam (IAPWS-IF97)*. IAPWS.

International Organization for Standardization. (2008). *ISO 18434-1:2008. Condition monitoring and diagnostics of machines—Thermography—Part 1: General procedures*. ISO.

International Society of Automation. (2024). *ANSI/ISA-5.1-2024: Instrumentation and control—Symbols and identification*. ISA.

Jaramillo Ortiz, A. J. (2010). *Uso racional y eficiente de la energía en un sistema de vapor de una industria papelera* [Proyecto de grado, Universidad EAFIT].

Leung, J. C. (1986). A generalized correlation for one-component homogeneous equilibrium flashing choked flow. *AIChE Journal, 32*(10), 1743–1746.

Ministerio de Salud. (2012). *Decreto Supremo N.º 10: Reglamento de calderas, autoclaves y equipos que utilizan vapor de agua*. Publicado el 19 de octubre de 2013. Texto consultado en Ley Chile. https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1055319

NASA Glenn Research Center. (s. f.). *Mass flow rate equations*. https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/BGP/mflchk.html

Parés y Álvarez. (2012). *Filosofía de control: Área 210* (Documento N.º 2330-INF-000-II-751, Rev. 0). Documento técnico interno preparado para C.M.P.C. Maderas S.A., Proyecto Ampliación Planta Plywood.

Salimi, M., Amidpour, M., Moradi, M. A., Hajivand, M., Siahkamari, E., & Shams, M. (2023). Technical-economic analysis of energy efficiency solutions for the industrial steam system of a natural gas processing plant. *Sustainability, 15*(20), 14995.

Schultz, D. (2026, 17 de abril). *How to install a Coriolis flow meter*. DwyerOmega. https://www.dwyeromega.com/en-us/resources/coriolis-flow-meter-installation

Servicios de Mantención Industrial Guerra e Hijo Ltda. (2026). *Cotización oficial del proyecto de normalización del drenaje del sector AK1, Planta Plywood* [Antecedente comercial adjudicado].

Spirax Sarco. (s. f.-a). *What is steam?* En *Learn about steam: Steam engineering principles and heat transfer*. Spirax Sarco. https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/steam-engineering-principles-and-heat-transfer/what-is-steam

Spirax Sarco. (s. f.-b). *Steam mains and drainage*. En *Learn about steam: Steam distribution*. Spirax Sarco. https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/steam-distribution/steam-mains-and-drainage

Spirax Sarco. (s. f.-c). *Installation*. En *Learn about steam: Flowmetering*. Spirax Sarco. https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/flowmetering/installation

Spirax Sarco. (s. f.-d). *Atemperadores de área variable VAD: instrucciones de instalación y mantenimiento* (IM-P451-02 CH, Issue 3). Spirax Sarco.

Spirax Sarco Chile Ltda. (2026a). *Cotizaciones comerciales de equipos para mejoras del sistema de vapor y condensado de Planta Plywood* [Antecedentes comerciales utilizados para la evaluación económica].

Spirax Sarco Chile Ltda. (2026b). *Atemperadores: aplicación, principio de funcionamiento, tipos y buenas prácticas de instalación* [Documento técnico remitido por Ventas Técnicas Regiones Ñuble–Biobío].

Spirax Sarco, Inc. (2004). *Steam utilization: Design of fluid systems*. Spirax Sarco, Inc.

Spirax-Sarco Limited. (2005). *The steam and condensate loop*. Spirax-Sarco Limited.

Spirax-Sarco S.A. (s. f.). *Guía de referencia técnica: Distribución del vapor* (TR-GCM-03, ESP Issue 1).

TLV Co., Ltd. (s. f.-a). *Traps and orifices: Part 1*. TLV.

TLV Co., Ltd. (s. f.-b). *A guide to steam trap testing*. https://www.tlv.com/en-us/steam-info/steam-theory/trap-considerations/steam-trap-test

TLV Co., Ltd. (s. f.-c). *Erosion in steam and condensate piping*. https://www.tlv.com/en-gb/steam-info/steam-theory/problems/piping-erosion

U.S. Department of Energy. (2006). *Insulate steam distribution and condensate return lines* (Energy Tips: Steam, Steam Tip Sheet N.º 2). Industrial Technologies Program, U.S. Department of Energy.

U.S. Department of Energy. (2012). *Improving steam system performance: A sourcebook for industry* (2.ª ed.). Advanced Manufacturing Office, U.S. Department of Energy.

Universidad de Concepción. (s. f.). *Curvas de expansión térmica para aceros al carbono y aleados* [Material docente del curso electivo Sistemas de Tuberías]. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción.

Anexo A Respaldo del cálculo de dilatación térmica

Este anexo reúne la evidencia del apoyo deformado y el desarrollo numérico utilizado para estimar la expansión térmica del tramo representativo de 500 m. Los resultados sustentan el diagnóstico mecánico presentado en la Sección 3.2.

A.1 Evidencia del apoyo inspeccionado



Figura A.1. Registro visual y termográfico del apoyo deformado. Fuente: elaboración propia.

A.2 Curva de expansión térmica empleada

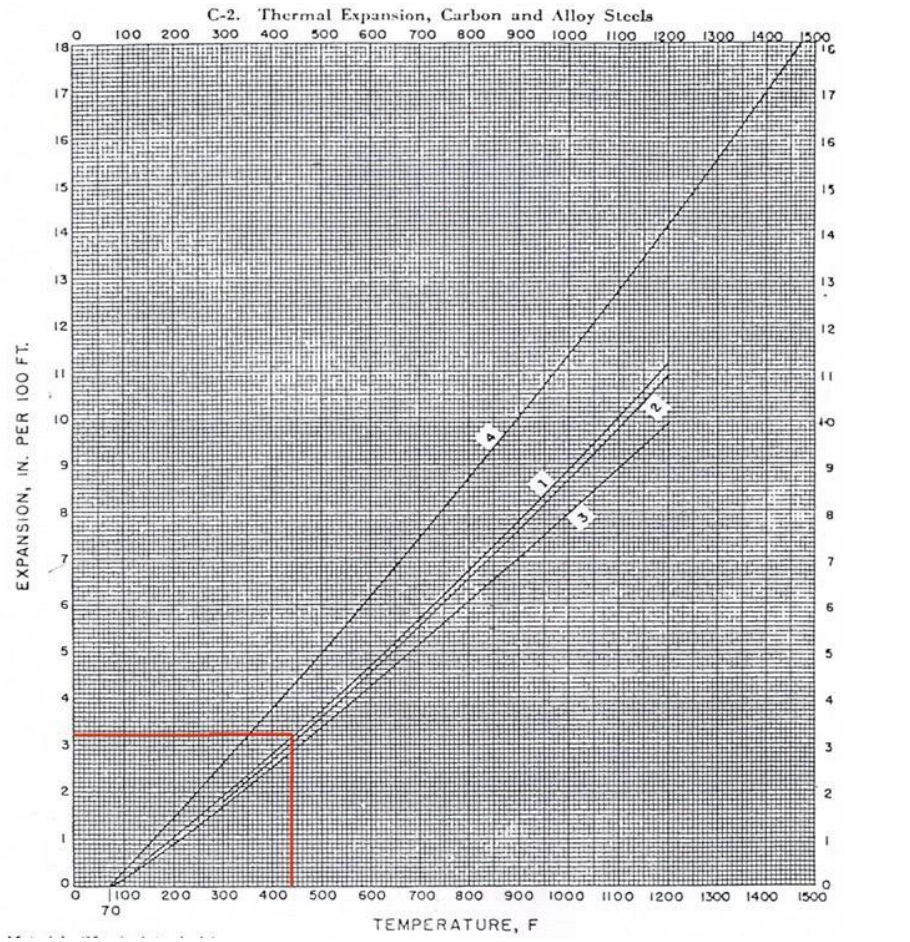


Figura A.2. Curva de expansión térmica utilizada para acero al carbono. Fuente: Universidad de Concepción (s. f.), material docente del curso electivo Sistemas de Tuberías.

A.3 Desarrollo del cálculo

A partir del gráfico de expansión térmica para aceros al carbono y aleados, se consideró la curva correspondiente a acero al carbono. La temperatura de operación de 268 °C equivale aproximadamente a 514 °F, valor que se ubica en el eje horizontal del diagrama. Para esa condición, la curva entrega una expansión aproximada del orden de 3,5 a 3,6 pulgadas por cada 100 pies de tubería.

Para el tramo representativo adoptado de 500 m, esa longitud corresponde aproximadamente a:

$$500 \text{ m} \times 3{,}28084 = 1640{,}4 \text{ ft}$$

Por lo tanto, la longitud total representa:

$$\frac{1640{,}4}{100} = 16{,}404$$

tramos de 100 pies. Adoptando 3,6 in/100 ft, extremo superior del rango leído en la curva, la expansión total resulta:

$$\Delta L = 3{,}6 \times 16{,}404 = 59{,}05 \text{ in}$$

y transformando a unidades del Sistema Internacional:

$$59{,}05 \text{ in} \times 0{,}0254 = 1{,}50 \text{ m}$$

Este resultado se contrasta con la relación analítica $\Delta L = \alpha L \, \Delta T$ empleada en el cuerpo principal, que para $\Delta T = 248$ °C entrega 1,49 m. Ambos métodos coinciden dentro del 1 %, lo que respalda el orden de magnitud adoptado. Los 20 °C son una referencia convencional de montaje, no una temperatura de instalación registrada. Los 12,8 °C del cálculo térmico son un promedio ambiental anual adoptado de Eleukon Global (2021), no una medición de la campaña.

Tabla A.1. Síntesis de la evaluación mecánica del tramo representativo.

Parámetro	Valor	Interpretación
Longitud analizada	500 m	Tramo representativo de la línea principal
Temperaturas de referencia	20 °C / 268 °C	Montaje supuesto y operación
Expansión térmica libre	1,49 m	Desplazamiento potencial sin restricción
Carga vertical	5,69 kN	Peso muerto estimado sobre el apoyo
Fuerza lateral	1,71 kN	Efecto referencial de fricción y desalineación
Momento local	0,65 kN · m	Demanda local estimada en la cabeza

La expansión obtenida corresponde a una condición libre de referencia. Su transformación en cargas reales depende de la función de apoyos, guías y puntos fijos, por lo que la verificación final requiere ingeniería de detalle e inspección en frío y caliente.

A.4 Modo de falla de un tramo con restricción axial

Para un tramo recto con restricción axial perfecta, el modelo elástico entrega $\sigma = E\alpha\Delta T$, independiente de la longitud. Al superar la fluencia, ese resultado deja de representar una tensión físicamente admisible dentro del modelo elástico. La comparación con Euler se utiliza solo como sensibilidad conceptual a la longitud efectiva, no como diagnóstico del modo de falla real.

Para la sección de 12 pulgadas en *Schedule* 80, con $A = 16.797$ mm^2 e $I = 1{,}978 \times 10^8$ mm^4, el radio de giro es

$$r = \sqrt{I/A} = 108{,}5 \text{ mm}.$$

La esbeltez a la que la tensión crítica de Euler iguala el límite de fluencia es

$$\lambda_{\text{tr}} = \pi\sqrt{E/S_y} = \pi\sqrt{200.000/240} = 90{,}7,$$

equivalente a una longitud efectiva de $KL = \lambda_{\text{tr}}\, r \approx 9{,}8$ m. Se adopta $K = 1$ solo para esta comparación.

Tabla A.2. Comparación formal entre Euler y fluencia para longitudes efectivas adoptadas.

Luz [m]	Esbeltez	Euler [MPa]	Comparación con 240 MPa
3,9	35,9	1.528	Euler supera fluencia
6,0	55,3	646	Euler supera fluencia
9,0	82,9	287	Euler supera fluencia
12,0	110,6	161	Euler inferior a fluencia
15,0	138,2	103	Euler inferior a fluencia

Los valores de Euler superiores a 240 MPa no son capacidades admisibles: exceden la referencia de fluencia y requieren un modelo inelástico. Los inferiores tampoco demuestran pandeo en terreno. El trazado, las guías, las imperfecciones y la rigidez de los extremos modifican la longitud efectiva; $K = 1$ no es conservador para toda configuración. La resistencia real requiere comprobar material a temperatura, geometría, restricciones y cargas conforme al código aplicable.

A.5 Solicitación de un apoyo fijo por fricción acumulada

Como idealización, un punto fijo puede recibir la resultante de fricción de apoyos vecinos si todos movilizan el contacto en un sentido compatible. Con separación representativa de 3,9 m, 500 m equivalen a unos 128 vanos, no a un inventario confirmado de apoyos. Cada contacto deslizante aportaría $\mu N = 0{,}30 \times 5{,}69 = 1{,}71$ kN en el caso adoptado.

Tabla A.3. Fricción acumulada idealizada mediante $F = \mu w L$.

Longitud restringida [m]	**Apoyos deslizantes**	**Fuerza acumulada [kN]**
25	6	10,9
50	13	21,9
100	26	43,8
150	38	65,7
250	64	109,4

Los conteos de apoyos se redondean para ilustrar la escala; las fuerzas de la tabla se calculan con $F = \mu w L$, sin multiplicar esos conteos redondeados. Los 1,71 kN locales, los 109,4 kN acumulados en 250 m y los 9.998 kN de restricción elástica formal corresponden a hipótesis distintas y no delimitan un rango universal de carga real. En particular, los 9.998 kN provienen de una tensión superior a fluencia, por lo que no constituyen una fuerza alcanzable demostrada.

No se dispone de una capacidad resistente certificada del apoyo y no puede afirmarse que ceda antes de una carga determinada. La deformación observada y el deslizamiento impedido justifican la revisión del tramo. La expansión libre de 11,6 mm por vano de 3,9 m puede redistribuirse entre flexión de la línea, holguras, apoyos y eventual plastificación; su reparto exige el modelo completo de flexibilidad.

Anexo B Respaldo del cálculo de atemperación mediante EES

Este anexo conserva las capturas del modelo desarrollado en EES (F-Chart Software, s. f.), con el que se obtuvieron los resultados de la Tabla 3.11, y presenta una verificación independiente del balance con la formulación IAPWS-IF97 (IAPWS, 2012). La verificación utiliza las mismas presiones y temperaturas de entrada y salida, todas en términos absolutos.

B.1 Capturas del modelo

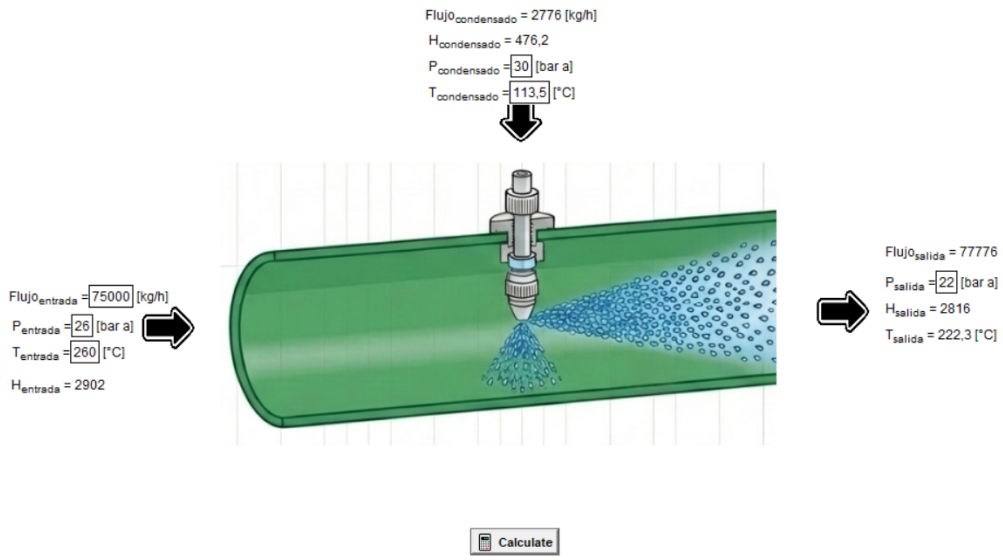


Figura B.1. Interfaz ilustrativa del modelo EES. Los valores de esta pantalla son un ejemplo de uso y no corresponden a los casos de la Tabla 3.11. Fuente: elaboración propia.

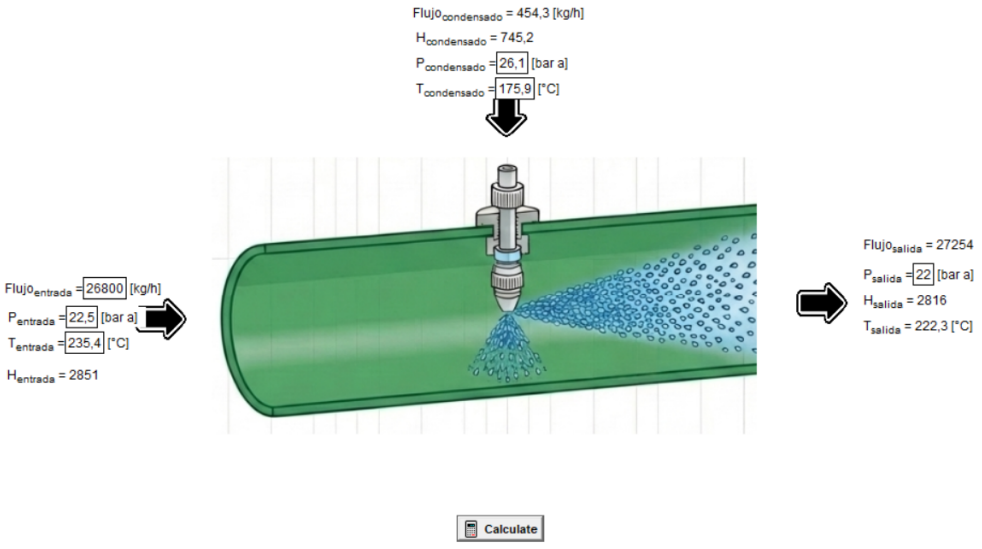


Figura B.2. Modelo EES de la Línea 2. Fuente: elaboración propia.

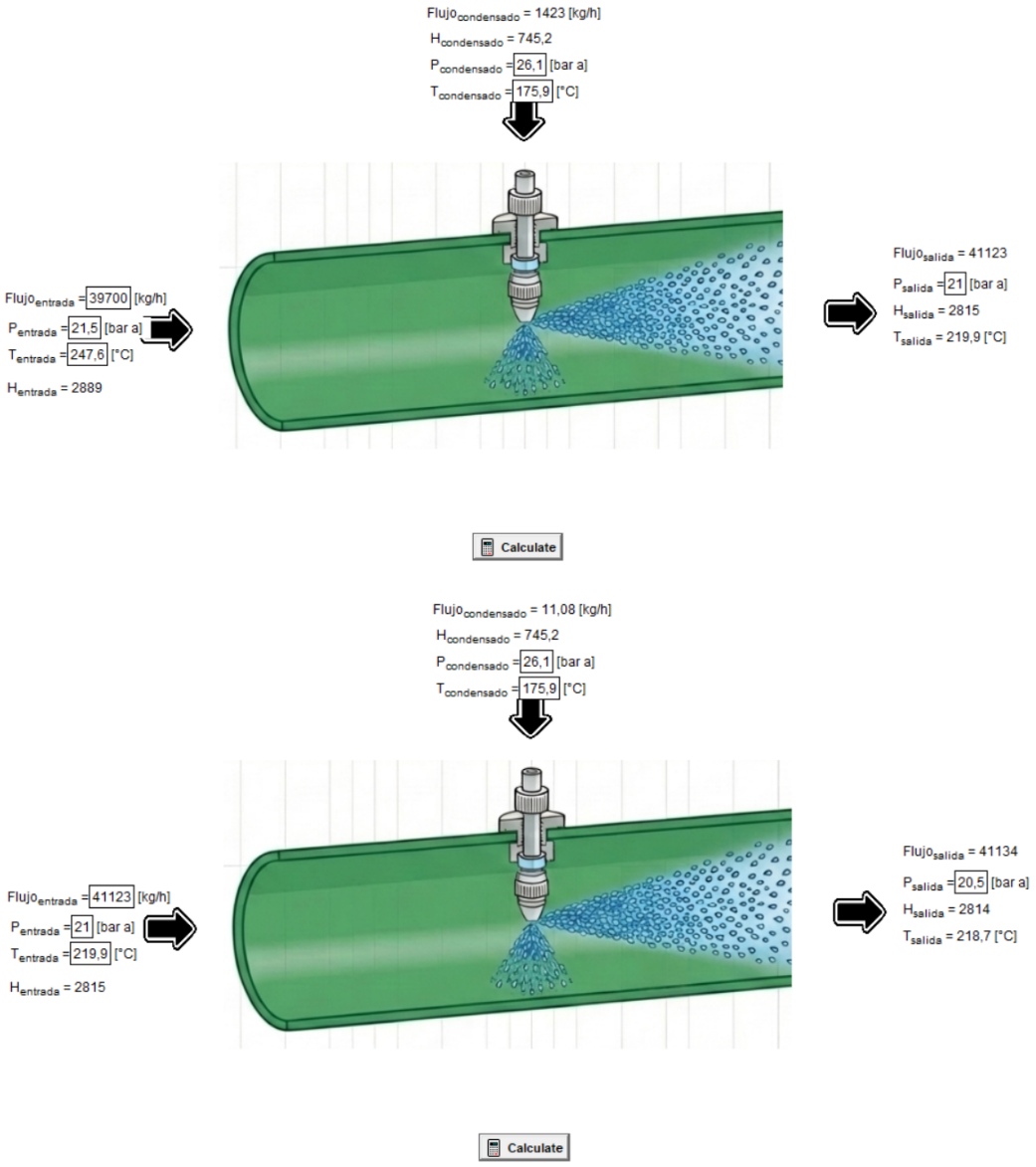


Figura B.3. Modelos EES de las dos etapas de la Línea 1: mayor, arriba; menor, abajo. Fuente: elaboración propia.

B.2 Balance y variables

Para una mezcla directa adiabática se utiliza:

$$\dot{m}_v h_e + \dot{m}_c h_c = (\dot{m}_v + \dot{m}_c) h_s, \qquad \dot{m}_c = \dot{m}_v \frac{h_e - h_s}{h_s - h_c}. \tag{B.1}$$

En el modelo EES las entalpías se obtienen con las funciones de propiedades del programa. En la verificación, la entalpía del vapor de entrada y de salida se obtiene con IAPWS-IF97 a (P, T), y la del agua de inyección como líquido comprimido a 26,1 bar(a) y 175,9 °C. No se fuerza un margen fijo de 5 °C en la tabla recalculada: se utilizan las temperaturas de salida registradas en cada caso. La pérdida de calor en la boquilla se desprecia y la relación entre caudales se verifica por balance de masa.

B.3 Verificación con IAPWS-IF97

Cada caso se verifica de forma independiente, conservando el caudal de entrada de su captura EES: 39.700 kg/h en L1 mayor, 41.123 kg/h en L1 menor y 26.800 kg/h en L2. Por ello, las dos filas de L1 no constituyen un balance IAPWS encadenado. La entrada de la segunda etapa difiere en 20,24 kg/h (0,05 %) de la salida recalculada de la primera. Esta presentación permite contrastar cada caso con su modelo original sin mezclar la actualización de propiedades con un cambio del caudal de entrada.

Tabla B.1. Verificación independiente de cada caso con IAPWS-IF97, conservando el caudal de entrada EES, presión absoluta y agua de inyección como líquido comprimido.

Caso	h_e [kJ/kg]	h_s [kJ/kg]	h_c [kJ/kg]	Inyección [kg/h]	Salida [kg/h]
L1, mayor	2.890,38	2.815,16	746,00	1.443,24	41.143,24
L1, menor	2.815,16	2.814,67	746,00	9,65	41.132,65
L2	2.852,10	2.816,23	746,00	464,27	27.264,27

Los resultados dependen de que las señales de presión y temperatura sean simultáneas y representen la misma frontera de caudal. La suma de las tres inyecciones es 1.888,4 kg/h en el modelo EES y 1.917,2 kg/h en la verificación, una diferencia de 1,5 % que no modifica las conclusiones; ninguna de las dos debe compararse directamente con la señal global de aproximadamente 15 t/h sin validar escala, unidades, totalización, alcance y sincronización del instrumento. La señal no permite concluir sobreinyección ni subinyección.

Las distancias al primer codo, de 2,5 a 4,2 m, deben contrastarse con el tipo de boquilla, velocidad, tamaño de gota y recomendación del fabricante. Una temperatura estable aguas abajo no demuestra por sí sola evaporación completa; se requiere verificación de mezcla, drenaje y, cuando sea posible, medición de fase.

Anexo C Respaldo termográfico de pérdidas en válvulas

Las termografías se utilizaron para establecer temperaturas superficiales representativas de las 14 válvulas sin manto consideradas en la cuantificación. Cada conjunto se conserva como evidencia trazable del elemento evaluado; los registros completos permanecen además en el archivo digital de terreno.

C.1 Secuencia de cálculo y verificación

Tabla C.1. Secuencia de cálculo y verificación aplicada a las válvulas sin manto térmico.

Etapa	Información utilizada	Resultado
1. Identificación	Línea, válvula, diámetro y condición de operación	Elemento trazable
2. Termografía	Temperatura central y máxima; emisividad y ambiente	Temperatura representativa
3. Modelo térmico	Convección y radiación sobre área equivalente	Pérdida térmica actual
4. Mejora	Pérdida posterior con manto removible	Calor y vapor equivalentes recuperables
5. Verificación	Termografía posterior y condición operacional comparable	Desempeño comprobado

C.2 Válvula 1



Figura C.1. Evidencia termográfica de la válvula V1: Línea 2, cuerpo de 50 cm, temperatura superficial 233,9 °C. Fuente: elaboración propia.

C.3 Válvula 2

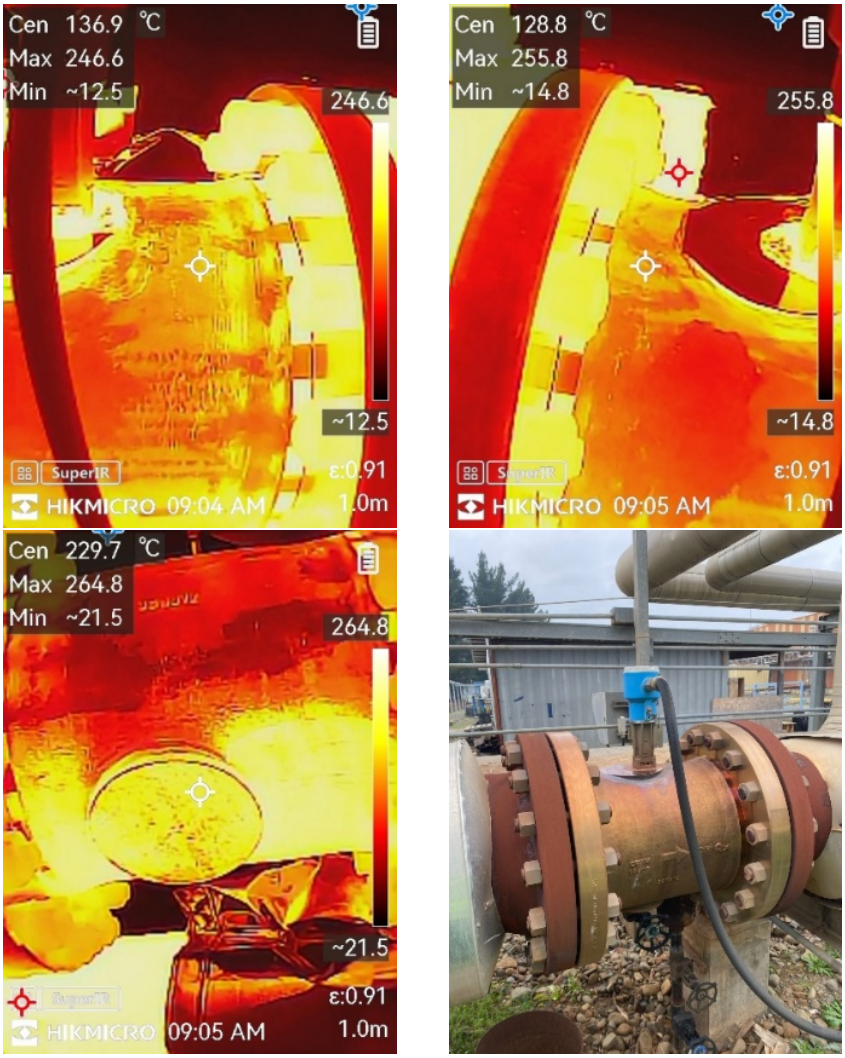


Figura C.2. Evidencia termográfica de la válvula V2: Línea 2, cuerpo de 30 cm, temperatura superficial 156,6 °C. Fuente: elaboración propia.



Figura C.3. Evidencia termográfica de la válvula V2 (continuación): Línea 2, cuerpo de 30 cm, temperatura superficial 156,6 °C. Fuente: elaboración propia.

