

Adrián Fernández Córdoba

**Control de variables energéticas por producto.
Aplicación del estándar corporativo eSplit a la máquina
de papel tisú número 6 en Essity Valls.**

**Trabajo Final de Máster
dirigido por David Álvarez Campos y Enric Chesé Macías**

Máster en Ingeniería Industrial



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Tarragona

2024

Índice

1	Memoria	7
1.1	Objeto.....	7
1.2	Alcance	7
1.3	Antecedentes.....	7
1.4	Normas y referencias.....	8
1.4.1	Disposiciones legales y normas	8
1.4.2	Programas de cálculo	8
1.4.2.1	DCS.....	8
1.4.2.2	Software A.....	8
1.4.2.3	Software B.....	9
1.4.2.4	Software C.....	9
1.4.3	Plan de gestión de calidad aplicado	9
1.4.4	Bibliografía	9
1.4.5	Otras referencias	9
1.5	Definiciones y abreviaturas	10
1.5.1	Abreviaturas.....	10
1.5.2	Definiciones.....	10
1.6	Requisitos de diseño.....	12
1.6.1	Adecuación al proceso productivo.....	12
1.6.1.1	El papel tisú	12
1.6.1.2	El proceso papelerero	13
1.6.1.2.1	Materias primas.....	14
1.6.1.2.2	Pulpeado	15
1.6.1.2.3	Preparación de pasta	15
1.6.1.2.3.1	Depuración de pasta.....	15
1.6.1.2.3.2	Refinado.....	16
1.6.1.2.3.3	Mezcla de rotos y tinas de máquina	17
1.6.1.2.4	Fan pumps.....	17
1.6.1.2.5	Máquina de papel.....	18
1.6.1.2.5.1	Formación del papel	18
1.6.1.2.5.2	Prensado	19
1.6.1.2.5.3	Secado	19
1.6.1.2.5.4	Crepado	20
1.6.1.2.5.5	Bobinado	21

1.6.1.2.6	Líneas de conversión	21
1.6.2	Adecuación al estándar eSplit	22
1.7	Análisis de soluciones	23
1.8	Resultados finales	23
1.8.1	Fase 1. eSplit 1.0 sobre DCS	23
1.8.1.1	Contenido eSplit 1.0	23
1.8.1.2	Límites energéticos.....	26
1.8.2	Fase 2. Score card de cumplimiento	29
1.8.2.1	Pantalla diaria score card	29
1.8.2.2	Modo de consulta de datos.....	30
1.8.2.2.1	Pantalla de datos en crudo	30
1.8.2.2.2	Pantalla de serie temporal.....	30
1.8.3	Fase 3. eSplit 2.0 sobre Software B	31
1.8.3.1	Contenido eSplit 2.0	31
1.8.3.2	Energía específica.....	35
1.8.4	Fase 4. Recomendaciones instrumentación	36
1.9	Planificación.....	37
2	Anexos.....	38
2.1	Documentación inicial	38
2.1.1	Listado cargas	38
2.1.2	eSplit 1.0 en FBD.....	38
2.1.3	Esquemas unifilares baja tensión.....	38
2.1.4	Diagrama de proceso	38
2.2	Cálculos.....	39
2.2.1	Fase 1. eSplit 1.0 sobre DCS	39
2.2.1.1	Cálculos tipo	39
2.2.1.2	Establecimiento de límites	40
2.2.2	Fase 2. Scorecard de cumplimiento	42
2.2.3	Fase 3. eSplit 2.0 sobre el software B	42
2.2.3.1	Cálculo de potencias por categorías	42
2.2.3.1.1	Calculos tipo	42
2.2.3.1.2	Código para el software B por categorías.....	44
2.2.3.1.2.1	Gas total.....	44
2.2.3.1.2.2	Gas campana	44
2.2.3.1.2.3	Gas caldera.....	44
2.2.3.1.2.4	Electricidad total.....	44
2.2.3.1.2.5	Aproximación de pasta.....	44
2.2.3.1.2.6	Accionamientos máquina papel.....	44

2.2.3.1.2.7	Vacío.....	45
2.2.3.1.2.8	Electricidad campana.....	45
2.2.3.1.2.9	Preparación de pasta.....	46
2.2.3.1.2.10	Extracción de polvo.....	46
2.2.3.1.2.11	Ventilación y refrigeración.....	47
2.2.3.1.2.12	Iluminación.....	47
2.2.3.1.2.13	Condensados.....	48
2.2.3.1.2.14	Compresores.....	48
2.2.3.1.2.15	Rotos.....	48
2.2.3.1.2.16	Pulpeado.....	49
2.2.3.1.2.17	Otros.....	49
2.2.3.2	Cálculo de energía específica.....	50
3	Planos.....	51
4	Presupuesto.....	52

NOTA: este proyecto se ha elaborado bajo un acuerdo de confidencialidad entre la empresa Essity Spain SL (Unipersonal) y la Universitat Rovira i Virgili. Para proteger los intereses de la empresa se han modificado arbitrariamente nombres o datos numéricos y se han eliminado algunas secciones que no podían hacerse públicas (esquemas, planos, figuras...).

1 Memoria

1.1 Objeto

El objeto del proyecto es desarrollar una herramienta para monitorizar el consumo energético (electricidad y gas) del proceso de producción de papel tisú en la máquina de papel 6 (PM6) de Essity en Puigpelat según el estándar corporativo eSplit. Según este estándar, la monitorización de consumo se seguirá por categorías (tracción de máquina, preparación de pasta, tratamiento de aguas...) y con límites superiores de aviso distintos para los diferentes tipos de papel producidos (que usan distintas condiciones de proceso). Gracias a su formato normalizado a nivel corporativo, sirve como report energético para la central.

El objetivo último es que el equipo de producción (ingenieros de proceso, mantenimiento...) pueda priorizar la reducción del consumo en las áreas de mayor impacto y detecte problemas incipientes a través del consumo energético (anormalmente elevado o reducido por incidencias en el proceso).

1.2 Alcance

El proyecto se limita al consumo de gas natural y potencia eléctrica activa de la máquina de papel seis de Essity en la planta de Puigpelat y su proceso de soporte directo. Aunque se requiere para su operación, se excluye el consumo energético de la estación de depuración de aguas residuales (EDAR) del complejo industrial. Se emplea sólo la instrumentación disponible en el momento de redacción del proyecto, estimando el resto de los consumos. Se establecen cuatro fases de proyecto:

1. Uso del esquema de cálculo de potencias preexistente (denominado eSplit 1.0 en el contexto de este proyecto) para establecer límites superiores de potencia en kW a modo de prueba de concepto (en inglés: *proof of concept*).
2. Desarrollo de un tablero de consulta de consumos en formato scorecard (porcentaje de cumplimiento de límites) fácilmente accesible para el usuario final.
3. Modificación del esquema de cálculo (denominado eSplit 2.0 en el contexto de este proyecto, más cercano a la realidad del proceso y recogiendo datos más allá de las categorías estrictamente requeridas) y cálculo de energía específica (kWh/t_{neto}).
4. Propuesta de mejora de la instrumentación (priorizada según la magnitud relativa de las potencias).

En este proyecto se ejecutan las fases 1 y 2 y se proyectan las fases 3 y 4 sin ejecutarlas.

1.3 Antecedentes

En 2021, antes de que fuese requerido por la compañía, el departamento de sistemas lanzó en la planta de Puigpelat el estándar eSplit 1.0 como continuación del proyecto eSave que monitorizaba el consumo de los motores y quemadores de gas natural de mayor potencia de la planta. El proyecto eSplit 1.0 tomó las señales analógicas de potencia (o asimilables como corriente eléctrica o caudal de gas natural), añadió nuevas y las agrupó en las categorías que exige el estándar corporativo eSplit de la comisión interna HMex (Hygiene Manufacturing

Excellence, véase la sección 1.6.2). Tal como establece el estándar, los valores de potencia instantánea recogidos se segregaron según el tipo de papel tisú producido en ese momento.

Los cálculos se programaron directamente en el servidor central del sistema de control distribuido (DCS) de la planta para tener estas potencias disponibles en las pantallas de control usadas por los operadores. Sin embargo, la mayoría de las señales nunca son consultadas por los operadores y, además, no se definieron límites superiores por lo que el proyecto fracasó como herramienta de monitorización de consumo energético.

En 2024, la compañía pasa a exigir a todas las plantas la implementación de este estándar de monitorización de energía como herramienta de control a nivel de planta y para poder comparar los consumos de producción entre diferentes plantas del mundo. Por ello, se retoma su desarrollo, esta vez gestionado desde el equipo de proceso, que será mucho más ágil a la hora de reflejar nuevos equipos o límites energéticos tras realizar cambios en el proceso productivo. Además, se plantea la migración del cálculo fuera del sistema de control distribuido, para reservar sus recursos estrictamente al control y automatización del proceso.

1.4 Normas y referencias

1.4.1 Disposiciones legales y normas

Normas:

- UNE 157001 Criterios generales para la elaboración formal de los documentos que constituyen un proyecto técnico.

Normas internas:

- Estándar eSplit del 10 de mayo de 2021 por la comisión de Hygiene Manufacturing Excellence (HMEEx) de Essity [1].

1.4.2 Programas de cálculo

1.4.2.1 DCS

El sistema de control distribuido (DCS) presente en la PM6 se basa en un controlador tipo X de la compañía Y. El sistema opera en base a un ordenador central que se comunica con los instrumentos a través de armarios de remotación distribuidos por la planta (con entradas y salidas analógicas y digitales). En el controlador, es posible realizar cálculos aritméticos y booleanos para ejecutar acciones de automatización programada, simular la acción de un controlador PID o para ejecutar los cálculos que dan pie a este proyecto. Sin embargo, su potencia de cálculo debería reservarse para ejecutar las acciones de control esenciales para la operación del proceso, externalizando el máximo de cálculos secundarias posibles.

1.4.2.2 Software A

El software A es un software desarrollado por la compañía B. Permite crear un sistema de ejecución de la producción (en inglés: Manufacturing Execution System, MES) que facilita y potencia las operaciones productivas. En la planta de Puigpelat se usa para seguir la producción en términos de planificación, proceso y calidad. En lo que respecta a este proyecto, es la herramienta usada para capturar los datos de potencia provenientes del sistema de control y ejecutar cálculos que tienen en cuenta la producción real neta de la máquina de papel (hasta el nivel de bobinas de papel individuales). También es la herramienta usada para establecer límites superiores a los valores recogidos.

1.4.2.3 Software B

El software B es una herramienta desarrollada por la compañía B. Permite recoger, almacenar y analizar datos de operaciones industriales en formato de series temporales (eje de abscisas temporal) con un tiempo entre muestreos mínimo de 10 ms.

Las variables mostradas pueden ser en realidad cálculos (ejecutados en el mismo software B con la potencia de cálculo de un servidor externo) a partir de otras variables. Esto se aprovecha en este proyecto para calcular las potencias de cada categoría con esta herramienta, liberando al sistema de control de esta tarea. El software B no permite establecer límites en las variables, de forma que esta tarea se sigue ejecutando en el software A.

1.4.2.4 Software C

Es un sistema de análisis empresarial desarrollado por la compañía C que permite mostrar datos en forma de visualizaciones interactivas. Su herramienta de diseño y desarrollo es lo suficientemente sencilla para permitir a los usuarios finales desarrollar sus propios informes. En este proyecto, se usa para crear el panel score card de cumplimiento de límites energéticos a partir de los datos recogidos en el software A y sus límites energéticos.

1.4.3 Plan de gestión de calidad aplicado

La calidad de los límites superiores de consumo propuestos en las fases 1 y 2 del proyecto se ha validado bajo el siguiente criterio analizando datos de múltiples producciones consideradas "normales" (velocidad nominal, sin incidencias destacables en ningún equipo):

- El consumo ha estado menos de un 85% del tiempo dentro de los límites establecidos: el límite es demasiado estricto o hay alguna desviación en el proceso (es tarea del ingeniero discernir entre los dos casos). Si el límite es verdaderamente demasiado estricto se modifica.
- El consumo ha estado dentro de límites entre un 85% y un 100% del tiempo (100% excluido). El límite es adecuado: recoge bien el promedio de consumo y su variabilidad natural.
- El consumo ha estado dentro de límites el 100 % del tiempo. El límite superior es demasiado laxo o hay alguna alteración en el proceso (es tarea del ingeniero discernir entre los dos casos). Si el límite es verdaderamente demasiado laxo se procede a modificarlo.

1.4.4 Bibliografía

Por la naturaleza del proyecto no se han consultado referencias bibliográficas tradicionales.

1.4.5 Otras referencias

- [1] Hygiene Manufacturing Excellence, «Energy Efficiency of PMs,» 10 05 2021. [En línea]. Available: <https://sca.sharepoint.com/sites/COMM-GMWIKI/SitePages/NF-KPIs-PM%20Loss%20Tree%20and%20Loss%20Calculation.aspx#energy-efficiency-of-pms-is-split-by-sub-processes-and-major-consumers>. [Último acceso: 31 Agosto 2024].
- [2] Valls Mill, Curso de tecnología del tissue. YPE & GO! Program, Valls: SCA, 2014.
- [3] Mordor Intelligence, «Tisse paper market size: report on industry size & market share analysis - growth trends & forecasts (2024-2029),» 2024. [En línea].

Available: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/global-tissue-paper-market-industry>. [Último acceso: 16 Agosto 2024].

[4] E-informa, «Informe de Essity Spain Sociedad Limitada Unipersonal,» 2024. [En línea]. Available: https://ranking-empresas.economista.es/ranking_empresas_nacional.html. [Último acceso: 16 Agosto 2024].

[5] Brunnschweiler, High velocity hood for yankee cylinder (DuoSystem Cascade type). Operating instructions., 2006.

[6] «How do Variable Speed Drives (VSDs) Work?,» EM Heater®, 11 2020. [En línea]. Available: <https://www.emheater.co.za/blog-vsd-howitworks/>. [Último acceso: 15 Agosto 2024].

1.5 Definiciones y abreviaturas

1.5.1 Abreviaturas

BF	Broke fiber (rotos)
CL	Centerline (valor estándar de proceso)
DCS	Sistema de control distribuido
eSplit	Segregación de energía
FBD	Diagrama de bloques funcionales
FC	Fibra corta
FL	Fibra larga
HMEx	Excelencia en fabricación de productos de higiene
LF	Long fiber (fibra larga)
MPV	Maximum production velocity (max. Velocidad de fabricación)
PCI	Poder calorífico inferior
SB	Software C
PM6	Máquina de papel 6
SA	Software A
SF	Short fiber (fibra corta)
UTM	Under the machine (pulper bajo máquina)

1.5.2 Definiciones

φ	Ángulo de desfase entre tensión y corriente
$E_{\text{específica},i}$	Energía específica (categoría eSplit i)
I	Corriente de línea medida
I_T	Corriente de entrada a VSD

I_{T2}	Corriente de salida de VSD
LRej	Límite inferior de rechazo
LWar	Límite inferior de aviso
$m_{barrada}$	Masa barrada (pareja de bobinas)
$m_{producción}$	Masa producida en 24 h
n	Velocidad angular
n_{max}	Velocidad angular si a frecuencia de red
P	Potencia
q	Caudal volumétrico
TG	Objetivo (target)
URej	Límite superior de rechazo
UWar	Límite superior de aviso
V	Tensión en bornes del equipo

1.6 Requisitos de diseño

1.6.1 Adecuación al proceso productivo

El estándar de cálculo debe adecuarse a la realidad del proceso productivo de la máquina de papel número seis en Puigpelat. En esta sección se ofrece una introducción al proceso con el objetivo de formar al lector para que comprenda fácilmente la estructura de desglose de consumo energético que se desarrolla en el proyecto.

1.6.1.1 El papel tisú

El tisú (del inglés: *tissue* y este a su vez del francés: *tissu*) es un tipo particular de papel ligero fabricado a partir de celulosa virgen o reciclada. Sus características principales son su suavidad, derivada del proceso de crepado (es decir, de cómo se extrae de la sección de secado del proceso) y su bajo gramaje (típicamente por debajo de 25 g/m² por capa). El proceso de crepado también crea micro arrugas en el papel que le dan su volumen y capacidad absorbente característica.

Una sola capa de papel se produce en continuo (24 horas / día) en grandes máquinas como la que es objeto de este trabajo para luego ser convertida en productos finales. El producto final puede contener dos, tres o incluso cuatro capas de papel en su característico formato de pequeños rollos con núcleo de cartón (véase la figura 1).

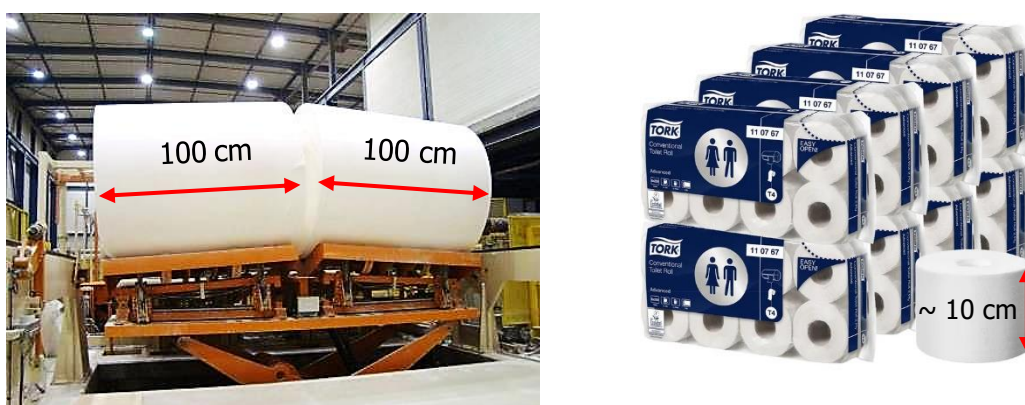


Figura 1. Dos bobinas de papel tal como abandonan la máquina de papel (izquierda) y su resultado como producto acabado (derecha). De la referencia [1] (material interno).

