



Aplicación del análisis termográfico en el estudio de la variación de humedad en papel tisú

Introducción

Con el objetivo de estudiar la influencia de los elementos de remoción de agua (formación/prensado/secado) en la calidad de la hoja de papel en la enrolladora, utilizaremos básicamente dos herramientas, una de ellas es la imagen térmica (análisis termográfico a través de infrarrojos) que define el perfil transversal de temperatura y registra la variación longitudinal de temperatura; La otra será una herramienta matemática basada en la "Transformada Rápida de Fourier" o "FFT" (Fast Fourier Transform) para el estudio longitudinal de la variación de la temperatura.

Método

Como el aumento de la temperatura de la hoja es inversamente proporcional a la masa de agua remanente, la humedad relativa se correlaciona con esta temperatura. Por lo tanto, las regiones más frías contienen una mayor masa de agua y las regiones más cálidas contienen una menor masa de agua. De esta manera correlacionamos la imagen térmica con el contenido de humedad de la hoja, así como sus variaciones.

Respecto a las variaciones de temperatura en la superficie del Yankee, consideramos que temperaturas más altas sugieren una mayor transferencia de calor del vapor interno a la superficie externa y temperaturas más bajas sugieren una menor transferencia de calor. Si asumimos que el espesor de la camisa es uniforme, la variación de temperatura en la superficie externa del Yankee es el resultado de una variación en el espesor del anillo de condensado en la cara interna.

Radiación Infrarroja

La radiación infrarroja fue descubierta en 1800 por William Herschel, un astrónomo inglés de origen alemán. Herschel colocó un termómetro de mercurio en el espectro obtenido por un prisma de cristal para medir el calor emitido por cada color. Descubrió que el calor era más fuerte en el lado rojo del espectro, y observó que allí no había luz. Este fue el primer experimento que demostró que el calor puede capturarse en forma de imagen, como es el caso de la luz visible.

El infrarrojo es una frecuencia electromagnética natural emitida por todos los materiales, con una intensidad proporcional a su temperatura.

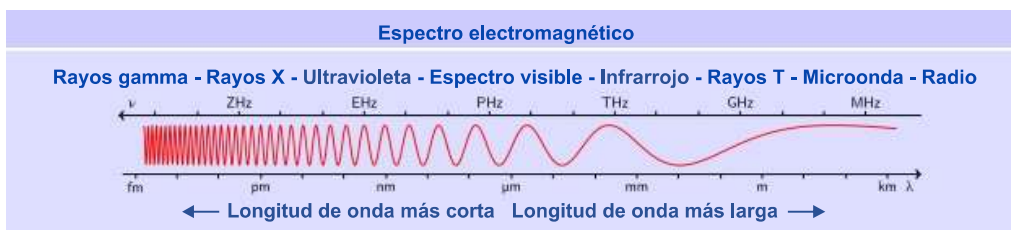


Figura 1: Espectro electromagnético



La “radiación infrarroja” es una radiación no ionizante en la porción “invisible” del espectro electromagnético que está adyacente a las longitudes de onda largas, o extremo rojo del espectro de luz visible.

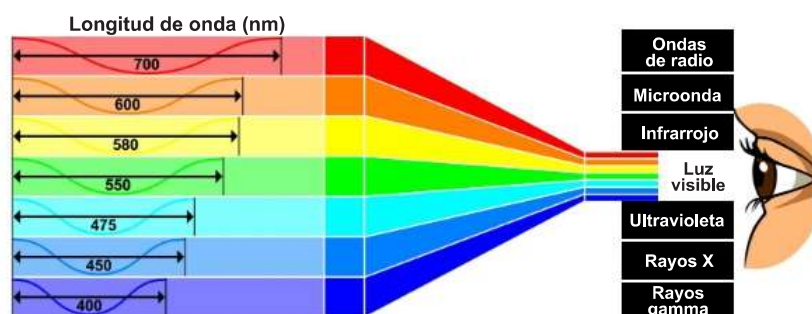


Figura 2: Espectro visible.

La termografía es una técnica para ampliar las imágenes del espectro infrarrojo a la visión humana. Por tanto, la captura de emisiones de frecuencia electromagnética en el rango infrarrojo reproducidas en una pantalla son los termo gramas o imágenes térmicas, que permiten visualizar la distribución del calor en la imagen enfocada.

