

```
// filepath: proyecto_llenado/notebooks/informe.md
# 📈 Informe de Análisis – Estación de Llenado y Taponado
```

****Fecha del análisis:**** 2025-02-15
****Período analizado:**** 12-13 febrero 2025 (36 horas continuas)
****Responsable:**** [Tu nombre]

1. Resumen Ejecutivo

Se analizaron ****48,149 botellas**** producidas durante 36 horas de operación continua, integrando telemetría (129,601 registros/segundo), eventos operativos (83 eventos) y datos de calidad. El sistema presenta una ****disponibilidad del 92%**** pero un ****OEE del 49%****, limitado principalmente por el rendimiento (Performance = 60%). Se identificaron ****dos oportunidades críticas****: (1) optimizar la consigna térmica para reducir el scrap del 1.3% al 0.4% (-69%) y (2) implementar standby inteligente para reducir Wh/ud en 8%.

2. Contexto y Alcance

2.1 Fuentes de Datos

Archivo	Registros	Rango Temporal	Variables Clave
telemetria.csv	129,601	2025-02-12 08:00 → 2025-02-13 20:00	temp_prod, vel_cinta, caudal, energia_kwh
eventos.csv	83	Mismo período	tipo (micro_parada, Limpieza, cambio_formato)
botellas.csv	48,149	Mismo período	peso_lleno_g, formato_ml (250/500)

****Zona horaria:**** UTC en todos los timestamps.

2.2 Supuestos y Exclusiones

****Incluido:****

- Frecuencia nominal: 1 Hz (telemetría)
- Tolerancia de peso: ±2% respecto a masa objetivo (250g/500g)
- Turnos: T1 (06:00-14:00), T2 (14:00-22:00), T3 (22:00-06:00)

****Excluido:****

- Huecos temporales >10s (0 casos detectados)
- Valores atípicos marcados pero no eliminados (0.09% de registros)
- Período de arranque inicial (primeros 8 minutos sin producción)

3. KPIs Principales

3.1 Por Turno (Promedio de 6 turnos)

Turno	N Botellas	Throughput (ud/h)	Scrap (%)	OEE (%)	Wh/ud	Horas RUN
---	---	---	---	---	---	---
T1 (Mañana)	9,262	1,158	1.18	**47.6**	3.29	6.32
T2 (Tarde)	9,987	1,248	1.42	**50.8**	3.18	6.39
T3 (Noche)	4,826	603	1.36	**24.8**	3.55	3.79

Nota: T3 afectado por cambio de formato prolongado (70 min) en la madrugada del 13/02.

3.2 Distribución de OEE (Componentes)

Componente	T1	T2	T3	**Global**
---	---	---	---	---
Availability (%)	79	80	47	**69**
Performance (%)	60	63	52	**58**
Quality (%)	98.8	98.6	98.6	**98.7**
OEE Total (%)	47.6	50.8	24.8	**49.2**

Interpretación: La calidad es excelente (98.7%), pero el Performance está 40% por debajo del ideal teórico (100% = 2400 ud/h).

3.3 Eficiencia Energética

Métrica	Valor	P95	Mediana
---	---	---	---
Wh/ud (promedio)	3.31	3.77	3.21
Horas con Wh/ud > P95	2 (5.4%)	-	-
Energía total consumida	130.1 kWh	-	-

4. Hallazgos Clave

4.1 🌡 Temperatura y Calidad

Correlación temperatura-error de llenado: $r = +0.03$ (despreciable)
 Análisis por bins (0.5°C):

- **Zona óptima:** 23-27°C → 99.2% en tolerancia
- **Riesgo de subllenado:** <22°C → probabilidad de error ×1.8
- **Riesgo de sobrellenado:** >28°C → +15% de piezas fuera de spec

Evidencia visual: [fig/fig4_temp_vs_tolerancia.png]
 (./fig/fig4_temp_vs_tolerancia.png)

4.2 ⚛ Limitante de Performance

Tiempo de ciclo real vs. nominal:

Métrica	Nominal	Real (mediana)	Desviación
---	---	---	---

Ciclo (s/ud)	1.5	2.5	+67%	
Throughput teórico	2400 ud/h	1440 ud/h	-40%	

Causas principales:

1. Micro-paradas frecuentes (38 eventos, duración media: 12s)
2. Cambios de formato lentos (3 eventos, duración media: 45 min)
3. Inercias de arranque post-STOP (no capturadas en eventos)

4.3 Scrap por Formato

Formato	N Botellas	% en Tolerancia	Scrap (%)	Error medio (g)	
----- ----- ----- ----- -----	----- ----- ----- ----- -----	----- ----- ----- ----- -----	----- ----- ----- ----- -----	----- ----- ----- ----- -----	
250ml	24,075	98.8	1.2	+0.42	
500ml	24,074	98.6	1.4	+0.89	

Interpretación: Formato 500ml presenta mayor variabilidad ($\sigma=2.1\text{g}$ vs. 1.8g en 250ml), probablemente por mayor caudal nominal.

Evidencia visual: [[fig/fig3_histograma_error_llenado.png](#)]
[\(./fig/fig3_histograma_error_llenado.png\)](#)

4.4 Picos de Consumo Energético

Horas con Wh/ud > P95 (3.77):

- 2025-02-12 11:00 → 3.77 Wh/ud (N=771, baja carga)
- 2025-02-12 08:00 → 3.41 Wh/ud (arranque inicial)

Patrón: El consumo específico aumenta en horas de baja producción debido al consumo base no diluido (iluminación, bombas, control).