Diferentes tipos de papel tisú, como el papel higiénico o el de cocina se producen en máquinas de papel que tienen algunas diferencias, pero operan bajo los mismos principios: una suspensión muy diluida de pasta de celulosa en agua se inyecta contra una vestidura donde tiene lugar un gran desgote inicial. Luego, la hoja creada es transportada por otra vestidura o vestiduras para ser prensada y secada con el objetivo de rebajar su contenido de humedad hasta el valor final. En la mayoría de las máquinas de papel tisú, el proceso de secado se produce sobre un único rodillo secador de gran tamaño calentado con vapor con la ayuda simultánea de un secado por aire caliente. Al final de la sección de secado, el papel se separa del secador y posteriormente se enrolla en grandes bobinas. Una, dos o incluso tres bobinas pueden ser producidas simultáneamente aumentando la anchura de la maquinaria.

El tamaño del mercado mundial de tisú proyectado para 2024 es de 20 850 millones de USD. Dada la comodidad en su uso, una concienciación creciente sobre la higiene y un poder adquisitivo en aumento en países en desarrollo, se espera que la demanda global de papel tisú siga creciendo durante la década en curso (véase figura 2). Los principales actores en el mercado global son Kimberly-Clark, Georgia Pacific, Procter and Gamble, Kruger y Essity. Essity es propietaria de las ramas de higiene europeas de Procter and Gamble y Georgia Pacific.

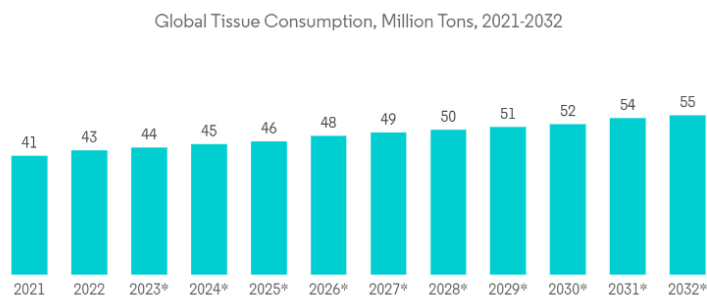


Figura 2. Evolución del mercado global de tisú en la década de 2020. Se espera que la demanda siga creciendo de forma monótona durante lo que queda de década. De la referencia [3].

Essity Spain SL (anteriormente conocida como SCA Hygiene Products) es la filial española de Essity. Con sede en Puigpelat (Tarragona), fue fundada en 1976 y emplea a más de 700 personas. Con unos ingresos de 678 M€ en 2022 (los últimos datos públicamente disponibles) es la empresa que más ingresa de la provincia de Tarragona y la número 350 en España. Su estructura productiva en la península ibérica incluye una planta productiva en Puigpelat, otra de similares dimensiones en Allo (Navarra) y una planta en Telde (Canarias) que sólo convierte papel tisú que importa de la península. Además, la empresa tiene tres oficinas comerciales en Barcelona, Madrid y Lisboa [4].

La compañía produce tisú para uso profesional y doméstico y productos de cuidado personal como pañales y productos de higiene menstrual. Estos productos están en el mercado bajo marcas propias (como Tork), marcas externas (como Colhogar, Tena...) o marcas blancas (como Mercadona, Dia...).

1.6.1.2 El proceso papelero

El proceso papelero es altamente complejo, integrado y eficiente (véase el apéndice 2.1.1. para el diagrama de proceso de la PM6). Las principales partes y equipos del proceso se definen en este apartado y se pueden agrupar en tres grandes bloques (sin considerar la posterior conversión del papel):

- Pulpeado: pasta de celulosa seca que se recibe de distintos puntos del mundo se rehidrata y dispersa en agua en tanques agitados denominados "púlperes". La dispersión creada se conoce como "pasta" de papel.
- Preparación de pasta: la pasta se depura por medios mecánicos y se trata químicamente. Esta sección incluye múltiples tanques de almacenamiento intermedio que brindan seguridad al proceso frente a averías menores y ayudan a uniformizar las propiedades del producto.
- Máquina de papel: su principal propósito es crear una hoja húmeda de papel usando la pasta anterior, escurrirla, secarla y luego enrollar el tisú resultante en grandes bobinas monocapa.

1.6.1.2.1 Materias primas

La materia prima para la producción de papel son distintos tipos de pasta de celulosa seca. La planta de Puigpelat opera sólo con fibra virgen (es decir, no reciclada). Cada tipo de producto (papel higiénico, de cocina, de cocina premium...) contiene una mezcla particular de distintos tipos de celulosa que se conoce como su "receta". La celulosa se recibe en balas, cada una pesando 250 kg que se almacenan en el exterior hasta su consumo. Las balas se entregan envueltas en papel (que también se introduce en el proceso) y en grupos de ocho denominados fardos (unidas por alambre de acero).



Figura 3. Almacenamiento de balas de celulosa en la planta de Puigpelat (izquierda) y estructura interna laminada de las balas (derecha). De la referencia [1].

Existen dos formas generalmente aceptadas para clasificar la pasta de celulosa. Según el tipo de madera de la cual se obtiene [1]:

- **Madera blanda:** la pasta proviene de árboles de madera blanda como el pino o el abeto. Sus fibras son largas y dan al papel la resistencia requerida.
- **Madera dura:** la pasta se obtiene de árboles de madera dura como el eucalipto, el abedul o el roble. Sus fibras son más cortas y ayudan a dar al producto su suavidad característica.

La otra gran clasificación se basa en el tipo de proceso usado para obtener la pasta de celulosa a partir de la madera. Se distinguen tres tipos de pasta de celulosa [1]:

- **Mecánica:** la pasta de celulosa se obtiene de la madera por procedimientos exclusivamente mecánicos (también se aceptan tratamientos térmicos). Este tipo de pasta contiene una mayor cantidad de lignina (el otro gran componente de la madera junto con la celulosa) y como consecuencia no es tan blanca y es propensa a amarillear.
- **Química:** la celulosa se obtiene a partir de madera principalmente por procesos químicos. Esto genera una pasta que tiene un contenido muy bajo de lignina y que, por tanto, es muy blanca y no tiene tendencia a amarillear. Al eliminar la lignina, su proceso de producción es menos eficiente (kg de pasta por kg de madera) lo que la hace más cara.
- **Rotos:** el rechazo producido internamente (por ejemplo, bobinas fuera de especificaciones o recortes de las líneas de conversión aguas abajo en el proceso) se reintroduce en el proceso como medida de reducción de residuos y de control de costes.

1.6.1.2.2 Pulpeado

El pulpeado de la pasta de celulosa seca tiene lugar de forma discontinua en grandes tanques agitados conocidos como púlperes. Estos tienen agitadores muy agresivos y mecánicamente robustos en el fondo que dispersan las balas de celulosa en agua. El pulper de la línea de rotos usa un agitador aún más agresivo ya que el material a dispersar puede contener tubos de cartón o papel de cocina (que no se deshace fácilmente en contacto con el agua, véase la figura 4).

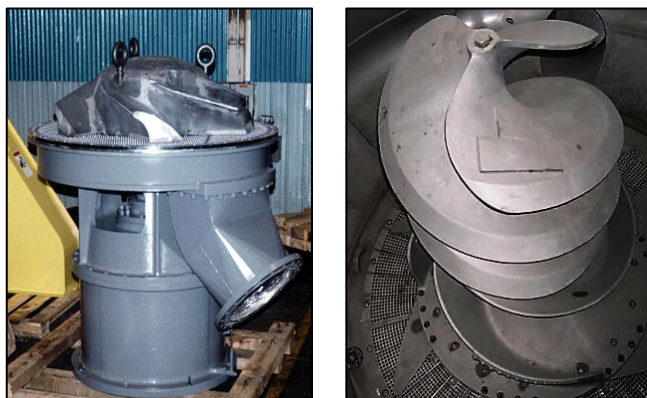


Figura 4. Agitador para los púlperes de fibra virgen (izquierda) y para el pulper de rotos (derecha). De la referencia [1], material de formación interno.

Para ayudar en el proceso de pulpeado y garantizar la estabilidad química del proceso, durante la secuencia de pulpeado se añade sosa cáustica y un cationizador. La corriente resultante contiene un 17% de celulosa en agua y se alimenta directamente a grandes tanques de almacenamiento denominados "torres" (200 m³ para las líneas de fibra virgen y 100 m³ para la línea de rotos) que permiten operar los equipos aguas abajo de forma continua.

1.6.1.2.3 Preparación de pasta

La preparación de pasta comprende las operaciones unitarias a las que se somete la pasta desde la salida del pulper hasta su entrada en la máquina de papel. Tal como se ha sugerido en las secciones anteriores, la PM6 dispone múltiples líneas independientes para la pasta. Esto permite modificar fácilmente las proporciones usadas en cada tipo de producto. Éstas son:

- **Fibra larga:** pasta de celulosa virgen proveniente de maderas blandas.
- **Fibra corta:** pasta de celulosa virgen proveniente de maderas duras.
- **Rotos:** pasta proveniente de producto semielaborado o acabado. Ya que esta pasta no proviene de fibra virgen la topología de esta línea es distinta.

1.6.1.2.3.1 Depuración de pasta

La pasta proveniente de fibra virgen o rotos puede contener contaminantes como astillas de madera, arena o residuos de resina. La manipulación en la planta también puede introducir cuerpos extraños. Uno de los cuerpos extraños más habituales son los alambres de acero que unen las balas de celulosa virgen.

Para eliminar estos cuerpos extraños, a la salida de las torres (primer almacenamiento

tras el pulpeado) la pasta pasa por atrapa alambres (inserciones en la tubería, véase la figura 5, izquierda) y , posteriormente, por hidrociclones para eliminar pequeños contaminantes más densos que la pasta (véase figura 5, derecha).



Figura 5. Barras metálicas de los atrapa alambres extraídas de la línea (izquierda, trabajo propio) e hidrociclones de pasta virgen (derecha, referencia [1]).

La línea de rotos además dispone de despastilladores, que destruyen mecánicamente cualquier grumo o resto de papel sin dispersar. Su nombre proviene del aspecto que tienen estos residuos si llegan hasta el producto final (similar a un comprimido de medicamento).

1.6.1.2.3.2 Refinado

Des de los hidrociclones la fibra virgen fluye directamente hacia los refinos. Como la pasta de la línea de rotos viene de producto acabado y sus fibras ya han sido refinadas, esta operación no se aplica a esta línea (véase el apéndice 2.1.1. para el diagrama de flujo de proceso).

El refinado es una operación unitaria que se usa para aumentar la resistencia mecánica del papel. En los refinos la pasta pasa entre discos ranurados que rotan muy próximos y fibrilan las fibras de celulosa (véase figura 6, izquierda). Las fibras fibriladas (deshilachadas) tienen más extremos disponibles para interactuar con fibras vecinas e incrementan la resistencia del papel resultante (véase figura 6, derecha).

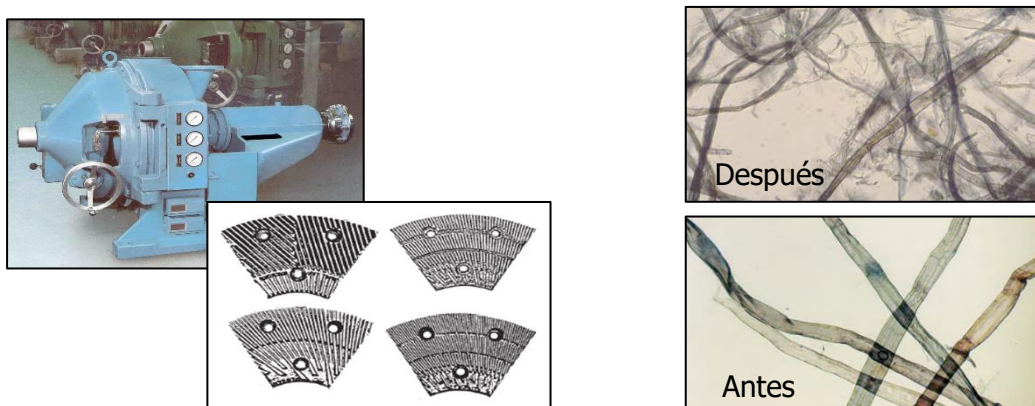


Figura 6. Refino y secciones de disco de refino (izquierda) e imágenes de microscopía óptica de fibras de celulosa antes y después de la operación de refinado (derecha). De la referencia [1].

1.6.1.2.3.3 Mezcla de rotos y tinas de máquina

La pasta refinada de las líneas de fibra virgen del paso anterior se mezcla con la pasta de la línea de rotos en las tinas de mezcla (una por cada línea de fibra virgen). La proporción de rotos y fibra virgen se puede controlar independientemente para cada línea y a voluntad del operador. Bajo la mayoría de las condiciones de operación, esta proporción se fija para conseguir un 1% de material reutilizado en el producto final. Esto garantiza que todos los rechazos generados en la planta se consumen sin acumularse o agotarse.

La pasta luego se bombea hacia el último almacenamiento intermedio antes de entrar en la máquina de papel, las tinas de máquina. Estas tinas (una por cada línea de pasta virgen) son solo de almacenamiento. Si se está produciendo papel de cocina, a su salida se añade un agente de resistencia en húmedo a la pasta. Dado que el agente de resistencia en húmedo es una solución acuosa de un polímero catiónico, también se añade un agente de compensación de carga (polímero aniónico).

1.6.1.2.4 Fan pumps

Hasta este punto en el proceso, la concentración de sólidos de la pasta (conocida como consistencia) se mueve entre 17 y el 7 % (más diluida a medida que la pasta se acerca a la máquina de papel). Para formar una hoja de papel uniforme en todo el ancho de la máquina de papel, se requiere una consistencia de entre 0.1 y 0.5 % [1].

La función de las fan pumps o bombas de mezcla, un tipo particular de bombas centrífugas que generan muy bajas pulsaciones a su salida (para asegurar la uniformidad del papel), es diluir la pasta y enviarla a la sección de formación de la máquina de papel (véase figura 7, izquierda). La corriente diluida resultante excede 10 m³/s por línea de fibra virgen bajo condiciones normales de operación. Esta agua (y la mayoría del agua consumida en el proceso) es agua reciclada internamente. Para evitar que se acumulen sólidos provenientes de la pasta, un dispositivo de flotación separa los sólidos para conseguir agua clarificada con menos de 100 ppm de sólidos totales (véase figura 7, derecha).



Figura 7. Carrete de las fan pumps instaladas en la PM6 (izquierda, de la referencia [1]) y dispositivo de flotación de fibras (derecha, trabajo propio).

Después de las fan pumps existe una última operación de depuración de la pasta para proteger a la máquina de papel. Los depuradores (en inglés: screens) tienen una cesta perforada (orificios de 0.14 mm) y un agitador interno que filtran la pasta y aseguran que no llegan grumos o cuerpos extraños al producto final o a la máquina de papel (véase la figura 8). Los sólidos descartados se pasan por un segundo depurador más estricto que permite recuperar parte de la pasta y reintroducirla en el proceso.



Figura 8. Agitador (en primer plano) y cesta cilíndrica de uno de los depuradores (dentro del equipo). De los archivos de la PM6.

1.6.1.2.5 Máquina de papel

Con la ayuda del proceso de soporte descrito, la máquina de papel crea una hoja de tisú uniforme que puede ser entregada a las líneas de conversión de la planta para crear pequeños rollos de papel higiénico o de cocina. La PM6 en Puigpelat es una máquina de tisú de doble prensa y formador de medialuna (Crescent former) construida por la compañía D en 2007 (véase la figura 9). Este tipo de máquina emplea dos vestiduras: una tela formadora (delgada y permeable a la cual el papel no se adhiere fácilmente) y un fieltro de transporte (grueso y afelpado al cual el papel sí se adhiere fácilmente). La PM6 es una máquina de doble ancho (produce dos bobinas simultáneamente) y puede operar a velocidades de hasta 2400 m/min. A esta velocidad, la hoja de papel se forma, transporta, seca y enrolla en menos de un segundo para producir hasta 2400 toneladas por día.

MATERIAL OCULTO POR CONFIDENCIALIDAD

Figura 9. Vista lateral de la PM6 en Essity Puigpelat. La vestidura verde es la tela y la azul el fieltro. Las partes activas de la máquina, incluidas las vestiduras, tienen 16 m de ancho (en la dirección que entra en el papel) y la máquina tiene una longitud de 250 m. Del proyecto inicial de la PM6.

1.6.1.2.5.1 Formación del papel

Tal como se ha sugerido con anterioridad a lo largo de esta introducción, la hoja de papel se forma a partir de una corriente de pasta muy diluida. La formación del papel tiene

lugar cuando esta corriente sale de la caja de entrada y se proyecta entre los rodillos 5 y 6 (el formador de medialuna) y contra la tela. En este paso tiene lugar un gran desgote de la hoja gracias a la permeabilidad de la tela (véase la figura 10, izquierda). La hoja de papel queda adherida al fieltro para seguir siendo procesada.