C.4 Válvula 3

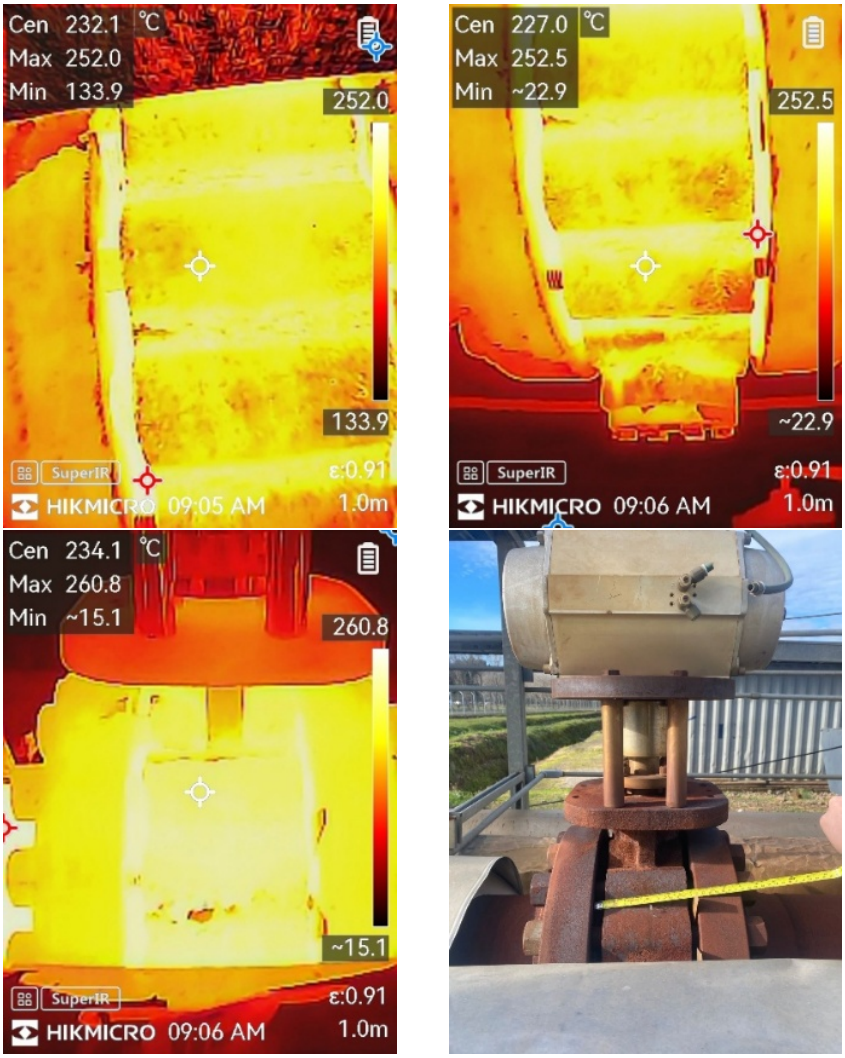


Figura C.4. Evidencia termográfica de la válvula V3: Línea 1, cuerpo de 30 cm, temperatura superficial 236,3 °C. Fuente: elaboración propia.



Figura C.5. Evidencia termográfica de la válvula V3 (continuación): Línea 1, cuerpo de 30 cm, temperatura superficial 236,3 °C. Fuente: elaboración propia.

C.5 Válvula 4

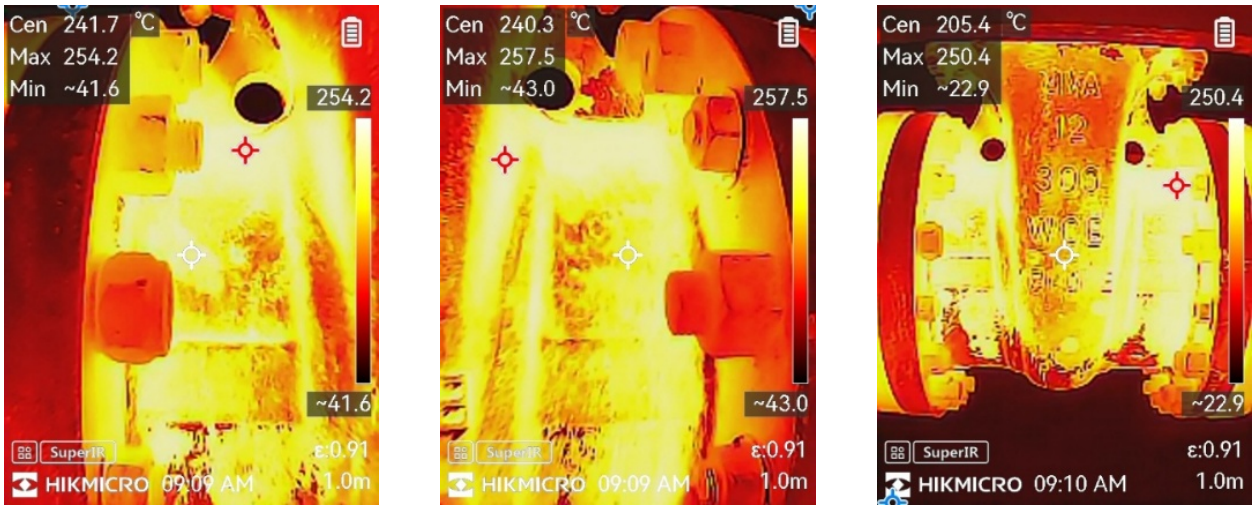


Figura C.6. Evidencia termográfica de la válvula V4: Línea 2, cuerpo de 50 cm, temperatura superficial 224,3 °C. Fuente: elaboración propia.

C.6 Válvula 5

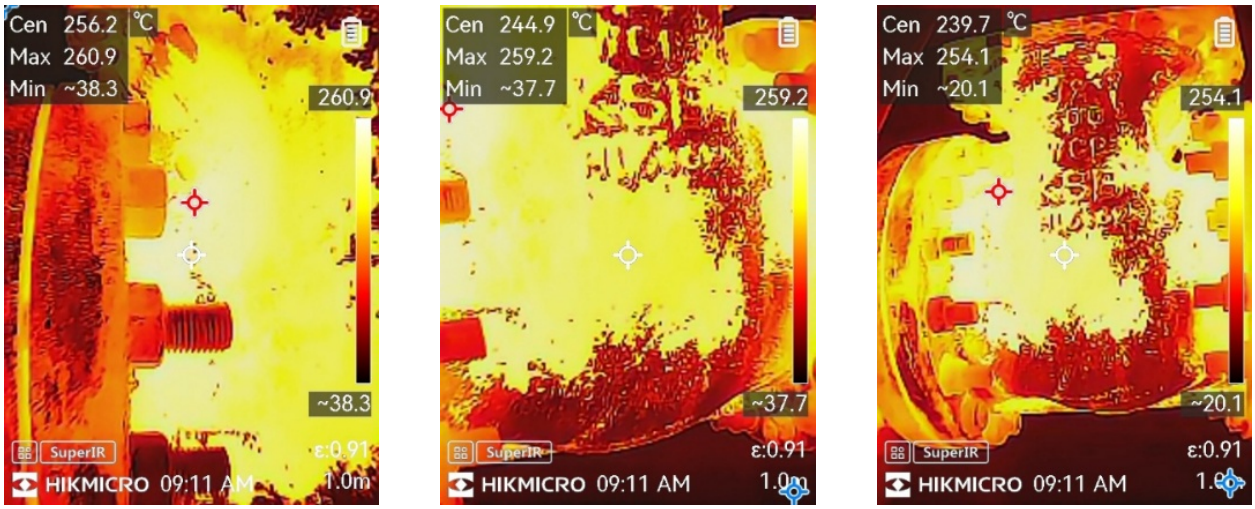


Figura C.7. Evidencia termográfica de la válvula V5: Línea 2, cuerpo de 50 cm, temperatura superficial 250,1 °C. Fuente: elaboración propia.

C.7 Válvula 6



Figura C.8. Evidencia termográfica de la válvula V6: Línea 2, cuerpo de 50 cm, temperatura superficial 239,4 °C. Fuente: elaboración propia.

C.8 Válvula 7

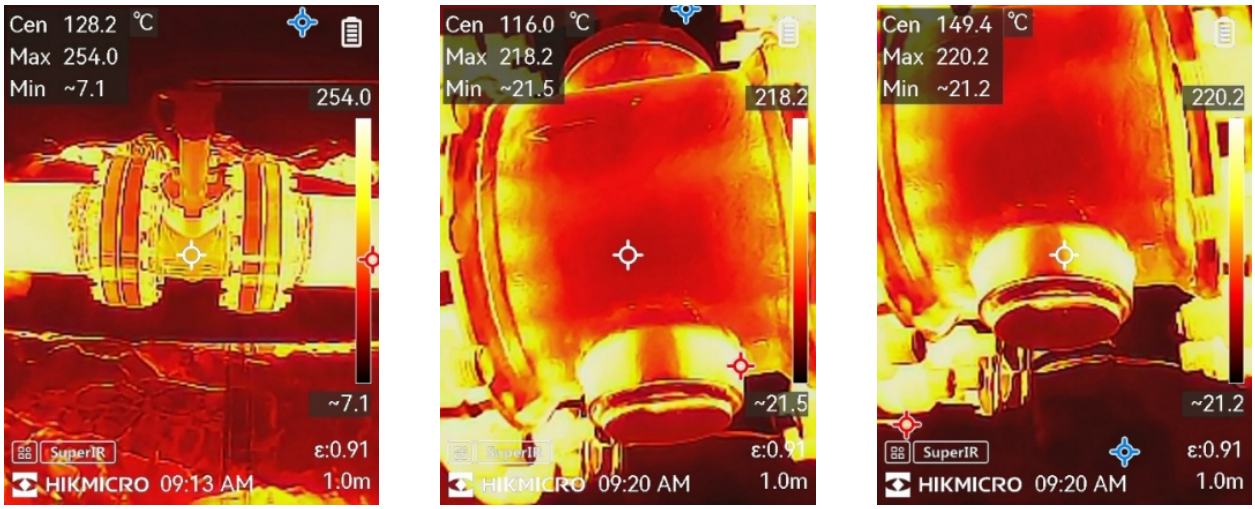


Figura C.9. Evidencia termográfica de la válvula V7: Línea 1, cuerpo de 50 cm, temperatura superficial 147,6 °C. Fuente: elaboración propia.

C.9 Válvula 8

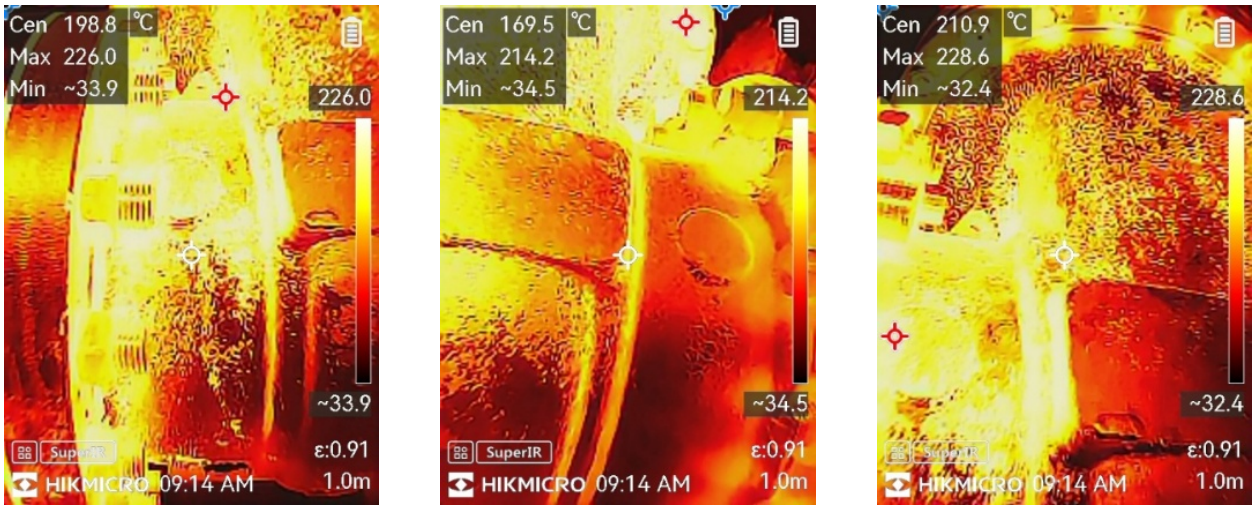


Figura C.10. Evidencia termográfica de la válvula V8: Línea 2, cuerpo de 50 cm, temperatura superficial 209,0 °C. Fuente: elaboración propia.

C.10 Válvula 9

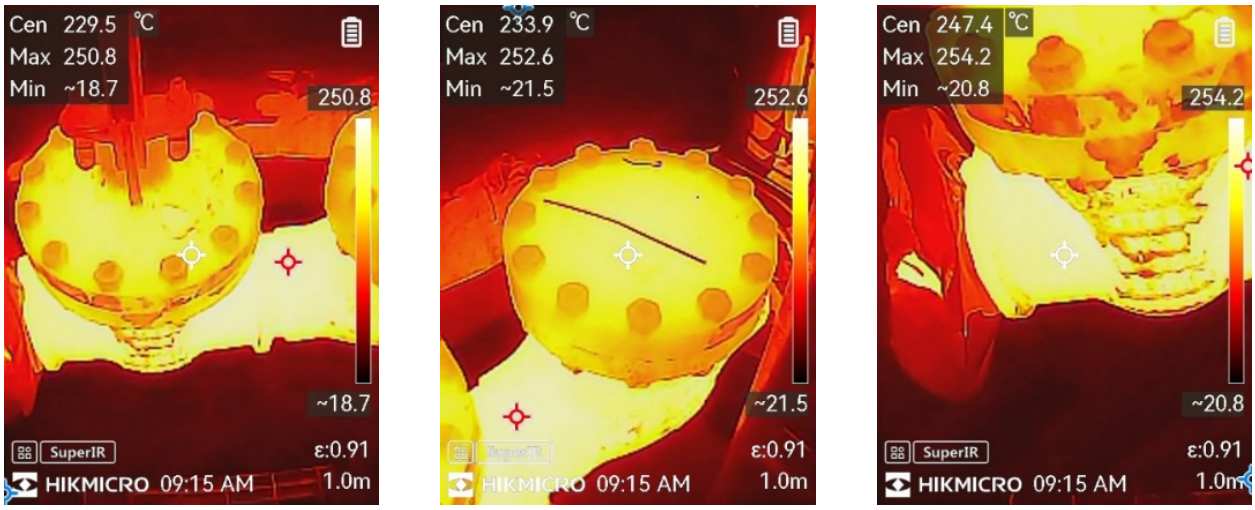


Figura C.11. Evidencia termográfica de la válvula V9: Línea 2, cuerpo de 30 cm, temperatura superficial 240,3 °C. Fuente: elaboración propia.

C.11 Válvula 10

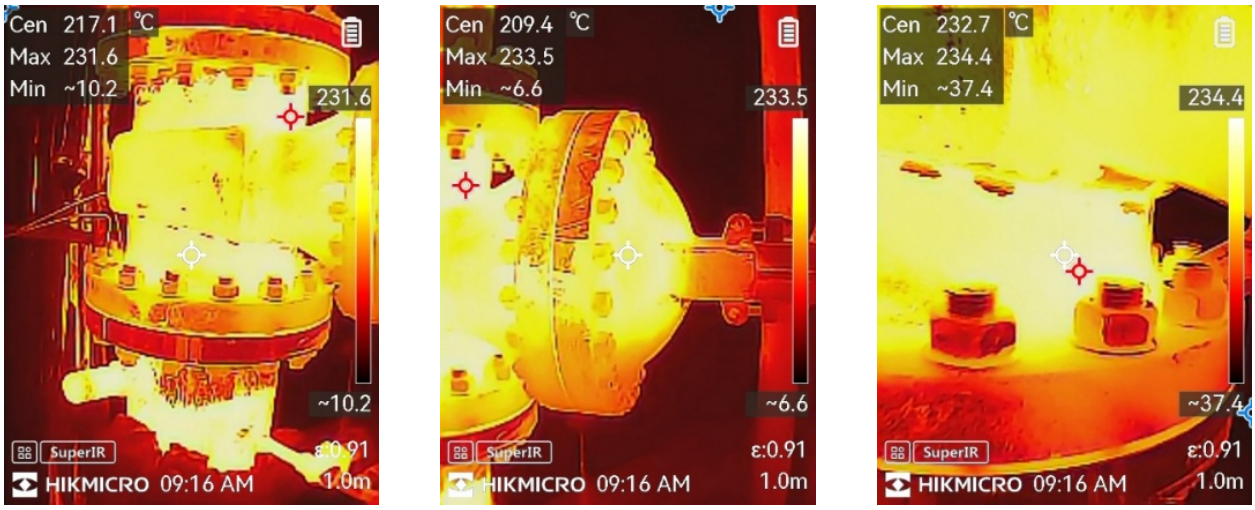


Figura C.12. Evidencia termográfica de la válvula V10: Línea 2, cuerpo de 50 cm, temperatura superficial 223,6 °C. Fuente: elaboración propia.

C.12 Válvula 11



Figura C.13. Evidencia termográfica de la válvula V11: Línea 1, cuerpo de 47 cm, temperatura superficial 239,5 °C. Fuente: elaboración propia.

C.13 Válvula 12

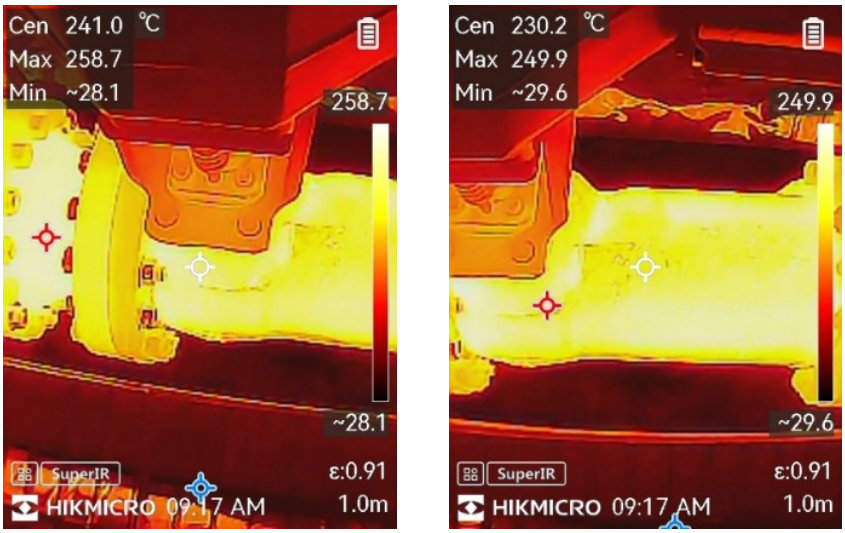


Figura C.14. Evidencia termográfica de la válvula V12: Línea 1, cuerpo de 32 cm, temperatura superficial 229,4 °C. Fuente: elaboración propia.

C.14 Válvula 13

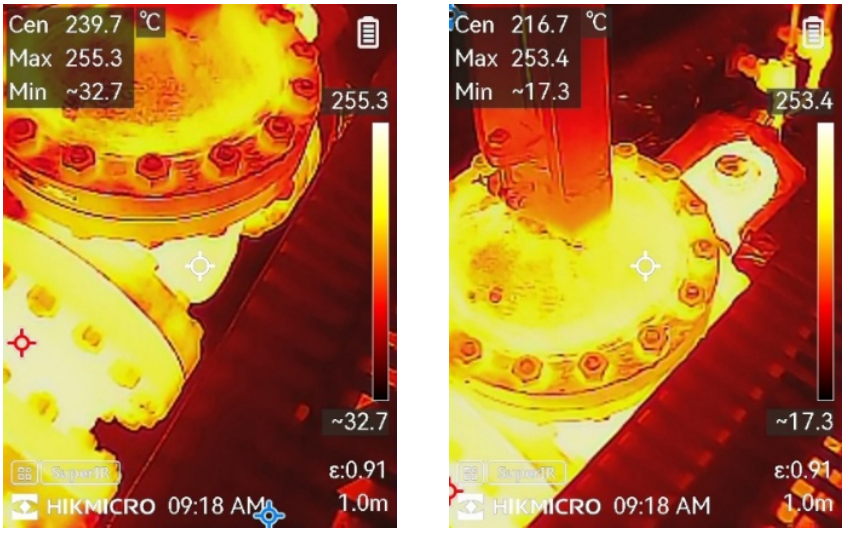


Figura C.15. Evidencia termográfica de la válvula V13: Línea 1, cuerpo de 47 cm, temperatura superficial 228,2 °C. Fuente: elaboración propia.

C.15 Válvula 14

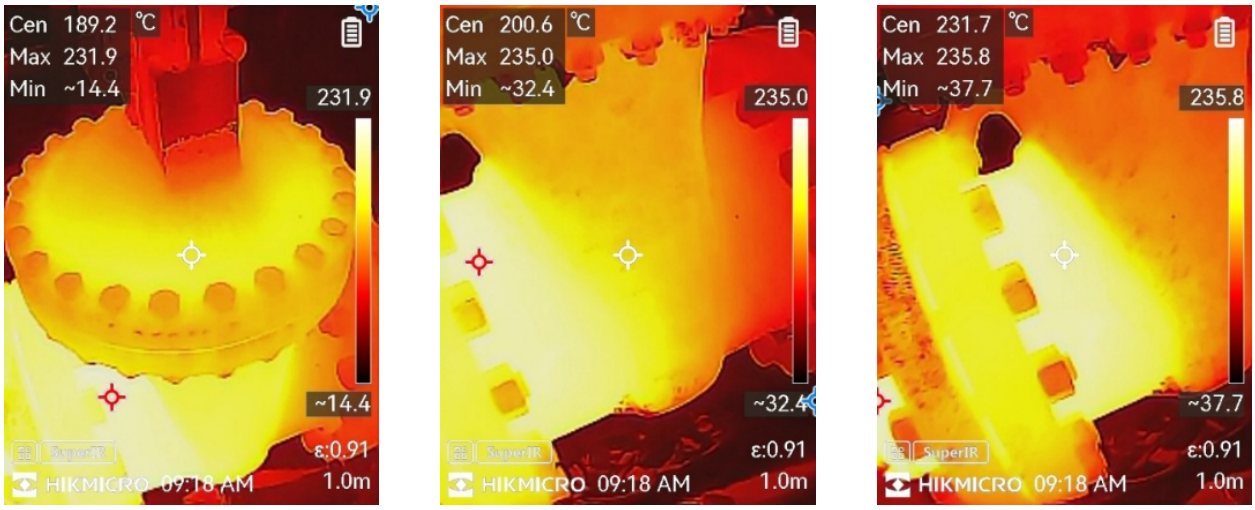


Figura C.16. Evidencia termográfica de la válvula V14: Línea 1, cuerpo de 40 cm, temperatura superficial 209,6 °C. Fuente: elaboración propia.

C.16 Referencia de válvula con manto térmico

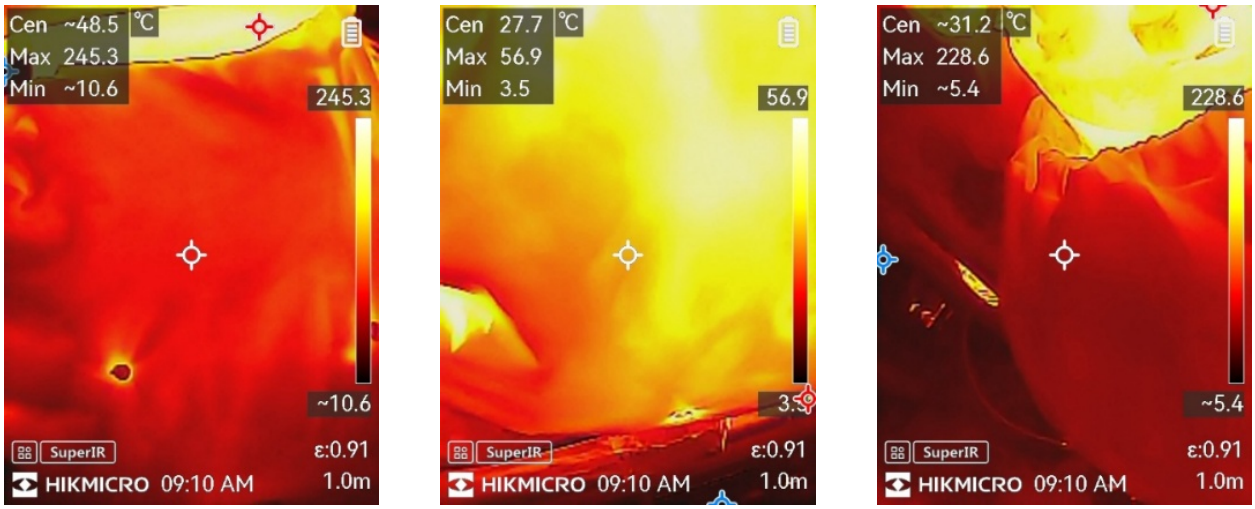


Figura C.17. Condición superficial de referencia con manto térmico instalado. Fuente: elaboración propia.

La comparación confirma la disminución de la temperatura superficial accesible, pero la validación económica utiliza el modelo térmico y no una resta directa entre máximos de termografías tomadas en instantes distintos.

Anexo D Respaldo termográfico de pérdidas en cañerías y sector AK1

Este anexo organiza por diámetro las termografías de cañerías sin aislación e incorpora las comparaciones térmicas y evidencias empleadas en las Secciones 3.3 y 3.7. Cada registro se conserva como evidencia trazable del tramo evaluado.

D.1 Criterio de cálculo para cañerías

Tabla D.1. Secuencia de cálculo aplicada a los tramos de cañería sin aislación.

Etapa	Dato principal	Uso
Inventario	Diámetro y longitud expuesta	Área exterior por tramo
Condición térmica	Temperatura superficial y ambiente	Diferencia térmica
Modelo	Balance superficial de convección y radiación	Pérdida actual y posterior
Conversión	Horas de operación y calor latente	Vapor equivalente anual
Validación	Termografía después de aislar	Comprobación del desempeño

D.2 Cañerías sin aislación por diámetro

D.2.1 Cañería de 1 1/2 pulgadas

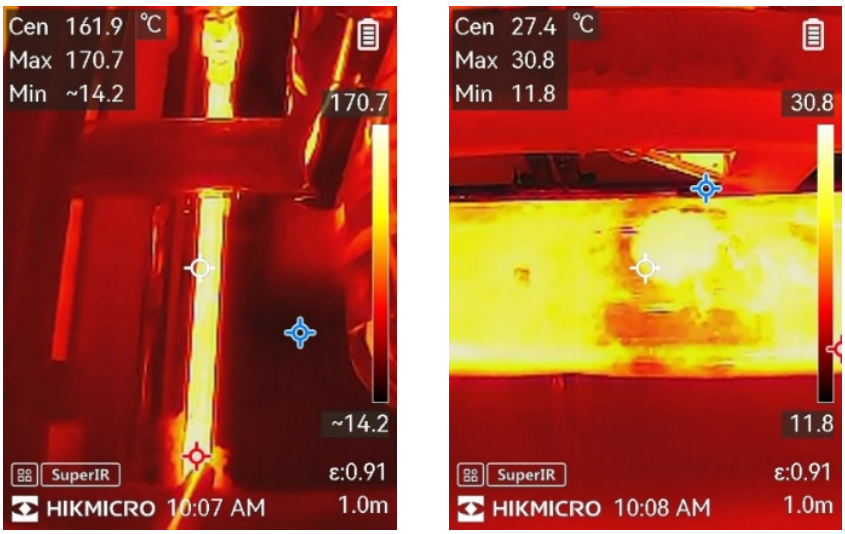


Figura D.1. Registro termográfico de cañería de 1 1/2 pulgadas sin aislación. Fuente: elaboración propia.

D.2.2 Cañería de 2 pulgadas

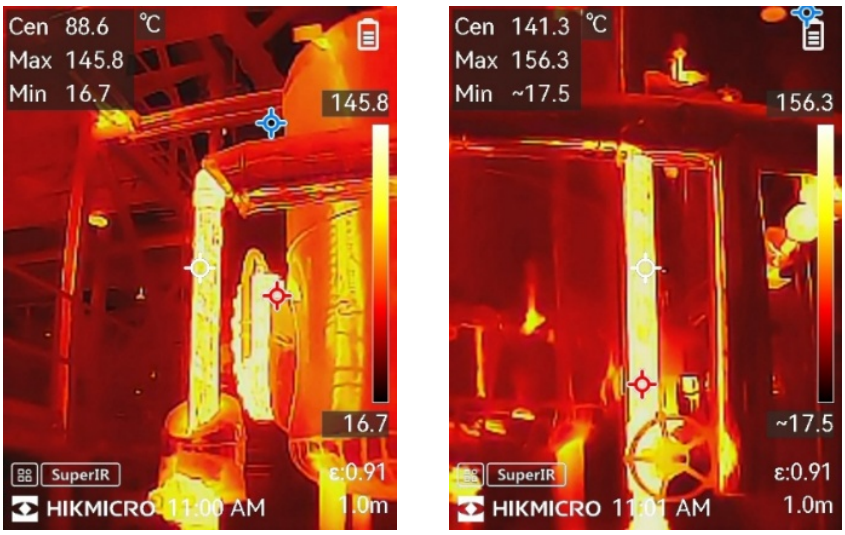


Figura D.2. Registro termográfico de cañería de 2 pulgadas sin aislación. Fuente: elaboración propia.