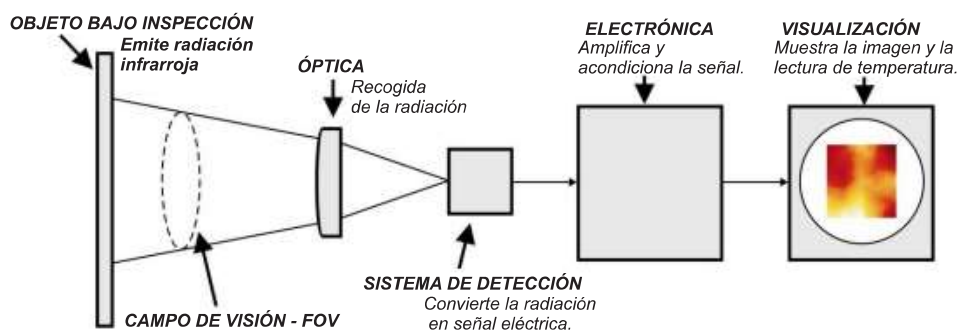


Figura 3: Esquema de cámara infrarroja.

A través de un visor térmico, es extremadamente fácil localizar regiones calientes o frías, a través de la interpretación de termo gramas que proporcionan imágenes, en rangos de temperatura que pueden abarcar desde -40°C hasta 1500°C.

Transformada Rápida de Fourier

En matemática, ingeniería y audio profesional, la “Transformada Rápida de Fourier” (del inglés “Fast Fourier Transform”, abreviado FFT) es un algoritmo que calcula la “Transformada Discreta de Fourier” (DFT) y su inversa (Teorema Inverso de Fourier), creado por el estadístico estadounidense John Tukey.

La Transformada Discreta de Fourier se obtiene “descomponiendo una secuencia de valores” en componentes de “diferentes frecuencias”. Esta operación es útil en muchos campos, sin embargo calcularla directamente a partir de la definición suele ser demasiado lento para ser práctico. Una “Transformada Rápida de Fourier” es una forma de calcular el mismo resultado más rápidamente.



Algoritmo representativo:

$$F(u) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) W_N^{ux}$$

A continuación, tenemos una representación esquemática de cómo se aplica el algoritmo “FFT” a una secuencia de valores en el dominio del tiempo, separándolos en grupos de diferentes longitudes de onda y sus amplitudes, y traza en un espectro de frecuencia con sus respectivas amplitudes.

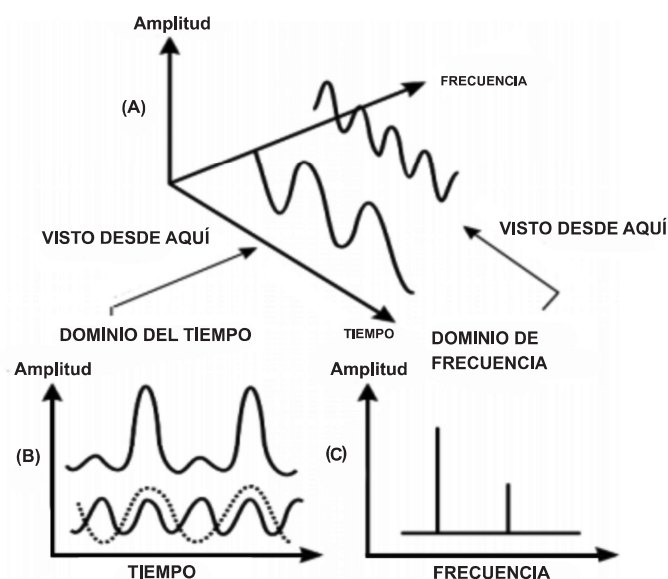


Figura 4: Esquema FFT.

Aplicación práctica

Con una cámara termográfica podemos filmar el papel en la enrolladora de la máquina y estudiar las variaciones de temperatura transversales y longitudinales y correlacionarlas con los elementos de la máquina.

Inicialmente, una imagen estática de la enrolladora ya permite observar la variación transversal de la temperatura, que, como ya hemos dicho, se correlaciona con la humedad del papel. Sin embargo, esto sólo nos mostraría dónde se encuentran los rangos de humedad y su intensidad, lo que sólo permitiría una correlación de la ubicación de los rangos húmedos con otras imágenes térmicas de los otros elementos de la máquina. No siempre es posible tomar imágenes de la superficie de los elementos de la máquina debido a la falta de espacio físico; exceso de niebla o polvo en el aire circundante. Cualquier material suspendido en el aire entre la cámara y la superficie que se está evaluando afecta la resolución de la imagen y, en consecuencia, los valores de temperatura.

