

# El potencial de optimización del malteado está en el aire

**DIAGRAMA DE MOLLIER** | En el proceso de malteado, la energía requerida en forma de electricidad y de calor representan el factor de coste más grande, aproximadamente el 40 por ciento del coste total de fabricación, comparado con el 60 por ciento del coste variable. No es de extrañar que la industria de la malta se haya dedicado durante décadas al tema energético con éxito y que en gran medida el potencial de ahorro se haya agotado. Si alguien desea optimizar esto aún más, debe entrar en los detalles con un conocimiento tecnológico y técnico excelente.

**NO SE PUEDE MALTEAR** sin aire, es el ayudante indispensable del maltero, aporta oxígeno a la materia en germinación y elimina el dióxido de carbono, humedece o seca la materia en germinación y aporta o elimina calor. Hasta el 90 por ciento de los costes totales de energía se emplean en el aire del proceso, que se mueve, calienta y enfría con esta energía. Por lo tanto, es aconsejable observar más de cerca los procesos con aire. En primer lugar, surge la pregunta: ¿Cómo se puede caracterizar el estado del aire?

El parámetro de la temperatura del aire en grados Celsius es conocido por todos y se puede medir de manera fácil, precisa y en



**Autor:** Karl Weigt, Propietario de bmtWeigt, Augsburg

cualquier lugar. Otro parámetro importante es la humedad relativa en porcentaje, que indica la carga de vapor de agua en el aire a una determinada temperatura en relación con el contenido máximo posible de vapor de agua, denominado saturación. También existen sistemas de medición simples y eficaces para condiciones ambientales normales. Sin embargo, la medición se vuelve problemática en numerosos puntos bastante interesantes del aire del proceso en la maltería debido a las condiciones de humedad, temperatura, corrosión y ataque microbiano que son desfavorables para los sensores. Como se explicará con más detalle más adelante, la humedad relativa también se puede determinar muy bien de forma indirecta con la ayuda del diagrama de Mollier.

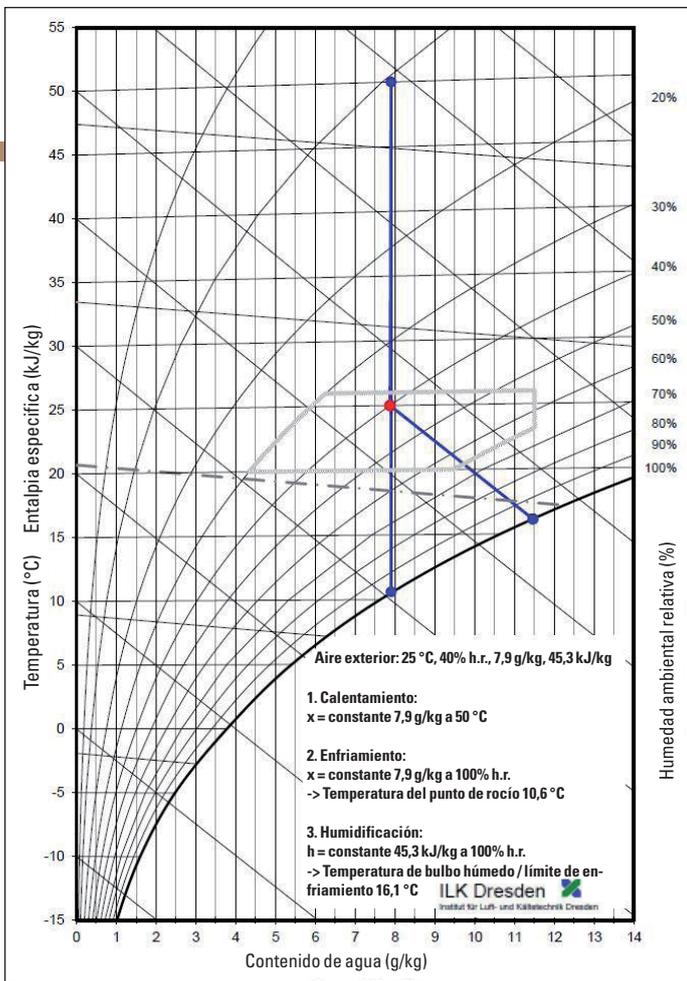
## ■ La presión del aire

Otro parámetro muy importante para caracterizar el aire que a menudo se descuida en la práctica es su presión. La presión del aire predominante en la ubicación de la planta de producción influye en el diseño de esta misma debido a la altura geográfica de la maltería. Cuanto más alta este la planta de producción, menos favorable es la rela-