D.2.3 Cañería de 4 pulgadas

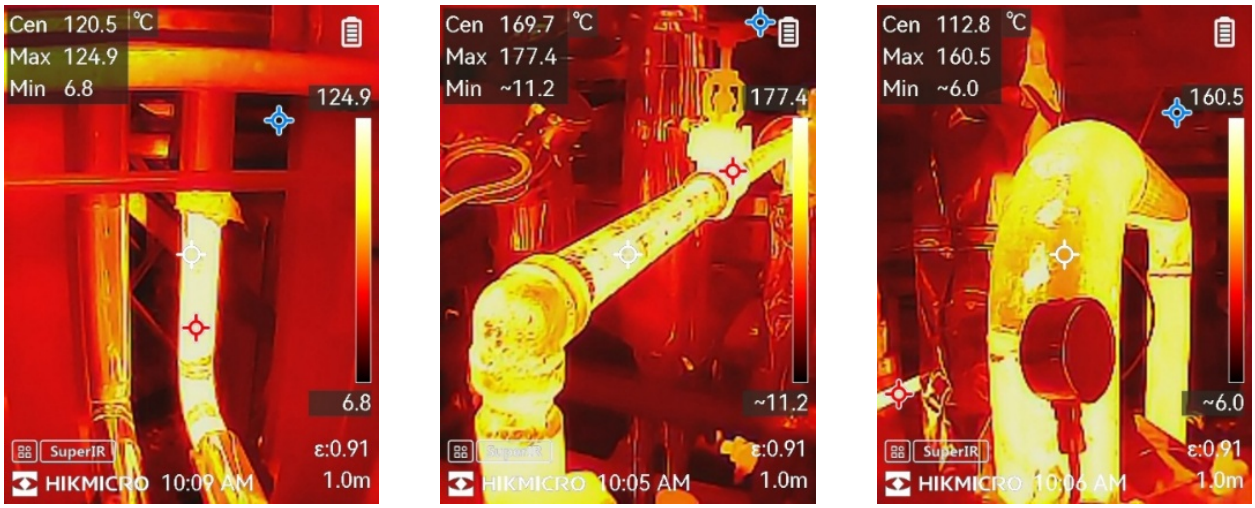


Figura D.3. Registro termográfico de cañería de 4 pulgadas sin aislación. Fuente: elaboración propia.

D.2.4 Cañería de 6 pulgadas

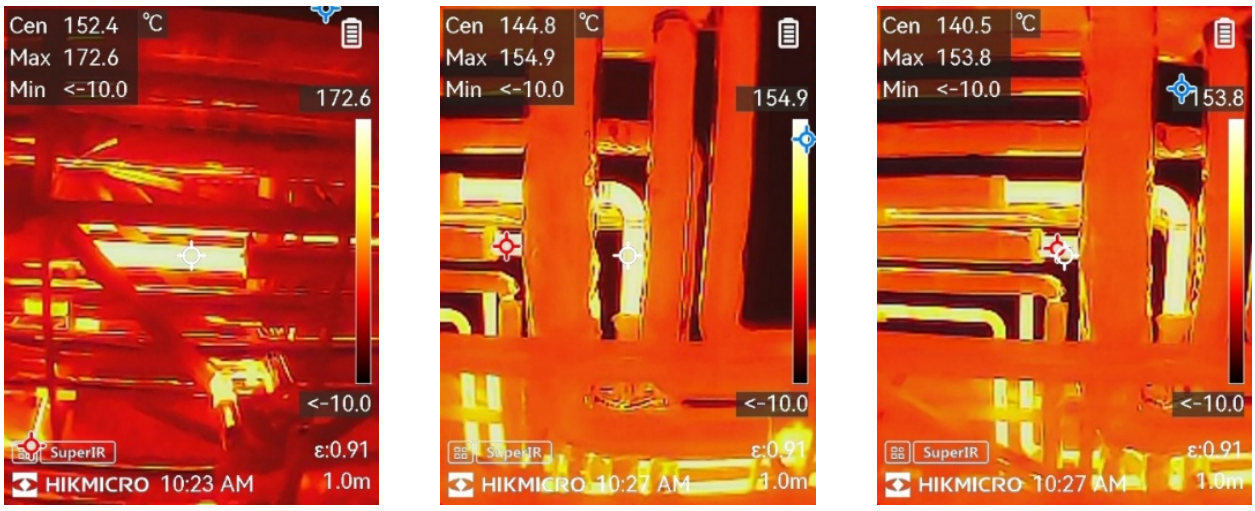


Figura D.4. Registro termográfico de cañería de 6 pulgadas sin aislación. Fuente: elaboración propia.

D.2.5 Cañería de 8 pulgadas

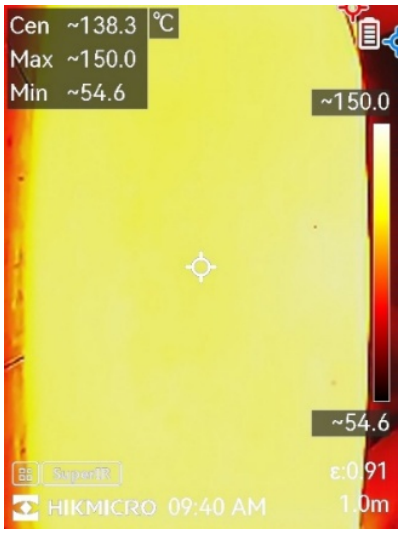


Figura D.5. Registro termográfico de cañería de 8 pulgadas sin aislación. Fuente: elaboración propia.

D.2.6 Cañería de 10 pulgadas

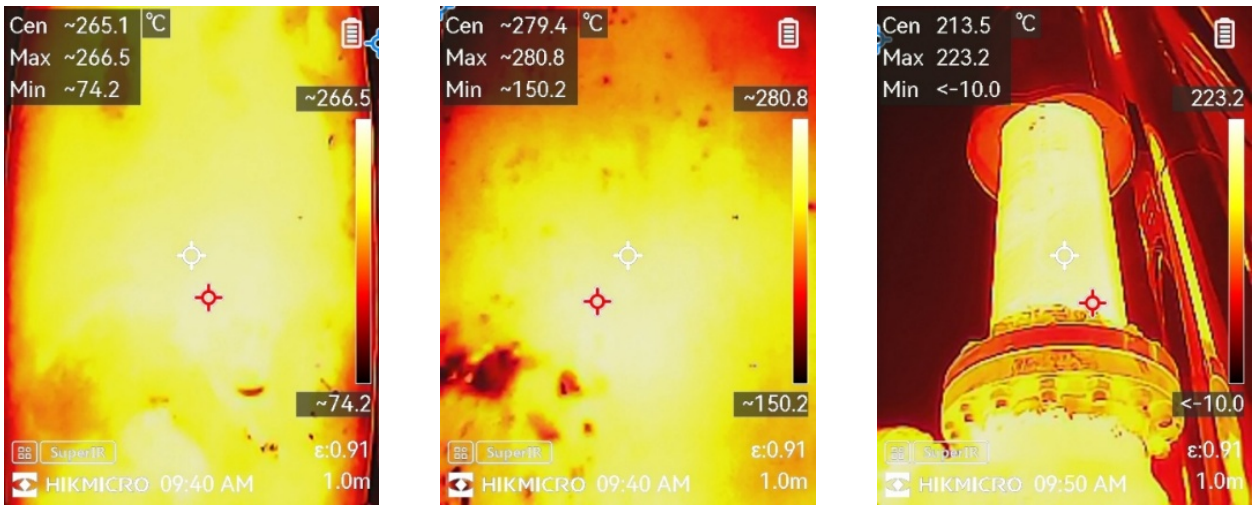


Figura D.6. Registro termográfico de cañería de 10 pulgadas sin aislación. Fuente: elaboración propia.

D.2.7 Cañería de 12 pulgadas



Figura D.7. Registro termográfico de cañería de 12 pulgadas sin aislación. Fuente: elaboración propia.

D.2.8 Cañería de 16 pulgadas

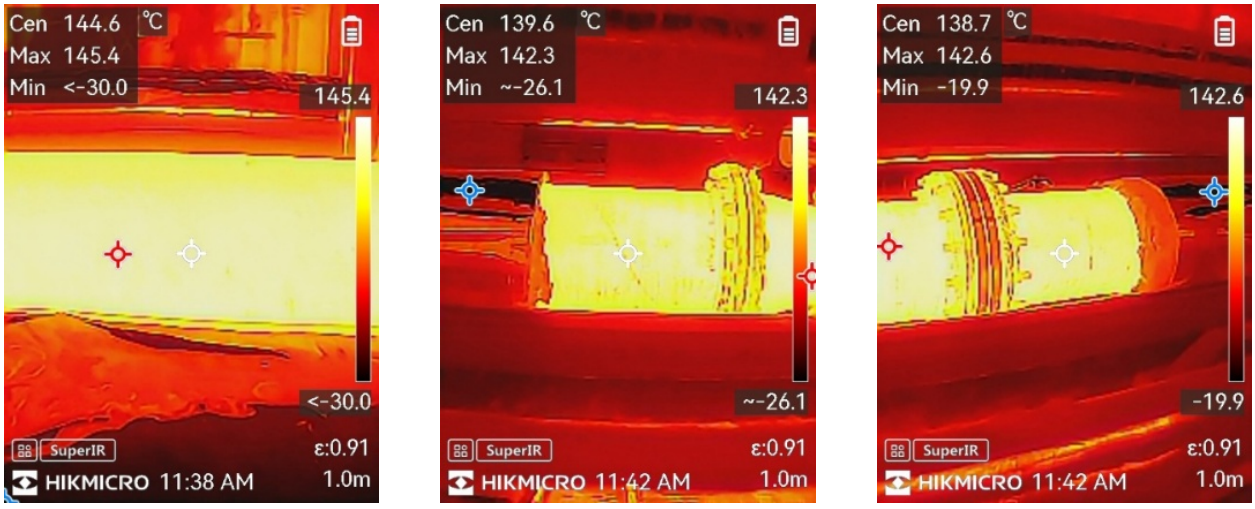


Figura D.8. Registro termográfico de cañería de 16 pulgadas sin aislación. Fuente: elaboración propia.

D.3 Comparación térmica de superficies



Figura D.9. Referencia adicional de válvulas sin manto térmico. Fuente: elaboración propia.

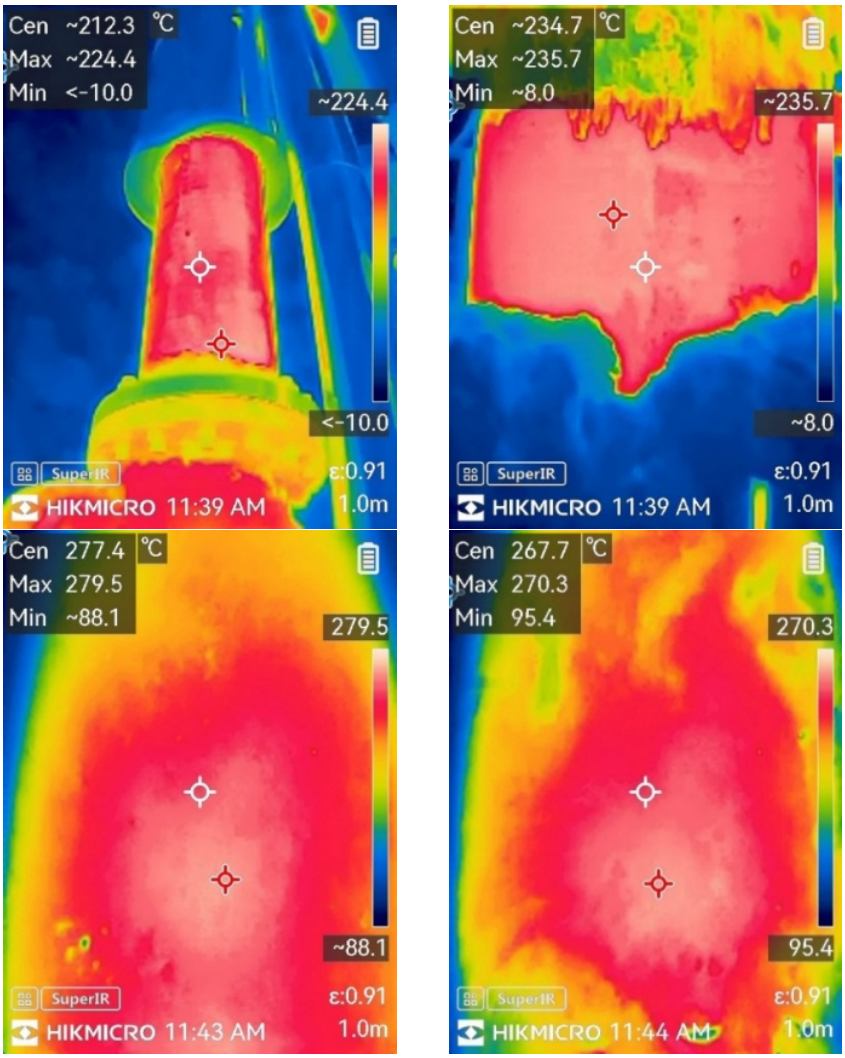


Figura D.10. Referencias de cañerías de vapor sin aislación térmica. Fuente: elaboración propia.

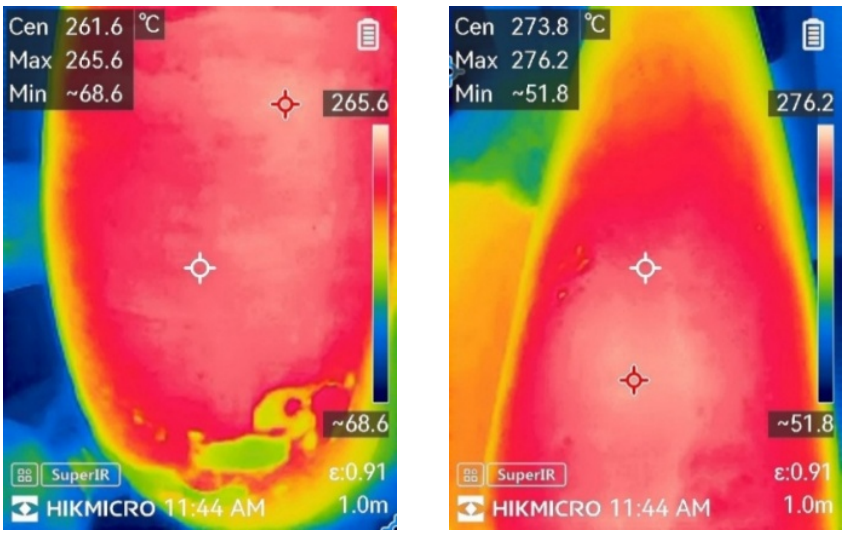


Figura D.11. Referencias de cañerías de vapor sin aislación térmica (continuación). Fuente: elaboración propia.

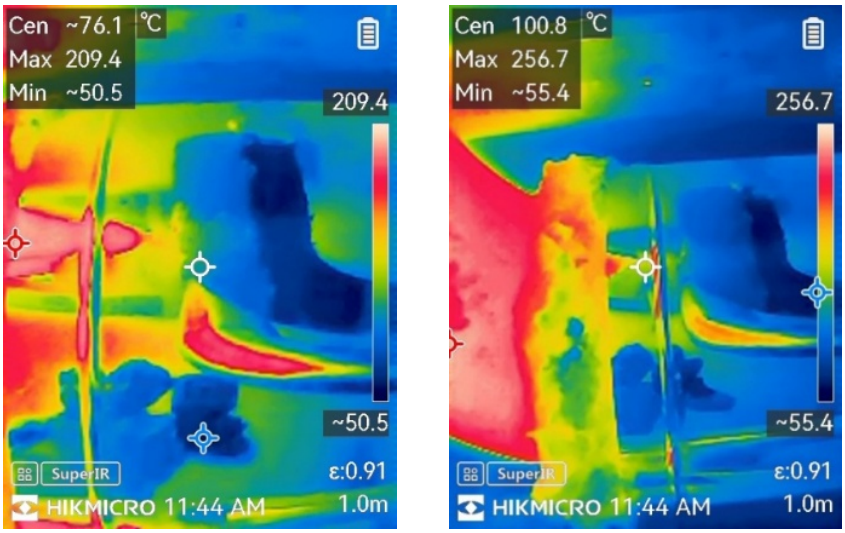


Figura D.12. Referencias de cañerías con aislación térmica. Fuente: elaboración propia.

D.4 Evidencia complementaria del sector AK1

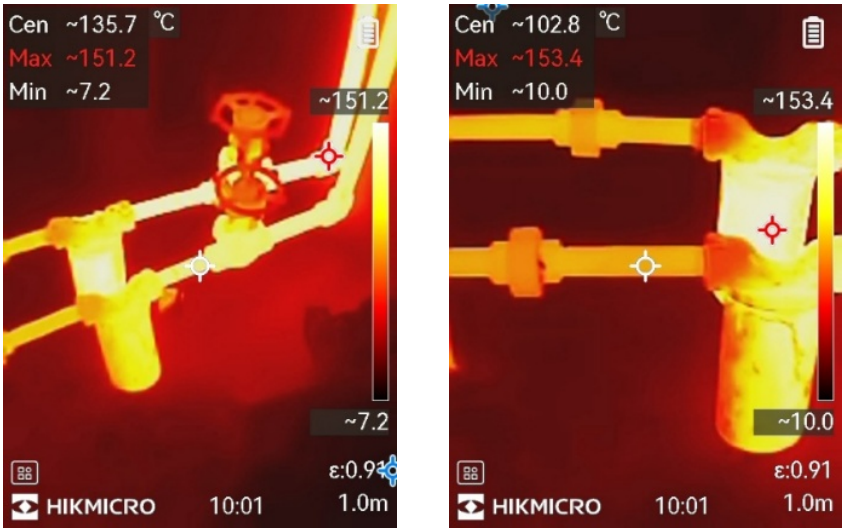


Figura D.13. Termografías de trampas de vapor del sector AK1. Fuente: elaboración propia.

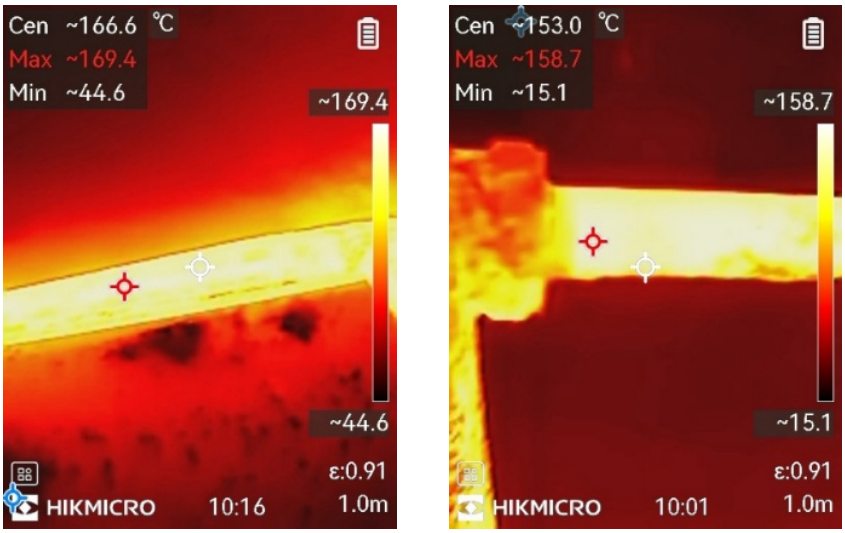


Figura D.14. Termografías de la línea de drenaje de condensado del sector AK1. Fuente: elaboración propia.



Figura D.15. Evidencia visual de fallas observadas en el sector AK1. Fuente: elaboración propia.

D.5 Trampas del pipe rack: contraste entre operación y falla

Las estaciones de trampeo del pipe rack se inspeccionaron con termografía radiométrica, con emisividad configurada de 0,91 y distancia indicada de 0,1 m en las capturas. El contraste térmico permite identificar diferencias de operación y orientar la inspección. Una temperatura baja puede relacionarse con bloqueo, carga insuficiente, aislamiento o falta de diferencial de presión; su interpretación exige comprobar el estado de servicio. Una trampa bloqueada no necesariamente alcanza temperatura ambiente, ni una superficie caliente demuestra por sí sola descarga correcta (TLV Co., Ltd., s. f.-b).

La Figura D.16 contrasta estaciones con temperaturas centrales de 179,6 °C, 112,7 °C y 109,8 °C, frente a otras de 15,7 °C, 18,2 °C y 17,2 °C. La diferencia orienta la inspección funcional, sin convertir el promedio anual de 12,8 °C en una medición ambiental simultánea. Deben contrastarse emisividad, reflexiones y geometría de observación.

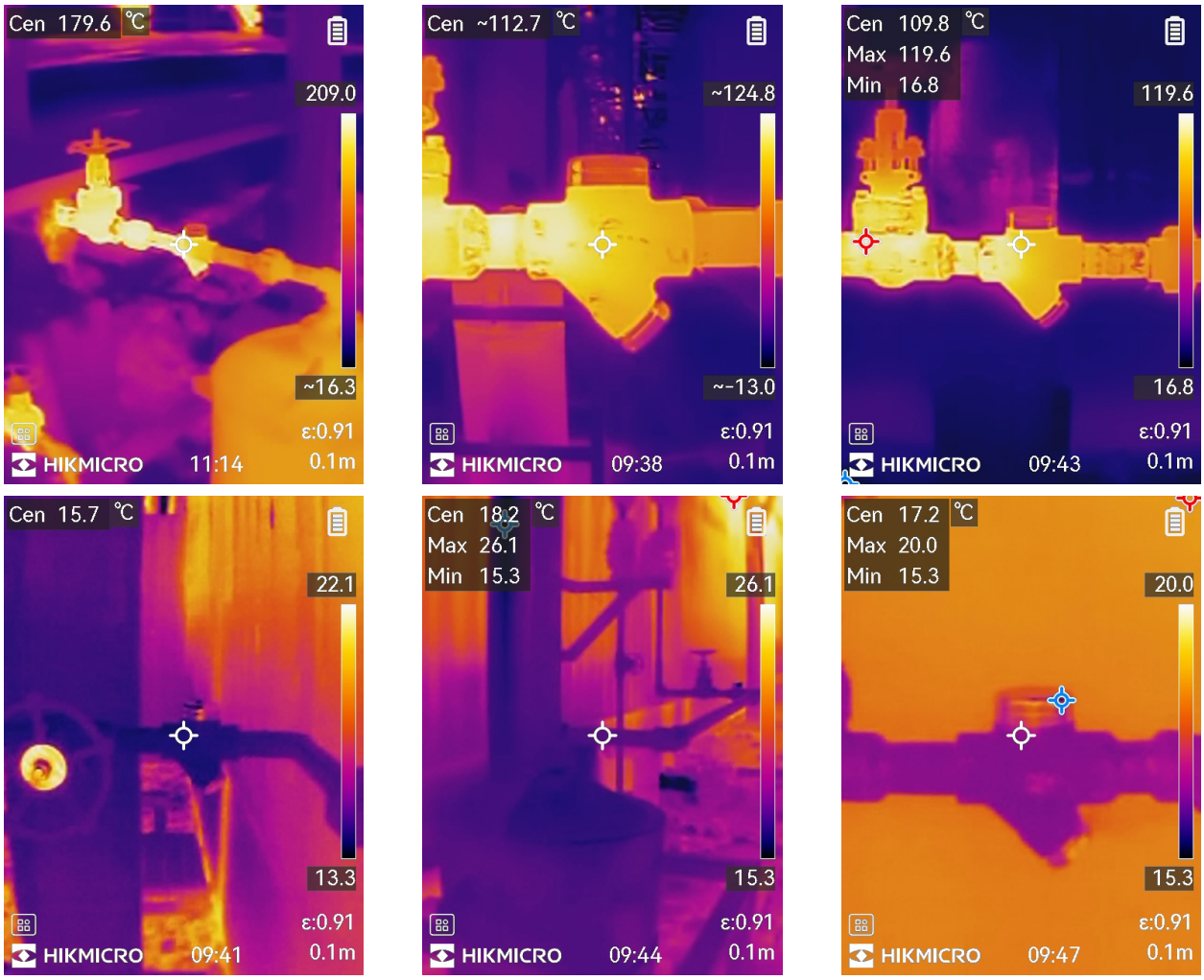


Figura D.16. Termografías del pipe rack. Fila superior: estaciones calientes; fila inferior: estaciones de baja temperatura superficial. La clasificación funcional requiere comprobar sus condiciones de servicio. Fuente: elaboración propia.

La clasificación se completa con temperatura de entrada, ultrasonido, estado de válvulas y carga. Toda inspección interna requiere aislamiento y despresurización, según la pauta de la Sección 3.6.

Anexo E Inventarios complementarios del diagnóstico

Este anexo conserva los registros detallados que complementan la evaluación del Capítulo 3. Su finalidad es mantener la trazabilidad de los datos sin interrumpir la lectura del diagnóstico consolidado.

E.1 Inventario de válvulas sin manto térmico

Tabla E.1. Válvulas sin manto térmico identificadas en la red principal.

Válvula	Línea	Diámetro de cuerpo [cm]	Temperatura promedio [°C]
V1	Línea 2	50	233,9
V2	Línea 2	30	156,6
V3	Línea 1	30	236,3
V4	Línea 2	50	224,3
V5	Línea 2	50	250,1
V6	Línea 2	50	239,4
V7	Línea 1	50	147,6
V8	Línea 2	50	209,0
V9	Línea 2	30	240,3
V10	Línea 2	50	223,6
V11	Línea 1	47	239,5
V12	Línea 1	32	229,4
V13	Línea 1	47	228,2
V14	Línea 1	40	209,6

El diámetro de cuerpo y la temperatura registrada no bastan por sí solos para reproducir la pérdida: el modelo de la Ecuación 3.4 opera sobre el área equivalente levantada de cada válvula. La Tabla E.2 reúne esa área junto con la potencia disipada en la condición actual, la correspondiente a la superficie de referencia con manto y la reducción resultante, de modo que los 81,93 kW empleados en el Capítulo 3 puedan verificarse válvula por válvula.

Tabla E.2. Trazabilidad de áreas, temperaturas y pérdidas en válvulas.

ID	Línea	Área [m²]	T_s [°C]	Q [kW]	Q ref. [kW]	Red. [kW]
V1	2	1,689	233,90	8,91	0,39	8,52
V2	2	0,565	156,65	1,61	0,13	1,48
V3	1	0,880	236,30	4,72	0,20	4,52
V4	2	1,767	224,28	8,71	0,41	8,30
V5	2	1,200	250,10	7,08	0,28	6,80
V6	2	1,200	239,40	6,58	0,28	6,30
V7	1	0,813	147,62	2,13	0,19	1,94
V8	2	1,693	209,03	7,46	0,39	7,07
V9	2	0,882	240,28	4,86	0,20	4,66
V10	2	1,689	223,58	8,28	0,39	7,89
V11	1	1,201	239,50	6,59	0,28	6,31
V12	1	0,881	229,37	4,50	0,20	4,30
V13	1	1,201	228,20	6,09	0,28	5,81
V14	1	0,995	209,58	4,40	0,23	4,17
Total		16,656		81,93	3,85	78,08

La suma de la columna de condición actual entrega 81,93 kW sobre un área total

de 16,656 m², y la reducción acumulada 78,08 kW, que es la magnitud convertida a vapor equivalente en la evaluación económica de los mantos. La temperatura de la superficie de referencia se fija en 28 °C para todas las unidades, valor representativo de una superficie protegida con manto en las condiciones ambientales de la campaña; no corresponde a una medición posterior a la instalación.

E.2 Temperaturas registradas en aireadores del sector AK1

Tabla E.3. Registro termográfico de aireadores del sector AK1.

Aireador	Temperatura central [°C]	Temperatura máxima [°C]	Observación
1	136,8	142,2	Línea caliente
2	130,4	131,9	Línea caliente
3	140,7	142,7	Línea caliente
4	144,0	145,0	Línea caliente
5	141,3	143,8	Línea caliente
6	135,4	137,9	Línea caliente
7	156,9	171,5	Conexión directa a línea de vapor

Nota: el catastro individual de trampas se conserva en la planilla de levantamiento y mantenimiento utilizada como respaldo digital de la memoria. La condición definitiva de cada unidad debe confirmarse mediante inspección funcional.

Anexo F Sensibilidades y datos complementarios de la evaluación

Este anexo conserva los escenarios paramétricos y desgloses que complementan el Capítulo 3. Los valores dependen de los supuestos indicados y no sustituyen mediciones directas de caudal.

F.1 Desglose del escenario base de aireadores AK1

Tabla F.1. Pérdida estimada por sector para deff = 3 mm.

Sector	Cant.	Por aireador [kg/h]	Subtotal [kg/h]	Vapor [t/año]	Costo [USD/año]
Sección 1	1	34,7	34,7	291,5	3.116
Sección 2	2	33,7	67,5	567,0	6.061
Sección 3	3	31,2	93,5	785,4	8.396
Línea directa	1	51,3	51,3	430,9	4.606
Total	7	—	247,0	2.074,8	22.180

El caudal se calculó con Cd = 0,62, k = 1,3, R = 461,5 J/(kg · K), descarga a 1,013 bar(a) y las presiones indicadas en la Tabla 3.20. El costo utiliza 8.400 h/año y 10,69 USD/t.

F.2 Sensibilidad de trampas abiertas

Tabla F.2. Pérdida potencial para cinco trampas según diámetro efectivo.

deff	Por trampa [kg/h]	Total [kg/h]	Vapor [t/año]	Costo [USD/año]
1 mm	5,7	28,5	239,4	2.559
2 mm	22,8	114,0	957,6	10.237
3 mm	51,2	256,0	2.150,4	22.988
5 mm	142,3	711,5	5.976,6	63.890

F.3 Sensibilidad de condensado no evacuado

Tabla F.3. Escenarios para seis trampas cerradas o con drenaje insuficiente.

Carga por punto [kW]	Por trampa [kg/h]	Total [kg/h]	Volumen [L/h]	Masa en 8 h [kg]
5	9,8	59,0	65,5	471,9
10	19,7	118,0	131,1	943,7
25	49,2	294,9	327,7	2.359,4
50	98,3	589,8	655,4	4.718,7
100	196,6	1.179,7	1.310,8	9.437,5

Nota: los totales de condensado se calculan antes del redondeo, con $h_{fg} = 1.831$ kJ/kg y densidad referencial de 900 kg/m³. Los escenarios de trampas abiertas y cerradas representan modos de falla diferentes; no deben sumarse ni interpretarse como una única pérdida medida.