La caja de entrada o caja de pasta es el último tramo de tubería que atraviesa la pasta antes de entrar en la máquina de papel. Ésta tiene una sección cuadrada con un área de paso que se reduce progresivamente a medida que se interna en la máquina de papel (para mantener la presión constante). La pasta abandona la caja a través del labio, una ranura esbelta de sección rectangular que ocupa todo el ancho de la máquina (véase la figura 10, derecha). Tal como se puede intuir a partir de las secciones anteriores, dos líneas independientes se introducen en la caja de pasta para producir una sola hoja de papel. Sendas líneas no se mezclan y generan una única hoja bicapa que es mecánicamente resistente (línea de fibra larga) conservando su suavidad (línea de fibra corta). En las líneas de conversión aguas abajo en la planta, los rollos se rebobinan siempre asegurando que la capa suave producida a partir de fibra corta siempre quede orientada hacia el exterior del producto, maximizando la suavidad percibida.

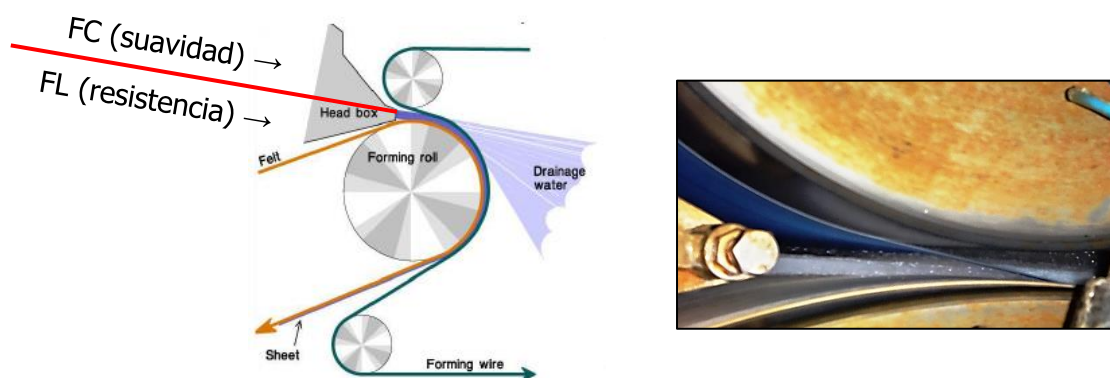


Figura 10. Vista lateral de la sección de formación (izquierda) y chorro de pasta emergiendo del labio de la caja de pasta (derecha). De la referencia [1] (material interno de formación).

1.6.1.2.5.2 Prensado

Tras su formación, la hoja de papel es transportada sin alteración por el fieltro hacia la sección de prensado. En esta parte de la máquina de papel, la hoja y el fieltro se presan juntos contra el rodillo secador para reducir el contenido de agua. La PM6 tiene dos prensas. La primera (en sentido de la producción) es aspirante (rodillo 17, véase la figura 9) y se aplica vacío a bajo su superficie perforada para maximizar la extracción de agua. La segunda prensa, conocida como ciega, aunque su superficie también está perforada (rodillo 2, véase la figura 9), sigue reduciendo el contenido de humedad de la hoja. Con el sistema de doble prensa, la PM6 consigue un contenido de sólidos en la hoja del 35 % (es decir, el 65 % de la hoja es todavía agua).

1.6.1.2.5.3 Secado

Tras el prensado, la hoja húmeda es transferida por el fieltro a la superficie del secador (rodillo 1, véase la figura 9). La hoja se adhiere preferentemente al secador gracias a la capa química que se le pulveriza justo antes de recibir la hoja. La mezcla acuosa que genera la capa contiene tres aditivos con diferentes propósitos:

- **Coating (o pegante):** este químico es el principal responsable de la adhesión de la hoja al secador. Su composición incluye un polímero adhesivo que se desactiva a medida que la hoja se seca para que se pueda separar del secador.
- **Release (o despegante):** Es una mezcla antiadherente basada en esteres de silicona. Durante la fase inicial del secado, el efecto del pegante domina asegurando la adhesión de la hoja al secador. A medida que la humedad disminuye y la temperatura aumenta durante el secado, las propiedades antiadherentes dominan y permiten la separación de la hoja del secador.
- **Fosfatos:** forma un complejo con el hierro de la superficie del secador que evita la corrosión o abrasión de su superficie.

En la mayoría de las máquinas de papel (incluida la PM6), el secado del papel se lleva a cabo con dos sistemas complementarios que actúan simultáneamente: secado por conducción y secado por convección forzada.

El secado por conducción tiene lugar sobre la superficie del secador. Al contrario que la mayoría de las máquinas de papel (cartón, papel para escribir...), las máquinas de tisú usan un solo secador de gran diámetro (15.49 m para la PM6). El secador de la PM6 es de fundición y se calienta introduciendo vapor saturado en su interior, que se transfiere a la hoja por contacto.

El resto del secado se logra en una campana sobre el secador que sopla aire a hasta 750 °C y 700 km/h. Su propósito es doble: proporciona calor extra para secar el papel, pero también es la única vía de salida para el agua proveniente del proceso de secado (véase la figura 11).

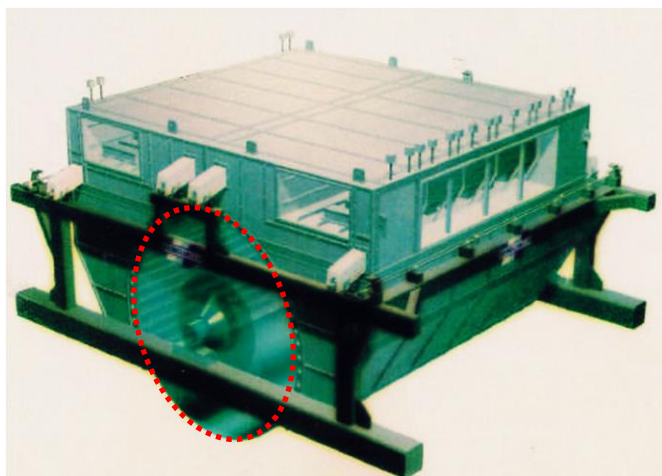


Figura 11. Cilindro secador (resaltado en rojo) y las campanas de soplado que lo cubren. Del manual de operación del sistema de campanas [5].

El contenido de humedad del papel tisú producido por la máquina de papel es medido en continuo por un escáner que barre todo el ancho de la hoja. El sistema de secado es ajustado consecuentemente por sus lazos de control para lograr la humedad objetivo. Las variedades de papel tisú producidas en la PM6 tienen contenidos de humedad entre el 6 y el 6.7 %.

1.6.1.2.5.4 Crepado

Al final del sistema de secado, la hoja de papel tisú es separada de la superficie del secador con la cuchilla de crepar. Si los químicos de recubrimiento del secador tienen el

equilibrio adherente-antiadherente correcto, la cuchilla crea una estructura de pequeñas arrugas denominada crepado (del francés *crêpe*: arrugado). Esta estructura aumenta el volumen y la suavidad del papel. Diferentes ángulos de filo (β) y de porta cuchillas (δ) producen crepados más suaves o bastos (véase la figura 12).

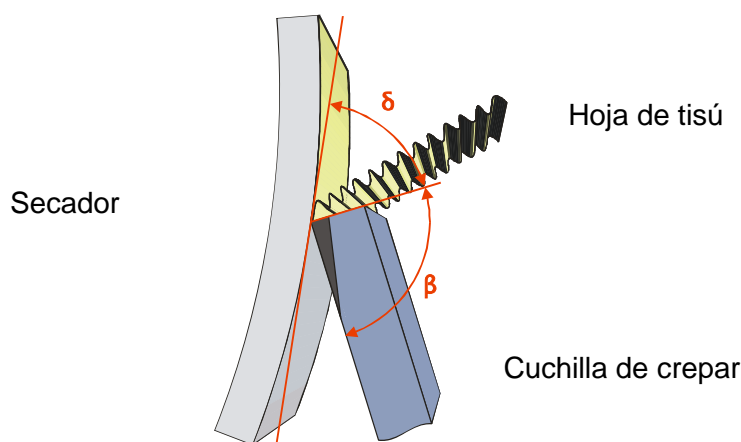


Figura 12. Representación esquemática del proceso de crepado empleado en la producción de tisú. Diferentes ángulos crean diferentes estructuras de crepado. De la referencia [1], material interno de formación.

1.6.1.2.5.5 Bobinado

Después de la sección de crepado el papel se enrolla en grandes bobinas (100 cm de ancho, más de 1 m de diámetro y cerca de 6000 kg). A causa de la estructura de zig-zag producida en el crepado, la longitud aparente del papel disminuye. Para no destruir la estructura creada durante el crepado, el papel se enrolla a una velocidad superficial inferior a la velocidad de producción de la máquina de papel (hasta un 5% inferior).

Bajo la sección de bobinado existe un foso donde se desvía el papel cuando no se puede bobinar (por ejemplo, durante los cambios de bobina). En este foso hay un púlper denominado UTM (siglas en inglés de under the machine) que rehidrata y tritura este papel para ser reutilizado en el proceso.

Las bobinas terminadas son transportadas y etiquetadas por un sistema automático que las lleva hacia el almacén contiguo de producto semielaborado sin intervención de los operadores.

1.6.1.2.6 Líneas de conversión

Las líneas de conversión (en inglés: *converting*) transforman las grandes bobinas producidas por la máquina de papel en productos de tisú completamente terminados y empaquetados para el mercado de doméstico y profesional. En las líneas de converting (fuera del alcance de este proyecto), se combinan múltiples capas, se estampan con diferentes diseños, se enrollan en pequeños rollos y se envasan en diferentes formatos.

1.6.2 Adecuación al estándar eSplit

Las categorías de potencias y sus contenidos deben adecuarse al estándar eSplit (del inglés: energy Split) elaborado por la comisión HMEEx. Las categorías y los equipos del proceso paplero considerados en el estándar se muestran a continuación (y entre paréntesis en inglés). Se muestran tachadas las que no existen en la PM6.

- **Gas natural total** (total gas)
 - Gas natural campana (hood gas)
 - Gas natural caldera (boiler gas)

- **Electricidad total** (total electricity)
 - **Aproximación y caja de pasta** (approach system and headbox)
 - Bombas de mezcla (fan pumps)
 - Depuradores (screens)
 - Bombas recirculación (recirculation pumps)
 - ~~Bombas de dilución para control de perfil (dilution water pump for profile)~~
 - **Accionamientos máquina de papel** (paper machine drives)
 - Accionamientos secador (yankee drives)
 - Accionamientos tela (wire drives)
 - Accionamientos fieltro (felt drives)
 - Accionamientos enrolladora (pope drives)
 - **Vacío** (bombas de vacío)
 - Bombas de vacío (vacuum pumps)
 - ~~Sopladores (blowers)~~
 - Torres de refrigeración (cooling towers)
 - ~~Módulo Atmos (Atmos module)~~
 - **Campana** (hood)
 - Ventiladores (fans)
 - Quemadores (burners)
 - ~~Sistema TAD (Through Air Drying system)~~
 - **Preparación de pasta** (stock preparation)
 - Refinos (refiners)
 - Agitadores de torres y tinas (agitators)
 - Hidrociclones (LC and HC Cleaners)
 - Bombas de salida de las torres (dump chest pumps)
 - **Polvo** (dust)
 - Ventiladores extracción polvo (dust removal fans)
 - Ventiladores extracción nieblas (mist removal fans)
 - **Ventilación / Climatización** (HVAC)
 - Ventiladores (fans)
 - Bombas (pumps)
 - Compresores de refrigeración (compressors used for cooling)
 - ~~Vapor usado en calefacción (heating steam)~~
 - **Agua** (water)
 - Bombas rociadoras alta presión (high pressure shower pumps)
 - ~~Microfiltración (microfiltration)~~
 - Sistema de aeroflotación (DAF in PM loop)
 - ~~Filtración polydisc (polydisc filtration)~~
 - ~~Manejo de fangos (sludge handling)~~
 - Bombas de agua de dilución pulper (pulper dilution water pumps)
 - **Iluminación** (lighting)

- **Condensado** (condensate)
 - Bombas de condensados (condensate pumps)
 - Bomba del generador de vapor (steam generator pump)
 - ~~Módulo Atmos (Atmos module)~~
- **Compresor** (compressor)
 - Compresores de aire (air compressors)
 - Secadores de aire (compressed air dryers)
- **Rotos** (broke)
 - Pulper UTM (Under the machine pulper)
 - Púlper de rotos (Broke line pulper)
 - Despastilladores (deflakers)
 - Hidrociclones (high consistency cleaners)
- **Pulpeado** (pulping)
 - Agitadores púlperes de fibra virgen (LF & SF pulper agitators)
 - Bombas de descarga púlperes de fibra virgen (LF & SF pumps)
- **Otros** (others)

1.7 Análisis de soluciones

Durante el desarrollo del proyecto se valora si evolucionar eSplit (fase 3) sobre el ordenador central del sistema de control (DCS) o migrar completamente el sistema fuera de DCS (pese al trabajo extra) y seguir desarrollando allí la herramienta. Finalmente se decide a favor de su desarrollo sobre el software B por los siguientes motivos:

1. Para reservar el sistema de control para tareas de control de proceso (acciones de control, alarmas...).
2. Por la facilidad de programación de cálculos en el software B (Python contra programación gráfica en lenguaje de bloques funcionales, FBD)
3. Por disponerse de exactamente de las mismas señales en el software B y en DCS (MARCHA/PARO, corrientes, potencias...).

1.8 Resultados finales

1.8.1 Fase 1. eSplit 1.0 sobre DCS

1.8.1.1 Contenido eSplit 1.0

Se analizan los diagramas de programación en diagrama de bloques funcionales (véase el anexo 2.1.2) para conocer qué se incluye en cada categoría de esta versión de eSplit. **Las cargas que no se mencionan a continuación no están incluidas.** En este apartado se recoge una lista con las cargas consideradas por categorías, véase el apartado 2.2.2.1 para los cálculos tipo usados según las señales disponibles.

- **Gas total:** del caudalímetro de gas global de la PM6.
- **Gas caldera:** del caudalímetro de gas de la caldera.
- **Gas campana:** diferencia del gas global menos el gas de la caldera (no existen otros consumidores de gas natural).
- **Electricidad total:** del medidor de potencia activa del interruptor general de media tensión que alimenta a toda la PM6.

- **Aproximación de pasta:**
 - Fan pumps: son la única carga del armario 14 de baja tensión. Se miden como la potencia activa de este.
 - Depuradores primarios: su potencia se calcula a partir de la corriente suministrada.
 - Depurador secundario: se incluye como constante de 15 kW condicionado a que los depuradores estén en marcha.

- **Accionamientos de máquina:** son la única carga en el armario 15 de baja tensión. Se mide su potencia como la potencia activa del armario completo.

- **Vacío:**
 - Bomba de vacío 610: se calcula su potencia a partir de corriente.
 - Bomba de vacío 620: se calcula su potencia a partir de corriente.
 - Bomba de vacío 630: se calcula su potencia a partir de corriente.
 - Bomba de vacío 640: se calcula su potencia a partir de corriente.
 - Auxiliares: 13.3 kW + 10.3 kW + 4.6 kW condicionados a que el sistema de vacío esté en marcha.

- **Electricidad campana:**
 - Ventilador de recirculación parte húmeda: cálculo de potencia a partir de corriente.
 - Ventilador de recirculación parte seca: cálculo de potencia a partir de corriente.
 - Ventilador de combustión parte seca: cálculo de potencia a partir de corriente.
 - Ventilador de combustión parte húmeda: cálculo de potencia a partir de corriente.
 - Ventilador de extracción: cálculo de potencia a partir de corriente.
 - Ventilador de cascada: incluido como constante de 19 kW fijos si la potencia activa del armario de baja tensión número 13 no es nula.
 - Ventilador de introducción: incluido como constante de 10 kW fijos si la potencia activa del armario de baja tensión número 13 no es nula.

- **Preparación de pasta:**
 - Refino 1 (FL): potencia medida con vatímetro.
 - Refino 2 (FL): potencia medida con vatímetro.
 - Refino 3 (FC): potencia medida con vatímetro.
 - Agitador torre FL: constante de 4.2 kW condicionados a marcha agitador.
 - Agitador torre FC: constante 4.4 kW condicionados a marcha agitador.
 - Bomba de salida torre FL: 194 kW condicionados marcha bomba (la bomba sólo puede absorber 60 kW). Quizá esta señal pretende compensar la ausencia de muchas otras).