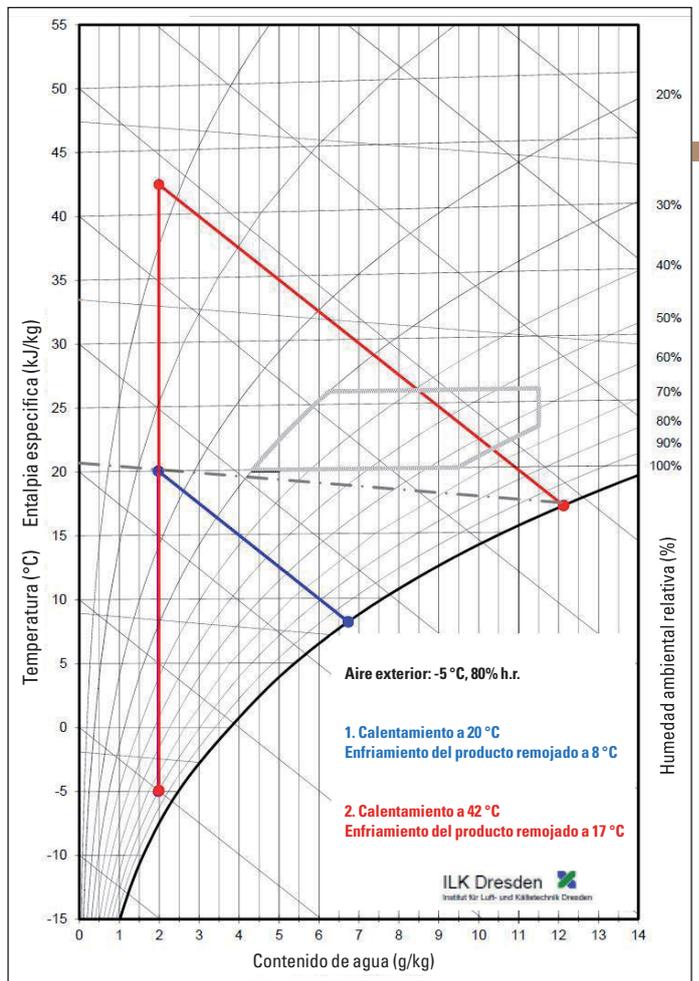
ción entre el flujo másico y el flujo volumétrico y, por lo tanto, los parámetros activos y la energía de transporte del aire de proceso debido a la disminución de la densidad del aire (ejemplo extremo: malteado en Bogotá, Colombia, a 2600 m sobre el nivel del mar; presión normal del aire 725 hPa o 72 % de “nuestros” 1013 hPa y correspondientemente baja densidad del aire).

Además de este parámetro, que se determina después de seleccionar la ubicación, la presión que deben generar los ventiladores para superar la resistencia del aire tiene un impacto significativo en el consumo de energía. En muchos sistemas, la presión de funcionamiento generalmente solo se registra debajo del material a secar, si es que se registra. Con poco esfuerzo, por ejemplo, un simple manómetro con un tubo en forma de U o con un tubo inclinado sería a menudo suficiente, pero para un control operativo energético deben tomarse la presión en todos los puntos donde surgen diferencias de presiones. Los depósitos que no se eliminan de los filtros y, sobre todo, de los intercambiadores de calor, registros de refrigeración y calefacción, provocan un aumento innecesario de las presiones diferenciales que no se reconoce en el punto de origen. Por razones físicas, y desafortunadamente, la resistencia del aire y el consumo de energía asociado también aumentan al cuadrado de la relación del aumento en la velocidad del aire o el flujo volumétrico aplicado a la sección transversal de un conducto.

Basándose en estos hallazgos, se debe otorgar gran importancia a las secciones transversales de flujo correspondientes, así como a la facilidad de limpieza y accesibilidad de los intercambiadores de calor al diseñar una planta de malteado y sus componentes. No es raro que esto se evite ya sea por un presupuesto de inversión limitado



**Fig. 1** Condiciones del aire y procesos relevantes en el diagrama de Mollier



**Fig. 2** Calentamiento del aire en la sala de remojo y efectos en el material en germinación

o por ofertas de fabricantes que desean obtener una ventaja sobre el precio dando un dimensionamiento más limitado. Si se considera de forma sensata la sostenibilidad y se tiene un compromiso honesto con ella, que no solo sea el de publicarlo en el stand de la exposición de muestras, se salva en la billetera y en el medio ambiente a largo plazo.