A continuación, tenemos un ejemplo de una imagen del papel en la enrolladora, donde podemos ver las variaciones de color. En la parte inferior de la imagen tenemos una escala de temperaturas correlacionadas con tonos de color, los tonos más oscuros corresponden a temperaturas más bajas, los tonos más claros a temperaturas más altas.

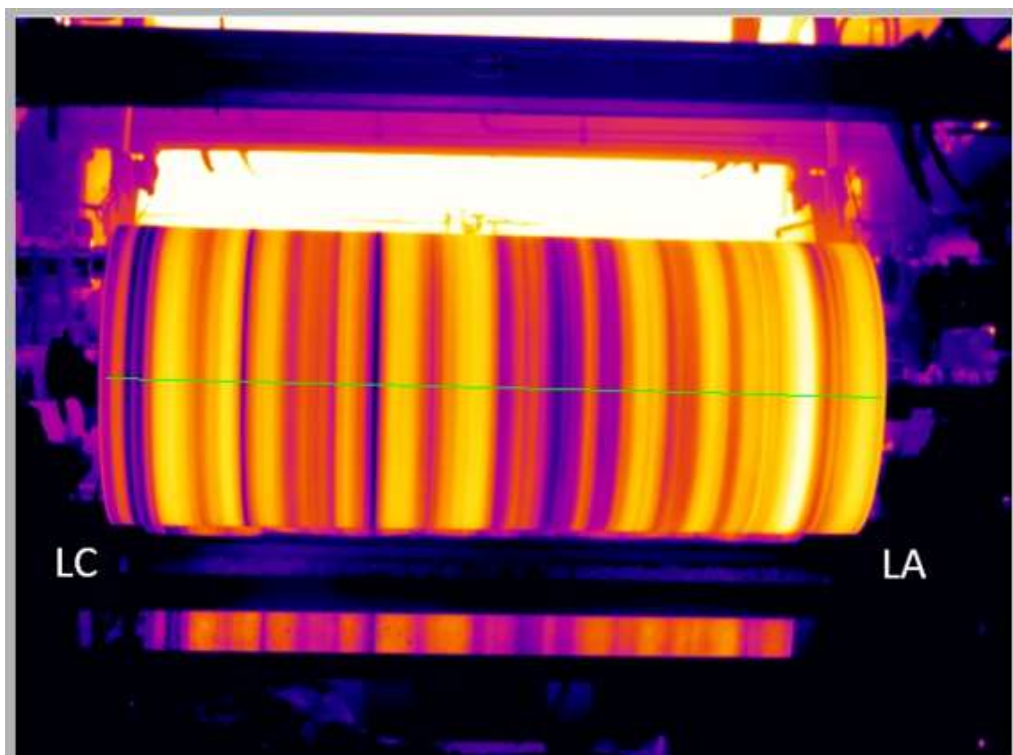


Figura 5: *Papel en el enrollador.*

El primer análisis que se puede hacer en esta imagen es lo significativa que es la variación transversal de la temperatura, ya que la escala de colores es ajustable a cualquier rango de temperatura. Por lo tanto, el análisis cualitativo, que sería visual, no es suficiente para definir si las variaciones son aceptables o no; Para eso, necesitamos evaluar la variación cuantitativa de la temperatura.

Por lo tanto, dibujamos la línea verde en el perfil (Figura 5), que se extiende desde el lado conductor (LC) hasta el lado de accionamiento (LA) de la enrolladora, y la variación de temperatura se trazada en un gráfico, como se muestra en la figura 6 a continuación.