- **Extracción de polvo:**
 - Ventilador de extracción de polvo: potencia calculada a partir de la nominal de 315 kW y el % de velocidad del variador de frecuencia (sobre el máximo de 1000 rpm). La carga está considerada por triplicado (quizá para compensar la ausencia de los otros dos ventiladores de extracción en el cálculo)

- **Ventilación:**
 - Ventilador introducción 1: constante 35 kW condicionada a marcha del ventilador.
 - Ventilador introducción 2: constante 35 kW condicionada a marcha del ventilador.
 - Ventilador introducción 3: constante 35 kW condicionada a marcha del ventilador.
 - Ventilador introducción 4: constante 35 kW condicionada a marcha del ventilador.
 - Ventilador soplado techo: constante de 67 kW condicionada a marcha del ventilador

- Ventilador extr. techo 1: constante de 4.2 kW condicionada a marcha del ventilador.
- Ventilador extr. techo 2: constante de 4.2 kW condicionada a marcha del ventilador.
- Ventilador extr. techo 3: constante de 4.2 kW condicionada a marcha del ventilador.
- Ventilador extr. techo 4: constante de 4.2 kW condicionada a marcha del ventilador.
- Ventilador extr. techo 5: constante de 4.0 kW condicionada a marcha del ventilador.
- Ventilador extr. techo 6: constante de 4.0 kW condicionada a marcha del ventilador.
- Ventilador extr. techo 7: constante de 4.0 kW condicionada a marcha del ventilador.
- Ventilador extr. Sala quemadores 1: constante de 11 kW condicionada a marcha.
- Ventilador extracción nieblas: potencia calculada a partir de corriente
- Ventilador de extracción UTM: potencia calculada a partir de corriente
- Compresor chiller sala eléctrica: potencia calculada a partir de corriente
- Ventilador impulsión sala eléctrica 1: constante de 38 kW condicionada a marcha del ventilador (este ventilador sólo puede absorber 12 kW por lo que se supone que la constante compensa la ausencia de los otros 3 ventiladores de la sala eléctrica).
- **Agua:**
 - Bomba agua clara 122 (inundación tela): cálculo de potencia a partir de corriente.
 - Bomba agua clara 110 (salida torre agua): cálculo de potencia a partir de corriente.
 - Bomba agua clara 105 (dilución púlperes): cálculo de potencia a partir de corriente.
 - Bomba agua clara 109 (dilución UTM): cálculo de potencia a partir de corriente.
 - Otras: añadidas como una corriente ficticia constante de 21 A, 360 A y 40 A (con tensión de 690 V y factor de potencia de 0.88).
- **Iluminación**: constante de 95 kW.
- **Condensados:**
 - Bomba de condensados 1: constante de 15.2 kW condicionada a marcha.
 - Bomba de condensados calefacción: constante de 5.0 kW condicionada a marcha.
 - Bomba generador de vapor: potencia calculada a partir de corriente.
- **Compresores:**
 - Compresor 1: potencia calculada a partir de corriente (factor potencia = 0.87).
 - Compresor 2: potencia calculada a partir de corriente (factor potencia = 0.87).
 - Compresor 3: potencia calculada a partir de corriente (factor potencia = 0.87).
 - Compresor 4: potencia calculada a partir de corriente (factor potencia = 0.87).
- **Rotos:**
 - Bomba descarga pulper rotos: constante de 168.7 kW condicionada a marcha.
 - Agitador 1 púlper UTM: cálculo de potencia a partir de corriente.
 - Agitador 2 púlper UTM: cálculo de potencia a partir de corriente.
- **Pulpeado:**
 - Agitador pulper FL: potencia calculada a partir de corriente.
 - Agitador pulper FC: potencia calculada a partir de corriente.
 - Bomba descarga pulper FL: potencia calculada a partir de corriente.
 - Bomba descarga pulper FC: potencia calculada a partir de corriente.
- **Otros**: diferencia entre la potencia activa total suministrada a la PM6 y la suma de las categorías anteriores.

1.8.1.2 Límites energéticos

Se establecen límites para cada categoría energética para los cinco tipos principales de papel producidos por la PM6. Los límites se establecen en base a una producción ideal, sin desviaciones en el proceso y operando a la velocidad nominal (MPV: maximum production velocity). En esta fase del proyecto no se tienen en consideración las variables que presentan un carácter discontinuo (broke o pulping) o que registran valores poco adecuados a la realidad (como others o water). Véase la sección 2.2.1.2 para el procedimiento usado y tablas 1 a 5 para los valores resultantes

La herramienta usada presupone que los consumos siguen distribuciones normales centradas en una media μ y con una desviación estándar σ (véase sección 2.2.1.2 de cálculo de límites). En una distribución estándar, el 99.7% de los valores encontrados se encuentra entre $\mu \pm 3\sigma$. Esto se usa para establecer los siguientes valores límite:

- Límite inferior (LRej): se encuentra tres desviaciones estándar por debajo del valor objetivo. Es muy improbable que el proceso se encuentre en condiciones estándar y se registren valores por debajo de este umbral. **Este límite se calcula, pero no se usa en el sistema** (no se penaliza un consumo bajo)
- Límite de aviso inferior (LWar): se encuentra dos desviaciones estándar por debajo del valor objetivo. Sirve como aviso de que hay algún equipo que no está en funcionamiento o presenta alguna desviación.
- Valor objetivo (TG): coincide con la media de la distribución estándar.
- Límite de aviso superior (HWar): se encuentra dos desviaciones estándar por debajo del valor objetivo. Sirve como aviso de que el proceso o algún equipo de esa categoría está funcionando fuera de condiciones básicas.
- Límite superior (HRej): se encuentra tres desviaciones estándar por encima del valor objetivo. Es muy improbable que el proceso se encuentre en condiciones estándar y se registren valores por encima de este umbral.

Tabla 1. Límites de potencia para el producto 212400601 establecidos sobre la producción estable a MPV (2 100 m/min) del 07/12/2023 de 01 h a 18 h.

Categoría	Límites para 212400601 (en kW)				
	LRej	LWar	TG	HWar	HRej
Approach	1 376.2	1 417.2	1 499.1	1 581.0	1 621.9
Boiler Gas	5 217.5	5 604.9	6 379.7	7 154.5	7 541.9
Broke	-	-	-	-	-
Compressor	43.5	44.8	47.5	50.1	51.4
Condensate	47.8	48.3	49.3	50.3	50.8
Drives	1 241.2	1 282.6	1 365.4	1 448.2	1 489.6
Dust	146.3	151.3	161.3	171.3	176.3
Hood Electricity	970.9	994.0	1 040.2	1 086.4	1 109.5
Hood Gas	6 309.7	6 525.2	6 956.2	7 387.2	7 602.6
HVAC	106.4	189.3	354.9	520.6	603.4
Lighting	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0
Other	-	-	-	-	-
Pulping	-	-	-	-	-
Stock	702.1	713.5	736.4	759.2	770.6
Total Electricity	7 051.0	7 332.8	7 896.5	8 460.1	8 742.0
Total Gas	12 060.9	12 484.1	13 330.4	14 176.6	14 599.8
Vacuum	1 294.1	1 296.4	1 301.1	1 305.7	1 308.0
Water	-	-	-	-	-

Tabla 2. Límites de potencia para el producto 212401100 establecidos sobre la producción estable a MPV (2 200 m/min) desde 04/12/2023 13 h hasta 05/12/2023 05 h.

Límites para 212401100 (en kW)					
Categoría	LRej	LWar	TG	HWar	HRej
Approach	1 374.2	1 421.2	1 515.3	1 609.3	1 656.4
Boiler Gas	5 707.0	5 904.5	6 299.6	6 694.8	6 892.3
Broke	-	-	-	-	-
Compressor	46.4	47.0	48.2	49.4	50.0
Condensate	47.6	48.2	49.2	50.3	50.8
Drives	1 247.0	1 291.5	1 380.5	1 469.4	1 513.9
Dust	146.3	151.3	161.3	171.3	176.3
Hood Electricity	575.5	576.5	578.3	580.1	581.1
Hood Gas	6 160.1	6 319.7	6 638.9	6 958.1	7 117.8
HVAC	298.8	337.4	414.7	492.0	530.7
Lighting	95.0	95.0	95.0	95.0	95.0
Other	-	-	-	-	-
Pulping	-	-	-	-	-
Stock	656.2	670.8	700.1	729.5	744.1
Total Electricity	6 828.4	7 074.3	7 566.1	8 057.8	8 303.7
Total Gas	12 322.5	12 531.1	12 948.2	13 365.4	13 574.0
Vacuum	1 282.6	1 284.8	1 289.1	1 293.4	1 295.6
Water	-	-	-	-	-

Tabla 3. Límites de potencia para el producto 212502000 establecidos sobre la producción estable a MPV (1 975 m/min) del 03/03/2014 entre las 00 h y las 13 h.

Límites para 212502000 (en kW)					
Categoría	LRej	LWar	TG	HWar	HRej
Approach	1 118.6	1 128.5	1 148.2	1 167.9	1 177.8
Boiler Gas	4 868.5	5 190.6	5 834.9	6 479.2	6 801.3
Broke					
Compressor	44.5	45.2	46.6	48.1	48.8
Condensate	48.9	48.9	49.1	49.2	49.3
Drives	973.4	982.6	1 001.0	1 019.4	1 028.6
Dust	24.4	29.4	39.4	49.4	54.4
Hood Electricity	813.2	871.2	987.3	1 103.3	1 161.3
Hood Gas	6 743.4	7 042.4	7 640.5	8 238.6	8 537.6
HVAC	254.3	288.7	357.6	426.4	460.8
Lighting	95.0	95.0	95.0	95.0	95.0
Other					
Pulping					
Stock	1 166.8	1 177.8	1 199.8	1 221.8	1 232.8
Total Electricity	8 049.0	8 060.4	8 083.1	8 105.9	8 117.3
Total Gas	12 795.8	13 013.0	13 447.2	13 881.5	14 098.6
Vacuum	925.2	927.3	931.4	935.5	937.6
Water					

Tabla 4. Límites de potencia para el producto 212502001 establecidos sobre la producción estable a MPV (1 800 m/min) desde el 10/12/2023 13 h hasta 11/12/2023 11 h.

Límites para 212400601 (en kW)					
Categoría	LRej	LWar	TG	HWar	HRej
Approach	811.4	815.2	822.6	830.1	833.8
Boiler Gas	5 321.9	5 588.6	6 121.8	6 655.1	6 921.7
Broke	-	-	-	-	-
Compressor	46.9	47.8	49.5	51.2	52.1
Condensate	47.9	48.4	49.3	50.1	50.6
Drives	658.8	662.5	669.9	677.4	681.1
Dust	146.3	151.3	161.3	171.3	176.3
Hood Electricity	1 068.1	1 074.9	1 088.4	1 102.0	1 108.8
Hood Gas	6 610.2	6 876.2	7 408.1	7 940.1	8 206.1
HVAC	135.8	193.3	308.5	423.6	481.2
Lighting	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0
Other	-	-	-	-	-
Pulping	-	-	-	-	-
Stock	1 107.1	1 121.0	1 148.8	1 176.7	1 190.6
Total Electricity	6 543.8	6 780.3	7 253.4	7 726.5	7 963.0
Total Gas	12 486.4	12 837.6	13 540.0	14 242.4	14 593.6
Vacuum	1 303.2	1 306.8	1 314.2	1 321.6	1 325.3
Water	-	-	-	-	-

Tabla 5. Límites de potencia para el producto 212500402 establecidos sobre la producción estable a MPV (1 920 m/min) de 07/12/2023 13:00h a 09/12/2023 06:00h.

Límites para 212500402 [kW]					
Categoría	LRej	LWar	TG	HWar	HRej
Approach	1 063.9	10 71.9	1 088.0	1 104.0	1 112.0
Boiler Gas	4 838.4	5 191.0	5 896.2	6 601.4	6 954.0
Broke	-	-	-	-	-
Compressor	46.8	47.5	48.8	50.2	50.9
Condensate	47.5	48.1	49.1	50.2	50.7
Drives	915.6	923.4	939.0	954.6	962.4
Dust	146.3	151.3	161.3	171.3	176.3
Hood Electricity	1 073.2	1 080.2	1 094.2	1 108.2	1 115.2
Hood Gas	6 883.2	7 313.1	8 172.7	9 032.4	9 462.2
HVAC	360.8	400.0	478.5	557.0	596.3
Lighting	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0
Other	-	-	-	-	-
Pulping	-	-	-	-	-
Stock	1 225.8	1 245.4	1 284.8	1 324.2	1 343.9
Total Electricity	7 190.6	7 459.8	7 998.3	8 536.8	8 806.0
Total Gas	12 628.0	13 109.7	14 073.0	15 036.3	15 517.9
Vacuum	1 307.6	1 311.6	1 319.4	1 327.2	1 331.1
Water	-	-	-	-	-

1.8.2 Fase 2. Score card de cumplimiento

1.8.2.1 Pantalla diaria score card

En la pantalla diaria se recogen los datos de cumplimiento de límite superior de las últimas 24 horas que se revisa en la reunión diaria de operaciones (se puede distinguir entre turnos). El formato score card permite mostrar fácilmente si se ha cumplido con los límites incluso si se ha fabricado más de un tipo de producto. En este último supuesto se pueden filtrar los resultados para mostrar sólo los porcentajes de cumplimiento para ese producto (véase figura 13).

En el score card se muestran (en este orden):

- Nombre de la categoría
- Porcentaje de cumplimiento del límite superior con código de color:
 - Rojo: cumplimiento inferior al 90%. Se debe revisar esa categoría. El consumo energético ha sido superior al previsto en los límites.
 - Verde: cumplimiento entre el 90 y 100% (sin incluir este último). El consumo es normal según los límites establecidos.
 - Negro: el cumplimiento es del 100%. El límite es demasiado laxo o hay alguna anomalía en el proceso que hace que el consumo en esa categoría sea bajo.
- El límite superior (si se ha fabricado más de un tipo de producto es la media ponderada de límites según el tiempo relativo de producción).
- Potencia media en el periodo seleccionado.
- Porcentaje de desviación sobre el límite superior
 - Valores negativos (en rojo): indican el porcentaje de exceso de consumo medio sobre el límite superior.
 - Valores positivos (en verde): indican el porcentaje de margen respecto al límite superior.

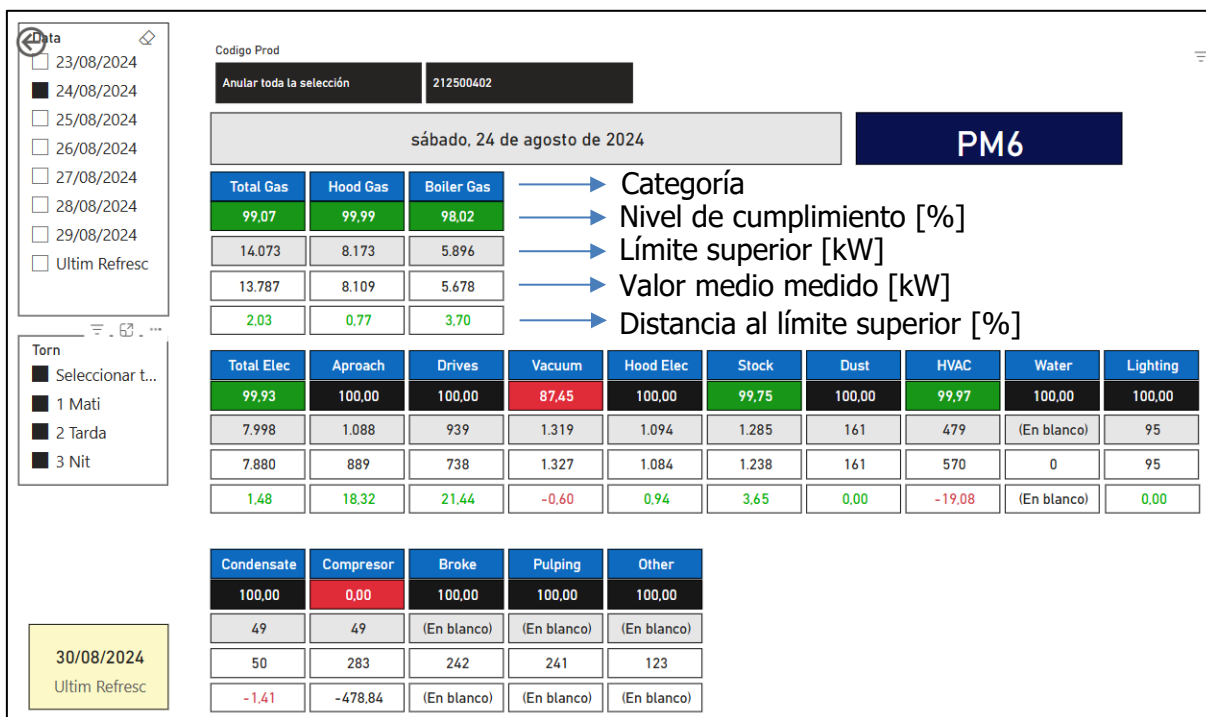


Figura 13. Scorecard en formato software C para las potencias consumidas (últimas 24h).

1.8.2.2 Modo de consulta de datos

Para consultar los datos de cumplimiento a lo largo del tiempo, se generan dos pantallas más en el software C.

1.8.2.2.1 Pantalla de datos en crudo

En esta pantalla se recoge el historial de los valores mostrados en el score card diario. Se puede elegir la visualización en porcentaje de cumplimiento de límite superior o de potencia en kW (véase figura 14).

Con los desplegaables de tiempo se pueden distinguir hasta turnos individuales. Al contraer los desplegaables, en su cabecera se muestra el promedio de sus contenidos.