Anexo G Respaldo técnico y económico de las propuestas

Este anexo conserva los desgloses técnicos y económicos que respaldan las propuestas del Capítulo 3. Los montos corresponden a las bases, monedas y alcances indicados; deben actualizarse antes de una aprobación definitiva de inversión.

G.1 Priorización de aislación de cañerías

Tabla G.1. Resultado por diámetro de la aislación propuesta.

NPS [pulg.]	Long. [m]	Actual [kW]	Posterior [kW]	Red. [kW]	Vapor [t/año]	Inversión [CLP]	Payback
16	3,0	9,50	0,77	8,73	144,10	1.451.414	12 meses
12	10,2	60,25	4,51	55,74	920,57	3.925.941	5 meses
10	6,5	30,27	1,08	29,19	482,11	2.109.576	5 meses
8	3,0	4,93	0,84	4,09	67,58	750.726	13 meses
6	24,0	37,31	1,73	35,58	587,61	4.804.720	10 meses
4	10,3	10,28	2,38	7,90	130,41	1.399.192	13 meses
2	2,0	0,85	0,13	0,72	11,92	119.157	12 meses
1 1/2	3,8	1,31	0,38	0,93	15,43	181.130	14 meses
Total	62,8	154,71	11,83	142,88	2.359,74	14.741.857	7,4 meses

Las columnas de potencia desglosan por diámetro el total de cañerías de la Tabla 3.5: la suma de la condición actual es 154,71 kW, la de la condición aislada de referencia 11,83 kW y la reducción resultante 142,88 kW, que es la magnitud convertida a vapor equivalente en la columna siguiente. Los tres diámetros de mayor aporte —12, 10 y 6 pulgadas— reúnen 127,83 kW, equivalentes al 82,63 % de la disipación en cañerías.

La Tabla G.2 conserva las variables de entrada con las que se obtuvieron esas potencias, de modo que el balance sea reproducible: diámetro exterior, longitud separada entre servicio de vapor y de condensado, temperatura superficial registrada y temperatura de la superficie aislada de referencia adoptada para cada diámetro.

Tabla G.2. Datos superficiales y resultados por diámetro.

NPS	D [mm]	L vapor	L cond.	T_s [°C]	$T_{s,ref}$ [°C]	Q [kW]	Q ref. [kW]
16	406,40	0,0	3,0	142,00	23,5	9,50	0,77
12	323,85	10,2	0,0	247,80	34,3	60,25	4,51
10	273,05	6,5	0,0	238,00	22,2	30,27	1,08
8	219,08	0,0	3,0	138,30	31,0	4,93	0,84
6	168,28	3,0	21,0	159,90	18,5	37,31	1,73
4	114,30	2,0	8,3	153,80	35,0	10,28	2,38
2	60,33	0,0	2,0	132,20	21,2	0,85	0,13
1 1/2	48,26	3,8	0,0	133,78	26,8	1,31	0,38

Procedencia de las temperaturas adoptadas

Las temperaturas de cañerías proceden del archivo de trabajo *cañeria sin aislacion 2.xlsx*, hoja `Hoja1`. La columna S contiene la temperatura sin aislación y la R la referencia aislada; ambas se identifican en la fila 3 como promedios de cuatro puntos. Las longitudes se conservan en las columnas E–H. La Tabla G.3 indica la correspondencia de celdas.

Tabla G.3. Correspondencia entre los valores adoptados y las celdas de la planilla de levantamiento.

NPS [pulg.]	Longitud [m]	T_s [°C]	$T_{s,ref}$ [°C]	Celdas T_s / $T_{s,ref}$
16	3,0	142,00	23,5	S4 / R4
12	10,2	247,80	34,3	S5 / R5
10	6,5	238,00	22,2	S6 / R6
8	3,0	138,30	31,0	S7 / R7
6	24,0	159,90	18,5	S8 / R8
4	10,3	153,80	35,0	S9 / R9
2	2,0	132,20	21,2	S10 / R10
1 1/2	3,8	133,78	26,8	S11 / R11

La planilla conserva estos promedios como valores ingresados, sin el desglose de los cuatro puntos de cañería ni su vínculo individual con fecha, archivo radiométrico o región de interés. Por tanto, se acredita la procedencia documental del dato utilizado, no una reconstrucción radiométrica independiente. Las figuras del Anexo D son evidencia representativa de las superficies y no el conjunto completo del promedio. Los 247,8 °C se toman de S5, no del transmisor de temperatura del fluido. Se mantienen las entradas originales del cálculo; su validación metrológica requiere recuperar el registro de puntos o contrastar las superficies en terreno.

Para válvulas, la misma hoja conserva las lecturas en A38:N43 y sus promedios en A44:N44, asociados a los identificadores de las filas 36–37. La referencia con manto se toma de O44. Esta trazabilidad permite reproducir los promedios de válvulas, aunque no reemplaza la identificación de cada lectura con su archivo termográfico.

Las longitudes de vapor y de condensado suman los 62,8 m levantados. La distinción es relevante porque solo los tramos de vapor participan del subtotal de 180,43 kW asociado a elementos de vapor que recoge la Tabla 3.4; los tramos de condensado disipan energía igualmente, pero su recuperación no se contabiliza como vapor dejado de consumir en la misma frontera.

Los periodos de recuperación se calculan valorizando el vapor ahorrado al costo uniforme de 10,69 USD/t adoptado en la Sección 3.1 y expresado en moneda local con el tipo de cambio de referencia de 950 CLP/USD, es decir 10.155,5 CLP/t. La tabla utiliza el balance superficial revisado y una condición aislada de referencia; el total de 7,4 meses es una estimación de prefactibilidad, no un desempeño garantizado. Los valores por diámetro se redondean a dos decimales en potencia y al mes en el periodo de recuperación, por lo que la suma directa de las cifras mostradas puede diferir del total en la última cifra; los totales se calculan sin redondear.

Reconstrucción del presupuesto de aislación

La inversión se reconstruye con los costos unitarios adoptados en la planilla de evaluación y las longitudes del levantamiento. Se reemplaza la partida de materiales de la cotización de Emyserv Ltda. (5.570.000 CLP) por 1.920.596,90 CLP y se mantienen sus demás partidas, que suman 12.821.260 CLP. Es una adaptación presupuestaria para prefactibilidad, no una nueva oferta del contratista para este alcance.

La asignación por diámetro de la Tabla G.1 distribuye el subtotal conservado en proporción al costo de materiales de cada grupo: $I_i = M_i(1 + 12.821.260/1.920.596{,}90)$, con $M_i = L_i c_i$. El total se redondea a 14.741.857 CLP; a 950 CLP/USD equivale a 15.517,74 USD. Se requiere confirmación comercial antes de contratar.

Tabla G.4. Materiales de aislación: cantidades y costos unitarios adoptados.

NPS [pulg.]	Longitud [m]	Unitario [CLP/m]	Materiales [CLP]
16	3,0	63.031	189.093,00
12	10,2	50.145	511.479,00
10	6,5	42.283	274.839,50
8	3,0	32.602	97.806,00
6	24,0	26.082	625.968,00
4	10,3	17.698	182.289,40
2	2,0	7.762	15.524,00
1 1/2	3,8	6.210	23.598,00
Total	62,8	—	1.920.596,90

Tabla G.5. Partidas conservadas de la cotización y presupuesto adaptado.

Partida	Monto [CLP]
Mano de obra	5.376.000,00
Equipos y servicios	3.352.400,00
Gastos generales	1.694.000,00
Utilidades	2.398.860,00
Subtotal conservado	12.821.260,00
Materiales recalculados para 62,8 m	1.920.596,90
Inversión adaptada	**14.741.856,90**

G.2 Costos de mantos térmicos para válvulas

Tabla G.6. Costos unitarios e inversión referencial.

Referencia	**Cantidad**	**Costo unitario [USD]**	**Aplicación Plywood**	**Inversión [USD]**
DN300 compuerta	4	1.262,98	Línea 2	5.051,93
DN300 control	4	1.161,28	Línea 2	4.645,12
DN250 compuerta	4	1.133,38	Línea 1	4.533,50
DN250 control	2	1.047,67	Línea 1	2.095,34
Total	14	—	Líneas 1 y 2	16.325,89

Los costos unitarios se presentan redondeados a dos decimales. La inversión total se obtiene sumando los importes por partida del presupuesto referencial, conservados en esta tabla: 16.325,89 USD.

G.3 Sensibilidad del potencial térmico

El potencial térmico de 220,96 kW se obtiene a partir de temperaturas y dimensiones levantadas, superficies aisladas de referencia y parámetros adoptados para convección y radiación. La Tabla G.7 evalúa variaciones deterministas alrededor de esa base, con 12,8 °C de ambiente y 8.400 h/año constantes. En los casos de h y emisividad se modifica el mismo valor en ambas condiciones superficiales; el factor de área también se aplica a ambas. Se conserva la conversión de 1.831 kJ/kg y 10,69 USD/t.

Dentro de los rangos ensayados, la variación de h entre 5 y 15 W/(m$^2 \cdot$ K) produce el mayor desplazamiento: de 173,85 a 268,06 kW, aproximadamente $\pm 21\,\%$. La emisividad entre 0,70 y 0,95 modifica el resultado entre $-13\,\%$ y $+2{,}5\,\%$; variar todas las áreas $\pm 10\,\%$ cambia el potencial en la misma proporción. Esta jerarquía depende de los rangos elegidos

Tabla G.7. Sensibilidad determinista del potencial térmico; no son intervalos de confianza.

Variación aislada	Reducción [kW]	t/año eq.	USD/año eq.
Base	220,96	3.649,2	39.010
$h = 5$ W/(m² · K)	173,85	2.871,2	30.693
$h = 15$ W/(m² · K)	268,06	4.427,2	47.327
Emisividad = 0,70	191,71	3.166,2	33.846
Emisividad = 0,95	226,53	3.741,2	39.994
T_s y $T_{s,ref}$: −5 °C	217,85	3.597,9	38.462
T_s y $T_{s,ref}$: +5 °C	224,15	3.702,0	39.575
Solo T_s: −5 °C	212,01	3.501,5	37.431
Solo T_s: +5 °C	230,10	3.800,2	40.624
Solo $T_{s,ref}$: −5 °C	226,80	3.745,7	40.041
Solo $T_{s,ref}$: +5 °C	215,01	3.551,0	37.960
Áreas: −10 %	198,86	3.284,3	35.109
Áreas: +10 %	243,05	4.014,1	42.911

y no constituye una comparación de incertidumbres metrológicas.

Desplazar simultáneamente T_s y $T_{s,ref}$ en ±5 °C representa un sesgo común: parte de su efecto se cancela al restar las dos pérdidas, dando cambios menores de 1,5 %. Por ello se incluyen también variaciones separadas. Modificar solo T_s entrega 212,01–230,10 kW y modificar solo $T_{s,ref}$ entrega 215,01–226,80 kW. La campaña debe contrastar ambas temperaturas, convección y emisividad en cada superficie.

Los extremos de los casos ensayados son 173,85 y 268,06 kW, equivalentes a 2.871,2 y 4.427,2 t/año. No son cotas de toda combinación posible ni intervalos de confianza: no se ha asignado una distribución conjunta de parámetros. Variar la emisividad en el balance a temperaturas fijas tampoco reproduce su efecto sobre la lectura radiométrica original.

G.4 Lista de datos para selección de atemperador

Tabla G.8. Información mínima para solicitar selección al proveedor.

Dato	Rango requerido	Finalidad
Caudal de vapor	Mínimo, normal y máximo	Rangeabilidad y tamaño de boquilla
Presión y temperatura de vapor	Sincronizadas por condición	Balance y margen de sobrecalentamiento
Condensado de inyección	P, T y caudal disponible	Presión diferencial y evaporación
Geometría	Diámetro, codo, sensor y derivación	Distancia garantizada de mezcla
Condición objetivo	Temperatura y margen sobre Tsat	Evitar operación sin margen
Servicios auxiliares	Vapor de atomización si aplica	Comparar tecnologías

G.5 Desglose económico del proyecto AK1

Tabla G.9. Componentes e inversión del proyecto AK1.

Partida	Cantidad	Valor [CLP]	Observación
Trampas TLV F53-21-DN25-SW NPS 1	4	Incluido	Alcance del proyecto
Válvulas check CKF3M NPS 1	4	Incluido	Alcance del proyecto
Válvulas de globo NPS 1	6	Incluido	Alcance del proyecto
Normalización y montaje	—	Incluido	Alcance del proyecto
Total con IVA	—	18.520.950	19.495,74 USD a TC 950

Se adopta el total del proyecto confirmado, sin sumar nuevamente los 5.292.796 CLP de la estimación previa de componentes. El extracto de la Figura G.1 respalda el monto global; el desglose contractual completo es la referencia para compras y ejecución.

G.6 Recambio y mantenimiento de trampas

Tabla G.10. Suministro cotizado para las 11 trampas.

Equipo	Cantidad	Valor	Alcance
TD62M NPS 1 clase 300 RF	10	26.295.942 CLP	Suministro
FT44-32 TV 2 pulgadas clase 300	1	3.314,76 USD	Suministro
Total a TC 887	11	32.960,69 USD	No confirma montaje incluido

Tabla G.11. Plan detallado de inspección de trampas.

Actividad	Frecuencia	Criterio	Salida
Visual	Mensual	Fuga, corrosión, vibración o bloqueo	Hallazgo por TAG
Termografía	Trimestral	Patrón térmico coherente	Imagen comparable
Ultrasonido	Trimestral	Sin paso continuo	Clasificación funcional
Filtro	Semestral / condición	Sin obstrucción	Orden de trabajo
Auditoría	Anual	100 % del universo	Matriz actualizada

G.7 Datos del separador y umbral económico

Tabla G.12. Resumen de la cotización del separador de Línea 2.

Ítem	Dato
Proveedor / referencia	Spirax Sarco Chile Ltda. (2026a); QT-5606.2602.0603-Rev.00
Equipo	Separador vertical tipo deflectores, NPS 10 pulgadas, clase 600
Material	ASTM A-285 Grado C
Accesorios	Trampa FT44-32 TV, filtro, válvulas de globo y check
Valor neto	70.000 USD
Valor con IVA	83.300 USD
Dato pendiente	Caudal de condensado capturable en el punto

G.8 Conciliación económica de prefactibilidad

Tabla G.13. Conversión común utilizada para el subconjunto cuantificable.

Medida	Base original	TC común	CAPEX [USD]	Beneficio [USD/año]
Aislación	14.741.857 CLP	950	15.517,74	25.225,58
Mantos	16.325,89 USD	—	16.325,89	13.784,62
AK1	18.520.950 CLP	950	19.495,74	22.179,61
Trampas	26.295.942 CLP + 3.314,76 USD	950	30.994,70	10.236,74
Subtotal	—	—	82.334,07	71.426,56

Nota: la conciliación utiliza un tipo de cambio común únicamente para comparación y no homologa fechas, impuestos ni alcances comerciales. El valor consolidado debe actualizarse con cotizaciones vigentes y beneficios medidos después de la implementación. En particular, el separador se evalúa por separado: su eventual incorporación a una evaluación económica conjunta exige verificar el ahorro neto en la frontera definida y disponer de una inversión instalada con alcance, fecha y tratamiento tributario comparables.

G.9 Criterios de aceptación detallados por medida

Esta sección reúne los criterios de aceptación de cada medida propuesta. El Anexo P presenta la versión consolidada en la Tabla P.17; aquí se conserva el desglose completo, que constituye la base para redactar los protocolos de puesta en servicio y las listas de verificación por TAG.

El apoyo intervenido debe recuperar simultáneamente geometría, orientación, capacidad de deslizamiento y pendiente. La Tabla G.14 detalla la condición actual, la acción y el criterio de aceptación de cada aspecto.

Tabla G.14. Condición funcional requerida para el apoyo intervenido.

Aspecto	Condición actual	Acción	Criterio de aceptación
Geometría	Cabeza deformada y contacto excéntrico	Reparar o reemplazar	Contacto uniforme, sin deformación residual
Orientación	Desfavorable respecto de la expansión	Realinear apoyo y patín	Eje compatible con el movimiento previsto
Unión patín–cabeza	Soldada; suprime el grado de libertad longitudinal	Retirar soldadura y restituir la función deslizante	Desplazamiento libre verificado en frío y caliente
Fricción	Carga lateral referencial de 1,71 kN del caso deslizante adoptado	Superficie deslizante en buen estado	Desplazamiento sin trabamiento
Pendiente	Posible alteración local	Levantar cotas antes y después	Escurrimiento hacia el drenaje definido
Función	No confirmada en la condición instalada	Revisar puntos fijos y guías	Clasificación documentada en plano

El cierre de la intervención térmica se verifica contra la línea base levantada. La Tabla G.15 fija la meta y el método de comprobación de cada indicador.

Tabla G.15. Indicadores de cierre para aislación y mantos térmicos.

Indicador	Línea base	Meta	Método
Longitud intervenida	62,8 m	100 % del alcance aprobado	Inspección dimensional
Válvulas protegidas	14 expuestas	14 con manto correctamente instalado	Registro por TAG
Pérdida térmica estimada	236,64 kW	$\approx$ 15,68 kW residual	Modelo actualizado
Superficies calientes	Puntos expuestos	Sin discontinuidades relevantes	Termografía comparable
Mantenibilidad	Válvulas descubiertas	Acceso conservado	Prueba de retiro/reinstalación

La aceptación del sistema de atemperación exige comprobar tanto la señal de caudal como la geometría de mezcla. La Tabla G.16 indica qué se verifica, con qué evidencia y qué hacer si el criterio no se cumple.

Tabla G.16. Pruebas de aceptación del sistema de atemperación.

Variable	Criterio	Evidencia	Acción si no cumple
Caudal de inyección	Coherente con EES y rango del equipo	Tendencia calibrada	Revisar escala, válvula y boquilla
Temperatura de salida	Estable en torno al setpoint	Registro sincronizado	Ajustar control y ubicación
Distancia de mezcla	Cumplimiento garantizado por proveedor	Hoja de selección	Reubicar o cambiar tecnología
Primer codo	Sin evidencia de impacto o acumulación	Termografía e inspección	Revisar atomización y drenaje
Sensor	Ubicado después de mezcla completa	Plano conforme a obra	Reubicar punto de medición

En AK1, la aceptación se apoya en que ninguna descarga mantenga una firma térmica

compatible con paso permanente de vapor. La Tabla G.17 resume los criterios y los métodos asociados.

Tabla G.17. Criterios de aceptación posterior en AK1.

Verificación	Meta	Método	Registro
Aireadores eliminados	Sin temperatura compatible con paso permanente	Termografía	Antes y después
Trampas nuevas	Descarga de condensado sin soplado continuo	Ultrasonido + temperatura	Por TAG
Válvulas check	Sin retorno hacia ramales	Prueba funcional	Protocolo
Línea aérea	Sin fugas, acumulación ni vibración	Inspección en operación	Lista de chequeo
Descarga total	Caudal y fase caracterizados	Medición temporal	kg/h y condición operacional

La selección de cada trampa de reemplazo requiere datos que no siempre están disponibles en terreno. La Tabla G.18 establece el mínimo exigible por punto antes de emitir la orden de compra.

Tabla G.18. Requisitos mínimos de selección por punto.

Dato	Uso	Condición de cierre
Presión aguas arriba y abajo	Determinar diferencial disponible	Medición en régimen
Carga normal y de arranque	Dimensionar capacidad	Memoria por TAG
Tipo de servicio	Elegir principio de operación	Línea, equipo o separador identificado
Descarga y contrapresión	Evitar bloqueo o retorno	Ruta inspeccionada
Accesibilidad	Permitir ultrasonido y mantenimiento	Punto visible y etiquetado

La aceptación del separador de gotas combina verificación mecánica, funcional y documental. La Tabla G.19 reúne los criterios propuestos.

Tabla G.19. Criterios de aceptación del separador de gotas.

Verificación	Criterio	Evidencia
Integridad mecánica	Clase, soportes y conexiones aprobados	Dossier de montaje
Trampa de drenaje	Descarga de condensado sin vapor continuo	Ultrasonido y temperatura
Contrapresión	Compatible con capacidad de la trampa	Presión aguas abajo
Captura	Caudal de condensado medido	Balance temporal
AK1	Menor evidencia de arrastre o drenaje anómalo	Tendencias e inspección
Documentación	Equipo y TAG incorporados	P&ID emitido

G.10 Cotizaciones de respaldo documental

Las siguientes cotizaciones respaldan los valores de inversión utilizados en el Capítulo 3 y en las tablas precedentes. Se conservan en su moneda, fecha, alcance e impuestos originales; por ello, deben actualizarse antes de emitir una orden de compra o aprobar una inversión definitiva.



Figura G.1. Extracto de cotización del proyecto AK1. Se utiliza el total confirmado de 18.520.950 CLP, con IVA incluido, sin adicionar nuevamente componentes ni importes intermedios. Fuente: Servicios de Mantención Industrial Guerra e Hijo Ltda. (2026).



Presente **CMPC MADERAS SPA**
RUT: 95.304.000-K
Dirección: AV. JORGE ALESSANDRI S/N
Comuna: Collipulli

Atención: **Marcelo Arroyo**
Sector: SUPERVISOR DE CONFIABILIDAD
Fono: +56959279198
E-mail: marcelo.arroyo@cmpc.com

Ref.SxS.: QT-5606.2602.0603-Rev.00
Proyecto: Cotizacion presupuestaria Separador de gotas para secador AK1

cmpc

spirax sarco
First for Steam Solutions

Spirax-Sarco Chile Limitada

Las Garzas #930 Edificio D
Quilicura | Santiago | Chile
+56 2 2616 2550
ventas@cl.spiraxsarco.com
www.spiraxsarco.com/global/cl
RUT: 76.233.013-K

NATURAL TECHNOLOGY

Spirax Group Steam Thermal Solutions

ITEM	TAG / HOJA DE DATOS	IMAGEN REFERENCIA	CANT	CODIGO	DESCRIPCION COMPLETA	DESCRIPCION CORTA	PRECIO UNITARIO SIN IVA	PRECIO TOTAL SIN IVA	PLAZO DE ENTREGA FOB SANTIAGO
006	-		1	-	Separador de Humedad Vertical tipo deflectores de alta expansion y eficiencia, cuerpo en ASTM A-285 Grade C, Aplicacion vapor alta presion, conexión flangeada acuerdo al ASME B.16.5 600#RF, NPS 10" CONSIDERA LOS ACCESORIOS PARA EL DRENAJE DE CONDENSADO TRAMPA FT44-32 TV 1.1/2" #300 WCB FILTRO FIG 34 1.1/2" #300 WCB 0.8 MM VALVULAS DE GLOBOO A3S 1.1/2" SW #800 VALVULA RETENCION DCV4 1.1/2" #300	SEPARADOR DE HUMEDAD SPV 10" # 600	USD 70,000.00	USD 70,000.00	POR DEFINIR
		TOTAL ITEMS	1						

NOTAS:

TOTAL DE LA PROPUESTA	
TOTAL SIN IVA	USD 70,000.00
VALOR DE IVA (19%)	USD 13,300.00
TOTAL FINAL CON IVA	USD 83,300.00

Figura G.2. Cotización del separador de gotas Línea 2/AK1, QT-5606.2602.0603-Rev.00. Fuente: Spirax Sarco Chile.



Presente **CMPC MADERAS SPA**
RUT: 95.304.000-K
Dirección: AV. JORGE ALESSANDRI S/N
Comuna: Collipulli

Atención: **FABIAN DE LA HOZ**
Sector: ABASTECIMIENTO
Fono:
E-mail: fdelahoz.brayben@cmpc.cl.

Ref.SxS.: QT-5606.2602.9213-Rev.00
Proyecto: SP 19355675

cmpc

spirax sarco
First for Steam Solutions

Spirax-Sarco Chile Limitada

Las Garzas #930 Edificio D
Quilicura | Santiago | Chile
+56 2 2616 2550
ventas@cl.spiraxsarco.com
www.spiraxsarco.com/global/cl
RUT: 76.233.013-K

NATURAL TECHNOLOGY

Spirax Group Steam Thermal Solutions

ITEM	TAG / HOJA DE DATOS	IMAGEN REFERENCIA	CANT	CODIGO	DESCRIPCION COMPLETA	DESCRIPCION CORTA	PRECIO UNITARIO SIN IVA	PRECIO TOTAL SIN IVA	PLAZO DE ENTREGA FOB SANTIAGO
001	SAP 80000572		10	30686797	Trampa termodinámica de alta eficiencia, para líneas de vapor saturado y sobrecalentado de altas presiones, fabricada en acuerdo European Pressure Equipment Directive 97/23/EC., disponible certificación EN 10204 3.1, cuerpo y tapa en ASTM A 217 WC6, internos reparables en Chromium-steel, con elemento filtrante en AISI316L, con tapa de aislación térmica anti intemperies, clase de presión ASME 600, presión máxima de operación 62 bar g @ 482°C, Temperatura máxima de operación 525°C @ 42.7 bar g (P&T limitados al rating del flange), conexión flangeada integral al cuerpo acuerdo al ASME B.16.5 300#RF.. Modelo TD62M 1" 300# RF 3.1 CERT Trampa Termodinámica. Fabricación Spirax-Sarco. Origen Inglaterra.	TD62M 1" 300#RF	CLP 2.209.743	CLP 22.097.430	6-8 SEMANAS
		TOTAL ITEMS	10						

NOTAS:

TOTAL DE LA PROPUESTA	
TOTAL SIN IVA	CLP 22.097.430
VALOR DE IVA (19%)	CLP 4.198.512
TOTAL FINAL CON IVA	CLP 26.295.942

Figura G.3. Cotización de diez trampas termodinámicas TD62M, QT-5606.2602.9213-Rev.00. Fuente: Spirax Sarco Chile.



Presente **CMPC MADERAS SPA**
RUT: 95.304.000-K
Dirección: AV. JORGE ALESSANDRI S/N
Comuna: Collipulli

Atención: **FABIAN DE LA HOZ**
Sector: ABASTECIMIENTO
Fono:
E-mail: fdelahoz.accenture@cmpc.com

Ref.SxS.: QT-5606.2603.2701-Rev.00
Proyecto: Solicitud de cotización 19478457

cmpc

spirax sarco
First for Steam Solutions

Spirax-Sarco Chile Limitada

Las Garzas #930 Edificio D
Quilicura | Santiago | Chile
+56 2 2616 2550
ventas@cl.spiraxsarco.com
www.spiraxsarco.com/global/cl
RUT: 76.233.013-K

Potente y sostenible
NATURAL TECHNOLOGY

Spirax Group Steam Thermal Solutions

ITEM	TAG / HOJA DE DATOS	IMAGEN REFERENCIA	CANT	CODIGO	DESCRIPCION COMPLETA	DESCRIPCION CORTA	PRECIO UNITARIO SIN IVA	PRECIO TOTAL SIN IVA	PLAZO DE ENTREGA FOB SANTIAGO
001	74012051		1	30837497	Purgador tipo boya de alta eficiencia con mecanismo anti-vibración, con eliminador termostático de aire incorporado tipo bimetalico alta temperatura, en acuerdo con European Pressure Equipment Directive (PED), cuerpo y tapa en acero carbono ASTM A 216 WCB, internos en acero inoxidable endurecido, PMO=32 barg @ 239 °C, TMO = 285 °C @ 28.5 barg, conexión horizontal flange ASME B.16.5 Class 300, con orificio para operar con máxima presión diferencial de 32 barg de vapor saturado. Nota: las capacidades de descarga (acuerdo a las respectivas fichas técnicas) están basadas en la descarga continua de condensado a la temperatura de saturación; por esta razón, son consideradas trampas de capacidad plena o total. Modelo: FT44-32 TV 2" ANSI 300 WCB TRAMPA FLOTADORA Fabricación Spirax-Sarco. Origen Inglaterra / Brasil.	FT44-32 TV 2" ANSI 300 WCB TRAMPA FLOTADORA	USD 2.785,51	USD 2.785,51	6 - 8 Semanas
		TOTAL ITEMS	1						

NOTAS:

TOTAL DE LA PROPUESTA	
TOTAL SIN IVA	USD 2.785,51
VALOR DE IVA (19%)	USD 529,25
TOTAL FINAL CON IVA	USD 3.314,76

Figura G.4. Cotización de la trampa de flotador y termostática FT44-32 TV, QT-5606.2603.2701-Rev.00. Fuente: Spirax Sarco Chile.

cmpc

FORMULARIO UNICO DE COTIZACIÓN

-

Total páginas incluyendo esta	

RAZÓN SOCIAL DE LA EMPRESA CONTRATISTA :			RUT	SP N°		N° Cotización
Emyserv Ltda.			76.604.734-3			
Peticionario						
DESCRIPCIÓN DELTRABAJO : Asilación térmica area macerado						
38m cañeria de 12", 28m caleria de 10", 38mx2 cañerias de 8"						
Se considera lana de 50mm con malla						
turno de 08 a 20hrs. Andamios suministrados por planta						
RESUMEN DE LOS MATERIALES,MANO DE OBRA, EQ. Y SERVICIOS Y G.G. Y UTILIDAD						
MANO OBRA $	MATERIAL $	EQ. Y SERV: $	GASTOS GEN. $	UTILIDADES $	TOTAL $	Validez de la Oferta	Plazo de Ejecución
5.376.000	5.570.000	3.352.400	1.694.000	2.398.860	**18.391.260**	15 dias	04 dias

Figura G.5. Cotización del servicio de aislación térmica. Fuente: Emyserv Ltda.

Anexo H Sensibilidad de la descarga a la fase y a la referencia energética

Este anexo contrasta dos estados de entrada idealizados: vapor seco saturado y líquido saturado que experimenta evaporación durante la expansión. La observación visual y termográfica no permite seleccionar entre ellos. Ambos mantienen las mismas presiones, cantidades de puntos, diámetro efectivo y $C_d = 0{,}62$; la comparación no se suma al potencial del cuerpo principal.