### El diagrama de Mollier ayuda

Para la caracterización de las condiciones del aire y la descripción de procesos en los que interviene el aire en las malterías, el maltero tiene una excelente ayuda con el diagrama de Mollier. El diagrama de Mollier también depende de la presión del aire y en parte se representa también para diferentes niveles del mar. Sin embargo, para las siguientes consideraciones en nuestras latitudes, es suficiente el empleo de un diagrama de Mollier isobárico para una presión normal del aire de 1013 hPa.

El diagrama de Mollier, también conocido como diagrama h,x o diagrama i-x, fue desarrollado por el profesor de física Richard Mollier (1863-1935), que trabajó en Dresde, y que permite determinar las condiciones del aire y los cambios en la condición del aire húmedo en un sistema de coordenadas con familias de curvas (Fig. 1).

Tomando por ejemplo como punto de

partida una condición del aire de 25 °C y 40 por ciento de humedad relativa, se pueden determinar todos los demás parámetros relevantes de la condición del aire usando estos dos parámetros: carga de agua 7,9 g/kg, entalpía 45,3 kJ/kg, densidad 1,18 kg/m<sup>3</sup>. Los principales procesos relevantes para la fábrica de malta son:

1. El calentamiento del aire en una línea con un contenido de agua constante, en este caso 7,9 g/kg llega hacia arriba verticalmente hasta la línea de 50 °C, con un aumento del contenido de energía de 45,3 kJ/kg a 71,0 kJ/kg. En el proceso de malteado: calentamiento del aire del secadero.
2. El enfriamiento del aire, también en la línea con un contenido constante de agua llega verticalmente hasta la línea de saturación al 100 por ciento de humedad relativa; en este caso, el contenido de energía del aire disminuye de 45,3 kJ/kg a 30,6 kJ/kg. Esta intersección de las dos líneas describe la temperatura del punto de rocío del estado inicial del aire, en este caso 10,6 °C. En el proceso de malteado: enfriamiento de la caja de germinación, suministro de aire.
3. La humidificación adiabática del aire en una línea de la misma entalpía, en este caso 45,3 kJ/kg lleva hasta la línea de

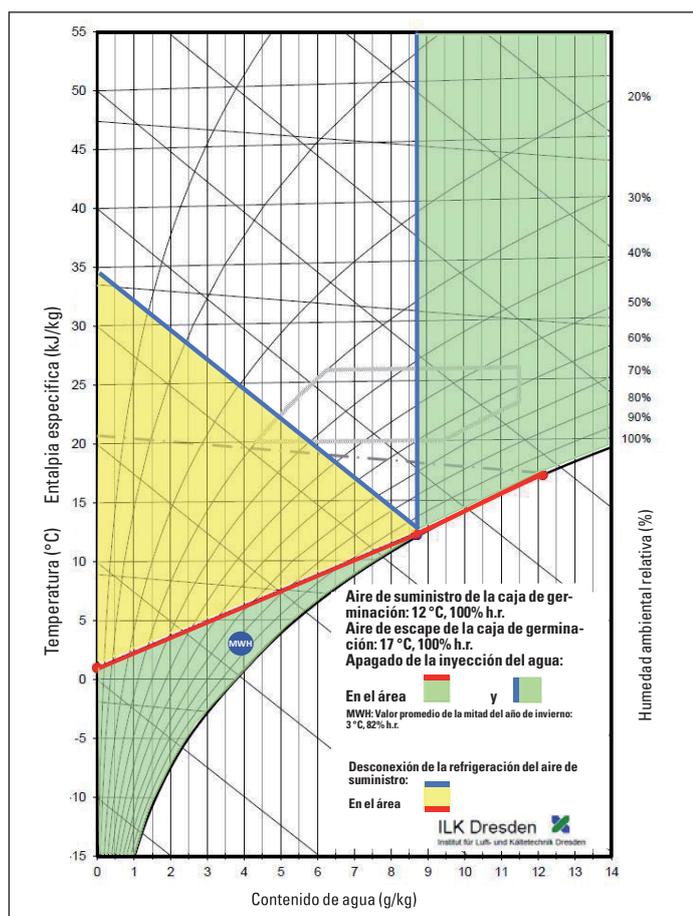
saturación del 100 por ciento. Esta intersección de las dos líneas describe la temperatura límite de enfriamiento, llamada temperatura de bulbo húmedo, en este caso 16,1 °C. En el proceso de malteado: humidificación del aire de suministro durante el remojo, aire de suministro de la caja de germinación y deshidratación en el secadero.