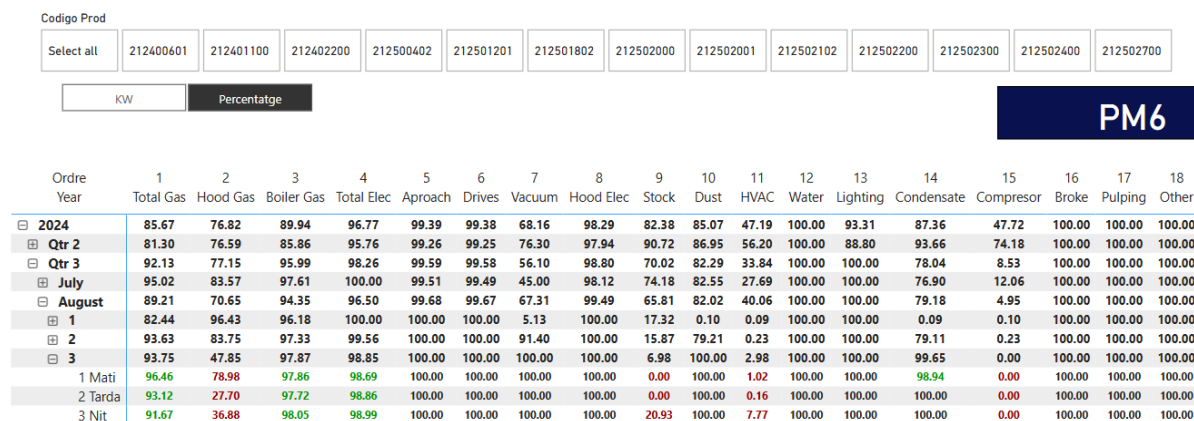


Figura 14. Pantalla de consulta de datos en crudo del software C

1.8.2.2.2 Pantalla de serie temporal

Se plantea una tercera pantalla en el software C con la serie temporal de datos graficada para visualizar tendencias fácilmente (véase figura 15).

La serie temporal, además tiene una función de análisis que permite comparar los valores medidos con sus límites, pero descartando valores extremos (por ejemplo 0 kW en un paro programado de mantenimiento) y calcular nuevos límites. Para ello se emplea el filtro "%(Reject-Valor)", que descarta según la diferencia entre el límite superior establecido ("Reject") y el valor medido.

- Límite negativo (-10% en la figura 15): los valores que están un cierto porcentaje por encima el límite actual se descartan (puntas de consumo, periodos con el proceso fuera de estándar...).
- Límite positivo (+10 en la figura 15: los valores que están por debajo del límite en una proporción mayor a la seleccionada (paros programados o no programados del proceso).

En la pantalla se muestran los límites actuales ("Target a CL" y "Limit CL") y los que se ajustarían a los datos filtrados ("Target" y "Mitja+3Sig") para valorar es conveniente revisar los límites establecidos.

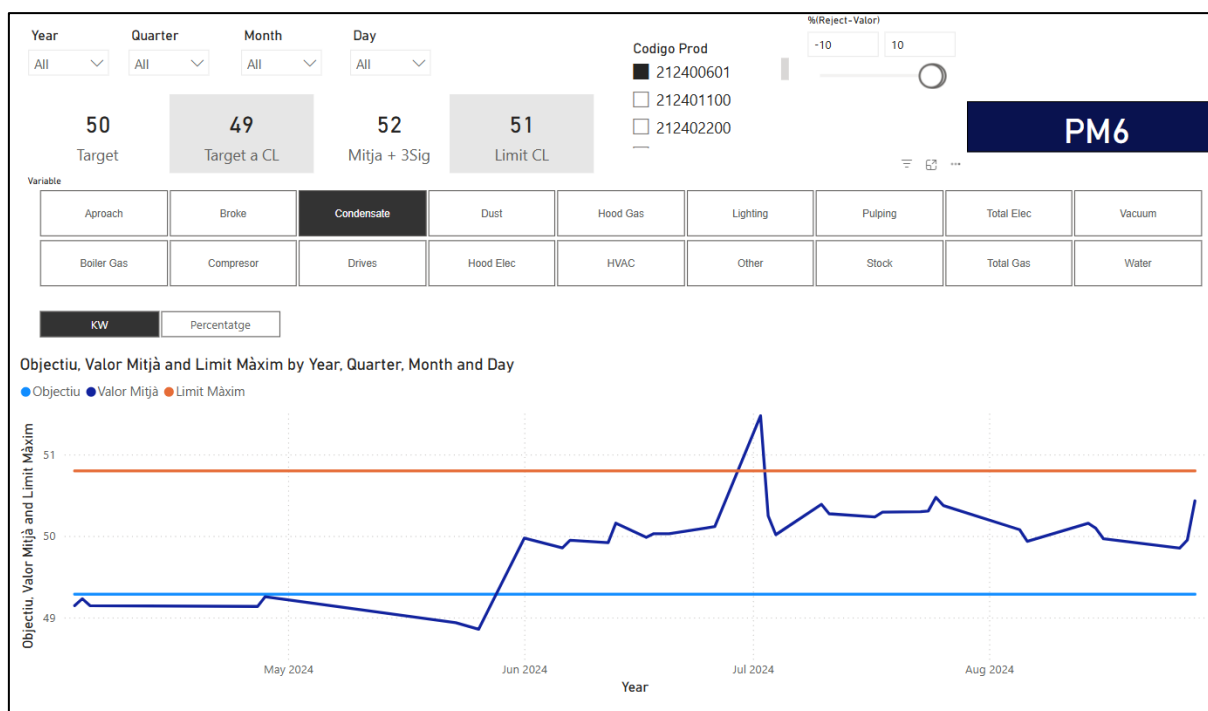


Figura 15. Serie temporal de datos en la pantalla "Serie temporal".

1.8.3 Fase 3. eSplit 2.0 sobre Software B

Ante el éxito y utilidad hallados en fases anteriores, en la fase 3 del proyecto se plantea migrar los cálculos al software B, ampliar el número de cargas consideradas y explicitar potencias con mayor detalle que el de las categorías estrictamente requeridas.

Así, se genera una jerarquía de cargas que permite un primer análisis cuando una categoría se encuentra por encima del límite superior. Para las cargas que no disponen de medida directa de potencia se estima la potencia activa consumida en base a constantes o constantes moduladas en base a la velocidad (véase sección 2.2.3.1 para el contenido exacto de cada categoría).

Gran parte de la estructura creada anteriormente se puede reutilizar directamente sólo cambiando la fuente de los datos de DCS a Software B (en el software A). Al generarse cambios en las categorías, sí deberán calcularse nuevos límites.

1.8.3.1 Contenido eSplit 2.0

En este apartado se recogen cualitativamente las cargas consideradas en cada categoría y la jerarquía de tres niveles creada. Las cargas a incluir se obtienen del cruce entre los equipos presentes en la PM6 (pantallas del sistema de control y listado de motores, véase apartado 2.1.1 para este último) y los requerimientos del estándar eSplit [1].

- **Gas total**
- **Gas caldera**
- **Gas campana**
 - Gas campana parte seca
 - Gas campana parte húmeda

- **Electricidad total**
- **Aproximación de pasta**
 - Fan pumps (no se puede subdividir con la instrumentación existente)
 - Depuradores
 - Depurador primario FC
 - Depurador primario FL
 - Depurador secundario
 - Bombas de recirculación caja de pasta
 - Bomba de recirculación canal superior (FC)
 - Bomba de recirculación canal inferior (FL)
- **Accionamientos de máquina** (no se puede subdividir con la instrumentación existente)
- **Vacío**
 - Bombas de vacío
 - Bomba de vacío 1 (cajas aspirantes)
 - Bomba de vacío 2 (prensa aspirante)
 - Bomba de vacío 3 (prensa aspirante)
 - Bomba de vacío 4 (prensa aspirante)
 - Equipos auxiliares del sistema de vacío
 - Ventilador torre de refrigeración
 - Bomba torre de refrigeración 1
 - Bomba torre de refrigeración 2
 - Bomba separador de gotas cajas aspirantes.
- **Campana**
 - Ventilador de cascada
 - Ventilador de introducción
 - Ventilador de extracción
 - Ventilador de recirculación parte húmeda
 - Ventilador de recirculación parte seca
 - Ventilador de combustión parte húmeda
 - Ventilador de combustión parte seca
- **Preparación de pasta**
 - Agitadores
 - Agitador torre FL
 - Agitador tina mezcla FL
 - Agitados tina máquina FL
 - Agitador torre FC
 - Agitador tina mezcla FC
 - Agitador tina maquina FC
 - Agitador torre de rotos
 - Agitador tina de rotos especiales ("happy meal")
 - Bombas de pasta
 - Bomba de salida torre FL
 - Bomba de salida tina mezcla FL
 - Bomba de salida tina maquina FL
 - Bomba de salida torre FC

- Bomba de salida tina mezcla FC
- Bomba de salida tina maquina FC
- Bomba de salida torre rotos
- Bomba de salida tina rotos especiales ("happy meal")
- Refinos
 - Refino 1 (FL)
 - Refino 2 (FL)
 - Refino 3 (FC)
- **Extracción de polvo**
 - Ventilador de extracción de nieblas
 - Ventilador de extracción de polvo
 - Ventilador de extracción pulper UTM
- **Climatización y ventilación**
 - Introducción de aire
 - Ventilador introducción 1
 - Ventilador introducción 2
 - Ventilador introducción 3
 - Ventilador introducción 4
 - Ventilador de soplado bajo techo
 - Extracción de aire
 - Ventilador de extracción cubierta 1
 - Ventilador de extracción cubierta 2
 - Ventilador de extracción cubierta 3
 - Ventilador de extracción cubierta 4
 - Ventilador de extracción cubierta 5
 - Ventilador de extracción cubierta 6
 - Ventilador de extracción cubierta 7
 - Ventilador de extracción sala quemadores 1
 - Ventilador de extracción sala quemadores 2
 - Ventilador de extracción sala quemadores 3
 - Refrigeración sala eléctrica
 - Compresor chiller
 - Ventilador impulsión 1
 - Ventilador impulsión 2
 - Ventilador recirculación 1
 - Ventilador recirculación 2
- **Aguas**
 - Agua residual
 - Bomba foso 1
 - Bomba foso 2
 - Bomba foso 3
 - Agua fresca
 - Bomba alta presión tela (117)
 - Bomba alta presión tela (112)
 - Bomba alta presión fieltro (111)
 - Agua clarificada
 - Bomba inundación tela (122)
 - Bomba alimentación torre agua clara (110)

- Bomba dilución pulperes (105)
- Bomba dilución UTM (109)
- Bomba reguladores consistencia (107)
- Bomba limpieza campana (114)
- Bomba rociadoras baja presión (113)
- Clarificador DAF (dissolved air flotation)
 - Bomba alimentación DAF (315)
 - Bomba de mezcla aire (115)
 -
- **Iluminación**
 - Constante de 95 kW. El cuadro general de alimentación y servicios tiene 326 kW instalados. Un tercio para iluminación (tal como estaba en eSplit 1.0 es razonable).
- **Condensados**
 - Bombas de condensados
 - Bomba de condensados 1 (300)
 - Bomba de condensados 2 (301)
 - Bomba generador de vapor
 - Bomba recirculación generador (1003)
- **Compresores** (desde 2023 no existe compresor 2)
 - Compresor 1
 - Compresor 3
 - Compresor 4
- **Rotos**
 - Púlper UTM
 - Agitador 1
 - Agitador 2
 - Bomba de descarga/recirculación (501)
 - Púlper rotos
 - Agitador
 - Bomba de descarga (601)
 - Depuración de rotos
 - Screen de rotos
 - Despastillador 1
 - Despastillador 2
 - Despastillador 3
- **Pulpeado** (fibra virgen)
 - Pulper FL
 - Agitador
 - Bomba de descarga (701)
 - Pulper FL
 - Agitador
 - Bomba de descarga (721)
- **Otros**
 - Se mantiene la estrategia de eSplit 1.0: "otros" es la diferencia entre el total de electricidad (contador) y la suma de las categorías anteriores.

1.8.3.2 Energía específica

La monitorización de la potencia consumida por los equipos en las diferentes categorías es suficiente para el control del proceso continuo de la PM6. Sin embargo, la potencia absoluta (kW) no permite comparar con otras plantas de dimensiones y tecnologías diferentes ni tiene en cuenta cuanto papel tisú se ha producido en el periodo analizado. Por ello como parte de la fase 3 del proyecto se plantea el cálculo de la energía específica por unidad neta de papel producido ($\text{kWh}/t_{\text{neto}}$).

En el proceso productivo de la PM6 las pérdidas de papel (diferencia entre producción bruta y neta) vienen dadas por:

- Descarte de retales: el papel producido por la máquina de papel es 2 cm más ancho que el que se bobina. Esto permite recortar los bordes bastos que se generan durante la producción y enrollar papel con bordes perfectamente definidos.
- Tiempo de rotura de papel: es habitual que la máquina de papel esté en marcha sin bobinar el papel producido (entre 15 y 20 minutos por cada 24 horas) por estarse realizando limpiezas de la máquina o cambios de bobina. Durante este tiempo el papel cae en el pulper UTM para aprovechar sus materiales.
- Papel rechazado: tras analizar el papel de una pareja de bobinas, si este no cumple con las especificaciones, puede enviarse a repulpear para aprovechar sus materiales. Aunque se ha consumido energía en su producción, este papel no computa en la producción.

La conversión de potencia absoluta a energía específica es sencilla ya que se conoce la potencia, y en el software A se registra el tiempo que tarda en bobinarse una pareja de bobinas y su peso neto (véase sección 2.2.3.2 para los cálculos). Una vez se calculen se incluirá una pantalla adicional del software C para el scorecard para energía específica (con el mismo formato que el de potencia absoluta).

1.8.4 Fase 4. Recomendaciones instrumentación

Se recomienda la adición de instrumentación de medida de potencia (o asimilable como corriente) para los siguientes motores con arranque directo. En el momento de redactar este proyecto, estos motores sólo disponen de una indicación de "MARCHA/PARO" en el sistema de control.

Tabla 6. Listado de motores de arranque directo propuestos para instrumentación.

#	Tag	Descripción	P_{abs} [kW]	P_{inst} [kW]
1	614PU601-M01	Bomba descarga pulper rotos	1350	1600
2	602FN401-M01	Ventilador extracción nieblas tela	1170	1320
3	602FN701-M01	Ventilador soplado techo	720	900
4	614MA502-M01	Despastillador 1	600	750
5	631MA102-M01	Despastillador 2	600	750
6	631MA103-M01	Despastillador 3	600	750
7	614AT702-M01	Agitador torre FL	440	550
8	614AT722-M01	Agitador torre FC	440	550
9	602FN601-M01	Ventilador introducción nave 1	440	550
10	602FN602-M01	Ventilador introducción nave 2	440	550
11	602FN603-M01	Ventilador introducción nave 3	440	550
12	602FN604-M01	Ventilador introducción nave 4	440	550

Además, dado que solo se conoce su consumo conjunto (a través del armario de distribución al completo), se recomienda instrumentar los motores con variador siguientes:

Tabla 7. Listado de motores con variador propuestos para instrumentación.

Tag	Descripción	$P_{abs,máx}$ [kW]	P_{inst} [kW]
622MA002-M01	Rodillo formador tela	2350	5000
622MA003-M01	Rodillo guía fieltro	2350	2000
622MA004-M01	Prensa ciega fieltro	2350	5000
623MA001-M01	Rodillo secador – 1	3815	5600
623MA001-M02	Rodillo secador – 2	3815	5600
625MA001-M01	Rodillo enrolladora	550	1320
625MA002-M01	Arrancador mandriles	120	550
614PU233-M01	Fan pump FC – 1	5200	5600
614PU233-M02	Fan pump FC – 2	5200	5600
614PU203-M01	Fan pump FL – 1	5200	5600
614PU203-M02	Fan pump FL – 2	5200	5600

1.9 Planificación

Las fases 1 y 2 del proyecto se han implantado durante el desarrollo de este trabajo (trimestre 2 de 2024).

La fase 3 se encuentra en desarrollo. Su progreso se sigue en reuniones cada 14 días (miércoles 11:30 – 12:30 h). Se distinguen 5 subfases cada una con su fecha límite (para asegurar que la herramienta esté activa y plenamente operativa a 31/12/2024).

- 1) Determinación de las cargas a incluir en eSplit 2.0 sobre SB y determinación del método de cálculo a emplear según señales disponibles (completado 18/08/24)
- 2) Inclusión de cada categoría en SB (límite 02/10/2024)
 - i. Aproximación pasta (completado 18/07/2024)
 - ii. Accionamientos (completado 29/07/2024)
 - iii. Vacío (completado 29/07/2024)
 - iv. Electricidad campana (completado 29/07/2024)
 - v. Preparación de pasta (11/09/2024)
 - vi. Polvo (11/09/2024)
 - vii. Ventilación (18/09/2024)
 - viii. Aguas (18/09/2024)
 - ix. Iluminación (18/09/2024)
 - x. Condensados (25/09/2024)
 - xi. Compresores (25/09/2024)
 - xii. Rotos (25/09/2024)
 - xiii. Pulpeado (02/10/2024)
 - xiv. Electricidad total (02/10/2024)
 - xv. Otros (02/10/2024)
 - xvi. Gas total (02/10/2024)
 - xvii. Gas caldera (02/10/2024)
 - xviii. Gas Campana (02/10/2024)
- 3) Cambio de la fuente de datos de DCS a SB en el SB (16/10/2024)
- 4) Despliegue del cálculo de energía específica (31/10/2024)
- 5) Establecimiento de nuevos límites (18/12/2024)

No se prevé el despliegue a corto plazo de la fase 4 (nueva instrumentación).