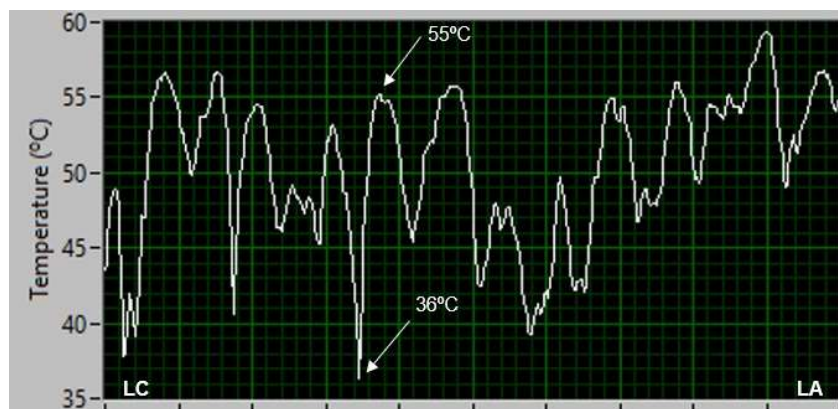


Figura 6: *Perfil transversal de temperatura en el enrollador.*



Con esta información podemos determinar si las variaciones son significativas o no. En la práctica, hemos observado que variaciones de temperatura adyacentes por debajo de 10°C no representan una variación en la humedad de la hoja suficientemente significativa como para causar problemas operativos. En el ejemplo anterior, observamos que esta diferencia entre picos y valles adyacentes alcanza valores muy superiores, llegando a alcanzar los 19°C entre pico y valle. Vale la pena señalar que este valor “aceptable” de 10°C es solo orientativo, ya que cada equipo opera en condiciones de mayor o menor exigencia, lo que cambia ligeramente la posibilidad de convivir con dichas variaciones.

Como hemos dicho antes, en algunas máquinas existe el espacio físico para tomar imágenes de algunos de los elementos que participan en el secado de la hoja, y no hay nada suspendido en el aire, entre la cámara y la superficie en cuestión. En el ejemplo siguiente, tenemos la superficie del Yankee, donde podemos comprobar el perfil de temperatura transversal.

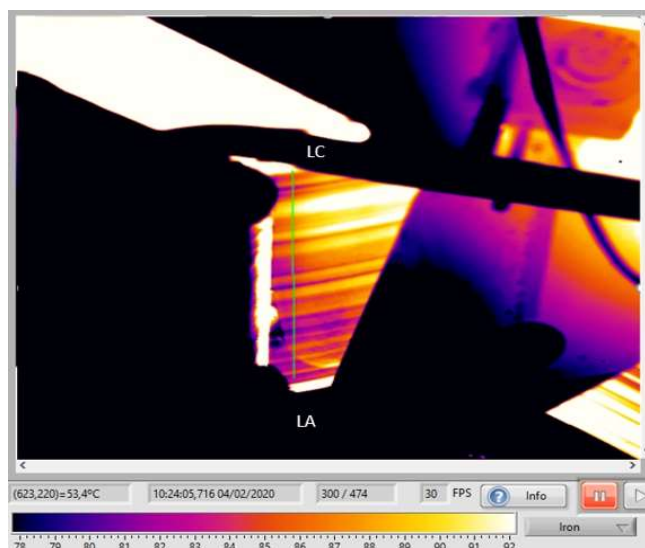


Figura 7: Superficie del Yankee.

De la misma manera que hicimos en el enrollador, al dibujar la línea de LC a LA, podemos generar un gráfico de temperatura, como se muestra a continuación.

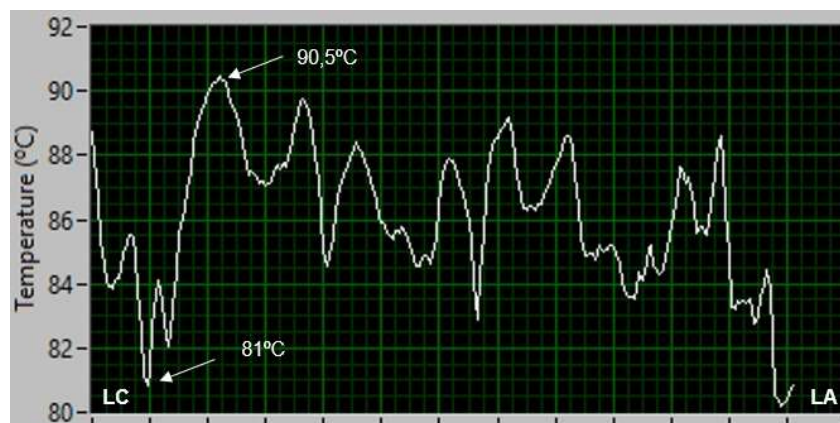


Figura 8: Perfil de temperatura transversal del Yankee.



En este ejemplo podemos ver que hay una variación de casi 10°C, lo que sería tolerable para el papel en el enrollador, pero no para la superficie del Yankee. Normalmente, variaciones adyacentes superiores a 5°C en la superficie del Yankee ya pueden ocasionar problemas operativos en la máquina de papel y/o en conversión.

Como ejemplo de la posibilidad de evaluar imágenes y perfiles transversales de temperatura, es posible verificar la contribución de las vestimentas. A continuación, se muestra una imagen del fieltro entre la sección formación y las prensas.