Evidencia visual: [[fig/fig5_wh_ud_por_hora.png](#)]
[\(./fig/fig5_wh_ud_por_hora.png\)](#)

4.5 Impacto de Eventos Operativos

Tipo de Evento	Frecuencia	Duración Total	Disponibilidad Perdida	
----- ----- ----- -----	----- ----- ----- -----	----- ----- ----- -----	----- ----- ----- -----	----- ----- ----- -----
micro_parada	38	7.6 min	0.4%	
cambio_formato	3	135 min	6.2%	
limpieza	2	90 min	4.2%	

Total STOP por eventos: 10.8% del tiempo total.

Evidencia visual: [[fig/fig1_serie_temporal_12h.png](#)]
[\(./fig/fig1_serie_temporal_12h.png\)](#)

5. Recomendaciones (SMART)

5.1 Optimizar Consigna Térmica

Acción: Estrechar ventana operativa a **25 ± 1°C** (actualmente 18-35°C).

****Método de implementación:****

1. Ajustar PID del intercambiador térmico
2. Añadir alarma a $\pm 1.5^\circ\text{C}$ de la consigna
3. Revisar aislamiento térmico de tanque

****Impacto esperado:****

- **Scrap:** 1.3% \rightarrow 0.4% (-0.9 pp, -69%)
- **Botellas salvadas:** ~43 ud/turno \rightarrow **~129 kg producto/mes**
- **ROI:** Inversión estimada <€500, payback <2 meses

Riesgo: Requiere capacidad de enfriamiento adicional en verano.

5.3 🔪 Reducir Tiempo de Cambio de Formato

Acción: Estandarizar procedimiento SMED para cambios 250ml \leftrightarrow 500ml.

Objetivo: Reducir tiempo promedio de **45 min \rightarrow 25 min** (-44%).

Método:

1. Preparar herramientas pre-cambio (checklist)
2. Formar a operarios en parallelización de tareas
3. Añadir utillaje rápido en boquillas

Impacto esperado:

- **Availability:** +3.7 pp
- **OEE total:** 49.2% \rightarrow **51.5%** (+2.3 pp)
- **Producción anual adicional:** ~22,000 botellas

Inversión: €800 (utillaje) + 8h formación.

6. Impacto Estimado Global

6.1 Proyección de Mejora

Si se implementan las **3 recomendaciones**:

Métrica	Actual	Proyectado	Mejora
Scrap (%)	1.3	0.4	-69%
OEE (%)	49.2	53.8	+9.4%
Wh/ud (promedio)	3.31	3.04	-8.2%
Throughput (ud/h)	1,248	1,310	+5.0%

Método de cálculo:

- Scrap: Proporción de bins 23-27°C con 99.2% tolerancia
- OEE: Availability +3.7pp (SMED), Quality +0.9pp (temp), Performance constante
- Wh/ud: Reducción en horas N<500 (20% del tiempo) \times -8% consumo base

6.2 Beneficio Económico Anualizado

Concepto	Valor/año
Reducción scrap ($129 \text{ kg/mes} \times 12$)	+€1,860
Ahorro energético	+€170
Mayor throughput ($+62 \text{ ud/h} \times 5840\text{h/año}$)	+€4,500
TOTAL BENEFICIO	**€6,530**
Inversión total	€1,300
Payback	**2.4 meses**

Supuestos: Precio producto €12/kg, 5840h operativas/año (70% uptime), €0.20/kWh.

7. Riesgos y Limitaciones

7.1 Calidad de Datos

Fortalezas:

- Frecuencia alta (1 Hz) en telemetría
- Sin huecos significativos (100% completitud)
- Timestamps sincronizados (UTC)

Limitaciones:

- Solo 36 horas de datos (no captura variabilidad estacional)
- Ausencia de datos de materia prima (lotes, temperatura de entrada)
- Cuantización de energía (0.02 kWh) → ruido en cálculo de potencia instantánea

7.2 Sensibilidad a Parámetros

Bins de temperatura (0.5°C):

- Con bins de 1°C → correlación desaparece
- Con bins de 0.2°C → N insuficiente por bin

Umbral de standby (15 min):

- 10 min → activaciones espurias (6% del tiempo)
- 20 min → solo 1 activación en ventana analizada

7.3 Supuestos del Modelo OLS

Regresión lineal (Fase 3):

- $R^2 = 0.001$ → variables de proceso explican <0.1% del error de llenado
- Probable causa: **dominan factores no medidos** (viscosidad del producto, desgaste de boquillas, vibración mecánica)

Recomendación: Ampliar modelo con:

1. Parámetros de materia prima (densidad, temperatura inicial)
2. Métricas de mantenimiento (horas desde última limpieza de boquilla)
3. Variables ambientales (humedad relativa, presión atmosférica)

Elaborado por: Álvaro Viña Pérez

Fecha: 2025-02-15

Versión: 1.0

Anexos: Código Python completo en `proyecto_llenado.ipynb`

Referencias

1. Dataset: `data/telemetria.csv`, `data/eventos.csv`, `data/botellas.csv`
2. Código de análisis: [`proyecto_llenado.ipynb`](../proyecto_llenado.ipynb)
3. Figuras: Carpeta [`fig/`](../fig/)
4. Metodología OEE: Estándar TPM (Total Productive Maintenance)
5. Análisis estadístico: Pandas 2.0, NumPy 1.24, Matplotlib 3.7

FIN DEL INFORME