2 Anexos

2.1 Documentación inicial

2.1.1 Listado cargas

A continuación, se listan las cargas eléctricas presentes en la máquina de papel 6 y su proceso aledaño. El listado corresponde al proyecto original. Algunas cargas no se han trasladado explícitamente al proyecto eSplit 2.0 por:

- No estar explícitamente contempladas en el estándar eSplit.
- No usarse en la actualidad (partes obsoletas del proceso).
- Presentar potencias inferiores a 3 kW.
- Presentar un coeficiente de uso muy bajo (equipos que no operan con el proceso continuo en estado estacionario).

Estas cargas (a excepción de las obsoletas), se redirigen indirectamente al apartado "otros" del estándar que se calcula como la diferencia entre el total (contador global) y la suma de las categorías.

Tabla 8. Listado de cargas del proyecto de la PM6 y proceso aledaño.

TAG	P	V	ARRANQUE	ARMARIO	DESCRIPCIÓN (ESPAÑOL)	kW(abs)	kW(ins)
LINEA FIBRA LARGA							
614AT701-M01	6	690	VARIADOR	KE603-012-01	ROTOR PULPER PRINCIPAL	450	560
SE OMITE EL RESTO DE LA TABLA POR CONFIDENCIALIDAD							

2.1.2 eSplit 1.0 en FBD

En este apartado se mostraban los diagramas de bloques funcionales con los cálculos eSplit 1.0 sobre DCS (9 páginas en DIN A3). Se eliminan por confidencialidad. Véase el apartado 2.2.1.1 para algunos ejemplos.

2.1.3 Esquemas unifilares baja tensión

En este apartado se mostraban los esquemas unifilares de baja tensión (8 páginas DIN A3). Se eliminan por confidencialidad.

2.1.4 Diagrama de proceso

En este apartado se mostraba el diagrama de flujo de proceso

2.2 Cálculos

2.2.1 Fase 1. eSplit 1.0 sobre DCS

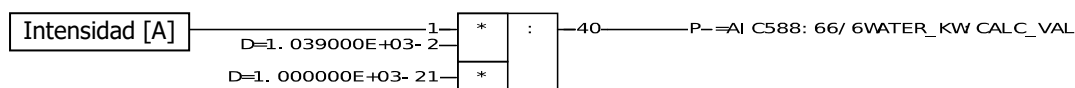
2.2.1.1 Cálculos tipo

Los cálculos completos en lenguaje de bloques funcionales (FBD) pueden encontrarse en el apéndice 2.1.2. Este lenguaje es muy adecuado para escribir automatización programada, pero es poco eficiente para ejecutar cálculos aritméticos (programación ineficiente y difícil lectura). En realidad, se realizan 4 tipos de cálculo de potencia que se repiten a lo largo del programa:

- 1) Potencia constante condicionada a la marcha del equipo: se usa un bloque SW-C (condición "si", véase más abajo). Si la señal de marcha no es nula: la potencia es la constante asignada, si es nula la potencia de salida es cero.



- 2) Potencia calculada a partir de medida de corriente (motores de conexión directa a red): se usa un bloque de multiplicación-división que multiplica las entradas del cuadrante superior izquierdo y las del cuadrante inferior izquierdo por separado y luego las divide (superior entre inferior).



Nótese que para abreviar el cálculo en la mayoría de las apariciones en el programa las constantes se agrupan para compactar al máximo. El bloque anterior se traduce en:

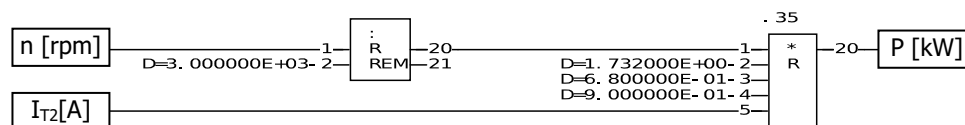
$$P [\text{kW}] = \frac{\sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos(\varphi)}{1\,000} \quad (1)$$

Donde P es la potencia consumida [kilovatios], V es la tensión recibida por la carga [voltios], I la intensidad consumida [amperios] y φ el ángulo de desfase entre tensión y corriente. En el ejemplo anterior, la constante de la entrada 2 es el resultado de multiplicar $\sqrt{3} \cdot 690 \text{ V} \cdot 0.869$.

- 3) Potencia calculada a partir de corriente (motores alimentados por variador de frecuencia). Se distinguen dos casos:
 - a. La intensidad que se mide es la de entrada al variador (I_T). La tensión es la de la red: el cálculo es idéntico al del apartado 2 porque la tensión a considerar es la de entrada.
 - b. La intensidad que se mide es la de salida del variador (I_{T2}). La tensión de salida del variador es aproximadamente proporcional a la velocidad del motor [6] para mantener la ratio tensión/frecuencia. La expresión a emplear es:

$$P [\text{kW}] = \frac{\sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos(\varphi) \cdot n}{1\,000 \cdot n_{\max}} \quad (2)$$

Donde n es la velocidad de rotación del motor y n_{\max} su máxima velocidad (a la frecuencia de la red). En FBD (con constantes explícitas):



2.2.1.2 Establecimiento de límites

Para establecer límites energéticos se analizan producciones ideales de los diferentes tipos de papel tisú para usarlas como referencia durante la operación en otras condiciones. Por causar una operación menos eficiente del proceso, se evitan:

- Producciones con el proceso fuera de condiciones estándar (equipos fuera de servicio, con un funcionamiento pobre, ...).
- Los primeros 7 días de vida de las vestiduras de la máquina (textiles activos), especialmente el fieltro, que tiene grandes efectos sobre la sequedad del papel al entrar en el sistema de secado (arrastre de agua) y obliga a emplear una mayor potencia en el sistema de vacío.
- Producciones de menos de 8 horas de duración.
- La operación cercana a cambios de producto por no tener la certeza de estar registrando el consumo para la producción del producto fabricado (el proceso se adapta progresivamente al nuevo producto durante al menos una hora antes de que se inicie verdaderamente su producción).

Tal como se ha sugerido en la memoria del proyecto, el valor de cada variable energética se muestra cada 10 minutos en el software A, generando una tabla de valores a lo largo del tiempo (véase figura 16).

Sobre los datos recogidos, se aplica la herramienta "statistical analysis" del software A para ver cómo están distribuidos y que límites corresponderían naturalmente a su distribución normal. Si ya se han definido límites, esta herramienta los compara con los que se originarían a partir de la producción analizada (véase figura 17).

Se practica este análisis sobre producciones ideales para las 14 variables que se pretende limitar y para los cinco productos principales producidos por la PM6.

Date	23/Aug/2024	23/Aug/2024	23/Aug/2024	23/Aug/2024	23/Aug/2024
Time	12:50	13:00	13:10	13:20	13:30
Product	212500402	212500402	212500402	212500402	212500402
ESF1_PM6_Gross Production Calc	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ESF1_PM6_Aproach Energy Consum Spec Calc	968.577	945.168	959.928	962.622	944.590
ESF1_PM6_Boiler Gas Energy Consum Spec Calc	5,346.679	5,276.592	5,433.342	5,687.102	5,562.857
ESF1_PM6_Broke Energy Consum Spec Calc	96.536	263.195	263.226	226.776	262.870
ESF1_PM6_Compresor Energy Consum Spec Calc	273.061	289.014	257.222	279.397	305.645
ESF1_PM6_Condensate Energy Consum Spec Calc	49.737	49.737	49.737	49.737	49.737
ESF1_PM6_Drives Energy Consum Spec Calc	818.000	803.000	810.000	809.000	777.000
ESF1_PM6_Dust Energy Consum Spec Calc	161.280	161.280	161.280	161.280	161.280
ESF1_PM6_Hood Elec Energy Consum Spec Calc	1,087.286	1,084.672	1,083.479	1,083.366	1,080.286
ESF1_PM6_Hood Gas Energy Consum Spec Calc	8,849.595	8,408.587	8,100.534	7,921.479	8,186.655
ESF1_PM6_HVAC Energy Consum Spec Calc	571.937	574.789	579.039	582.158	587.635
ESF1_PM6_Lighting Energy Consum Spec Calc	95.000	95.000	95.000	95.000	95.000
ESF1_PM6_Other Energy Consum Spec Calc	138.942	18.283	5.674	142.035	-212.413
ESF1_PM6_Pulping Energy Consum Spec Calc	364.648	2.375	2.375	292.956	239.903
ESF1_PM6_Stock Energy Consum Spec Calc	1,204.636	1,274.440	1,270.511	1,286.289	1,275.718
ESF1_PM6_Total Elec Energy Consum Spec Calc	7,937.030	7,666.910	7,624.142	8,078.843	7,711.930
ESF1_PM6_Total Gas Energy Consum Spec Calc	14,196.273	13,685.180	13,558.895	13,851.970	13,749.513
ESF1_PM6_Vacuum Energy Consum Spec Calc	1,324.383	1,322.486	1,322.656	1,321.764	1,320.250
ESF1_PM6_Water Energy Consum Spec Calc	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Figura 16. Tabla generada en la recogida de datos cada 10 minutos en el software A

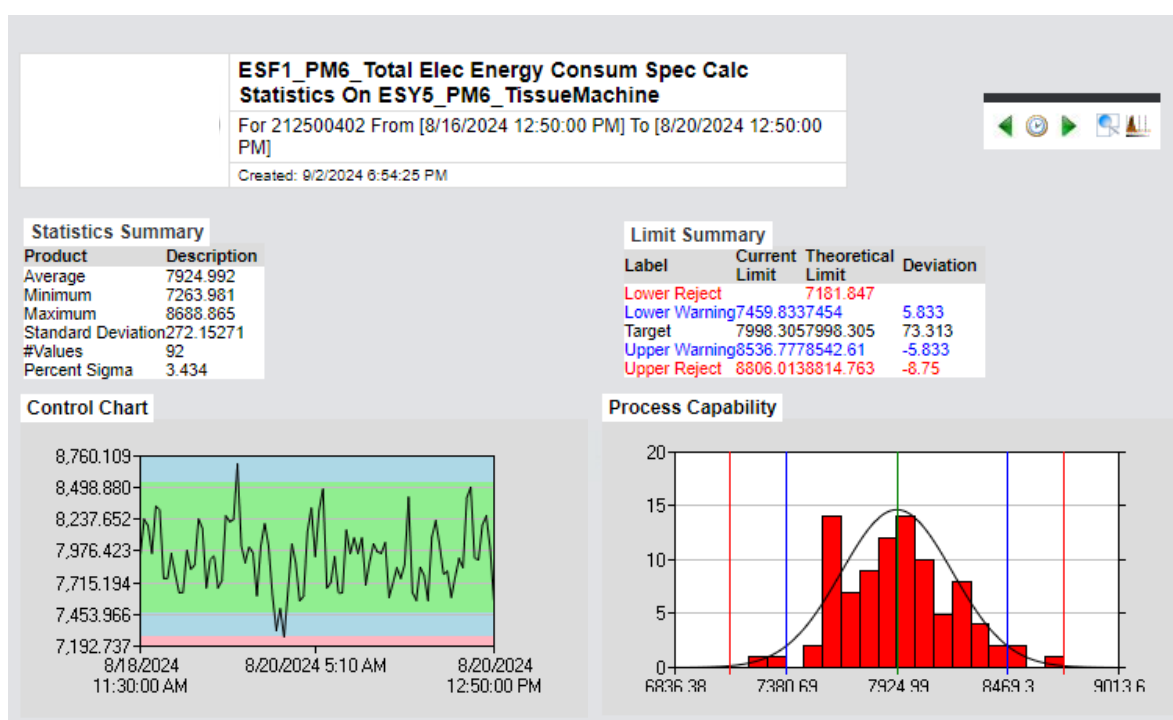


Figura 17. Herramienta de análisis estadístico del software A. Si ya se han establecido límites los compara con los que se generarían a partir de los datos analizados.

2.2.2 Fase 2. Scorecard de cumplimiento

En cada muestreo de las variables energéticas en el software A se valora si la potencia de las diferentes categorías está por encima o por debajo del límite superior. En cada turno productivo de 8 horas se calcula la proporción de periodos de 10 minutos que ha estado dentro de límites (véase figura 18, abajo). Este porcentaje de cumplimiento se importa en el software C, se muestra sin procesamiento alguno en la pantalla de registro de datos y se calcula su media aritmética para mostrarlo en el score card diario.

Date	23/Aug/2024	23/Aug/2024	23/Aug/2024	23/Aug/2024	23/Aug/2024
Time	05:30	05:40	05:50	06:00	06:10
Product	212502001	212502001	212502001	212502001	212502001
ESF1_PM6_Gross Production Calc	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ESF1_PM6_Aproach Energy Consum Spec Calc	773.712	764.395	757.392	755.334	748.749
ESF1_PM6_Boiler Gas Energy Consum Spec Calc	5,290.274	5,495.934	5,538.518	5,220.935	5,192.821
ESF1_PM6_Broke Energy Consum Spec Calc	262.531	263.767	263.318	395.113	262.888
ESF1_PM6_Compresor Energy Consum Spec Calc	299.875	311.415	279.284	265.255	295.689
ESF1_PM6_Condensate Energy Consum Spec Calc	49.852	49.852	49.725	49.725	49.725
ESF1_PM6_Drives Energy Consum Spec Calc	621.000	611.500	601.000	600.333	595.500
ESF1_PM6_Dust Energy Consum Spec Calc	161.280	161.280	161.280	161.280	161.280
ESF1_PM6_Hood Elec Energy Consum Spec Calc	1,063.241	1,065.151	1,064.496	1,064.524	1,068.463
ESF1_PM6_Hood Gas Energy Consum Spec Calc	8,586.715	8,202.350	8,517.176	8,936.025	8,646.043
ESF1_PM6_HVAC Energy Consum Spec Calc	560.565	559.715	558.665	560.197	560.628
ESF1_PM6_Lighting Energy Consum Spec Calc	95.000	95.000	95.000	95.000	95.000
ESF1_PM6_Other Energy Consum Spec Calc	260.592	265.985	165.806	-41.842	-33.174
ESF1_PM6_Pulping Energy Consum Spec Calc	2.463	2.463	315.035	299.700	373.562
ESF1_PM6_Stock Energy Consum Spec Calc	1,239.767	1,232.855	1,238.998	1,236.170	1,239.102
ESF1_PM6_Total Elec Energy Consum Spec Calc	7,590.375	7,615.137	7,833.484	7,700.675	7,693.921
ESF1_PM6_Total Gas Energy Consum Spec Calc	13,876.988	13,698.283	14,055.693	14,156.959	13,838.865
ESF1_PM6_Vacuum Energy Consum Spec Calc	1,333.723	1,329.728	1,331.391	1,332.671	1,338.497
ESF1_PM6_Water Energy Consum Spec Calc	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
KPIs REJECT 8H					
ESF1_PM6_Gross Production Rj8h				100.000	
ESF1_PM6_Aproach Energy Consum Spec Rj8h				100.000	
ESF1_PM6_Boiler Gas Energy Consum Spec Rj8h				98.326	
ESF1_PM6_Broke Energy Consum Spec Rj8h				100.000	
ESF1_PM6_Compresor Energy Consum Spec Rj8h				0.920	
ESF1_PM6_Condensate Energy Consum Spec Rj8h				100.000	
ESF1_PM6_Drives Energy Consum Spec Rj8h				100.000	
ESF1_PM6_Dust Energy Consum Spec Rj8h				100.000	
ESF1_PM6_Hood Elec Energy Consum Spec Rj8h				100.000	
ESF1_PM6_Hood Gas Energy Consum Spec Rj8h				23.465	
ESF1_PM6_HVAC Energy Consum Spec Rj8h				0.924	
ESF1_PM6_Lighting Energy Consum Spec Rj8h				100.000	
ESF1_PM6_Other Energy Consum Spec Rj8h				100.000	
ESF1_PM6_Pulping Energy Consum Spec Rj8h				100.000	
ESF1_PM6_Stock Energy Consum Spec Rj8h				0.920	
ESF1_PM6_Total Elec Energy Consum Spec Rj8h				90.788	
ESF1_PM6_Total Gas Energy Consum Spec Rj8h				95.111	
ESF1_PM6_Vacuum Energy Consum Spec Rj8h				3.108	
ESF1_PM6_Water Energy Consum Spec Rj8h				100.000	

Figura 18. Cálculo del porcentaje de cumplimiento de límites energéticos mostrado cada turno en el software A. Estos datos se importan en el software C sin modificación para generar el scorecard.

2.2.3 Fase 3. eSplit 2.0 sobre el software B

2.2.3.1 Cálculo de potencias por categorías

2.2.3.1.1 Calculos tipo

Los tipos de cálculos empleados para el cómputo de potencia son muy similares a los empleados en DCS. Su formato, sin embargo, es distinto ya que se emplea código escrito en lugar de gráfico para su programación. En el siguiente apartado se describen los cálculos tal

como se programarán en el software B. Ya que su sintaxis puede ser algo críptica, se resumen los cuatro tipos de cálculos posibles en este apartado:

- 1) Potencia constante condicionada a la marcha del equipo: se multiplica la potencia estimada por la señal de marcha (la potencia se extrae del listado de cargas, véase apartado (2.1.1):

$$P \text{ [kW]} = k \text{ [kW]} \cdot (\text{run}) \quad (3)$$

Donde P es la potencia calculada en kW, k es la estimación de potencia absorbida por el equipo y (run) es la señal de marcha o paro (es -1 cuando el equipo está en marcha).