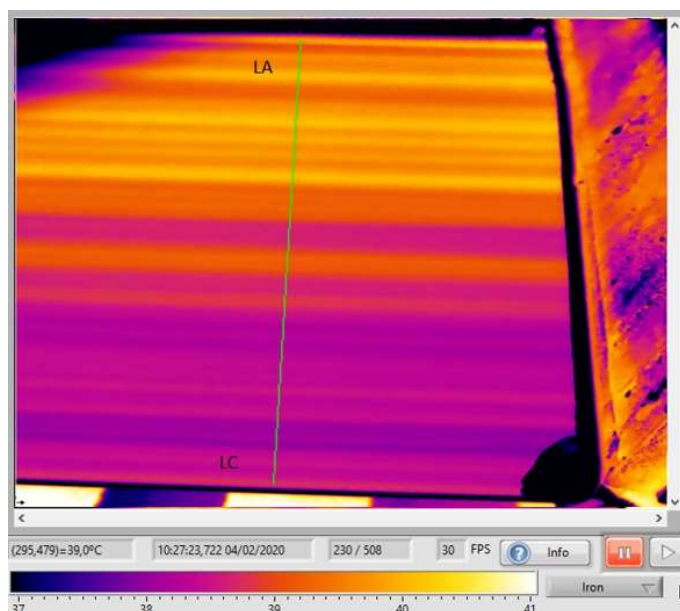


Figura 9: *Fieltro*.

De la misma forma que en las situaciones anteriores, es posible trazar el gráfico del perfil de temperatura transversal relativo a la imagen de arriba. Aquí tendremos menores variaciones de temperatura debido al bajo intercambio térmico, pero sirve para verificar si el comportamiento del perfil se puede correlacionar con el perfil del enrollador.

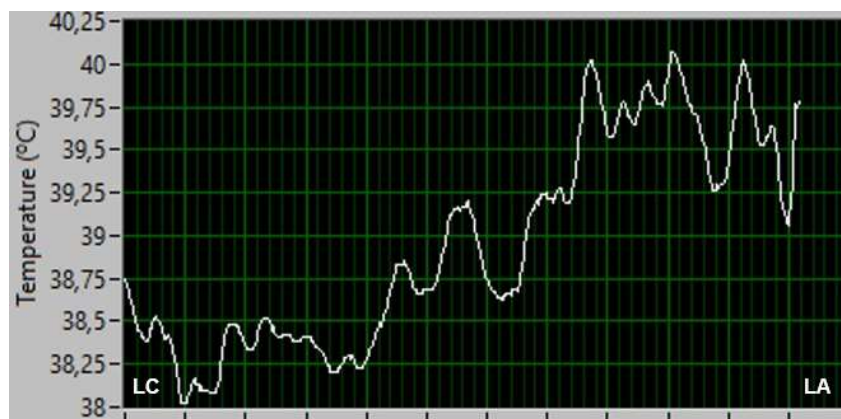


Figura 10: *Perfil de temperatura transversal del fieltro*.



A continuación (Figura 11), un ejemplo de cómo la imagen térmica de la tela formadora nos permite encontrar un punto de interferencia en el perfil de humedad transversal en el borde de la hoja. En esta imagen el cortador de cola ya había sido ajustada a una posición donde era posible evitar roturas en el LA. Nótese que, para evitar la región que provocó roturas en el lado LA, se redujo el formato, dejando el punto más crítico dentro del refil. Es prácticamente imposible observar este suceso a simple vista. En la figura 12 tenemos el perfil de temperatura correspondiente a la imagen térmica.