H.1 Modelo y propiedades

Para vapor seco se conserva el orificio compresible con $k = 1{,}3$ y $R = 461{,}5$ J/(kg K). Para líquido saturado se resuelve directamente el modelo homogéneo de equilibrio (HEM), en lugar de transcribir una correlación polinómica del parámetro omega sin verificar sus coeficientes. El enfoque supone expansión adiabática, velocidades iguales de las fases y equilibrio local; corresponde a una idealización de descarga crítica (Leung, 1986), no al dimensionamiento certificado de un dispositivo de alivio, que exige el procedimiento normalizado de API Standard 520 (American Petroleum Institute, 2020).

$$G_{\text{seco}} = P_0 \sqrt{\frac{k}{RT_0}} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/[2(k-1)]}, \tag{H.1}$$

$$G_{\text{HEM}}(P) = \frac{\sqrt{2\,[h_0 - h(P, s_0)]}}{v(P, s_0)}, \qquad G_c = \max_{P_2 \le P < P_0} G_{\text{HEM}}(P), \tag{H.2}$$

$$\dot{m} = C_d\, G_c\, \frac{\pi d_{\text{eff}}^2}{4}. \tag{H.3}$$

En estas ecuaciones las entalpías están en J/kg y las presiones en Pa. El algoritmo utiliza IAPWS-IF97 con entalpías en kJ/kg, multiplicando la diferencia por 1.000 antes de calcular la velocidad. Se maximiza el flujo en una expansión isentrópica hasta $P_2 = 1{,}013$ bar(a), verificando el máximo con un barrido de presión. La formulación termodinámica de agua y vapor se conserva como referencia primaria (IAPWS, 2012).

H.2 Datos de entrada

Se evalúa saturación a la presión de cada sector; no se mezclan propiedades de una temperatura redondeada con una presión independiente. Las cuatro filas corresponden a las secciones 1, 2 y 3 de AK1 y a la línea directa, con cantidades 1, 2, 3 y 1, respectivamente. Las cinco trampas se representan con la última condición. Las entalpías de la tabla están en kJ/kg y los flujos másicos superficiales en kg/(m² s).

Tabla H.1. Propiedades de entrada y flujo crítico para los dos estados idealizados.

P_0 [bar(a)]	T_{sat} [°C]	h_f	h_g	h_{fg}	P_c/P_0	G_{HEM}	G_{seco}
15,36	199,42	849,79	2.791,71	1.941,92	0,8723	8.931,3	2.194,7
14,97	198,20	844,29	2.790,95	1.946,66	0,8734	8.759,8	2.141,7
13,77	194,27	826,67	2.788,37	1.961,70	0,8772	8.223,8	1.978,3
23,21	220,04	943,82	2.801,06	1.857,24	0,8525	12.143,3	3.246,2

H.3 Convención energética común

El estado de referencia es líquido saturado a 1,013 bar(a), $h_{\text{ref}} = 418{,}96$ kJ/kg. Para cada punto se calcula:

$$\dot{Q} = \frac{\dot{m}_{\text{kg/h}}(h_0 - h_{\text{ref}})}{3600}, \quad \dot{m}_{\text{eq}} = \frac{3600\dot{Q}}{1831}, \quad m_{\text{eq,anual}} = 8{,}4\dot{m}_{\text{eq}}. \tag{H.4}$$

La potencia queda en kW, el equivalente horario en kg/h y el anual en t/año. La valorización usa 10,69 USD/t equivalente y 8.400 h/año. Para vapor se toma $h_0 = h_g(P_0)$; para líquido, $h_0 = h_f(P_0)$. Así se comparan ambas fases con el mismo cero energético, sin confundir caudal hidráulico con vapor equivalente.

Tabla H.2. Comparación de fase con referencia energética común.

Sistema	Estado inicial	kg/h	kW	kg/h eq.	t/año eq.	USD/año eq.
AK1	Vapor seco	247,1	162,9	320,2	2.689,8	28.754
AK1	Líquido saturado / HEM	998,1	121,5	239,0	2.007,2	21.457
Trampas	Vapor seco	113,8	75,3	148,1	1.243,8	13.296
Trampas	Líquido saturado / HEM	425,7	62,1	122,0	1.025,1	10.959

El cuerpo principal valoriza masa de vapor seco a la tarifa de suministro; este anexo valoriza energía respecto del líquido de referencia mediante el calor latente convencional. Son preguntas distintas y sus resultados no deben sustituirse ni sumarse. La cercanía entre algunos montos no valida el estado de fase adoptado. La suma de corrientes se realiza antes del redondeo.

H.4 Sensibilidad e interpretación

Tabla H.3. Sensibilidad al diámetro con la misma referencia energética.

Sistema	d [mm]	Seco [kg/h]	Seco [t/año eq.]	HEM [kg/h]	HEM [t/año eq.]
AK1	1	27,5	298,9	110,9	223,0
AK1	2	109,8	1.195,5	443,6	892,1
AK1	3	247,1	2.689,8	998,1	2.007,2
AK1	5	686,3	7.471,7	2.772,6	5.575,6
Trampas	1	28,5	310,9	106,4	256,3
Trampas	2	113,8	1.243,8	425,7	1.025,1
Trampas	3	256,1	2.798,5	957,9	2.306,6
Trampas	5	711,3	7.773,6	2.660,9	6.407,1

En los casos calculados, HEM entrega mayor caudal hidráulico y menor potencia que el modelo de vapor seco con el mismo diámetro y referencia entálpica. Esto describe exclusivamente las idealizaciones tabuladas; no demuestra una cota superior universal del costo ni una fase real. El resultado continúa escalando con d_{eff}^2 y C_d, parámetros no medidos.

La hipótesis HEM puede no representar un orificio con evaporación retardada, deslizamiento, subenfriamiento, fricción o geometría compleja. Tampoco acredita contrapresión atmosférica en las cinco trampas. Se debe verificar por TAG el destino, la presión aguas abajo, la fase y el caudal antes de reconocer beneficios o dimensionar retornos. Para vapor seco, el flujo es crítico si $P_2/P_0 \leq 0{,}546$; a 23,21 bar(a), $P_2 \leq 12{,}67$ bar(a).

Anexo I Frontera de medición y alcance del balance de masa

Este anexo delimita qué puede y qué no puede concluirse a partir de la diferencia registrada entre los totalizadores de CELPAC y Plywood. El análisis es de volumen de control: establece dónde se ubica cada medición respecto de las pérdidas cuantificadas y, en consecuencia, qué fenómenos pueden explicar esa diferencia. El resultado acota el alcance del balance de masa disponible y justifica por qué la memoria no utiliza esa diferencia para validar los escenarios paramétricos.

I.1 Definición del volumen de control

La Sección 3.10 registra 319.493,1 t medidas en CELPAC y 312.811,5 t medidas en Plywood durante el mismo periodo de 181 días, con una diferencia de 6.681,6 t equivalente al 2,09 %. Expresada como caudal medio sobre las 4.344 h del periodo, la diferencia corresponde a 1.538 kg/h frente a una lectura media de 72.010 kg/h en Plywood.

La ubicación relativa de ambos instrumentos determina qué puede explicar esa diferencia. El medidor de CELPAC registra el vapor entregado en origen y el de Plywood lo registra al ingreso a la planta. Entre ambos existe un tramo de conducción de aproximadamente 300 m que, conforme a la Sección 2.3, queda fuera del levantamiento de esta memoria.

CELPAC $\longrightarrow$ [medidor CELPAC] $\longrightarrow$ tramo externo ($\approx$300 m) $\longrightarrow$ [medidor Plywood] $\longrightarrow$ red interna evaluada

Una diferencia de masa real debe explicarse dentro del volumen de control entre ambos medidores; la diferencia entre sus lecturas también puede contener errores instrumentales, efectos de fase y desfases de totalización.

I.2 Por qué las pérdidas cuantificadas no explican la diferencia

Las pérdidas evaluadas en el Capítulo 3 se ubican todas aguas abajo del medidor de Plywood: las pérdidas térmicas corresponden a la red interna, y las descargas de AK1 y de las trampas abiertas pertenecen a equipos y ramales internos. Su masa ya fue contabilizada por el medidor de Plywood antes de perderse. En consecuencia, no pueden contribuir a la diferencia entre totalizadores, cualquiera sea su magnitud.

Existe además una segunda razón, de naturaleza dimensional. Los 236,64 kW de pérdidas térmicas equivalen convencionalmente a 465,3 kg/h al dividir por el calor latente de referencia, pero incluyen 56,21 kW asociados a líneas de condensado. Los 180,43 kW restantes corresponden a líneas de vapor y representan 354,7 kg/h equivalentes, no una medición de líquido generado: parte de la energía puede proceder del desobrecalentamiento y las propiedades locales varían. El enfriamiento de condensado ya líquido tampoco genera esa masa adicional. Por tanto, ninguna de estas equivalencias energéticas debe incorporarse como masa extraída en un balance entre caudalímetros.

Los escenarios de AK1 y de trampas con paso interno suman 361,0 kg/h, equivalentes al 0,50 % de la lectura media de Plywood. Esta suma es paramétrica, no un caudal medido. En las trampas, el destino de cada descarga y la recuperación efectiva deben verificarse por TAG: el paso de vapor a un retorno cerrado no equivale automáticamente a una descarga atmosférica. En cualquier caso, estos equipos se encuentran aguas abajo del medidor de Plywood y no explican la diferencia entre totalizadores.

Tabla I.1. Ubicación de cada pérdida respecto de la frontera de medición.

Pérdida	Magnitud	Posición	Efecto sobre la diferencia
Pérdidas térmicas	465,3 kg/h equivalentes	Red interna	Ninguno: es equivalencia energética, no masa extraída
Aireadores AK1	247,0 kg/h	Red interna	Ninguno: aguas abajo del medidor
Trampas abiertas	114,0 kg/h	Red interna	Ninguno: aguas abajo del medidor
Tramo externo	No levantado	Entre medidores	Drenajes, derivaciones y acumulación por verificar
Discrepancia instrumental	No conciliada	Ambos medidores	Origen alternativo posible

I.3 Interpretación admisible

La diferencia de 1.538 kg/h requiere conciliar las salidas de masa, la variación del inventario y las mediciones del tramo externo. Para un intervalo común y sin otras entradas, el balance integrado es:

$$M_{C,\mathrm{lec}} - M_{P,\mathrm{lec}} = M_{\mathrm{salidas,ext}} + \Delta M_{\mathrm{ext}} + (\varepsilon_C - \varepsilon_P). \tag{I.1}$$

Aquí, $M_{\mathrm{salidas,ext}}$ incluye drenajes, fugas y derivaciones entre medidores; ΔM_{ext} representa el cambio de inventario y ε agrupa errores de medición y totalización. Si existieran otras entradas, deberían añadirse al balance con el signo correspondiente. Un cambio de fase no destruye masa, pero puede alterar la respuesta de un medidor que no mida correctamente flujo bifásico. Los datos disponibles no permiten separar estas contribuciones ni validar los diámetros efectivos adoptados para AK1 y las trampas.

Por esta razón, la Sección 3.10 trata la diferencia como una brecha de medición pendiente de conciliación y no la incorpora a la suma de pérdidas energéticas. Los escenarios paramétricos de 3 mm y 2 mm se sustentan exclusivamente en el modelo de descarga y en su análisis de sensibilidad, y su verificación requiere medición directa de la descarga, no un balance de frontera.

La razón de 0,50 % solo describe el tamaño de los escenarios respecto del suministro registrado. No demuestra que los caudales adoptados sean representativos, no acredita una pérdida atmosférica neta y no sustituye su medición independiente.

I.4 Condiciones para un balance de masa completo

Cerrar un balance de masa verificable sobre el sistema exigiría instrumentación y campañas que no formaron parte de esta memoria: conciliación previa de ambos totalizadores en calibración, alcance, unidades, criterios de totalización y sincronización horaria; medición del condensado efectivamente retornado a CELPAC; medición o aforo de las descargas a la atmósfera en AK1 y en las estaciones de trampeo; y levantamiento del tramo externo con el mismo detalle aplicado a la red interna. Mientras esas condiciones no se cumplan, el balance disponible permite delimitar el problema, pero no cuantificarlo.

Anexo J Carga térmica transitoria de un tramo representativo

El calentamiento inicial de una tubería demanda energía adicional a sus pérdidas estacionarias. Este anexo estima la masa de vapor que condensaría para calentar el metal de un tramo idealizado, sin afirmar que ese caudal haya sido medido durante los eventos de terreno. Las cargas de arranque y régimen deben evaluarse por separado al seleccionar drenajes (Spirax Sarco, s. f.-b).

J.1 Balance y supuestos

$$m_{\text{cond}} = \frac{m_{\text{tubo}} c_p (T_f - T_i)}{h_{fg}}, \qquad \overline{\dot{m}}_{\text{cond}} = \frac{m_{\text{cond}}}{t_{\text{cal}}}, \qquad m'_{\text{tubo}} = \pi (D_e - e) e \rho_{\text{acero}}. \tag{J.1}$$

Se adoptan $c_p = 0{,}49$ kJ/(kg K), $\rho_{\text{acero}} = 7.850$ kg/m^3, $T_i = 12{,}8$ °C y $T_f = 220$ °C. La condición inicial supone metal a la referencia ambiental anual adoptada; no es una temperatura de arranque medida ni la de montaje del análisis de expansión. El calor latente de saturación a 23,21 bar(a), calculado con IAPWS-IF97, es 1.857,24 kJ/kg. Este valor físico local se distingue de los 1.831 kJ/kg utilizados como convención económica de vapor equivalente.

Se mantienen masas de referencia por diámetro para *Schedule* 40. El *Schedule* no se deduce de la presión de servicio y debe confirmarse con isométricos y especificaciones. El tiempo es un parámetro de calentamiento, no una base anual alternativa a las 8.400 h/año.

J.2 Resultados por diámetro

Tabla J.1. Condensado teórico por 100 m, geometría de referencia *Schedule* 40.

NPS	kg metal/m	kg condensado/100 m	60 min [kg/h]	30 min [kg/h]	15 min [kg/h]
1 1/2	4,05	22,1	22	44	89
2	5,44	29,7	30	59	119
4	16,07	87,8	88	176	351
6	28,26	154,5	154	309	618
8	42,55	232,6	233	465	930
10	60,31	329,7	330	659	1.319
12	79,73	435,9	436	872	1.743
16	123,30	674,0	674	1.348	2.696

Los valores corresponden a 100 m de tubo y se escalan por longitud, masa de pared y tiempo de calentamiento. No reemplazan el inventario completo: el levantamiento térmico de 62,8 m cubre superficies deficientes, no toda la red. Accesorios, válvulas y aislación deben incorporarse para calcular una estación concreta.

J.3 Aplicación ilustrativa

Para NPS 12 *Schedule* 80 se conserva la masa metálica estimada de 66.040 kg en 500 m, coherente en orden de magnitud con el área de pared del análisis mecánico. El balance entrega 3.610 kg de condensado para el calentamiento completo del metal. Los 500 m constituyen una longitud representativa; no equivalen a los aproximadamente 300 m entre medidores ni acreditan que toda esa carga llegue a una sola trampa. No se divide este resultado por la

Tabla J.2. Caudal medio de calentamiento del tramo representativo de 500 m, NPS 12 *Schedule* 80.

Tiempo [min]	Masa condensada [kg]	Caudal medio [kg/h]
15	3.610	14.441
30	3.610	7.220
60	3.610	3.610
120	3.610	1.805

condensación estacionaria del inventario parcial de superficies expuestas: ambas magnitudes tienen fronteras diferentes. Por ello no se extrapola una razón de incremento a toda la planta. Variar c_p entre 0,46 y 0,52 kJ/(kg K) cambia la masa estimada aproximadamente entre 3.389 y 3.831 kg; el caudal medio, además, es inversamente proporcional al tiempo de calentamiento.

J.4 Aplicación al drenaje y limitaciones

Cada estación debe dimensionarse con su longitud tributaria, presión diferencial mínima durante el arranque, contrapresión, tiempo de calentamiento y capacidad certificada de la trampa. El balance ilustra por qué no basta con la carga estacionaria, pero no determina la capacidad de las estaciones inspeccionadas ni demuestra la causa de su inundación.

Se omiten energía de accesorios, pérdidas al ambiente, calentamiento de aislación y condiciones iniciales no uniformes. Estas omisiones y el uso de un calor latente constante impiden tratar el resultado como límite universal o caudal instantáneo. El balance estima el promedio de vapor condensado para cubrir la energía del metal; no afirma que todo el vapor admitido condense durante el transitorio. Una prueba de arranque instrumentada permitiría verificar el frente térmico, el líquido evacuado y la distribución entre drenajes.

Anexo K Estimación idealizada de sobrepresión por movimiento de condensado

La acumulación y el arrastre de condensado constituyen mecanismos de riesgo en una red de vapor. El cálculo siguiente estima órdenes de magnitud bajo una detención idealizada del líquido; no reconstruye la presión real de los eventos observados ni atribuye las fallas de radiadores exclusivamente a golpe de ariete.

K.1 Modelo y parámetros

Para una columna líquida homogénea en un conducto elástico se adopta:

$$a = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + K D_i/(Ee)}}, \qquad \Delta p = \rho a \Delta v. \tag{K.1}$$

Se usan $K = 0{,}90$ GPa, $\rho = 840$ kg/m^3 y $E = 185$ GPa como propiedades aproximadas para el análisis de sensibilidad alrededor de 220 °C. D_i es diámetro interior y e espesor de pared. La velocidad en el líquido sin deformación del tubo sería aproximadamente 1.035 m/s. El modelo no representa por sí solo una mezcla con bolsas de vapor, evaporación o condensación rápida.

Tabla K.1. Geometrías *Schedule* 40 y velocidades de referencia.

NPS	D_i [m]	e [mm]	a [m/s]	Vapor [m/s]
6	0,1541	7,11	984	47,1
8	0,2027	8,18	978	27,2
10	0,2546	9,27	972	17,3
12	0,3033	10,31	968	12,2

Las velocidades de vapor se obtienen con 36.510 kg/h y $v = 0{,}0866$ m^3/kg, aplicados separadamente a cada diámetro. No son mediciones simultáneas de todos esos tramos, no certifican el *Schedule* instalado y no establecen una cota de velocidad del líquido durante un evento transitorio.

K.2 Sensibilidad a la variación de velocidad

Tabla K.2. Incremento ideal de presión con $a = 968$ m/s y $\rho = 840$ kg/m^3.

Δv [m/s]	Δp [bar]	$p_0 + \Delta p$ [bar(a)]	Alcance
2	16,3	39,5	Variación de velocidad supuesta.
5	40,7	63,9	Variación de velocidad supuesta.
10	81,3	104,5	Variación de velocidad supuesta.
15	122,0	145,2	Variación de velocidad supuesta.
20	162,6	185,8	Extremo del intervalo explorado; no límite físico.

La presión inicial se adopta en 23,21 bar(a). Δp es un incremento, no la presión total; por ello se presenta también la suma ideal con p_0. Los cambios de velocidad de 2–20 m/s son parámetros de sensibilidad y no categorías de severidad acreditadas por el levantamiento.

K.3 Interpretación y límites

El resultado muestra que una detención rápida de líquido, bajo las hipótesis adoptadas, puede producir incrementos comparables o superiores a la presión de servicio. Justifica evaluar drenaje, pendientes y procedimientos de puesta en servicio junto con el riesgo mecánico. No permite comparar directamente con una capacidad resistente de radiadores sin conocer diseño, espesor remanente, material, defectos y respuesta dinámica.

Aunque la expresión simplificada no contenga explícitamente el volumen del tapón, no se concluye que el daño sea independiente de su longitud o masa. La longitud modifica duración del pulso, condiciones de reflexión y aplicabilidad de la aproximación; la detención debe ser rápida respecto de la escala $2L/a$. El gas atrapado, el intercambio de fase, la flexibilidad y las reflexiones pueden alterar el transitorio, sin que esta ecuación constituya una cota superior universal para todos los mecanismos de golpe de ariete.

La verificación de un evento requiere geometría real, estado inicial, ubicación y cantidad de condensado, velocidades y registro de presión de alta frecuencia. También debe distinguir impacto de líquido del colapso de bolsas de vapor, fenómeno que no se resuelve aquí. El Anexo J ilustra una demanda de calentamiento, pero no prueba que ambos cálculos reconstruyan fases sucesivas de un mismo evento observado. Se conserva la evidencia fotográfica de daños en el Anexo N sin atribución causal exclusiva.

Anexo L Participación en el programa de certificación DS 10

Este anexo documenta la participación del autor en el programa de certificación normativa del sistema de vapor de Planta Plywood, desarrollado en paralelo con esta memoria. Su inclusión responde a dos motivos: dejar constancia del origen de parte de la información de instrumentación utilizada en el Capítulo 3 y delimitar con precisión qué actividades corresponden a gestión operacional de planta y cuáles constituyen el desarrollo técnico propio de la memoria.

L.1 Contexto normativo

El Decreto Supremo N.º 10 de 2012 del Ministerio de Salud regula las condiciones de seguridad de calderas, autoclaves, equipos que utilizan vapor y redes de distribución, dentro de su ámbito de aplicación. Su cumplimiento no se acredita únicamente con una prueba hidrostática: requiere las revisiones, pruebas y documentación que correspondan, bajo intervención del profesional facultado y de la autoridad sanitaria (Ministerio de Salud, 2012, arts. 1 y 73–76). Este anexo describe el programa de planta y no certifica conformidad normativa.

El alcance del programa dentro de la planta abarca cinco frentes: equipos que utilizan vapor (secadores, prensas, intercambiadores y cuerpos de presión), la red de vapor y condensado (líneas, soportes, aislación, sentido de flujo y purgas), la instrumentación (manómetros, sensores de temperatura y disposición en terreno), los dispositivos de seguridad (válvulas de seguridad, accesibilidad, sellos y certificados) y las pruebas con su respaldo documental.

Varios hallazgos del Capítulo 3 —aislación deficiente, soportes deformados, trampas fuera de servicio y brechas de trazabilidad— también se incorporaron al programa de planta. Su clasificación normativa específica debe verificarse frente al requisito aplicable, sin equiparar automáticamente toda oportunidad de eficiencia con un incumplimiento del DS 10.

L.2 Rol desempeñado

El autor tuvo a su cargo el control de avance del programa de certificación. Las funciones ejercidas fueron las siguientes:

- Estructuración del plan de acción DS 10 y consolidación de las actividades en un cronograma único.
- Seguimiento del avance por área y actualización periódica del estado consolidado.
- Designación de responsables y asignación de tareas por área.
- Identificación y priorización de brechas críticas, distinguiendo las que condicionan la liberación de la prueba hidrostática.
- Análisis de alternativas de regularización y elaboración de antecedentes técnicos de respaldo.
- Conducción de reuniones de seguimiento por área y alineamiento sobre la ruta hacia la certificación.
- Preparación de los informes de estado de avance presentados a la organización.

L.3 Estado consolidado del programa

Tabla L.1. Estado consolidado del programa DS 10 al cierre del seguimiento documentado.

Frente	Avance	Estado	Condición
Levantamiento general	65 %	Parcial	Manómetros avanzados; temperatura y válvulas de seguridad en inicio
Documentación y P&ID	40 %	En curso	Avance relevante; falta cierre As-Built y respaldos
Regularización en terreno	20 %	Pendiente	Aislación, soportes, placas y purgas aún condicionan
Pruebas de certificación	0 %	Pendiente	Condicionadas al cierre de las anteriores

De 41 actividades consolidadas, 10 estaban realizadas, 7 en curso y 24 pendientes: las terminadas representan 24,4 % del conteo. El seguimiento informó un avance ponderado de 33 %; este indicador requiere conservar sus ponderaciones y no equivale al porcentaje de actividades concluidas. Las 27 actividades identificadas como condicionantes de la prueba hidrostática se utilizaron para ordenar la ejecución; ningún porcentaje sustituye su cierre técnico.

L.4 Aporte al levantamiento de instrumentación

El frente de instrumentación es el que presenta una relación directa con la Sección 3.9 de esta memoria. Las actividades ejecutadas incluyeron el mapeo de manómetros en prensas, estanques y secadores, el cruce entre la disposición en terreno y los P&ID vigentes, la incorporación de los puntos faltantes al plano y la asignación de identificadores.

Tabla L.2. Puntos de instrumentación regularizados en ingeniería base.

Acción	Cantidad	Efecto
Manómetros incorporados al plano	26	Puntos existentes en terreno que no estaban representados
Manómetros con TAG asignado	16	Puntos representados sin identificador trazable
Total regularizado	42	Serie aprobada por gestión documental e incorporada a los planos oficiales

Estas cifras corresponden exactamente a las 42 brechas de trazabilidad documentadas en el Capítulo 3: los 26 manómetros incorporados son los puntos levantados en terreno que no figuraban en el P&ID, y los 16 con TAG asignado son los puntos que estaban representados sin identificador trazable. El levantamiento y la regularización de ambos grupos se ejecutaron en el marco de este programa.

Corresponde precisar el estatus de este trabajo. La incorporación de puntos y la asignación de identificadores se desarrollaron como propuesta de ingeniería base de tipo *red-line*, y en esa condición completaron posteriormente la revisión de gestión documental: el rango PI-DS-2601 a PI-DS-2642 fue aprobado y los planos actualizados quedaron incorporados al repositorio oficial de la planta, según se detalla en la Sección 3.9. Las demás actualizaciones planimétricas generadas en el marco del programa conservan carácter de *red-line* mientras no completen ese mismo procedimiento de revisión, aprobación y emisión controlada por parte de CMPC.

L.5 Otras actividades ejecutadas

Además del frente de instrumentación, se ejecutaron las siguientes actividades con incidencia técnica: revisión de informes de inspección de terceros, metrado y evaluación de recuperación de inversión de la aislación térmica, elaboración de especificaciones preliminares para las placas de identificación exigidas por la normativa, inspección inicial del stock de repuestos y accesorios normativos, y entrega de información consolidada para la actualización de planos.

El metrado de aislación desarrollado en este marco es el mismo antecedente que sustenta la evaluación económica de la Sección 3.3, lo que explica la coherencia entre ambos documentos en cuanto a longitudes, diámetros y alcance de la intervención.

L.6 Brechas identificadas y secuencia propuesta

El diagnóstico del programa identificó cuatro brechas principales: instrumentación incompleta, en particular sensores de temperatura y válvulas de seguridad sin el nivel de levantamiento aplicado a manómetros; cumplimiento físico de los requisitos aplicables a manómetros, incluyendo escala, sello de agua, válvula de corte, conexión patrón y accesibilidad; integridad mecánica, que abarca soportes, aislación, purgas, trampas y espesores; y expediente documental, con placas, certificados, memorias e informes pendientes.

La secuencia de ejecución propuesta ordenó estas brechas en cuatro etapas: cierre del diagnóstico faltante, regularización en terreno, preauditoría con profesional facultado mediante una lista única de observaciones, y finalmente certificación con prueba hidrostática, regulación de válvulas y consolidación del dossier. El criterio de liberación adoptado fue no ejecutar la prueba hidrostática con observaciones abiertas.

L.7 Delimitación respecto del alcance de la memoria

La distinción entre ambos trabajos es la siguiente. El programa DS 10 es una actividad de gestión y cumplimiento normativo cuyo objetivo es habilitar la certificación del sistema; su producto es un expediente y una condición de conformidad. La memoria es un estudio de ingeniería cuyo objetivo es evaluar la eficiencia y confiabilidad del sistema; su producto es un diagnóstico cuantificado y una cartera priorizada de mejoras.

La intersección se limita al levantamiento de instrumentación y al metrado de aislación, antecedentes que se generaron en el marco del programa y se utilizan en esta memoria con la referencia correspondiente. Los modelos térmicos, los balances termodinámicos, la evaluación paramétrica de descargas, el análisis de consumo específico, la cuantificación económica y los desarrollos de los Anexos A a K corresponden íntegramente al desarrollo de la memoria y no forman parte del programa de certificación.

Anexo M Comparación operacional posterior al recambio de trampas

El recambio se ejecutó el 28 de julio de 2026. La comparación operacional y los gráficos originales fueron elaborados y validados por CMPC para el Secador 27 (Línea 1) y AK2 (Línea 2). Este anexo incorpora ese análisis interno (CMPC Planta Plywood, 2026b), organiza sus estadísticas y explicita los cambios porcentuales. El resultado principal es la menor variabilidad de presión y temperatura, que CMPC relaciona con el recambio de trampas. La síntesis numérica y el gráfico normalizado se desarrollan en esta memoria a partir de esos antecedentes.

M.1 Condiciones y estadística descriptiva

Los registros corresponden a presión, temperatura de entrada y consumo horario. La Línea 1 reúne 1.427 registros antes y 1.070 después; Línea 2, 1.229 y 1.004. Estas cifras indican cantidad de observaciones, no consumo en t/h. Los antecedentes incorporados no detallan un filtrado por receta, humedad, espesor, carga o detenciones ni un tratamiento de la autocorrelación. La comparación se presenta para las ventanas disponibles, conservando su alcance operacional.

Tabla M.1. Medias y desviaciones estándar de las ventanas disponibles. Fuente: antecedentes de CMPC Planta Plywood (2026b); organización propia.

	Antes		Después	
Variable	Media	s	Media	s
Línea 1: Secador 27				
Presión [bar]	20,311	0,797	20,362	0,0763
Temperatura [°C]	218,13	6,99	218,38	1,32
Consumo [t/h]	21,901	2,981	21,940	3,575
Línea 2: AK2				
Presión [bar]	22,258	0,534	22,425	0,153
Temperatura [°C]	224,88	1,41	224,72	0,715
Consumo [t/h]	21,078	1,374	20,944	1,629

M.2 Cambios observados

Se calcula $\Delta s = 100(s_{\text{después}}/s_{\text{antes}} - 1)$. Los valores negativos indican menor dispersión. Las diferencias de temperatura media se expresan en °C, evitando porcentajes que dependan del origen de la escala Celsius.