- 2) Potencia calculada a partir de medida de corriente (motores de conexión directa a red):

$$P \text{ [kW]} = \frac{\sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos(\varphi)}{1\,000} \quad (4)$$

Donde P es la potencia consumida [kilovatios], V es la tensión recibida por la carga [voltios], I la intensidad consumida [amperios] y φ el ángulo de desfase entre tensión y corriente, que se obtiene de las especificaciones de los motores.

- 3) Potencia calculada a partir de corriente (motores alimentados por variador de frecuencia). Se distinguen dos casos:

- a. La intensidad que se mide es la de entrada al variador (I_T). La tensión es la de la red: el cálculo es idéntico al del apartado 2 porque la tensión a considerar es la de entrada.
- b. La intensidad que se mide es la de salida del variador (I_{T2}). La tensión de salida del variador es aproximadamente proporcional a la velocidad del motor [6] para mantener la ratio tensión/frecuencia. La expresión a emplear es:

$$P \text{ [kW]} = \frac{\sqrt{3} \cdot V \cdot I_{T2} \cdot \cos(\varphi) \cdot n}{1\,000 \cdot n_{\max}} \quad (5)$$

Donde n es la velocidad de rotación del motor y n_{\max} su velocidad nominal (a la frecuencia de la red).

- 4) Potencia calorífica de la quema de gas natural: se emplea el poder calorífico inferior (por las temperaturas empleadas) y los caudales disponibles.

$$P \text{ [kW]} = \text{PCI} \cdot q \quad (6)$$

Donde PCI es el poder calorífico inferior del gas natural [10.5 kWh/Nm³] y q el caudal de gas que ingresa a los diferentes quemadores [Nm³/h].

2.2.3.1.2 Código para el software B por categorías

Se marcan en negrita el texto correspondiente a variables (tags) del software B (existentes o que se crearan para alojar los resultados de los cálculos presentados).

2.2.3.1.2.1 Gas total

ESF1_PM6_Total_Gas_eSplit_Level_00_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = \text{ESF1_PM6_Gas_Flow_In_Tag_624MC101-FT01:Value}^{(10.5)}$

2.2.3.1.2.2 Gas campana

ESF1_PM6_Hood_Gas_eSplit_Level_00_Calc (suma de las hijas).

ESF1_PM6_Hood_Gas_eSplit_Level_01_DE_Gas_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = \text{ESF1_PM6_Gas_Consum_Hood_Dry_End_Flow_In_Tag_624MC101-FT03: Value}^{(10.5)}$

ESF1_PM6_Hood_Gas_eSplit_Level_01_WE_Gas_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = \text{ESF1_PM6_Gas_Consum_Hood_Wet_End_Flow_In_Tag_624MC101-FT02: Value}^{(10.5)}$

2.2.3.1.2.3 Gas caldera

ESF1_PM6_Boiler_Gas_eSplit_Level_00_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = \text{ESF1_PM6_Boiler_Gas_Flow_In_Tag_695MU001-FT01:Value}^{(10.5)}$

2.2.3.1.2.4 Electricidad total

ESF1_PM6_Total_Electricity_eSplit_Level_00_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = \text{ESF1_PM6_KE603-001-01_Active_Power_Tag_601-01-AP:Value} + \text{ESF1_PM6_KE603-001-02_Active_Power_Tag_601-02-AP:Value}$

2.2.3.1.2.5 Aproximación de pasta

ESF1_PM6_Approach_eSplit_Level_00_Calc (suma de las hijas).

ESF1_PM6_Approach_eSplit_Level_01_Fan_Pumps_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = \text{ESF1_PM6_KE603-001-07_Active_Power_Tag_603-014-ACP00:Value}$

ESF1_PM6_Approach_eSplit_Level_01_Screens_Calc (suma de las hijas)

ESF1_PM6_Approach_eSplit_Level_02_SF_Screen_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = 1.73*690*0.87*\text{ESF1_PM6_SF_Screen_Motor_Intensity_Tag_614SE233-M01_IT:Value}/1000$

ESF1_PM6_Approach_eSplit_Level_02_LF_Screen_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = 1.73*690*0.87*\text{ESF1_PM6_LF_Screen_Motor_Intensity_Tag_614SE203-M01_IT:Value}/1000$

ESF1_PM6_Approach_eSplit_Level_02_Secondary_Screen_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = (-15)*\text{ESF1_PM6_Secondary_Screen_State_Tag_614SE234-M01_RUN:Value}$

ESF1_PM6_Approach_eSplit_Level_01_Recirculation_Pumps_Calc (suma de las hijas)

ESF1_PM6_Approach_eSplit_Level_02_LF_Headbox_Recir_Pump_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = 18.5*\text{ESF1_PM6_Headbox_LF_Recir_Pump_Post_Tag_614PU204-M01_RPM-O:Value}/100$

ESF1_PM6_Approach_eSplit_Level_02_SF_Headbox_Recir_Pump_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = 18.5*\text{ESF1_PM6_Headbox_SF_Recir_Pump_Post_Tag_614PU234-M01_RPM-O:Value}/100$

2.2.3.1.2.6 Accionamientos máquina papel

ESF1_PM6_Drives_eSplit_Level_00_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = \text{ESF1_PM6_KE603-001-08_Active_Power_Tag_603-015-ACP00:Value}$

2.2.3.1.2.7 Vacío

ESF1_PM6_Vacuum_eSplit_Level_00_Calc (suma de las hijas)

ESF1_PM6_Vacuum_eSplit_Level_01_Vacuum_Pumps_Calc (suma de las hijas)

ESF1_PM6_Vacuum_eSplit_Level_02_Pumps_01_Calc.

Cálculo [kW]: $1.73*690*0.9*ESF1_PM6_Vacuum_System_Pump_01_Intensity_Tag_621PU610-M01_IT2*ESF1_PM6_Vacuum_System_Pump_01_Speed_Tag_621PU610-M01_RPM-O:Value/1000000$.

ESF1_PM6_Vacuum_eSplit_Level_02_Pumps_02_Calc.

Cálculo [kW]: $1.73*690*0.9*ESF1_PM6_Vacuum_System_Pump_02_Intensity_Tag_621PU620-M01_IT2*ESF1_PM6_Vacuum_System_Pump_02_Speed_Tag_621PU620-M01_RPM-O:Value/1000000$.

ESF1_PM6_Vacuum_eSplit_Level_02_Pumps_03_Calc.

Cálculo [kW]: $1.73*690*0.9*ESF1_PM6_Vacuum_System_Pump_03_Intensity_Tag_621PU630-M01_IT2*ESF1_PM6_Vacuum_System_Pump_03_Speed_Tag_621PU630-M01_RPM-O:Value/1000000$.

ESF1_PM6_Vacuum_eSplit_Level_02_Pumps_04_Calc.

Cálculo [kW]: $1.73*690*0.9*ESF1_PM6_Vacuum_System_Pump_04_Intensity_Tag_621PU640-M01_IT2*ESF1_PM6_Vacuum_System_Pump_04_Speed_Tag_621PU640-M01_RPM-O:Value/1000000$.

ESF1_PM6_Vacuum_eSplit_Level_01_Vacuum_Auxiliary_Calc (suma de las hijas)

ESF1_PM6_Vacuum_eSplit_Level_02_Cooling_Tower_Fan_Calc. Cálculo: $P [kW] = (-9.4)*ESF1_PM6_Vacuum_System_Cooling_Tower_State_Tag_621HE001-M01_RUN:Value$

ESF1_PM6_Vacuum_eSplit_Level_02_Cooling_Tower_Pump_1_Calc. Cálculo: $P [kW] = (-9.4)*ESF1_PM6_Vacuum_Pit_Pump_State_Tag_621PU511-M01_RUN:Value$

ESF1_PM6_Vacuum_eSplit_Level_02_Cooling_Tower_Pump_2_Calc. Cálculo: $P [kW] = (-9.4)*ESF1_PM6_Vacuum_Pit_Pump_State_Tag_621PU512-M01_RUN:Value$

ESF1_PM6_Vacuum_eSplit_Level_02_Ubox_Separator_Pump_Calc. Cálculo: $P[kW]=(-6.4)*ESF1_PM6_Vacuum_System_Ubox_Sep_Tank_Pump_State_Tag_621PU310-M01_RUN:Value$

2.2.3.1.2.8 Electricidad campana

ESF1_PM6_Hood_Electricity_eSplit_Level_00_Calc (suma de las hijas)

ESF1_PM6_Hood_Electricity_eSplit_Level_01_Cascade_Fan_Calc. Cálculo: $P[kW] = 19.7*ESF1_PM6_Hood_Cascade_Fan_Speed_Tag_624FN901-M01_RPM_O:Value/1500$

ESF1_PM6_Hood_Electricity_eSplit_Level_01_Make_Up_Fan_Calc. Cálculo: $P[kW] = 12.1*ESF1_PM6_Hood_Aux_Make_Up_Air_Fan_Speed_Tag_624FN201-M01_RPM-O:Value/1500$

ESF1_PM6_Hood_Electricity_eSplit_Level_01_Exhaust_Fan_Calc. Cálculo: $P[kW] = ESF1_PM6_Hood_Aux_Exhaust_Air_Fan_Power_Tag_624FN101-M01_PW:Value$.

ESF1_PM6_Hood_Electricity_eSplit_Level_01_Wet_End_Recirculation_Fan_Calc. Cálculo: $P[kW] = ESF1_PM6_Hood_Wet_End_Recir_Fan_Power_Tag_624FN401-M01_PW:Value$.

ESF1_PM6_Hood_Electricity_eSplit_Level_01_Dry_End_Recirculation_Fan_Calc. Cálculo: $P[kW] = ESF1_PM6_Hood_Dry_End_Recir_Fan_Power_Tag_624FN701-M01_PW:Value$.

ESF1_PM6_Hood_Electricity_eSplit_Level_01_Wet_End_Combustion_Fan_Calc. Cálculo: $P[kW] = ESF1_PM6_Hood_Wet_End_Combustion_Fan_Power_Tag_624FN501-M01_PW:Value$.

ESF1_PM6_Hood_Electricity_eSplit_Level_01_Dry_End_Combustion_Fan_Calc. Cálculo: $P[kW] = ESF1_PM6_Hood_Dry_End_Combustion_Fan_Power_Tag_624FN801-M01_PW:Value$.

2.2.3.1.2.9 Preparación de pasta

ESF1_PM6_Stock_eSplit_Level_00_Calc (suma de las hijas).

ESF1_PM6_Stock_eSplit_Level_01_Agitators_Calc (suma de las hijas)

ESF1_PM6_Stock_eSplit_Level_02_LF_Dump_Chest_Agitator_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = \text{ESF1_PM6_LF_Dump_Chest_Agitator_Speed_Tag_614AT702-M01_RUN:Value}*(-44)$

ESF1_PM6_Stock_eSplit_Level_02_LF_Mixing_Chest_Agitator_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = \text{ESF1_PM6_LF_Mixing_Chest_Agitator_State_Tag_614AT400-M01_RUN:Value}*(-8.8)$

ESF1_PM6_Stock_eSplit_Level_02_LF_Machine_Chest_Agitator_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = \text{ESF1_PM6_LF_Machine_Chest_Agitator_State_Tag_614AT401-M01_RUN:Value}*(-8.8)$

ESF1_PM6_Stock_eSplit_Level_02_SF_Dump_Chest_Agitator_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = \text{ESF1_PM6_SF_Dump_Chest_Agitator_Speed_Tag_614AT722-M01_RUN:Value}*(-44)$

ESF1_PM6_Stock_eSplit_Level_02_SF_Mixing_Chest_Agitator_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = \text{ESF1_PM6_SF_Mixing_Chest_Agitator_State_Tag_614AT420-M01_RUN:Value}*(-8.8)$

ESF1_PM6_Stock_eSplit_Level_02_SF_Machine_Chest_Agitator_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = \text{ESF1_PM6_SF_Machine_Chest_Agitator_State_Tag_614AT421-M01_RUN:Value}*(-8.8)$

ESF1_PM6_Stock_eSplit_Level_02_BF_Dump_Chest_Agitator_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = \text{ESF1_PM6_Broke_Dump_Chest_Agitator_State_Tag_614AT503-M01_RUN:Value}*(-12)$

ESF1_PM6_Stock_eSplit_Level_02_BF_Happy_Meal_Chest_Agitator_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = \text{ESF1_PM6_Broke_Chest_Agitator_State_Tag_631AT100-M01_RUN:Value}*(-18)$

ESF1_PM6_Stock_eSplit_Level_01_Stock_Pumps_Calc (suma de las hijas)

ESF1_PM6_Stock_eSplit_Level_02_LF_Dump_Chest_Out_Pump_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = \text{ESF1_PM6_LF_Dump_Chest_Pump_Intensity_Tag_614PU702-M01_IT:Value}*1.73*690*0.82/1000$

ESF1_PM6_Stock_eSplit_Level_02_LF_Mixing_Chest_Out_Pump_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = \text{ESF1_PM6_LF_Mixing_Chest_Pump_State_Tag_614PU401-M01_RUN:Value}*(-24)$

ESF1_PM6_Stock_eSplit_Level_02_LF_Machine_Chest_Out_Pump_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = \text{ESF1_PM6_LF_Machine_Chest_Pump_Speed_Tag_614PU402-M01-RPM-O:Value}/100*(24)$

ESF1_PM6_Stock_eSplit_Level_02_SF_Dump_Chest_Out_Pump_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = \text{ESF1_PM6_SF_Dump_Chest_Pump_Intensity_Tag_614PU722-M01_IT:Value}*1.73*690*0.8/1000$

ESF1_PM6_Stock_eSplit_Level_02_SF_Mixing_Chest_Out_Pump_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = \text{ESF1_PM6_SF_Mixing_Chest_Pump_State_Tag_614PU421-M01_RUN:Value}*(-24)$

ESF1_PM6_Stock_eSplit_Level_02_SF_Machine_Chest_Out_Pump_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = \text{ESF1_PM6_SF_Machine_Chest_Pump_Speed_Tag_614PU422-M01_RPM-O:Value}/100*(24)$

ESF1_PM6_Stock_eSplit_Level_02_BF_Dump_Chest_Out_Pump_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = \text{ESF1_PM6_Broke_Dump_Chest_Pump_State_Tag_614PU503-M01_RUN:Value}*(-12)$

ESF1_PM6_Stock_eSplit_Level_02_BF_Happy_Meal_Out_Chest_Pump_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = \text{ESF1_PM6_Broke_Chest_Pump_State_Tag_631PU101-M01_RUN:Value}*(-4.7)$

ESF1_PM6_Stock_eSplit_Level_01_Refiners_Calc (suma de las hijas)

ESF1_PM6_Stock_eSplit_Level_02_LF_Refiner_1_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = \text{ESF1_PM6_Refiner_1_Power_Tag_614MA801-M01-POWER:Value}$

ESF1_PM6_Stock_eSplit_Level_02_LF_Refiner_2_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = \text{ESF1_PM6_Refiner_2_Power_Tag_614MA802-M01-POWER:Value}$

ESF1_PM6_Stock_eSplit_Level_02_SF_Refiner_3_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = \text{ESF1_PM6_Refiner_3_Power_Tag_614MA803-M01-POWER:Value}$

2.2.3.1.2.10 Extracción de polvo

ESF1_PM6_Dust_eSplit_Level_00_Calc (suma de las hijas)

ESF1_PM6_Dust_eSplit_Level_01_Mist Removal_Fan_Calc. Cálculo: $P[\text{kW}] = \text{ESF1_PM6_Mist_Sys_1_Mist_Ext_Fan_State_Tag_602FN101-M01_RUN:Value}*(-117)$

ESF1_PM6_Dust_eSplit_Level_01_Dust Removal_Fan_Calc.

Cálculo: $P[\text{kW}] = \text{ESF1_PM6_Dust_Syst_Fan_Intensity_Tag_696FN201-M01_IT2:Value}* \text{ESF1_PM6_Dust_Syst_Fan_Speed_Out_Tag_696FN201-M01_RPM-O:Value}*690*1.73*0.83/1000/1000$

ESF1_PM6_Dust_eSplit_Level_01_UTM_Pulper_Fan_Calc. Cálculo: $P [kW] = \text{ESF1_PM6_Mist_Sys_2_Mist_Ext_Fan_Intensity_Tag_602FN401-M01_IT:Value} * 690 * 1.73 * 0.85 / 1000$

2.2.3.1.2.11 Ventilación y refrigeración

ESF1_PM6_HVAC_eSplit_Level_00_Calc (suma de las hijas).

ESF1_PM6_HVAC_eSplit_Level_01_Air_Introduction_Calc (suma de las hijas)

ESF1_PM6_HVAC_eSplit_Level_02_Air_Introduction_01_Calc. Cálculo. $P[kW] = (-44) * \text{ESF1_PM6_Hall_Vent_Imp_Fan_01_State_Tag_602FN601-M01_RUN:Value}$

ESF1_PM6_HVAC_eSplit_Level_02_Air_Introduction_02_Calc. Cálculo. $P[kW] = (-44) * \text{ESF1_PM6_Hall_Vent_Imp_Fan_02_State_Tag_602FN602-M01_RUN:Value}$

ESF1_PM6_HVAC_eSplit_Level_02_Air_Introduction_03_Calc. Cálculo. $P[kW] = (-44) * \text{ESF1_PM6_Hall_Vent_Imp_Fan_03_State_Tag_602FN603-M01_RUN:Value}$

ESF1_PM6_HVAC_eSplit_Level_02_Air_Introduction_04_Calc. Cálculo. $P[kW] = (-44) * \text{ESF1_PM6_Hall_Vent_Imp_Fan_04_State_Tag_602FN604-M01_RUN:Value}$

ESF1_PM6_HVAC_eSplit_Level_02_Air_Introduction_Roof_Calc. Cálculo. $P[kW] = (-72) * \text{ESF1_PM6_Hall_Vent_Imp_Fan_06_State_Tag_602FN701-M01_RUN:Value}$

ESF1_PM6_HVAC_eSplit_Level_01_Roof_Air_Extraction_Calc (suma de las hijas).