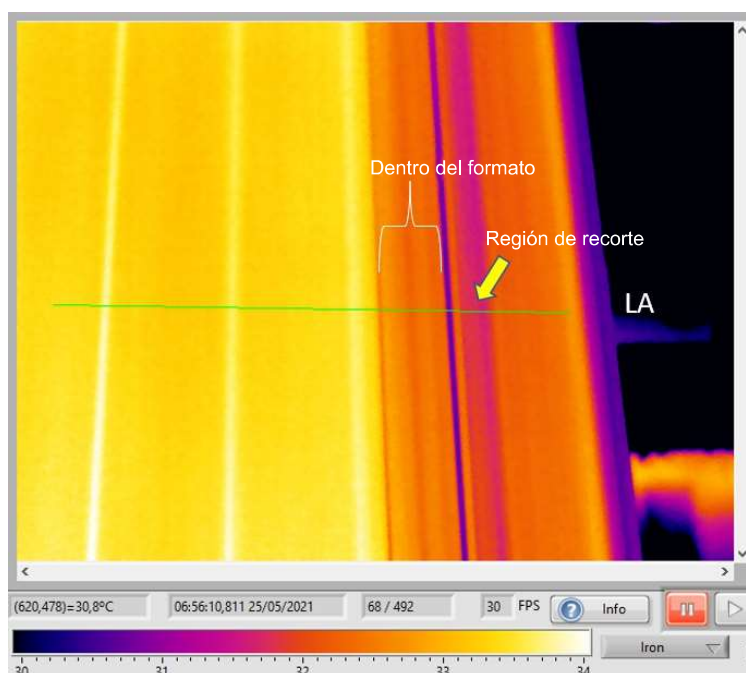


Figura 11: Imagen térmica de la tela (LA)



Figura 12: Perfil de temperatura transversal de la tela (LA).



Por lo tanto, los perfiles transversales estáticos, como se presentó anteriormente, sirven como una herramienta comparativa para definir la contribución de cada elemento al perfil de la hoja en el enrollador. Pero como ya se mencionó, no siempre será posible obtener los perfiles de temperatura de los elementos que nos gustaría evaluar, como el rodillo de la prensa de succión, el rodillo formador, el Yankee y las vestimentas.

En una situación donde únicamente disponemos de la imagen térmica del enrollador, es posible realizar un estudio de la variación longitudinal de las temperaturas en las regiones de interés definidas en el perfil transversal, para verificar una posible correlación entre los elementos rotatorios de la máquina y la variación longitudinal de la temperatura en la región elegida. Por lo tanto es necesario calcular las “frecuencias de rotación” de los elementos rotatorios; lo cual se puede lograr fácilmente conociendo sus dimensiones (perímetros) y respectivas velocidades.

Como el trabajo se realiza sobre la imagen dinámica, para facilitar la comprensión, utilizaremos la función de trazar los escaneos realizados por la cámara en una imagen estática, como si estuviéramos desenrollando el papel del carrete (Figura 13).

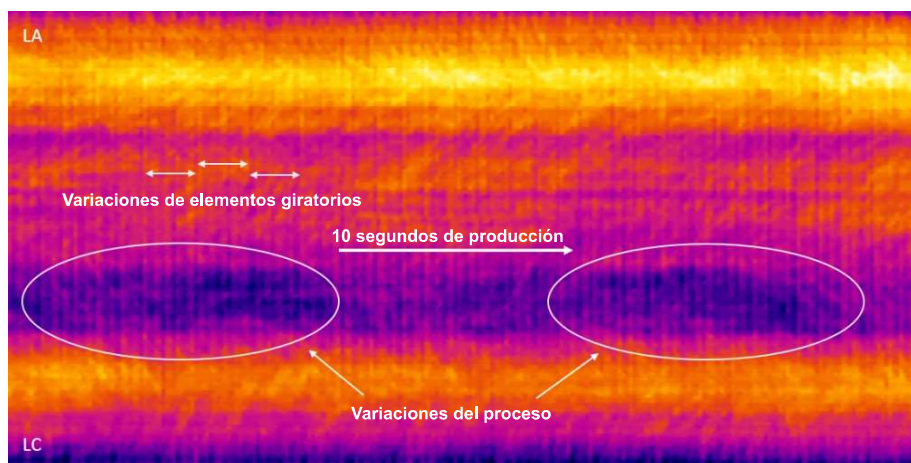


Figura 13: *Imagen del papel producido.*

En la imagen superior, es posible observar variaciones aleatorias de temperatura (humedad), en el perfil longitudinal, resultado de un proceso, cuya distancia es mayor y en consecuencia la frecuencia es muy baja. También es posible observar variaciones relacionadas con elementos rotatorios, cuya distancia entre eventos es menor y la frecuencia es mayor. Sin embargo, incluso si es posible establecer este tipo de correlación, determinar qué elemento rotatorio es responsable de la variación longitudinal de la temperatura utilizando sólo esta imagen tendría un margen de error muy alto.

En la imagen de abajo (Figura 14), podemos observar la pulsación de la caja de entrada, la cual se produce a frecuencias muy bajas, en comparación con los elementos rotatorios de la máquina. Muchas veces, si solo se observara el espectro de frecuencia, estos valores se confundirían con variaciones aleatorias en el proceso, pero el uso de la función de trazar el escaneo de lectura hace que sea más fácil observar las pulsaciones.