Tabla M.2. Cambio de dispersión y nivel medio. Fuente: cálculo propio a partir de los antecedentes de CMPC.

Variable	Δs [%]	Diferencia de media	Lectura
Presión L1	−90,4	+0,051 bar	Menor dispersión de presión.
Temperatura L1	−81,1	+0,25 °C	Menor dispersión de temperatura.
Consumo L1	+19,9	+0,039 t/h	Mayor dispersión de consumo.
Presión L2	−71,3	+0,167 bar	Menor dispersión de presión.
Temperatura L2	−49,3	−0,16 °C	Menor dispersión de temperatura.
Consumo L2	+18,6	−0,134 t/h	Mayor dispersión de consumo.

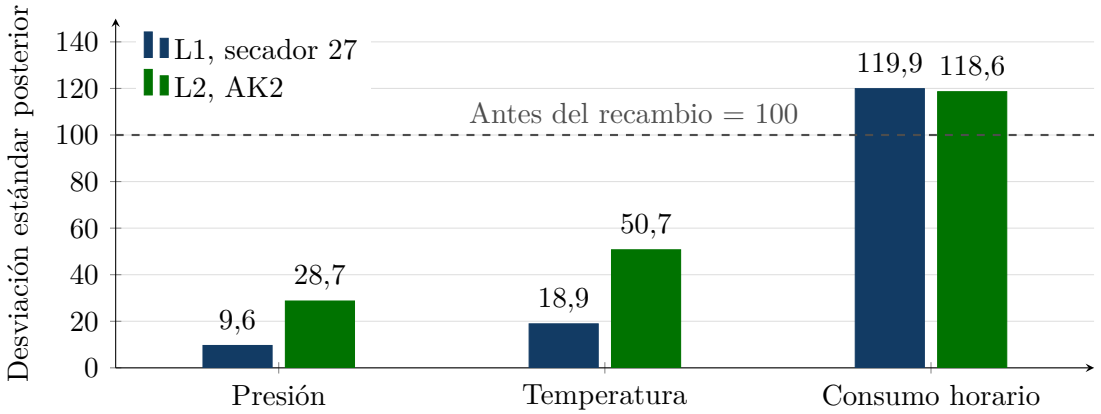


Figura M.1. Dispersión posterior normalizada a la condición anterior igual a 100. Disminuye la variabilidad de presión y temperatura y aumenta la del consumo. Fuente: elaboración propia a partir del análisis de CMPC Planta Plywood (2026b).

El consumo medio cambia de 21,901 a 21,940 t/h en L1 (+0,18 %) y de 21,078 a 20,944 t/h en L2 (−0,64 %). Son niveles medios próximos, no una prueba de equivalencia estadística. El coeficiente de variación del consumo pasa de 13,61 a 16,29 % y de 6,52 a 7,78 %, respectivamente. El aporte observado es una operación de presión y temperatura menos variable, sin un cambio amplio del consumo medio en estas ventanas. La mayor dispersión del consumo no se califica como favorable o desfavorable sin contrastarla con producción y señales de control.

M.3 Interpretación y alcance de la validación

La validación operacional de CMPC aporta evidencia de una respuesta favorable posterior a la intervención: menor variabilidad de las condiciones de suministro a los secadores. Este resultado es coherente con la función de las trampas de evacuar condensado y con el diagnóstico de drenaje de la memoria. Las excursiones remanentes se conservan en los gráficos para orientar el seguimiento; no se afirma que hayan desaparecido todos los transitorios.

La memoria no reproduce una identificación causal independiente ni pruebas t o F que supongan independencia de los registros. Cuantificar ahorro requiere ventanas productivas comparables, duración y frecuencia de muestreo documentadas y control de cambios simultáneos. Estos antecedentes no miden la calidad del vapor ni demuestran ausencia total de condensado, fatiga o golpe de ariete; la confiabilidad global se seguiría con el tiempo medio entre fallas (MTBF) y el tiempo medio de reparación (MTTR). El potencial de 957,6 t/año conserva su base paramétrica y se distingue del resultado operacional validado por CMPC.

M.4 Registro gráfico original

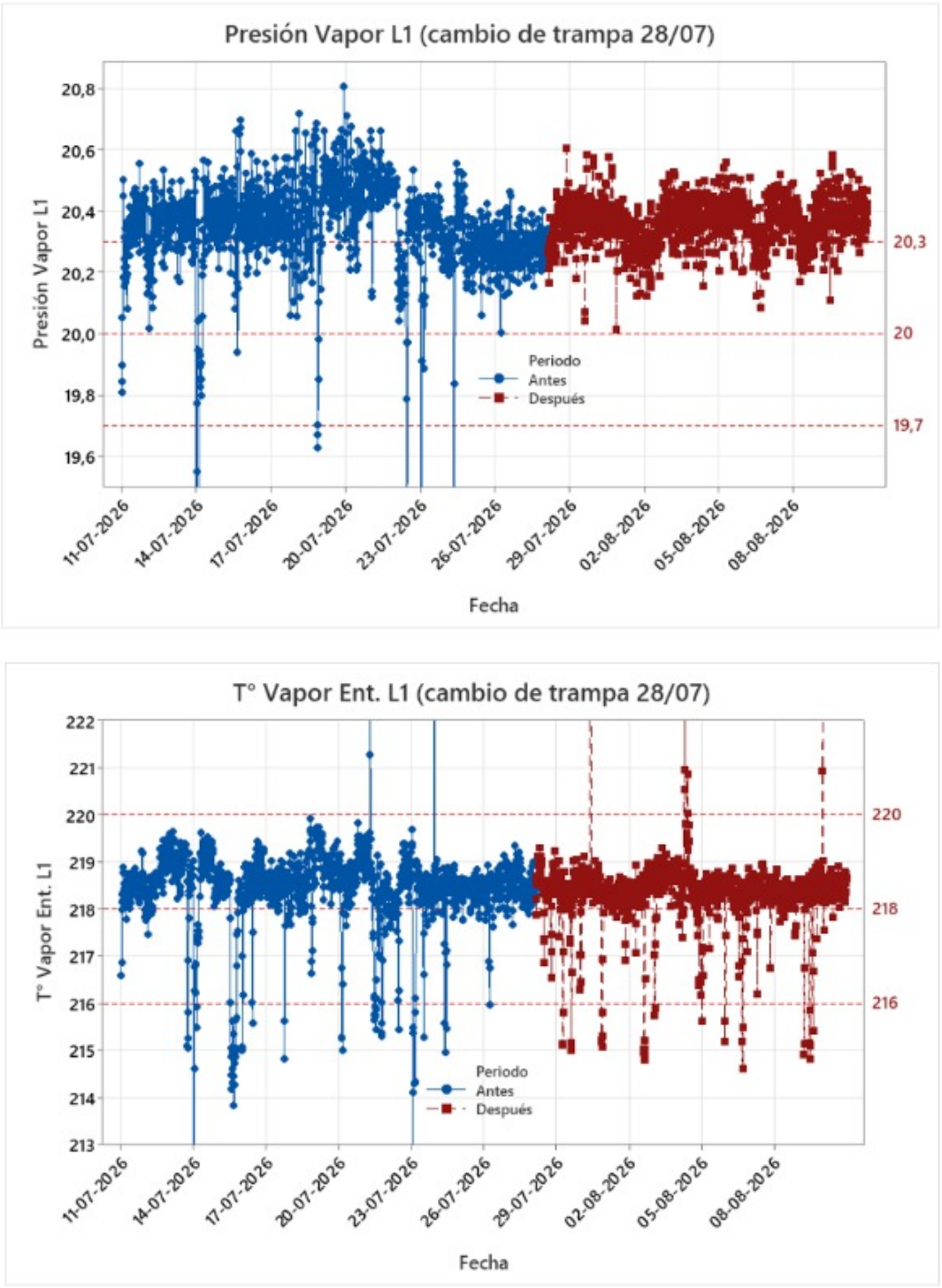
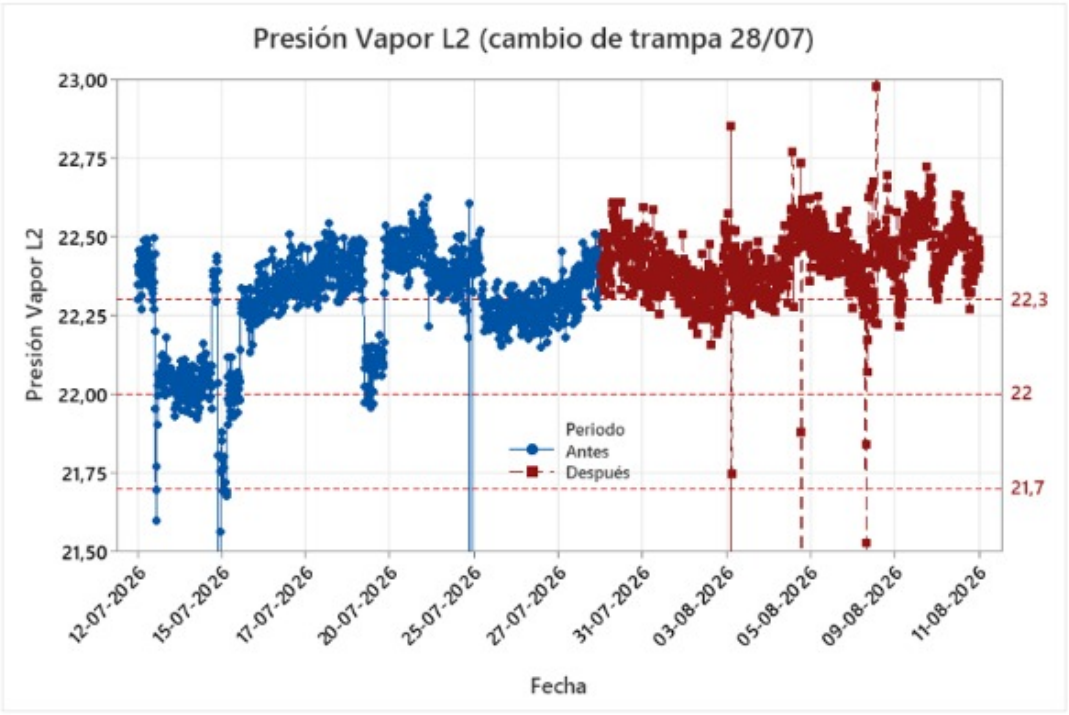


Figura M.2. Línea 1, Secador 27: presión (arriba) y temperatura (abajo), antes y después del recambio. Fuente: gráficos elaborados y validados por CMPC Planta Plywood (2026b), ampliados por panel sin modificar sus datos ni escalas.



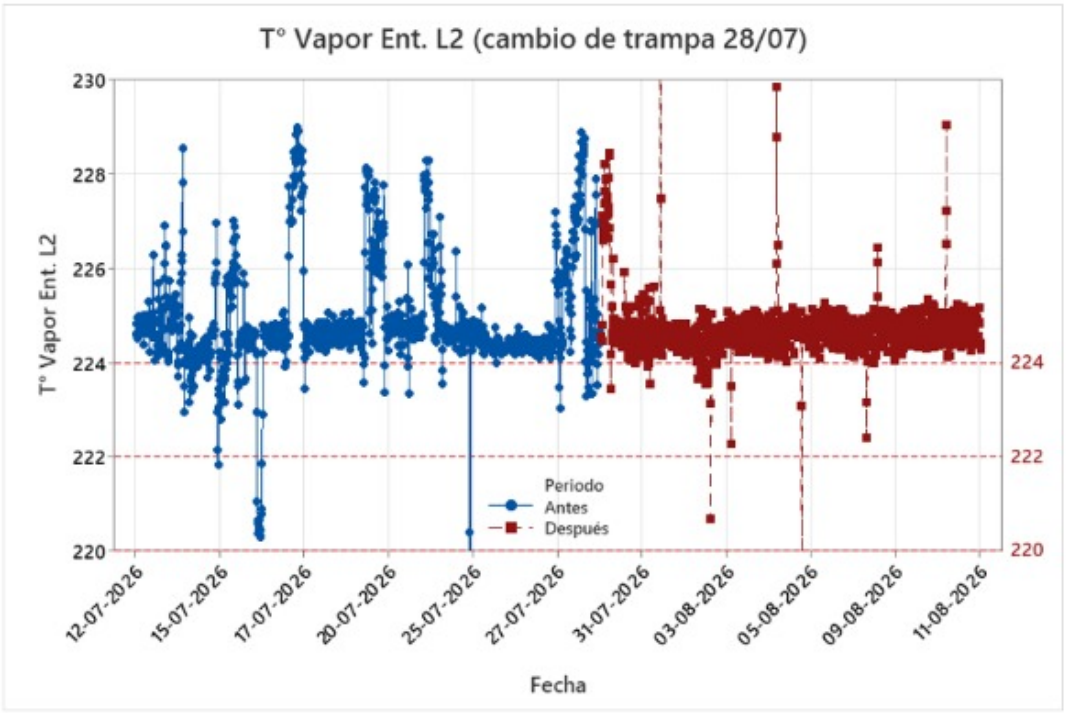


Figura M.3. Línea 2, AK2: presión (arriba) y temperatura (abajo), antes y después del recambio. Fuente: gráficos elaborados y validados por CMPC Planta Plywood (2026b), ampliados por panel sin modificar sus datos ni escalas.

Los gráficos muestran menor dispersión y perturbaciones remanentes. Se conservan las escalas originales; algunas excursiones alcanzan sus límites. Las desviaciones estándar de la Tabla M.1 proceden del resumen de CMPC, no de una reconstrucción de las imágenes. Reproducirlas requiere las series originales, sus ventanas y criterios de selección.

Anexo N Registro fotográfico de daños y fugas asociados a condensado

Este anexo reúne el registro fotográfico de las condiciones de daño y fuga observadas en terreno durante el levantamiento. Su función es documental. Tres afirmaciones del diagnóstico se apoyan en observación directa y no en medición: los antecedentes de daño en radiadores de secadores de la Sección 3.4, la solicitación hidráulica sobre codos y uniones que la Sección 3.6 señala como consecuencia del drenaje deficiente, y la condición del drenaje del sector AK1 descrita en la Sección 3.7. El material que sigue conserva esa evidencia.

El registro se complementa con los antecedentes operacionales de planta. Para el codo de la sala de vapor de Línea 1 se incorpora el diagnóstico de daño por impacto de condensado y erosión posterior. Se distingue ese antecedente de la evidencia fotográfica y del cálculo de caudal, que requiere medición específica.

N.1 Daño en radiadores de secadores

Los radiadores de los secadores son intercambiadores de tubos aletados de pared delgada alimentados desde la red de vapor. La Sección 3.4 registra antecedentes de daño en estos equipos como condición compatible con arrastre o golpe hidráulico, y el Anexo K estima órdenes de magnitud de sobrepresión bajo condiciones idealizadas, sin reconstruir el evento ni verificar la capacidad resistente de los radiadores. Ese análisis toma los eventos como premisa; las figuras siguientes documentan la condición que le da origen.

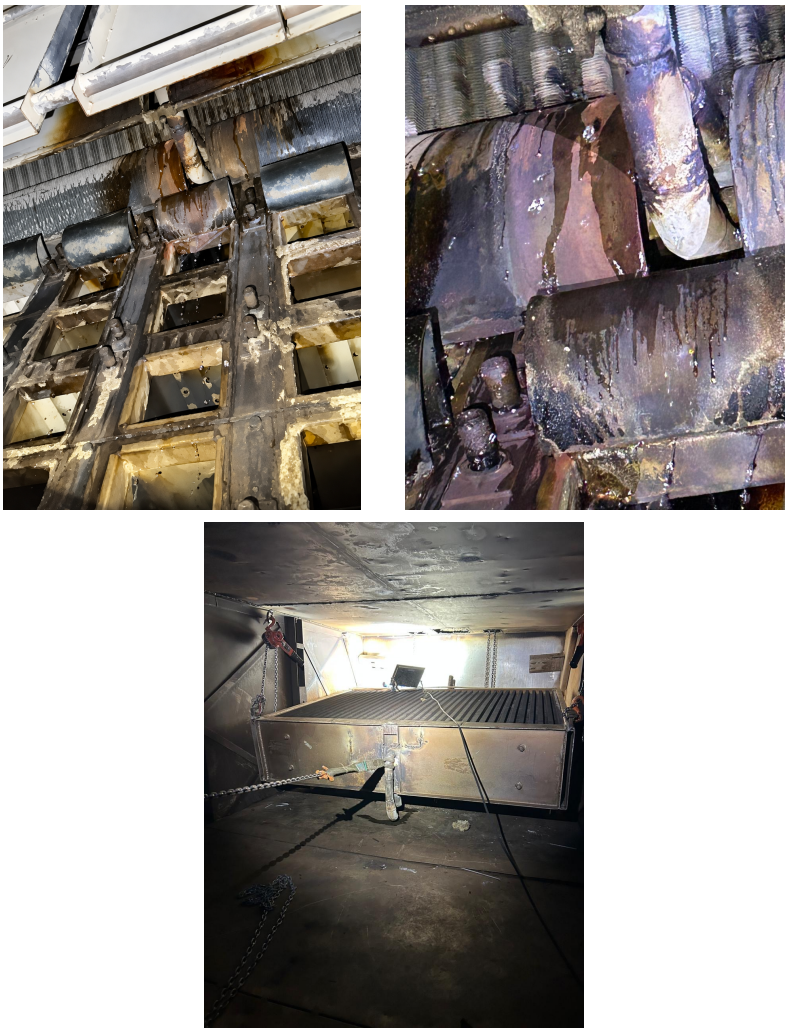


Figura N.1. Daño en radiadores de secadores. Superior izquierda: escurrimiento desde el colector y goteo sobre los bastidores. Superior derecha: detalle de cabezales, depósitos y corrosión superficial. Inferior: retiro de una unidad mediante tecles de palanca durante su recambio. Fuente: elaboración propia.

Las primeras imágenes documentan pérdida de estanqueidad y escurrimiento al interior del secador; la tercera registra el retiro del equipo durante su recambio. La manifestación externa no distingue entre un evento hidráulico, fatiga o corrosión. El aporte del registro es acreditar daños y consecuencias materiales que respaldan la prioridad de inspección y mejora del drenaje de la Sección 3.6. La identificación del mecanismo requiere inspeccionar los componentes afectados.

N.2 Fuga en codo de la sala de vapor, Línea 1

La Figura N.2 corresponde a un codo de la Línea 1 situado en la sala de vapor. Según los antecedentes operacionales recabados en planta, la fuga se produjo tras el daño asociado al impacto de condensado contra el codo, con episodios de golpe de ariete y erosión progresiva hasta la pérdida de estanqueidad. Se documenta así una consecuencia material del drenaje deficiente analizado en la Sección 3.6.



Figura N.2. Fuga en un codo de 90° con conexiones bridadas de la sala de vapor, Línea 1. Se observa escurrimiento sobre el accesorio sin aislación. El antecedente operacional identifica daño por impacto de condensado y erosión; la fotografía documenta la filtración exterior. Fuente: elaboración propia.

Conviene distinguir los mecanismos: el golpe de ariete impone una solicitación transitoria por el cambio brusco de movimiento del líquido; la erosión por impactos repetidos de gotas o condensado desgasta progresivamente la pared, especialmente en cambios de dirección (Spirax Sarco, s. f.-b; TLV Co., Ltd., s. f.-c). Pueden coexistir, pero no son sinónimos. El diagnóstico de planta relaciona ambos con la filtración de este codo; la fotografía exterior no localiza por sí sola la pérdida de espesor ni discrimina el punto interno de origen.

La intervención debe corregir la causa operacional además de recuperar la estanqueidad: revisar evacuación de condensado, trampas, pendientes y condiciones de arranque, junto con la integridad del codo y sus conexiones. La inspección del componente retirado y el control de espesores permiten documentar la extensión del daño. Así, el caso fundamenta la prioridad de drenaje y protección mecánica, no solamente la reparación de la fuga visible.

N.3 Línea de drenaje hacia la descarga “sauna”

La Sección 3.7 describe el drenaje del sector AK1 y su descarga exterior, conocida operacionalmente como “sauna”, y la propuesta correspondiente plantea reemplazar el tramo subterráneo por una línea aérea accesible con estaciones de trampeo. La Figura N.3 documenta la condición del tramo existente.



Figura N.3. Línea de drenaje hacia la descarga "sauna". Izquierda: liberación visible de fluido caliente en la unión entre la línea y una derivación, a nivel de piso y sin aislación. Derecha: liberación equivalente en el codo de bajada, con el accesorio parcialmente cubierto por residuo de madera. Fuente: elaboración propia.

Ambos puntos ilustran las limitaciones del arreglo actual: recorrido a nivel de piso, ausencia de aislación, contacto con residuo de madera y accesibilidad reducida para inspección. Son las condiciones que motivan la reconfiguración propuesta. En coherencia con el criterio adoptado para la descarga del sector, la liberación observada no se cuantifica como pérdida de vapor vivo, porque la observación visual no permite diferenciar vapor vivo, vapor flash y condensado caliente.

N.4 Curvatura de una línea de aireación del sector AK1

La Figura N.4 documenta la curvatura visible de una línea de aireación y la válvula manual asociada. Durante el levantamiento, el autor registró una condición semejante en las siete líneas y paso de fluido aun con las válvulas cerradas. La fotografía ilustra uno de esos puntos; el alcance de siete unidades corresponde al antecedente de inspección, no al número de componentes visibles en la imagen.

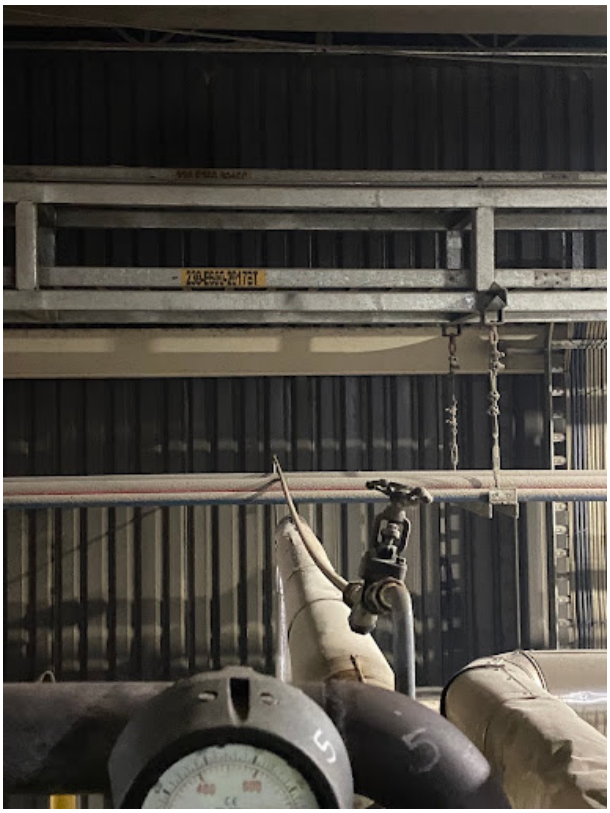


Figura N.4. Curvatura visible de una línea de aireación del sector AK1 y válvula manual asociada. La condición similar en las siete líneas y el paso interno por las válvulas corresponden al antecedente de inspección del autor. Fuente: registro fotográfico del levantamiento en planta.

La curvatura se incorpora como hallazgo geométrico que justifica revisar integridad, soportación y libertad de expansión. La fotografía no permite establecer cuánto cambió respecto del montaje original ni atribuir por sí sola la forma observada al flujo energético, a dilatación restringida o a una carga hidráulica. Tampoco muestra el interior de la válvula. El antecedente de paso interno se complementa con la actividad térmica registrada aguas abajo y con las temperaturas de los siete puntos del Anexo E.

La evaluación conserva así tres antecedentes distintos: geometría visible, condición funcional informada durante la inspección y registro termográfico. Su integración respalda la normalización del sector; el caudal perdido permanece como escenario paramétrico hasta contar con una medición.

N.5 Uso del registro y trazabilidad del diagnóstico

La evidencia reúne dos niveles complementarios: fotografías que documentan el daño y antecedentes de planta que describen su evolución y mecanismo operacional. En el codo de Línea 1, la atribución al impacto de condensado, golpe de ariete y erosión corresponde al diagnóstico de planta, no a una deducción exclusiva de la fotografía. Las inspecciones internas y mediciones de espesor aportarían el respaldo dimensional del deterioro.

Las imágenes no permiten calcular caudal liberado ni extrapolar la frecuencia de falla a toda la red. Su uso en la memoria es localizar las consecuencias observadas, conservar el diagnóstico operacional y respaldar la prioridad de las medidas de drenaje y protección. Ninguna de las cifras energéticas de la evaluación se obtiene del tamaño aparente de estas fugas.

Anexo O Propuesta de medición de condensado en la línea de vapor

O.1 Magnitud que se desea conocer

La pregunta operacional es cuánta agua líquida acompaña al vapor antes de ingresar al consumidor y cuánto retira la separación propuesta. Se deben distinguir el caudal de líquido transportado [kg/h], la masa acumulada en un punto bajo [kg] y el caudal drenado [kg/h]. Una sonda de nivel detecta acumulación en un recipiente; un aforo mide lo que sale por un drenaje; ninguna de estas lecturas identifica por sí sola todo el líquido que circula por la sección principal.

La pareja presión–temperatura identifica la cercanía a saturación, pero en equilibrio bifásico ambas variables son dependientes y no determinan la proporción de fases. Con vapor sobrecalentado y gotas sin evaporar tampoco procede asignar automáticamente una calidad termodinámica. Se propone comenzar por una magnitud verificable: la masa retirada por un separador y su evolución con la carga productiva. La cuantificación del contenido líquido total exige además conocer la captura efectiva y el arrastre remanente.

Tabla O.1. Alternativas de observación y medición del condensado.

Objetivo	Instrumentación	Resultado y límite
Detectar acumulación	Nivel en bolsillo o recipiente y alarma	Presencia o inventario local si se conoce su geometría; no caudal de gotas.
Cuantificar extracción	Separador, trampa y aforo másico del drenaje acondicionado	kg/h y masa retirada durante la ventana; requiere controlar flash y almacenamiento.
Medir fracción líquida en flujo	Medidor bifásico o de vapor húmedo validado para el servicio	Fracción másica y caudales dentro del rango certificado del equipo.
Verificar funcionamiento	Ultrasonido y temperatura de la estación	Diagnóstico funcional de la trampa; no sustituye un aforo calibrado.

O.2 Punto propuesto y frontera de medición

Para proteger AK1 se propone evaluar el ramal de Línea 2 antes del secador, después de la distancia de evaporación y mezcla que debe definir el proveedor del atemperador. El separador se instala conforme a su orientación de diseño, con drenaje exclusivo y sin reunir descargas de otros consumidores antes de medir. Para estudiar el suministro desde CELPAC se necesitaría otra estación en el ingreso a Plywood; los dos puntos responden a fronteras diferentes.

El separador remueve gotas y líquido transportado hacia su drenaje; su desempeño depende del tamaño de gota y de la carga. La disposición debe conservar pendiente, capacidad de evacuación, accesibilidad y soporte independiente cuando corresponda. Spirax Sarco (s. f.-c) recomienda separación y drenaje adecuados para acondicionar vapor antes de la medición convencional de caudal. Esa recomendación sirve para medir vapor acondicionado: no debe aplicarse aguas arriba de un medidor de humedad si el objetivo es conocer la humedad de entrada sin modificarla.

O.3 Montaje de la estación de aforo propuesta

La Figura O.1 representa una propuesta de ingeniería conceptual para una campaña temporal. No es un plano de fabricación ni una selección comercial cerrada. La ingeniería de

detalle debe definir capacidad de separación, caudal máximo de arranque, presión de diseño, conexiones, protección de recipientes y contrapresión admisible de la trampa.

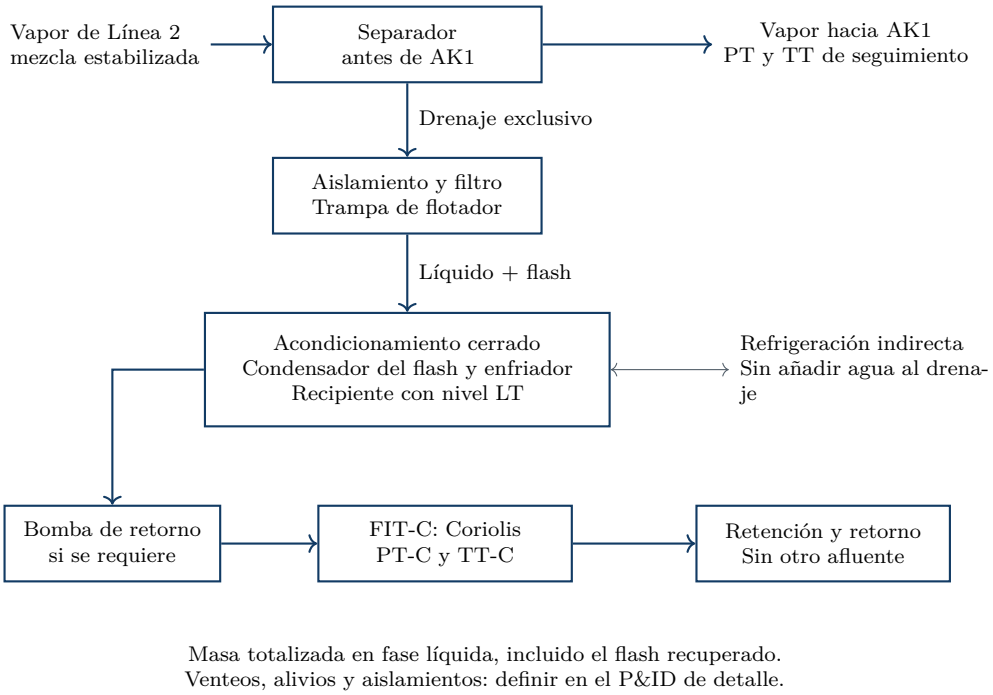


Figura O.1. Esquema funcional de aforo del drenaje del separador. Los identificadores son propuestos. Fuente: elaboración propia.