ESF1_PM6_HVAC_eSplit_Level_02_Roof_Air_Extraction_01_Calc. Cálculo. $P[kW] = (-4.4) * \text{ESF1_PM6_Hall_Vent_Ext_Fan_05_State_Tag_602FN801-M01_RUN:Value}$

ESF1_PM6_HVAC_eSplit_Level_02_Roof_Air_Extraction_02_Calc. Cálculo. $P[kW] = (-4.4) * \text{ESF1_PM6_Hall_Vent_Ext_Fan_06_State_Tag_602FN802-M01_RUN:Value}$

ESF1_PM6_HVAC_eSplit_Level_02_Roof_Air_Extraction_03_Calc. Cálculo. $P[kW] = (-4.4) * \text{ESF1_PM6_Hall_Vent_Ext_Fan_03_State_Tag_602FN803-M01_RUN:Value}$

ESF1_PM6_HVAC_eSplit_Level_02_Roof_Air_Extraction_04_Calc. Cálculo. $P[kW] = (-4.4) * \text{ESF1_PM6_Hall_Vent_Ext_Fan_04_State_Tag_602FN804-M01_RUN:Value}$

ESF1_PM6_HVAC_eSplit_Level_02_Roof_Air_Extraction_05_Calc. Cálculo. $P[kW] = (-4.4) * \text{ESF1_PM6_Hall_Vent_Ext_Fan_01_State_Tag_602FN805-M01_RUN:Value}$

ESF1_PM6_HVAC_eSplit_Level_02_Roof_Air_Extraction_06_Calc. Cálculo. $P[kW] = (-4.4) * \text{ESF1_PM6_Hall_Vent_Ext_Fan_08_State_Tag_602FN806-M01_RUN:Value}$

ESF1_PM6_HVAC_eSplit_Level_02_Roof_Air_Extraction_07_Calc. Cálculo. $P[kW] = (-4.4) * \text{ESF1_PM6_Hall_Vent_Ext_Fan_07_State_Tag_602FN807-M01_RUN:Value}$

ESF1_PM6_HVAC_eSplit_Level_02_Mezzanine_Air_Extraction_01_Calc. Cálculo. $P[kW] = (-4.4) * \text{ESF1_PM6_Hall_Vent_Ext_Fan_10_State_Tag_602FN901-M01_RUN:Value}$

ESF1_PM6_HVAC_eSplit_Level_02_Mezzanine_Air_Extraction_02_Calc. Cálculo. $P[kW] = (-4.4) * \text{ESF1_PM6_Hall_Vent_Ext_Fan_11_State_Tag_602FN902-M01_RUN:Value}$

ESF1_PM6_HVAC_eSplit_Level_02_Mezzanine_Air_Extraction_03_Calc. Cálculo. $P[kW] = (-4.4) * \text{ESF1_PM6_Hall_Vent_Ext_Fan_12_State_Tag_602FN903-M01_RUN:Value}$

ESF1_PM6_HVAC_eSplit_Level_01_Cooling_Calc (suma de las hijas).

ESF1_PM6_HVAC_eSplit_Level_02_AHU_Chiller_Calc. Cálculo: $P [kW] = \text{sqrt}(3) * 400 * 0.8 * \text{ESF1_PM6_Chiller_Intensity_Tag_687MA110-001:IT:Value} / 1000$

ESF1_PM6_HVAC_eSplit_Level_02_AHU_Imp_Fan_FN120_Calc. Cálculo: $P [kW] = (-12) * \text{ESF1_PM6_MCC_Cool_Sys_Imp_Fan_1_State_Out_Tag_687FN120-M01_RUN:Value}$

ESF1_PM6_HVAC_eSplit_Level_02_AHU_Imp_Fan_FN130_Calc. Cálculo: $P [kW] = (-12) * \text{ESF1_PM6_MCC_Cool_Sys_Imp_Fan_3_State_Out_Tag_687FN120-M01_RUN:Value}$

ESF1_PM6_HVAC_eSplit_Level_02_AHU_Recirc_Fan_FN121_Calc. Cálculo: $P [kW] = (-4.4) * \text{ESF1_PM6_MCC_Cool_Sys_Imp_Fan_2_State_In_Tag_687FN120-M01_RUN:Value}$

ESF1_PM6_HVAC_eSplit_Level_02_AHU_Recirc_Fan_FN131_Calc. Cálculo: $P [kW] = (-4.4) * \text{ESF1_PM6_MCC_Cool_Sys_Imp_Fan_4_State_In_Tag_687FN120-M01_RUN:Value}$

2.2.3.1.2.12 Iluminación

ESF1_PM6_Lighting_eSplit_Level_00_Calc. Cálculo: $P[kW] = 95$

2.2.3.1.2.13 Condensados

ESF1_PM6_Condensate_eSplit_Level_00_Calc (suma de las hijas).

ESF1_PM6_Condensate_eSplit_Level_01_Condensate_Pumps_Calc (suma de las hijas)

ESF1_PM6_Condensate_eSplit_Level_02_Yankee_Cond_Pump_1_Calc. Cálculo: $P \text{ [kW]} = (-17.6) * \text{ESF1_PM6_Yankee_Condens_Pump_1_State_Tag_695PU300-M01_RUN:Value}$

ESF1_PM6_Condensate_eSplit_Level_02_Yankee_Cond_Pump_2_Calc. Cálculo: $P \text{ [kW]} = (-17.6) * \text{ESF1_PM6_Yankee_Condens_Pump_2_State_Tag_695PU301-M01_RUN:Value}$

ESF1_PM6_Condensate_eSplit_Level_01_Steam_Generator_Pump_Calc. Cálculo: $P \text{ [kW]} = \text{sqrt}(3) * 690 * \text{ESF1_PM6_FG_Pump_Intensity_Tag_695PU1003-M01_IT:Value} / 1000$

2.2.3.1.2.14 Compresores

ESF1_PM6_Compressor_eSplit_Level_00_Calc (suma de las hijas).

ESF1_PM6_Compressor_eSplit_Level_01_Compressor_01_Calc. Cálculo: $P \text{ [kW]} = \text{sqrt}(3) * 400 * 0.8 * \text{ESF1_PM6_Compresor_Compr_1_Intensity_Tag_693MA001_IT:Value}$

ESF1_PM6_Compressor_eSplit_Level_01_Compressor_03_Calc. Cálculo: $P \text{ [kW]} = \text{sqrt}(3) * 400 * 0.8 * \text{ESF1_PM6_Compresor_Compr_3_Intensity_Tag_693MA003_IT:Value}$

ESF1_PM6_Compressor_eSplit_Level_01_Compressor_04_Calc. Cálculo: $P \text{ [kW]} = \text{sqrt}(3) * 400 * 0.8 * \text{ESF1_PM6_Compresor_Compr_4_Intensity_Tag_693MA004_IT:Value}$

2.2.3.1.2.15 Rotos

ESF1_PM6_Broke_eSplit_Level_00_Calc (suma de las hijas).

ESF1_PM6_Broke_eSplit_Level_01_UTM_Pulper_Calc (suma de las hijas).

ESF1_PM6_Broke_eSplit_Level_02_UTM_Pulper_Agitator_01_Calc. Cálculo: $P \text{ [kW]} = \text{sqrt}(3) * 690 * 0.8 * \text{ESF1_PM6_UTM_Pulper_Rotor_1_Intensity_Tag_614AT501-M01_IT1:Value} / 1000$

ESF1_PM6_Broke_eSplit_Level_02_UTM_Pulper_Agitator_02_Calc. Cálculo: $P \text{ [kW]} = \text{sqrt}(3) * 690 * 0.8 * \text{ESF1_PM6_UTM_Pulper_Rotor_2_Intensity_Tag_614AT502-M01_IT1:Value} / 1000$

ESF1_PM6_Broke_eSplit_Level_02_UTM_Pulper_Pump_Calc. Cálculo: $P \text{ [kW]} = (-60/100) * \text{ESF1_PM6_UTM_Pulper_Pump_Speed_Tag_614PU501-M01_RPM-I:Value} * \text{ESF1_PM6_UTM_Pulper_Pump_State_Out_Tag_614PU501-M01_RUN:Value}$

ESF1_PM6_Broke_eSplit_Level_01_Broke_Pulper_Calc (suma de las hijas).

ESF1_PM6_Broke_eSplit_Level_02_Broke_Pulper_Agitator_Calc. Cálculo: $P \text{ [kW]} = \text{sqrt}(3) * 690 * 0.8 * \text{ESF1_PM6_BR_Pulper_Agitator_Intensity_F2_Tag_614AT601-M01_IT:Value} / 1000$

ESF1_PM6_Broke_eSplit_Level_02_Broke_Pulper_Discharge_Pump_Calc. Cálculo: $P \text{ [kW]} = (-135) * \text{ESF1_PM6_BR_Pulper_Pump_State_Tag_614PU601-M01_RUN:Value}$

ESF1_PM6_Broke_eSplit_Level_01_Depuration_Calc (suma de las hijas).

ESF1_PM6_Broke_eSplit_Level_02_Broke_Screen_Calc. Cálculo: $P \text{ [kW]} = \text{sqrt}(3) * 690 * 0.8 * \text{ESF1_PM6_BR_Screen_Intensity_Tag_614SE501-M01_IT2:Value} / 1000$

ESF1_PM6_Broke_eSplit_Level_02_Deflaker_01_Calc. Cálculo: $P \text{ [kW]} = (-60) * \text{ESF1_PM6_Deflaker_State_Tag_614MA502-M01_RUN:Value}$

ESF1_PM6_Broke_eSplit_Level_02_Deflaker_02_Calc. Cálculo: $P \text{ [kW]} = (-60) * \text{ESF1_PM6_Deflaker_02_State_Tag_631MA102-M01_RUN:Value}$

ESF1_PM6_Broke_eSplit_Level_02_Deflaker_03_Calc. Cálculo: $P \text{ [kW]} = (-60) * \text{ESF1_PM6_Deflaker_03_State_Tag_631MA103-M01_RUN:Value}$

2.2.3.1.2.16 Pulpeado

ESF1_PM6_Pulping_eSplit_Level_00_Calc (suma de las hijas)

ESF1_PM6_Pulping_eSplit_Level_01_LF_Pulper_Calc (suma de las hijas)

ESF1_PM6_Pulping_eSplit_Level_02_LF_Pulper_Agitator_Calc.

Cálculo: $P \text{ [kW]} = \sqrt{3} * 0.82 * 690 * (\text{ESF1_PM6_LF_Pulper_Agitator_Speed_Tag_614AT701-M01_RPM-O:Value}/100) * \text{ESF1_PM6_LF_Pulper_Agitator_Intensity_F2_Tag_614AT701-M01_IT2:Value}/1000$

ESF1_PM6_Pulping_eSplit_Level_01_LF_Pulper_Discharge_Pump_Calc. Cálculo: $P \text{ [kW]} = \sqrt{3} * 690 * 0.82 * \text{ESF1_PM6_LF_Pulper_Pump_Intensity_Tag_614PU701-M01_IT:Value}$

ESF1_PM6_Pulping_eSplit_Level_01_SF_Pulper_Calc (suma de las hijas)

ESF1_PM6_Pulping_eSplit_Level_02_SF_Pulper_Agitator_Calc.

Cálculo: $P \text{ [kW]} = \sqrt{3} * 0.85 * 690 * (\text{ESF1_PM6_SF_Pulper_Agitator_Speed_Tag_614AT721-M01_RPM-O:Value}/100) * \text{ESF1_PM6_SF_Pulper_Agitator_Intensity_F2_Tag_614AT721-M01_IT2:Value}/1000$

ESF1_PM6_Pulping_eSplit_Level_01_SF_Pulper_Discharge_Pump_Calc. Cálculo: $P \text{ [kW]} = \sqrt{3} * 690 * 0.82 * \text{ESF1_PM6_SF_Pulper_Pump_Intensity_Tag_614PU721-M01_IT:Value}$

2.2.3.1.2.17 Otros

ESF1_PM6_Others_eSplit_Level_00_Calc. Cálculo: $P \text{ [kW]} = \text{ESF1_PM6_Total_Electricity_eSplit_Level_00_Calc} -$

- **ESF1_PM6_Approach_eSplit_Level_00_Calc** -
- **ESF1_PM6_Drives_eSplit_Level_00_Calc** -
- **ESF1_PM6_Vacuum_eSplit_Level_00_Calc** -
- **ESF1_PM6_Hood_Electricity_eSplit_Level_00_Calc** -
- **ESF1_PM6_Stock_eSplit_Level_00_Calc** -
- **ESF1_PM6_Dust_eSplit_Level_00_Calc** -
- **ESF1_PM6_HVAC_eSplit_Level_00_Calc** -
- **ESF1_PM6_Lighting_eSplit_Level_00_Calc** -
- **ESF1_PM6_Condensate_eSplit_Level_00_Calc** -
- **ESF1_PM6_Compressor_eSplit_Level_00_Calc** -
- **ESF1_PM6_Broke_eSplit_Level_00_Calc** -
- **ESF1_PM6_Pulping_eSplit_Level_00_Calc**

2.2.3.2 Cálculo de energía específica

El cálculo de potencia específica es una adición sencilla a toda la estructura creada (o proyectada) anteriormente. Debe calcularse la energía consumida en un cierto periodo a partir de las potencias instantáneas de cada categoría eSplit y luego dividir-la por la masa de papel tisú fabricada. Se plantean dos alternativas complementarias que deberían implementarse en paralelo.

1. **Cálculo de energía específica por pareja de bobinas fabricada.** La pareja de bobinas (denominada barrada) es la unidad más pequeña producida por la máquina de papel (equivalente a unas 16 toneladas) y su masa exacta se conoce tras su paso por una báscula automatizada. También se conoce exactamente su tiempo de bobinado.

Esta aproximación tiene la ventaja de que preserva el máximo detalle de las variaciones de consumo (hasta la unidad másica indivisible, la barrada). Sin embargo, si el papel no se está enrollando (por limpieza, avería...) no hay un tiempo o masa asociados y esta energía no se puede contabilizar.

Se plantea contabilizar la energía consumida para la producción de barradas individuales como:

$$E_{\text{específica, } i} = \frac{\int_0^{t_{\text{bobinado}}} P_i(t) dt}{m_{\text{barrada}}}$$

Donde $E_{\text{específica, } i}$ es la energía específica para la barrada o bobina en kWh/t en la categoría eSplit i , t_{bobinado} es el tiempo de bobinado en horas, P_i es la potencia instantánea para la categoría eSplit i y m_{barrada} es la masa de la barrada en toneladas. Dado que el tiempo de bobinado es del orden de 1 000 segundos, la integral se podría evaluar numéricamente por el método de rectángulos con un paso de 1 segundo y obtener la precisión suficiente. Este cálculo puede realizarse sobre el software A que tiene disponible toda la información referente a bobinas y puede leer las nuevas variables de potencia del software B.

2. **Cálculo de energía específica diaria.** Como alternativa para tener en cuenta la energía desperdiciada por estar fabricando papel sin bobinarlo de forma robusta se plantea calcular la energía total consumida en cada categoría y dividirla por la producción diaria neta (perfectamente conocida). En este caso la integral abarcaría todo el día productivo (de 06:00 h a 06:00 h del día siguiente).

$$E_{\text{específica, } i} = \frac{\int_0^{24 \text{ h}} P_i(t) dt}{m_{\text{producción}}}$$

Donde $E_{\text{específica, } i}$ es la energía específica promedio de las últimas 24 horas en kWh/t o MWh/t para la categoría eSplit i y $m_{\text{producción}}$ es la masa de papel tisú producida en el día productivo en toneladas. En este caso se debería evaluar el paso adecuado para obtener la precisión requerida (cálculo preciso hasta 0.01 MWh/t). Esta aproximación da como resultado los valores de consumo específico que exige la compañía para el estándar eSplit (energía específica por categorías e incluyendo la energía desperdiciada por no bobinar) pero no permite distinguir el detalle de la distribución temporal del consumo a lo largo del día productivo.

3 Planos

Por la naturaleza de este proyecto no se generan nuevos planos durante su ejecución.

4 Presupuesto

El proyecto se desarrolla sin necesidad de recursos materiales o informáticos adicionales a los preexistentes en la PM6.

El coste es únicamente debido a mano de obra, en este caso proporcionada por el autor del trabajo en la forma de convenio de prácticas curriculares de 2 meses de duración. Su coste se desglosa a continuación:

Tabla 9. Coste de mano de obra del proyecto

Concepto	Cantidad	Precio Unitario [€]*	Precio [€]
Coste mensual trabajador	2	1 058.09	2 116.18
TOTAL			2 116.18

(*). Coste para la empresa