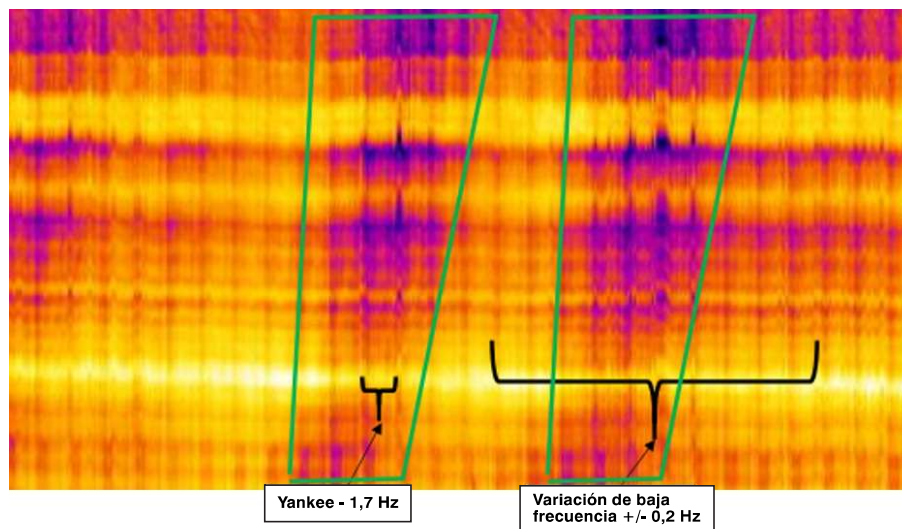


Figura 14: *Imagen del papel producido*

Para aumentar la precisión del análisis de la variación longitudinal de la temperatura, utilizamos el algoritmo “FFT”, descrito previamente. En la imagen de abajo, filmada en el enrollador (Figura 15), establecimos una región de interés (ROI) y enrollamos la película para que el software pueda registrar la variación de temperatura y, a esta variación, un espectro de frecuencia correspondiente.

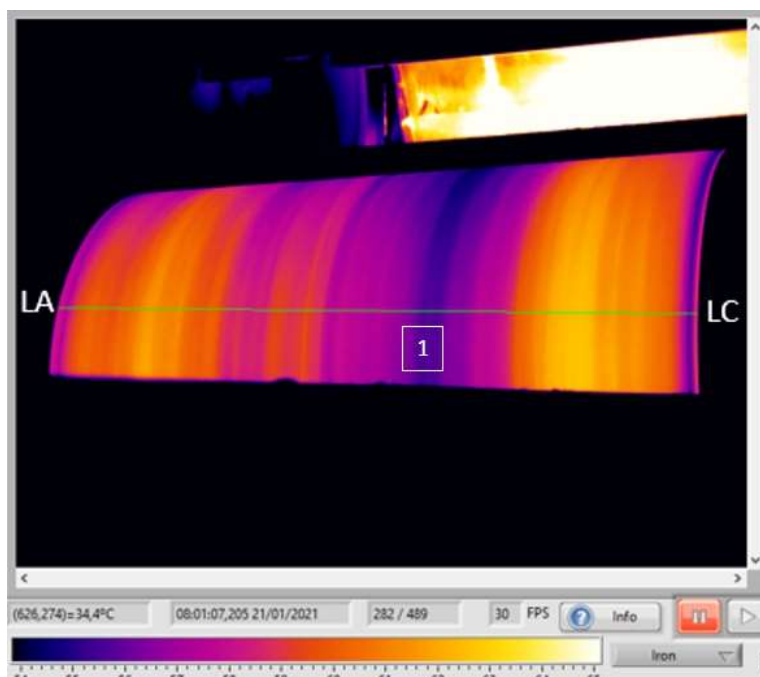


Figura 15: *Imagen de papel en el enrollador – ROI 1.*



A medida que establecemos la ubicación (ROI 1) a evaluar, el software traza un gráfico de la variación longitudinal de la temperatura, como se ve a continuación.