La descarga de la trampa puede revaporizar parcialmente al reducir su presión. El acondicionamiento debe condensar esa fracción y enfriar la corriente antes del aforo, mediante intercambio indirecto. Se requiere comprobar que no exista una salida de vapor sin contabilizar, entrada de agua de refrigeración ni fuga de vapor vivo por la trampa. El nivel del recipiente permite corregir la masa almacenada entre el inicio y el final de cada ventana. Si la capacidad de refrigeración es insuficiente, el registro se considera inválido para cuantificar condensado.

Se propone un caudalímetro másico Coriolis en el drenaje acondicionado, con tubería llena y sin burbujas. Una disposición vertical de flujo ascendente puede favorecer esa condición; la orientación exacta y los soportes deben seguir el manual del modelo seleccionado. El control de contrapresión se ubica aguas abajo del medidor y se ajusta sin perjudicar el drenaje aguas arriba (Schultz, 2026). El recipiente desacopla las descargas intermitentes de la trampa del aforo, y la bomba se dimensiona para retornar contra la presión real del colector.

El transmisor PT-C y el sensor TT-C verifican la condición monofásica en el medidor. Debe cumplirse $T_C < T_{sat}(P_C)$ con margen suficiente para incertidumbre instrumental y pérdida de presión a través del equipo. No se fija aquí un margen universal ni un rango de caudal: deben seleccionarse con los valores mínimo, normal y máximo del drenaje. Un caudalímetro electromagnético solo sería una alternativa si se verifica además la conductividad mínima exigida para ese condensado.

La instalación requiere aislamiento para mantenimiento, puntos de verificación, soportes que no transmitan esfuerzos al sensor y registro de masa totalizada. La trampa debe verificarse funcionalmente durante el aforo: si deja pasar vapor vivo, el sistema de enfriamiento también lo condensará y el resultado sobreestimará el líquido que llevaba la línea. No corresponde realizar un aforo abierto manual de una descarga caliente y presurizada.

O.4 Balance de masa e interpretación del resultado

Para una ventana Δt expresada en horas, el caudal medio drenado se obtiene mediante:

$$\overline{\dot{m}}_d = \frac{M_{\mathrm{FIT}} + \Delta M_{\mathrm{rec}}}{\Delta t}. \tag{O.1}$$

M_{FIT} es la masa totalizada [kg] y $\Delta M_{\mathrm{rec}} = M_f - M_i$ es el incremento de inventario del conjunto de acondicionamiento. La ecuación supone captura completa del flash, ausencia de otros afluentes y pérdidas despreciables. Si se utiliza pesaje calibrado del recipiente como aforo alternativo, se registra el incremento de masa y las descargas efectuadas durante la misma ventana.

La masa drenada incluye el líquido interceptado y cualquier condensación generada dentro del separador. Un balance del líquido, sin reevaporación apreciable, puede escribirse como:

$$\dot{m}_{\ell,\mathrm{entrada}} = \dot{m}_d - \dot{m}_{\mathrm{cond,sep}} + \dot{m}_{\ell,\mathrm{salida}} + \frac{dM_{\ell,\mathrm{sep}}}{dt}. \tag{O.2}$$

Por tanto, la extracción no determina por sí sola el líquido de entrada. Deben acotarse la pérdida térmica del separador, su acumulación y el arrastre residual; con intercambio de fase adicional se incluyen los términos correspondientes. Si se conoce una eficiencia de captura η_c válida para las gotas y caudales del ensayo, y el inventario es estable, puede estimarse $\dot{m}_{\ell,\mathrm{entrada}} \simeq (\dot{m}_d - \dot{m}_{\mathrm{cond,sep}})/\eta_c$. No se adopta $\eta_c = 1$ sin verificación.

Solo con caudales de ambas fases representativos de la misma frontera y ventana puede calcularse la fracción másica de vapor en flujo:

$$x_{\mathrm{flujo}} = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_v + \dot{m}_\ell}. \tag{O.3}$$

Su interpretación como calidad termodinámica exige equilibrio de fases. Como ejemplo ilustrativo, $\dot{m}_v = 40.000$ kg/h y $\dot{m}_\ell = 400$ kg/h darían $x_{\mathrm{flujo}} = 0{,}9901$. No son resultados de Plywood. Dividir los 354,7 kg/h de equivalencia térmica por un caudal de suministro tampoco mediría esa fracción, porque falta una frontera y una medición de líquido común.

Si se afora solo el líquido remanente después de un recipiente de flash y no se recupera el vapor, el resultado subestima la masa drenada. Una corrección por balance energético requiere conocer la entalpía de entrada h_{in} y la presión de descarga P_d:

$$y_{\mathrm{flash}} = \frac{h_{\mathrm{in}} - h_f(P_d)}{h_{fg}(P_d)}, \qquad \dot{m}_d = \frac{\dot{m}_{\ell,d}}{1 - y_{\mathrm{flash}}}. \tag{O.4}$$

Esta expresión se limita a un estrangulamiento adiabático con equilibrio de salida y $0 \leq y_{\mathrm{flash}} < 1$; no corrige vapor vivo que atraviese una trampa defectuosa. Para la campaña propuesta se prefiere condensar y contabilizar ambas fases, reduciendo la dependencia de esa hipótesis.

O.5 Alternativa de medición de vapor húmedo en línea

Existen medidores especializados que obtienen información sobre humedad a partir de la señal de flujo. Como ejemplo tecnológico se revisó Proline Prowirl F 200 de Endress+Hauser. Debe distinguirse la opción de detección cualitativa de la opción de medición de humedad; no todo caudalímetro de vórtices posee esta última. La especificación especial de 2015 documenta una configuración limitada a DN 25–100, $2 < P < 11$ bar(a),

$120 < T < 185$ °C y velocidades dependientes del diámetro. Esos límites no avalan su uso directo en las condiciones de aproximadamente 21–23 bar(a) de esta memoria. Debe obtenerse del proveedor el rango de humedad certificado para la versión y servicio concretos, además de la resistencia nominal del cuerpo (Endress+Hauser, 2015).

Para la configuración descrita en la información técnica de 2024, el montaje es horizontal con el cabezal hacia abajo. Después de un codo simple se especifican 20 DN de entrada y 5 DN de salida; después de una válvula de control, 50 DN de entrada. Las tomas externas de presión y temperatura se ubican a 3–5 DN y 4–8 DN aguas abajo, respectivamente. La función de humedad no admite sustituir esas longitudes por corrección de entrada o acondicionador de flujo. Estas distancias corresponden al modelo documentado y no son reglas universales (Endress+Hauser, 2024).

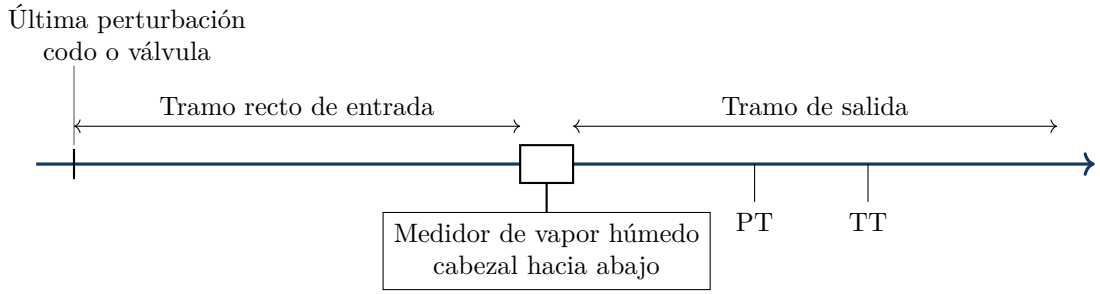


Figura O.2. Ubicación conceptual de un medidor especializado en la sección principal. Esquema sin escala; la viabilidad depende de la configuración certificada. Fuente: elaboración propia.

Un equipo en un bypass de toma única no garantiza una muestra representativa: el líquido puede viajar como película inferior o gotas con distribución no uniforme. Tampoco procede reducir una línea principal solo para adaptarla al rango nominal de un sensor. La selección debe acreditar velocidad, pérdida de presión, carga mínima, presión, temperatura, fracción líquida y régimen de flujo. Cuando no exista una solución directa validada, corresponde contratar una campaña especializada de separación y calorimetría con muestreo representativo; una calorimetría por estrangulamiento exige demostrar, entre otras condiciones, sobrecalentamiento en la salida de la muestra.

O.6 Campaña, aceptación y uso económico

Se propone registrar simultáneamente presión, temperatura, caudal de vapor, masa del drenaje, inventario del recipiente, estado de la trampa, carga del secador y caudal de atemperación. El historiador debe conservar fecha, hora, unidades, estado de calidad y alarmas del instrumento. Las ventanas de carga baja, normal y alta se separan de los arranques y detenciones. Una resolución inicial de un minuto puede servir para tendencia; los transitorios de descarga requieren un muestreo acorde con su duración y no deben interpretarse solo desde promedios horarios.

La incertidumbre debe considerar caudalímetro, inventario, pérdidas de flash y captura del separador. Una comparación antes–después requiere que el cambio sea discernible frente a la incertidumbre combinada y que persista bajo condiciones productivas equivalentes. Cerca de vapor seco, una pequeña incertidumbre de x puede traducirse en una incertidumbre relativa elevada de $\dot{m}_\ell = (1 - x)\dot{m}_{\text{total}}$; no debe prometerse resolución de pequeñas mejoras sin comprobarla.

El resultado inmediato del aforo será una tasa de extracción y una masa por ventana.

Tabla O.2. Condiciones para aceptar una medición de condensado.

Verificación	Evidencia requerida
Frontera exclusiva	Drenaje identificado, sin mezcla de otras estaciones; bypass y venteos documentados.
Fase en el medidor	Presión y temperatura compatibles con líquido subenfriado; ausencia de indicaciones de gas o tubo vacío.
Balance temporal	Totalizador e inventario inicial y final; relojes sincronizados y ventana completa.
Trampa funcional	Sin paso de vapor vivo; presión diferencial suficiente para el caudal de ensayo.
Calidad metrológica	Calibración, resolución, rango útil e incertidumbre del conjunto, no solo de un sensor.
Comparabilidad	Producción, receta, humedad inicial y final, espesor y horas efectivas de ambas campañas.

Un aumento del drenaje después de reparar trampas puede reflejar recuperación de evacuación, no peor calidad del suministro. Una disminución después de aislar puede ser coherente con menor condensación local, pero exige igual carga y captura comparable. El ahorro se evalúa por menor suministro normalizado o por recuperación energética adicional demostrada; capturar un kilogramo de líquido no equivale a ahorrar un kilogramo de vapor. Los costos de esta instrumentación deberán cotizarse e incorporarse al CAPEX antes de recalcular el retorno de la inversión.

Anexo P Información complementaria de la evaluación

Este anexo reúne las tablas, figuras y registros de terreno que respaldan el Capítulo 3. En el cuerpo de la memoria se mantienen el resultado y su interpretación; aquí se detalla el respaldo, ordenado según las secciones de ese capítulo.

P.1 Soportación de cañerías

Complementa la Sección 3.2.

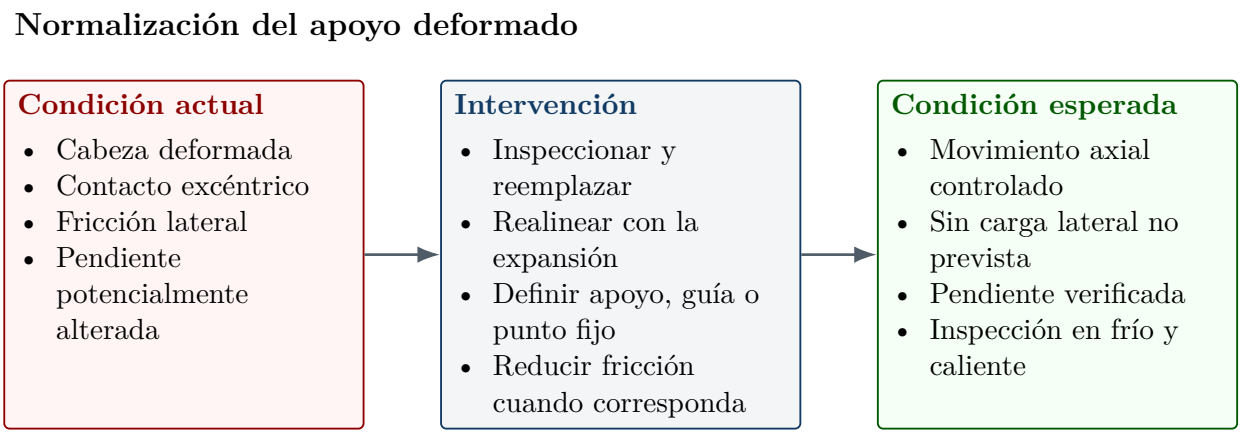


Figura P.1. Secuencia funcional para normalizar el apoyo deformado. Fuente: elaboración propia.

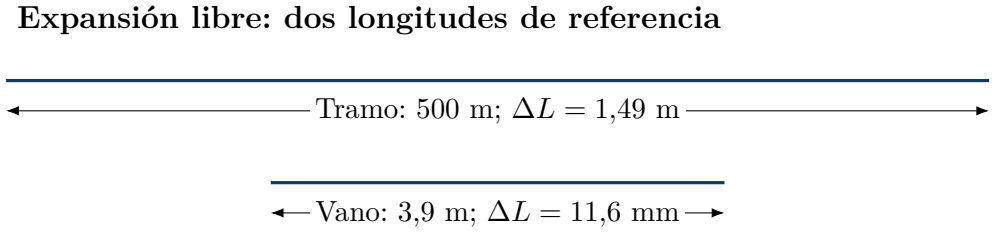


Figura P.2. Acciones del modelo local deslizante. Los valores describen esa idealización y no la reacción real del montaje restringido. Fuente: elaboración propia.

P.2 Pérdidas térmicas en cañerías y válvulas

Complementa la Sección 3.3.

Tabla P.1. Sensibilidad a la emisividad de las cañerías aisladas, con temperaturas fijas y mantos sin modificar.

ε del revestimiento	$\dot{Q}_{\mathrm{ref}}$ [kW]	Reducción [kW]	Vapor [t/año]	Diferencia
0,91 (valor adoptado)	15,68	220,96	3.649,2	—
0,30 (escenario)	12,94	223,69	3.694,4	+1,2 %
0,20 (escenario)	12,50	224,14	3.701,8	+1,4 %
0,10 (escenario)	12,05	224,59	3.709,2	+1,6 %

Tabla P.2. Sensibilidad de la evaluación térmica al costo unitario de vapor.

Costo de vapor	Beneficio cañerías	Recuperación	Beneficio mantos	Recuperación
8,55 USD/t (−20 %)	20.176 USD/año	9,2 meses	11.025 USD/año	17,8 meses
10,69 USD/t (adoptado)	25.226 USD/año	7,4 meses	13.785 USD/año	14,2 meses
12,83 USD/t (+20 %)	30.275 USD/año	6,2 meses	16.544 USD/año	11,8 meses

Tabla P.3. Resumen de exposición térmica identificada en la red principal.

Elemento	**Extensión o cantidad**	**Evidencia**	**Implicancia diagnóstica**
Cañerías con aislación faltante o deficiente	62,8 m	Inspección y termografía	Pérdida distribuida de energía hacia el ambiente
Válvulas sin manto térmico	14 unidades	147,6 a 250,1 °C	Pérdida localizada en componentes expuestos
Válvula equivalente con manto	Caso de comparación	Menor temperatura superficial exterior	Evidencia cualitativa del efecto de la barrera térmica

P.3 Condición térmica del vapor

Complementa la Sección 3.4.

La Figura P.3 reproduce la pantalla de secadores del sistema de control del 29 de enero de 2026. Los recuadros señalan los tres pares de instrumentos de llegada utilizados en la Tabla 3.8: (A) presión y temperatura de entrada del secador 17; (B) PIT318P4 y TIT318R5 del secador 27; y (C) PIT2103 y TIT6005 de AK2. La pantalla muestra además los caudales de cada secador: FIT2106C, 15,5 t/h en el secador 17; FIT2106B, 21,2 t/h en el 27; FIT6002, 11,4 t/h en AK2; y FIT6003, 0,9 t/h en AK1. Como la captura corresponde a otro instante, sus valores no coinciden con los de la tabla, pero reproducen la misma tendencia: con 20,6 barg y 217,4 °C el secador 27 conserva 1,1 °C de margen, y con 22,5 barg y 218,5 °C AK2 queda 2,2 °C bajo la saturación calculada.

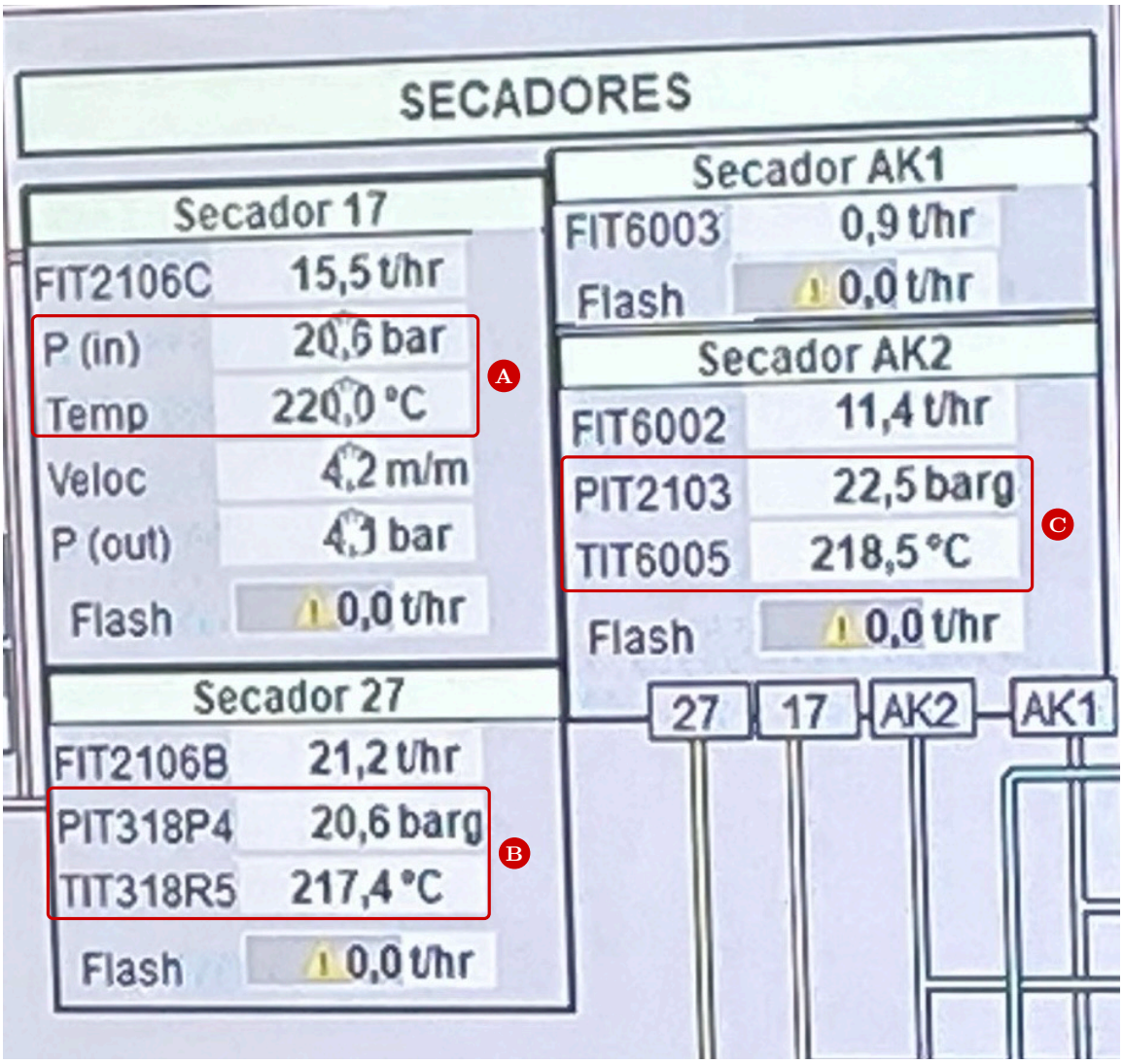


Figura P.3. Pantalla de secadores del sistema de control (29 de enero de 2026), con los TAG y valores de caudal, presión y temperatura de entrada de los secadores 17, 27, AK1 y AK2. Recuadros: (A) secador 17; (B) secador 27, PIT318P4 y TIT318R5; (C) AK2, PIT2103 y TIT6005. Fuente: sistema de control de Planta Plywood, captura propia.

Tabla P.4. Evidencias utilizadas para evaluar el riesgo de condensado libre.

Evidencia	Alcance de la interpretación
Descarga significativa en trampas de ingreso	Confirma presencia local de condensado; no identifica su origen ni inventario total
Drenaje mantenido cerrado por riesgo de inundación	Indica evacuación inestable o acumulación en el sector
Antecedentes de daño en radiadores	Condición compatible con arrastre o golpe hidráulico; registro en Anexo N, no constituye medición de calidad
Sensores con vapor sobrecalentado	Caracterizan la fase vapor en el punto de medición; no descartan líquido estratificado
Separador de gotas en Línea 1	El diseño reconoce la necesidad de retirar humedad o condensado arrastrado

La Figura P.4 reproduce la pantalla de distribución de vapor del sistema de control (junio de 2026). En ella figuran los transmisores de la Tabla 3.8 para el ingreso y la

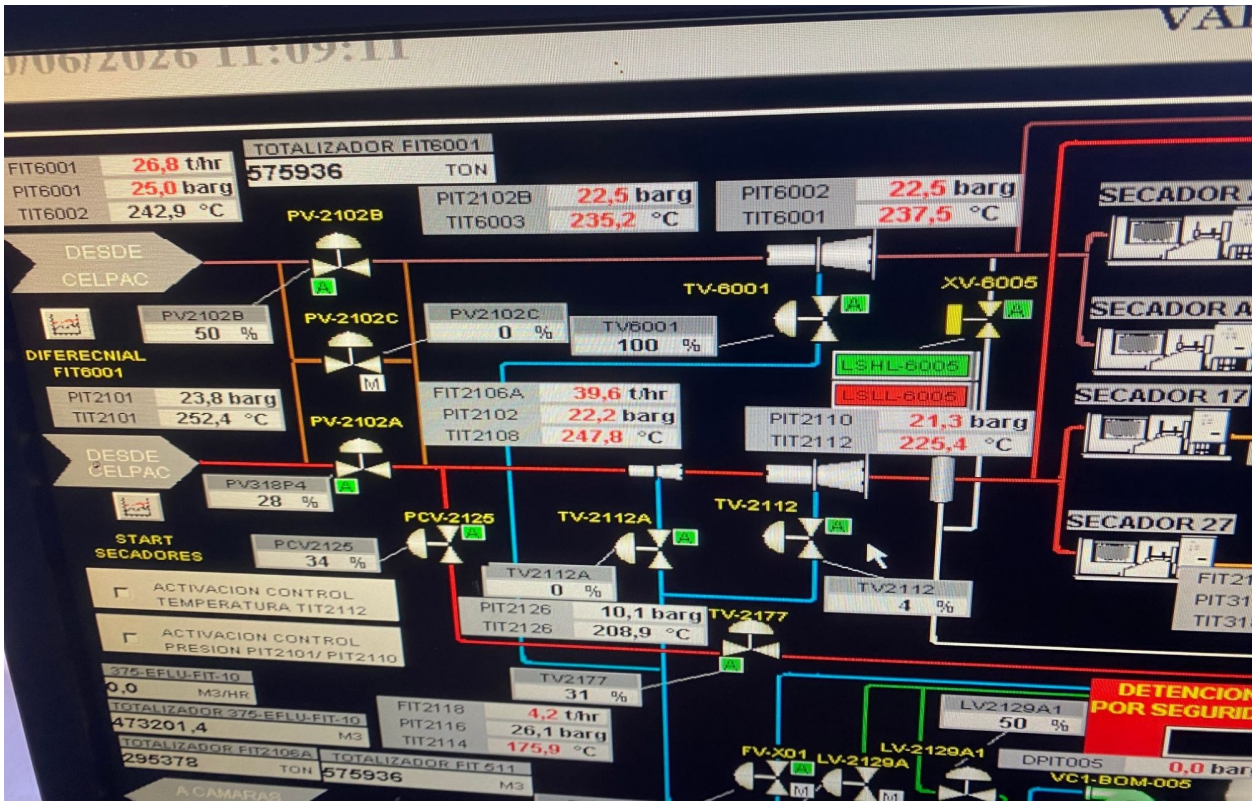


Figura P.4. Pantalla de distribución de vapor del sistema de control (junio de 2026), con los TAG de presión, temperatura y caudal del ingreso desde CELPAC, de las válvulas principales, de la atemperación y de la corriente de inyección. Fuente: sistema de control de Planta Plywood, fotografía propia.

salida de las válvulas principales de ambas líneas (PIT2101/TIT2101, PIT2102/TIT2108, PIT6001/TIT6002 y PIT2102B/TIT6003) y para la salida de atemperación de la Línea 1 (PIT2110/TIT2112), además de los instrumentos de la corriente de inyección (PIT2116 y TIT2114) y los caudales de entrada FIT6001 y FIT2106A.

Tabla P.5. Comparación presión-temperatura en puntos representativos, con identificación del instrumento de origen.

Punto	**Instrumentos P / T**	**P [barg]**	**P [bar(a)]**	**T medida [°C]**	T_{sat} **[°C]**	ΔT_{sup} **[°C]**
Entrada Plywood L1	PIT2101 / TIT2101	23,8	24,8	252,4	223,6	+28,8
Salida válvula L1	PIT2102 / TIT2108	22,2	23,2	247,8	220,0	+27,8
Entrada Plywood L2	PIT6001 / TIT6002	25,0	26,0	242,9	226,1	+16,8
Salida válvula L2	PIT2102B / TIT6003	22,5	23,5	235,2	220,7	+14,5
Salida atemperación L1	PIT2110 / TIT2112	21,3	22,3	225,4	218,0	+7,4
Llegada secador 27	PIT318P4 / TIT318R5	20,2	21,2	222,5	215,4	+7,1
Llegada secador 17	HMI secador 17	20,1	21,1	220,0	215,1	+4,9
Llegada AK2	PIT2103 / TIT6005	21,6	22,6	219,0	218,7	+0,3

Tabla P.6. Matriz integrada de factores que afectan la condición efectiva del vapor.

Factor	**Mecanismo**	**Resultado disponible**	**Influencia**
Pérdidas térmicas	Consumen margen térmico	180,43 kW en elementos de vapor	Alta
Atemperación	Reduce sobrecalentamiento; gotas pueden no evaporar	2,5–4,2 m al primer codo	Alta
Trampas cerradas	Impiden evacuación	6 unidades deficientes	Alta
Trampas abiertas	Descargan energía y fluido	5 unidades con paso interno	Alta
Drenaje del separador	Puede disminuir descarga efectiva	Montaje distinto al P&ID	Alta
Soportación	Puede alterar pendiente y puntos bajos	Apoyo deformado	Media
Suministro Pacífico/CELPAC	Posible arrastre previo	Sin medición de fase líquida	No cuantificada

P.4 Sistema de atemperación

Complementa la Sección 3.5.

La Figura P.5 muestra el atemperador de la Línea 2 (VC1-ENF-601) tal como está instalado en la planta: el equipo se inserta en la línea de vapor mediante una conexión bridada y se acciona con un actuador neumático de diafragma, con posicionador y volante de operación manual.



(a) Vista general sobre la línea. **(b)** Actuador y posicionador.

Figura P.5. Atemperador VC1-ENF-601 de la Línea 2 instalado en Planta Plywood. Fuente: registro de terreno del autor.

La Figura P.6 documenta la acotación en terreno de los dos atemperadores de la Línea 1, medida con huincha y con distanciómetro láser, contrastando ambos métodos. En cada fotografía se rotulan el punto de inyección y el comienzo del primer codo; la línea roja marca la distancia recta entre ambos. Las cotas corresponden a la Tabla 3.10.



(a) Atemperador mayor, VC1-ENF-008: 2,5 m. **(b)** Atemperador menor, VC1-ENF-008A: 4,0 m.

Figura P.6. Tramo recto disponible aguas abajo de los atemperadores de la Línea 1. La línea roja indica la distancia medida entre el plano de inyección y la tangente de entrada del primer codo, obtenida con huincha y distanciómetro láser. Estas cotas son las de la Tabla 3.10. Fuente: elaboración propia, levantamiento en terreno.

La Figura P.7 reproduce la pantalla de selección de instrumentos del lazo de temperatura de la atemperación, del 24 de febrero de 2026. Permite elegir, para cada línea, entre el sensor local a la salida de la estación (TIT2112 en la Línea 1 y TIT6001 en la Línea 2) y el sensor del consumidor (TIT318R5 en el secador 27 y TIT6005 en AK2); en ese registro figuraban seleccionados los sensores de consumidor.