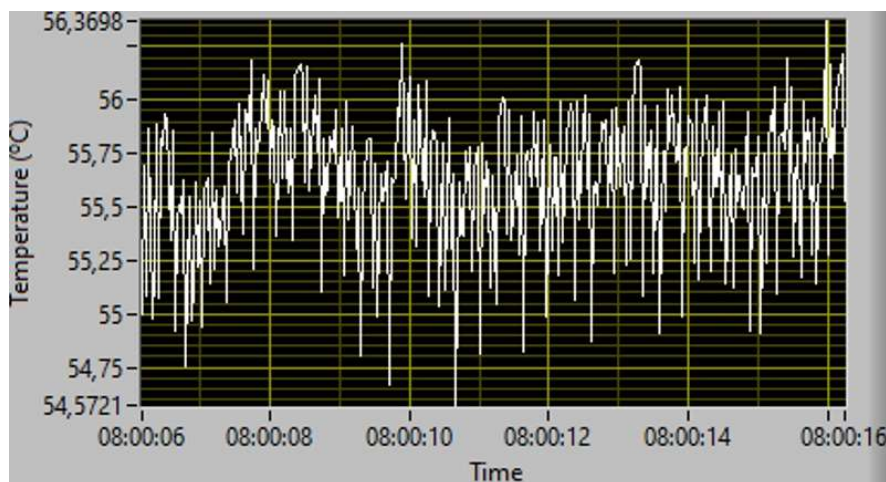


Figura 16: Variación longitudinal de la temperatura en ROI 1.

Nótese que en estos 10 segundos de producción ya tenemos una muestra de cómo se comporta la variación de temperatura en el “ROI” establecido, pero aún sería difícil definir un estándar de repetibilidad específico.

Pero con esta información es posible realizar el análisis FFT y tendremos el espectro a continuación.

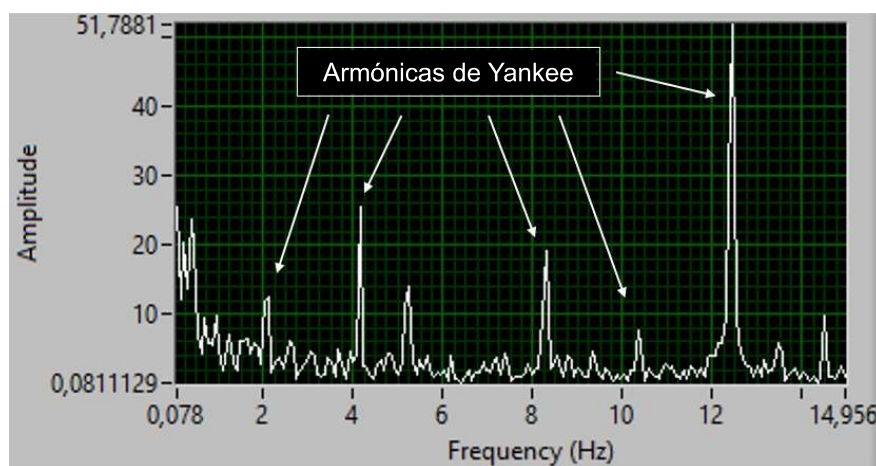


Figura 17: Espectro de frecuencias en ROI 1.

En este caso (Figura 17) los picos de mayor amplitud están relacionados con los armónicos de la frecuencia rotacional del Yankee previamente calculada (2,08 Hz), y su “mayor componente” se ubica en el sexto armónico de la frecuencia rotacional, que es precisamente el número de patas de los extractores de condensados internos. Esto indica que, en la región en estudio, existe una influencia del ajuste de los elementos extractores, por lo que participan efectivamente en la determinación de la perturbación de temperatura en el “perfil transversal de humedad”.



Conclusiones

Este tipo de análisis más elaborado se suma a los servicios de evaluación dinámica que se realizan en las máquinas Tisú con mayor frecuencia. Estos se centran más en el perfil transversal del fieltro, donde se determina su perfil de humedad y permeabilidad, que muchas veces no explican el perfil de humedad observado en el enrollador. Con el análisis térmico ampliamos la información, incluyendo otros factores que pueden contribuir a los problemas observados en el enrollador.

Referencias

1. Radiación infrarroja; Wikipedia
2. Infrarrojos – Concepto, características y aplicaciones; “Conocimiento Científico”
3. Transformada Rápida de Fourier; “Wikipedia”

Perfil del autor

Marcos Emídio Bressani – Graduado en Ingeniería Mecánica por el IMT – Escola de Engenharia Mauá – SP. Actuó como ingeniero responsable de proyectos y "start-ups" en Voith entre 1982 y 1987. Desde 1987 trabaja como ingeniero de servicios y ventas en Albany International. Actualmente es consultor de Ingeniería de Servicios para Sudamérica, especializándose en Transferencia Térmica, Análisis de Vibraciones y Sistemas de Prensado.