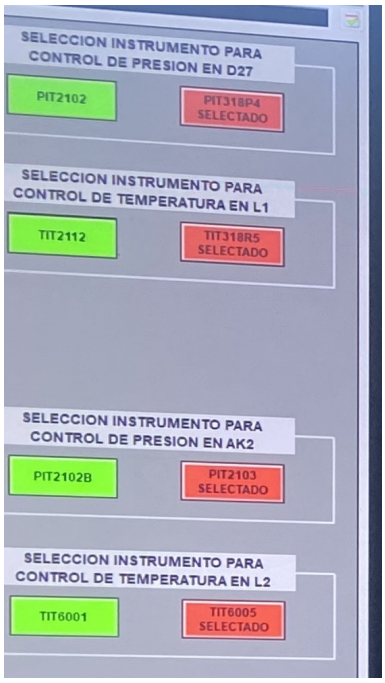


Figura P.7. Pantalla de selección de instrumentos del lazo de temperatura de la atemperación (24 de febrero de 2026). TIT318R5 y TIT6005 aparecen seleccionados para el control. Fuente: sistema de control de Planta Plywood, captura propia.

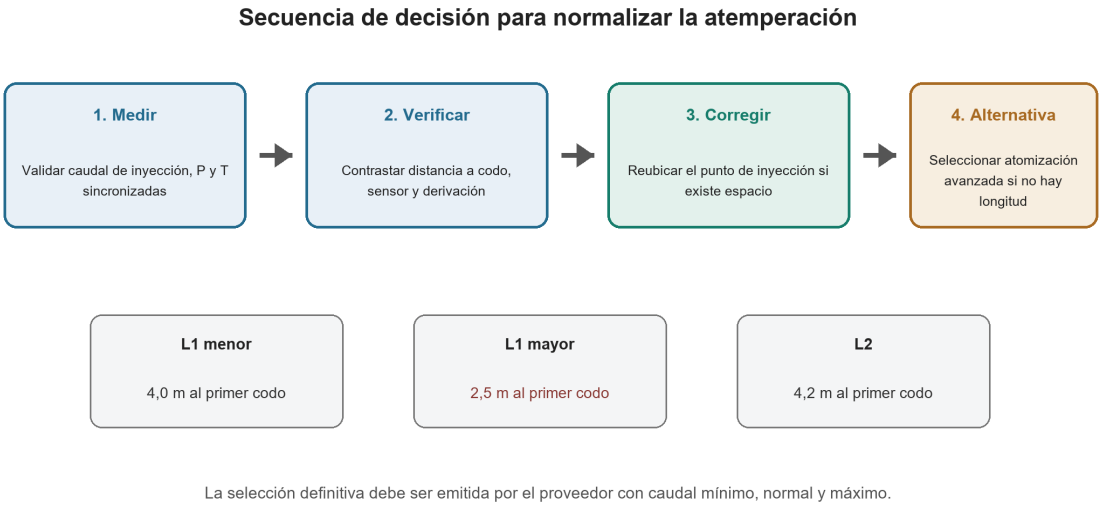


Figura P.8. Secuencia de decisión para normalizar la atemperación. Fuente: elaboración propia.

Tabla P.7. Instrumentación relevante para el diagnóstico de atemperación.

Señal o variable	Ubicación o función	Condición observada	Uso en el diagnóstico
TIT2114	Temperatura del condensado de inyección	Señal fija al inicio; posteriormente corregida	Brecha subsanada durante el estudio
PIT2116	Presión del condensado de inyección	Señal intervenida y corregida según antecedentes de planta	Registro previo en el Anexo Q
TIT318R5	Línea 1 aguas abajo	Tendencia disponible con oscilaciones	Seguimiento del efecto térmico final
TIT6005	Entrada a AK2	Tendencia disponible con fluctuaciones	Seguimiento de temperatura en AK2
Caudal de condensado	Inyección a atemperadores	Lectura cercana a 15 t/h no representativa	Impide validar el balance con medición directa
Presión y temperatura de condensado	Condición de alimentación	Datos puntuales disponibles	Entrada para el modelo, previa sincronización

P.5 Drenaje de condensado y trampas de vapor

Complementa la Sección 3.6.

Tabla P.8. Estado y tipología de las trampas registradas.

Categoría	Clasificación	Cantidad	Participación
Tipo	Flotador	104	81,3 %
Tipo	Termodinámica	18	14,1 %
Tipo	Termostática	6	4,7 %
Estado	Operativa	117	91,4 %
Estado	No operativa o deficiente	11	8,6 %
Modo preliminar	Abierta o con paso interno	5	Parte de las 11 deficientes
Modo preliminar	Cerrada o con drenaje insuficiente	6	Parte de las 11 deficientes

Tabla P.9. Clasificación funcional de las trampas deficientes.

Condición	Cantidad	Efecto principal	Tratamiento cuantitativo
Abierta o con paso interno	5	Pérdida energética potencial	Orificio equivalente
Cerrada o drenaje insuficiente	6	Acumulación de condensado	Carga térmica por punto
Total deficiente	11	Efectos energéticos y operacionales	Análisis separado

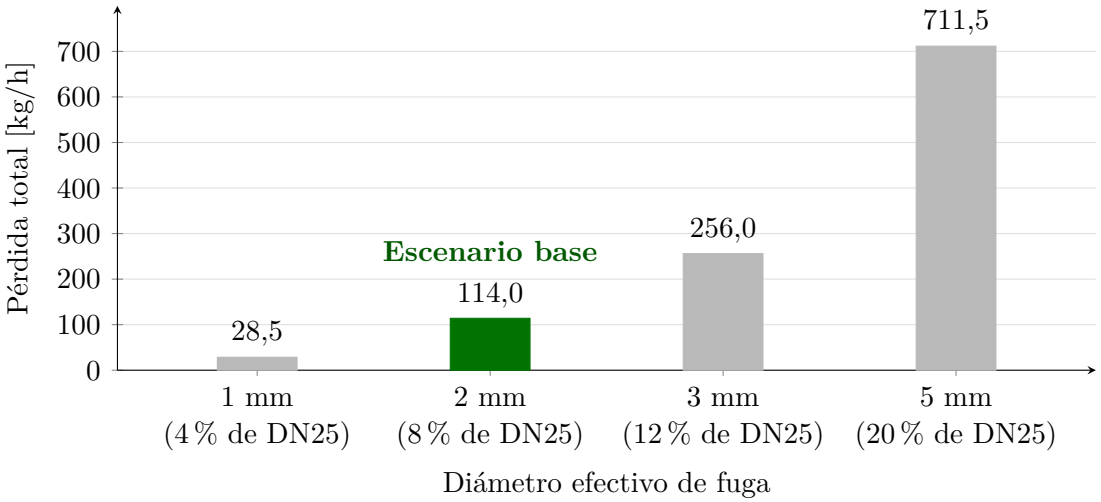


Figura P.9. Sensibilidad de la pérdida estimada para las cinco trampas abiertas. Entre paréntesis, el diámetro efectivo como fracción del diámetro nominal DN25 de la conexión. Fuente: elaboración propia.

Tabla P.10. Alcance y resultado esperado del recambio de trampas.

Modo de falla	Cant.	Acción	Beneficio	Resultado de referencia
Abierta o paso interno	5	Recambiar y verificar conjunto	Evitar descarga energética	114,0 kg/h; 957,6 t/año
Cerrada o drenaje insuficiente	6	Recambiar, limpiar filtro y revisar descarga	Restituir evacuación	294,9 kg/h no evacuados a 25 kW/punto

P.6 Sector AK1

Complementa la Sección 3.7.

Las condiciones de la Tabla 3.20 se leyeron en la pantalla de proceso del secador AK1 (sistema Grenzebach, 2 de julio de 2026), reproducida en la Figura P.11. Las temperaturas de las secciones 1, 2 y 3 corresponden a TIRC BT7001 (199,5 °C), BT7002 (198,3 °C) y BT7003 (194,4 °C), y la presión de la línea directa, al suministro del sistema de calentamiento BP8001 (22,2 bar). La Figura P.12 muestra las tendencias de temperatura de las tres zonas entre la 01:00 y las 08:45 del mismo día: tras el calentamiento, cada zona se mantiene estable en torno a los valores de la tabla, lo que respalda el uso de una temperatura representativa por sección.

Las cuatro imágenes son fotografías de la pantalla procesadas digitalmente para mejorar su legibilidad. Ese procesamiento puede alterar rótulos secundarios, como la lista de alarmas, las escalas de los ejes o algunos TAG; por ello, de estas capturas solo se utilizan las temperaturas por sección y la presión de suministro indicadas.

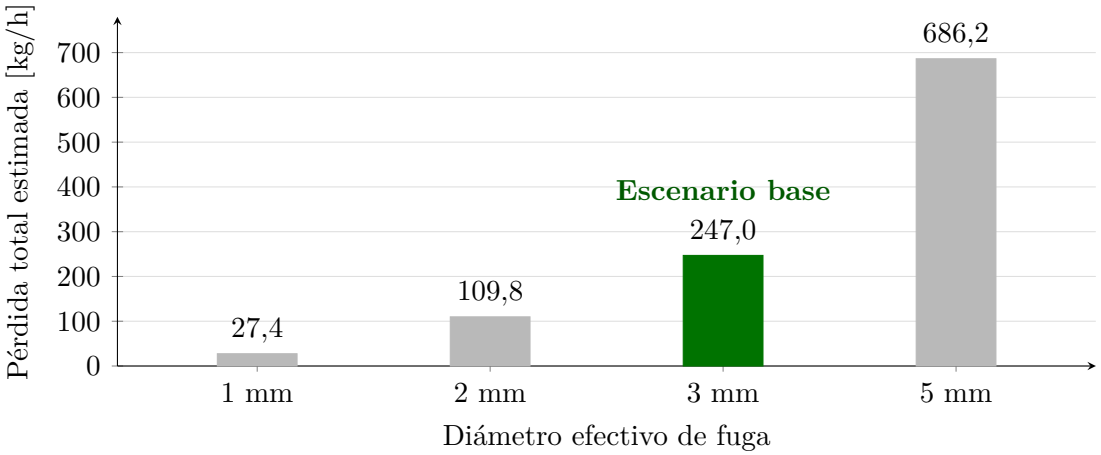


Figura P.10. Sensibilidad de la pérdida estimada al diámetro efectivo de fuga en AK1. Fuente: elaboración propia.

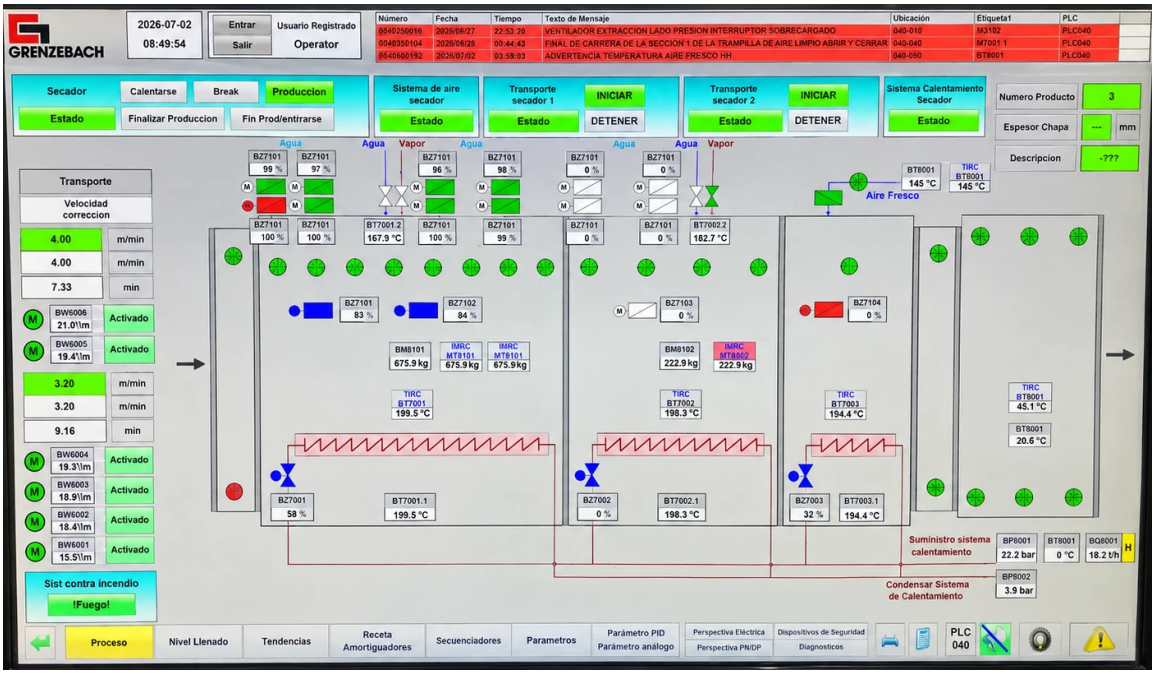
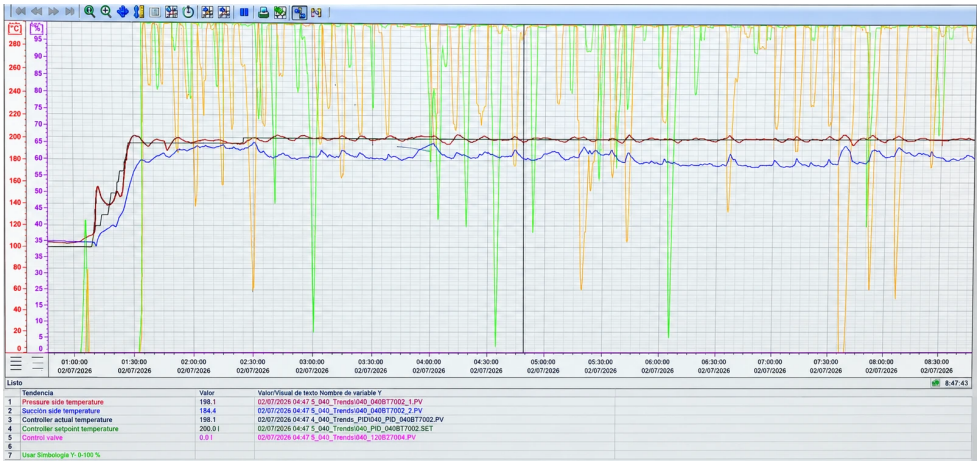


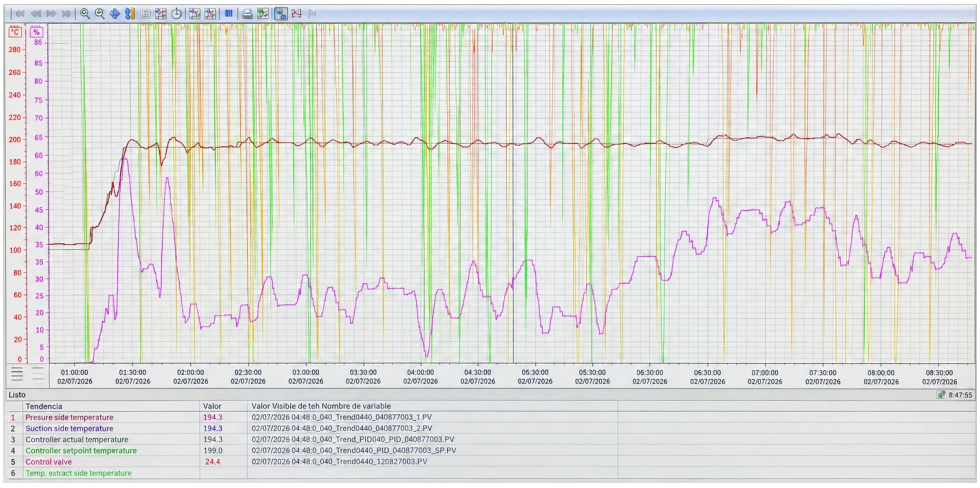
Figura P.11. Pantalla de proceso del secador AK1 (2 de julio de 2026): temperaturas de las secciones 1, 2 y 3 (BT7001, BT7002 y BT7003) y suministro del sistema de calentamiento (BP8001). Fuente: sistema de control Grenzebach de Planta Plywood, fotografía propia procesada digitalmente.



(a) Zona 1.



(b) Zona 2.



(c) Zona 3.

Figura P.12. Tendencias de temperatura de las zonas 1, 2 y 3 del secador AK1 entre la 01:00 y las 08:45 del 2 de julio de 2026. Fuente: sistema de control Grenzebach de Planta Plywood, fotografías propias procesadas digitalmente.

Tabla P.11. Transformación funcional del sistema AK1.

Aspecto	Condición actual	Condición propuesta	Efecto
Aireadores	Siete líneas térmicamente activas	Eliminación funcional	Suprime rutas no controladas
Drenaje	Subterráneo y poco inspeccionable	Línea aérea de 55 m	Mejora acceso y detección
Descarga	Válvulas manuales con cierre deficiente	Cuatro estaciones de trampeo	Evacúa condensado y restringe vapor
Retorno	Posible flujo inverso	Válvulas check	Evita retorno hacia los puntos

P.7 Separación de gotas

Complementa la Sección 3.8.

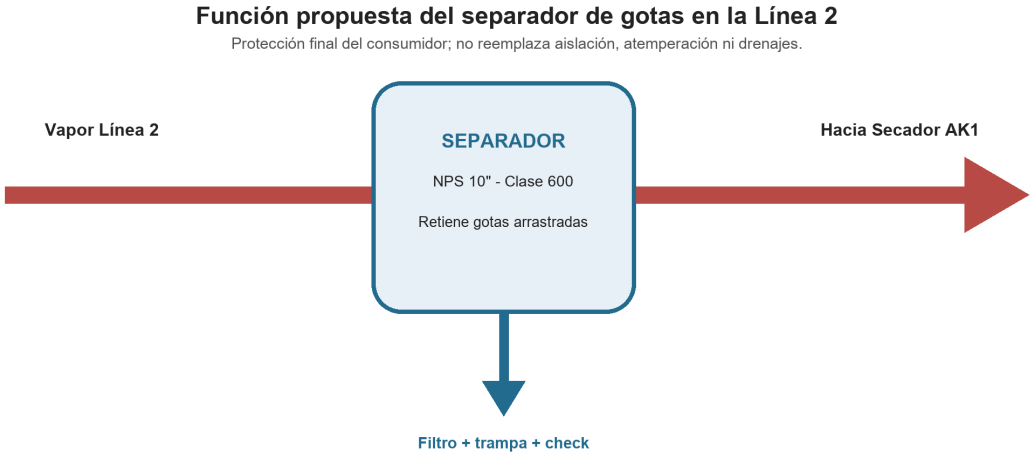


Figura P.13. Función propuesta del separador de gotas en la Línea 2. Fuente: elaboración propia.

P.8 Instrumentación y P&ID

Complementa la Sección 3.9.

Tabla P.12. Flujo de formalización documental de referencia.

Etapa	Alcance	Resultado
Levantamiento	Confirmar ubicación, rango y conexión de 42 PI	Listado trazable por TAG
Red-line	Incorporar 26 instrumentos y etiquetar 16 existentes	Plano marcado
Revisión	Validar nomenclatura y coherencia de proceso	Comentarios cerrados
Emisión	Actualizar revisión y registro de cambios	P&ID oficial controlado

Tabla P.13. Alcance de la normalización del drenaje.

Acción	Criterio técnico	Validación
Definir conexión final	Sentido de flujo, pendiente y frontera del sistema	Revisión de ingeniería
Reubicar la derivación	No comprometer el diferencial de la trampa	Presión antes y después
Revisar o cambiar trampa	Capacidad para drenaje de separador	Ciclo de descarga estable
Actualizar P&ID	Representar configuración ejecutada	Emisión controlada

Tabla P.14. Comparación funcional del drenaje del separador VC1-SEP-009.

Elemento	Según P&ID	Condición en terreno	Implicancia
Línea 210-C02-6008-40	Conexión aguas abajo del conjunto de trampeo	Conexión antes del conjunto	Modifica la ruta hidráulica representada
Conjunto válvula-filtro-trampa	Recibe el drenaje del separador y controla la descarga	Puede recibir carga adicional desde el tramo conectado	Riesgo de inundación o descarga inestable
Separador VC1-SEP-009	Evacuación controlada de líquido separado	Operación condicionada por la conexión real	Posible reducción de capacidad efectiva de drenaje
Documentación	Filosofía coherente con el diseño	No representa el montaje actual	Dificulta diagnóstico y maniobras

P.9 Consumo específico aparente

Complementa la Sección 3.10.

Tabla P.15. Información utilizada para evaluar el desempeño operacional.

Información	Unidad	Resolución	Cobertura
Vapor suministrado por CELPAC, Líneas 1 y 2	t/día	Diaria	181 días
Vapor registrado en Plywood, Líneas 1 y 2	t/día	Diaria	181 días
Producción de chapa por centro	m^3/día	Diaria	181 días
Asignación de centros por línea	L1/L2	Según operación	Enero-junio 2026

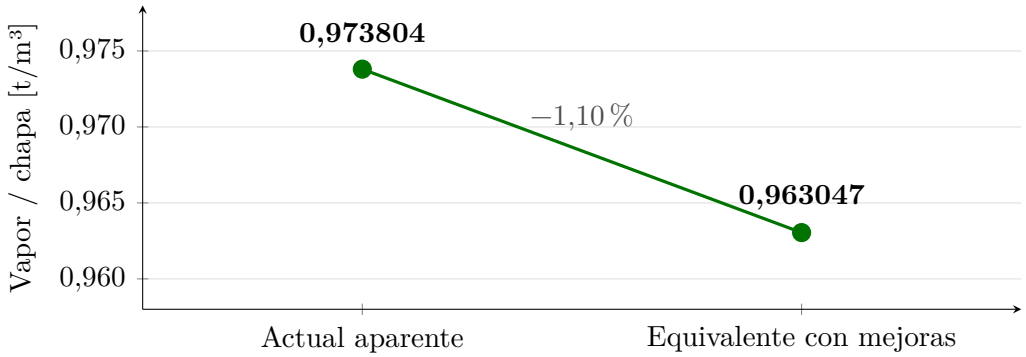


Figura P.14. Comparación del consumo específico aparente con la normalización energética integrada. Eje vertical ampliado; reducción referencial de 1,10 %. Fuente: elaboración propia.

P.10 Evaluación integrada y cierre

Complementa la Sección 3.11.

Tabla P.16. Síntesis final de decisión, inversión y efecto esperado.

Propuesta	Decisión	Inversión disponible	Resultado esperado	Confirmación
Soportación	Intervenir y revisar tramo	Pendiente	Movimiento térmico controlado	Ingeniería + inspección caliente
Aislación	Ejecutar por prioridad	14.741.857 CLP	2.359,74 t/año equivalentes	Termografía posterior
Mantos	Priorizar Línea 2	16.325,89 USD	1.289,49 t/año equivalentes	Temperatura superficial
Atemperación	Medir y reubicar; evaluar tecnología	Pendiente	Evaporación y control verificables	Datos sincronizados
AK1	Ejecutar proyecto	19.495,74 USD	2.074,8 t/año paramétricas	Medición de descarga
P&ID/montaje	42 PI formalizados; corregir drenaje	Por completar	Trazabilidad incorporada; mejora de drenaje propuesta	Plano emitido y prueba funcional
Trampas	Recambio ejecutado el 28-07-2026; mantener y verificar	32.960,69 USD cotizados	957,6 t/año paramétricas + drenaje restituido	Ultrasonido/ termografía bajo condiciones comparables
Separador L2	Ingeniería y medición antes de compra	83.300 USD	Protección de AK1	Condensado capturado

Tabla P.17. Criterio de aceptación y evidencia asociada por medida propuesta.

Medida	Criterio que define la aceptación	Evidencia
Soportación	Contacto uniforme, eje alineado con la expansión y escurrimiento hacia el drenaje definido	Cotas frío/caliente y clasificación en plano
Aislación y mantos	Continuidad térmica sin discontinuidades y acceso conservado para mantenimiento	Termografía comparable y registro por TAG
Atemperación	Señal de caudal coherente con el balance EES y ausencia de impacto en el primer codo	Tendencia calibrada y termografía
Trampas	Descarga de condensado sin soplado continuo en los 11 puntos intervenidos	Ultrasonido y temperatura por TAG
AK1	Ninguna descarga con firma térmica compatible con paso permanente de vapor	Termografía antes–después y aforo
Separador	Condensado capturado sin vapor continuo y contrapresión compatible con la trampa	Balance temporal y presión aguas abajo
Documentación	P&ID conforme a terreno, con TAG unívoco en cada elemento	Plano emitido y verificación en planta

Tabla P.18. Evidencias mínimas para el cierre técnico de las propuestas.

Etapa	Evidencia requerida	Resultado de cierre
Puesta en servicio	Protocolo de montaje, estanqueidad y funcionamiento	Intervención operativa y segura
Verificación	Termografía, caudales, presiones y temperaturas comparables	Efecto técnico confirmado
Documentación	P&ID, TAG, planos y fichas actualizados	Configuración trazable
Mantenimiento	Frecuencias, responsables y criterios de aceptación	Desempeño sostenible
Cierre económico	Beneficio medido y CAPEX final conciliado	Payback actualizado

Anexo Q Registro previo a la corrección de señales de atemperación

Estas capturas complementan la Sección 3.5 y conservan el estado previo de TIT2114 y PIT2116. Según los antecedentes del levantamiento, ambas señales fueron intervenidas y corregidas durante el estudio. Las imágenes no son entradas del balance EES ni sustituyen el registro de calibración y la verificación posterior. La medición del caudal de inyección sigue pendiente.

Q.1 Tendencia de temperatura TIT2114

La traza es prácticamente horizontal en la zona inferior del gráfico. No se asigna una temperatura numérica ni se interpreta como temperatura real del condensado de inyección: la resolución no permite transcribir valores y fechas con precisión suficiente.

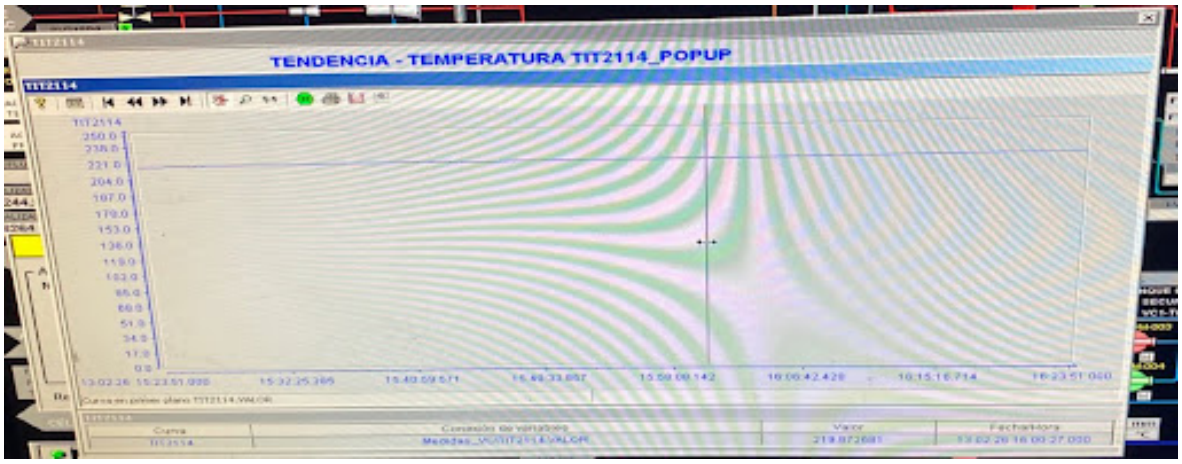


Figura Q.1. Señal TIT2114 antes de su corrección. Fotografía original, sin reconstrucción de datos. Fuente: levantamiento en planta.

Q.2 Tendencia de presión PIT2116

Se observan variaciones rápidas y cambios de nivel. La tendencia no distingue por sí sola una perturbación real de una falla instrumental; el antecedente de corrección procede de la intervención informada en planta.

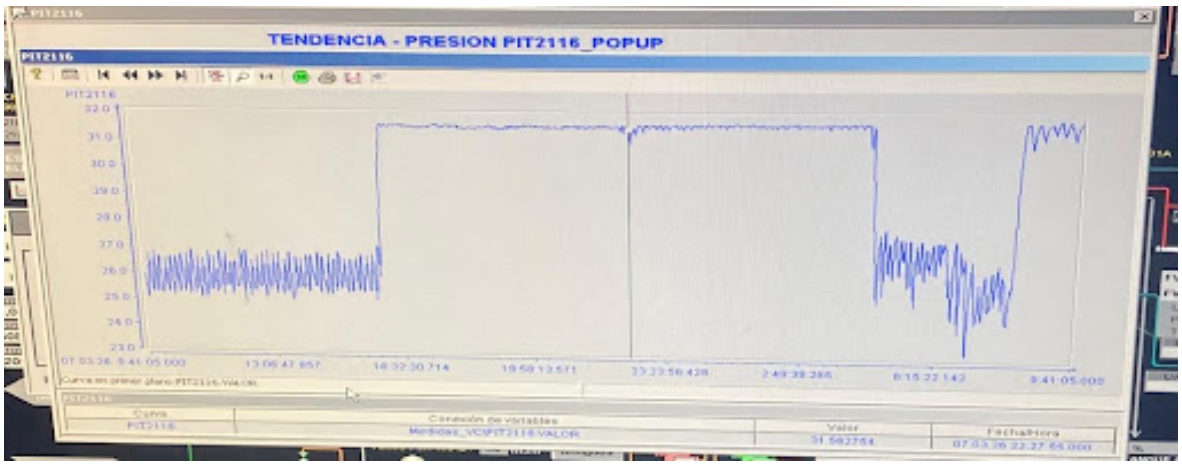


Figura Q.2. Señal PIT2116 antes de su corrección. Se conservan la traza y las escalas originales. Fuente: levantamiento en planta.