### Ejemplos de aplicación

#### El producto remojado está muy frío

El invierno es severo, la sala de remojo esta fría, la cebada fría se remoja con agua fría y no hay un incremento de la temperatura durante el remojo lo cual tiene consecuencias negativas: la absorción de agua por parte de la cebada es demasiado lenta y, por lo tanto, el comienzo de la germinación y la generación de calor en la caja de germinación se retrasan. El tiempo planificado de estancia en la caja de germinación no es suficiente para lograr el objetivo de germinación necesario. El ritmo de malteado se altera y surgen problemas en la capacidad y/o calidad.

La solución que se emplea repetidamente en la industria para resolver este problema es calentar la sala de remojo. ¿Eso realmente tiene el efecto deseado? Vale la pena echar un vistazo al diagrama de Mollier (Fig. 2):



**Fig.3**  
**Ahorros potenciales en el acondicionamiento del aire de suministro de la caja de germinación**

me energía de bombeo y debe recibir mantenimiento. Este sistema de humidificación suele funcionar durante todo el año. Pero ¿tiene que ser así realmente?

Por otro lado, la inyección de agua en el aire insaturado conduce a la absorción adiabática de agua y al enfriamiento hasta la temperatura límite de enfriamiento. Si está por debajo de la temperatura de entrada deseada en la caja de germinación, se puede prescindir del enfriamiento por aire del sistema de refrigeración y se puede ahorrar electricidad, aunque el aire exterior medido está en parte muy por encima de la temperatura objetivo en la entrada de la caja de germinación. Una mirada al diagrama de Mollier ayuda a decidir si encender o apagar el sistema de inyección o enfriamiento del agua.

Para las siguientes consideraciones, se asumió que la temperatura de entrada en la caja de germinación es de 12 °C al 100 % de humedad relativa y la temperatura de salida es de 17 °C, también con un 100 por ciento de saturación. En el diagrama de Mollier (Fig. 3) se pueden ver tres casos:

1. La temperatura del aire exterior está por debajo de la temperatura objetivo deseada en la entrada de la caja de germinación. El sistema de refrigeración se apaga. El control automático de la temperatura de entrada abre la trampilla del aire de retorno y, como consecuencia, dosifica aire caliente de salida de la caja de germinación (17 °C y 100 % h.r.) al aire fresco aspirado hasta alcanzar la temperatura objetivo (12 °C, 100 % h.r.). Si la condición del aire exterior en el diagrama de Mollier está por debajo de la línea roja dibujada en el campo verde, la mezcla de aire llega a una condición de aire saturado en la entrada de la caja de germinación y la humidificación del aire se puede apagar. La condición promedio del aire que prevalece en nuestras latitudes en el semestre de invierno es actualmente de 3 °C y 82 por ciento de humedad relativa (punto azul) y está bajo control.
2. La temperatura del aire exterior está por encima de la temperatura objetivo y debe enfriarse con el sistema de refrigeración. Si el contenido de agua del aire exterior es mayor que el contenido de agua de la temperatura de entrada saturada, en este caso 8,7 g/kg, el aire exterior se enfriará por debajo de la temperatura del punto de rocío en intercambiador de frío y se separará el agua. El aire enfriado está 100 por ciento saturado y la humidificación

En este ejemplo, se ha seleccionado un aire exterior de -5 °C con un 80 por ciento de humedad relativa. Bajo estas condiciones, se construirá un calentador o se empleará un calentador portátil que sople aire a 20 °C en la sala de remojo. El trabajador se siente bien y no se congelan las tuberías, eso es todo. Si este aire caliente llega al grano húmedo en el recipiente de remojo durante el reposo al aire, se produce una humidificación adiabática hasta la temperatura límite de enfriamiento, en este caso 8 °C. Eso no es suficiente para iniciar notablemente los procesos fisiológicos de la germinación. Teóricamente, el aire debería calentarse a más de 40 °C para que el producto remojado alcance los 16 °C. Incluso entonces, el volumen o flujo másico del ventilador para la extracción del CO<sub>2</sub> no es suficiente para llevar la cantidad de calor requerida al material en germinación. En la práctica, el problema solo puede resolverse agregando el agua para germinar calentada a por ejemplo 20 °C, de modo que cuando se mezcla con la cebada que está fría, se llega a una "temperatura agradable" de unos 16 °C. Las fuentes de calor residual existentes deberían usarse idealmente para esto. Para

esto se pueden usar intercambiadores de calor de agua y gases de combustión, que pueden transferir precisamente para este propósito la energía residual de los gases de combustión después del calentador del aire de secado para el agua de germinación.

### Acondicionamiento del aire de suministro de las cajas de germinación

Durante la germinación, se debe evitar en la medida de lo posible que el material en germinación se seque. Con este propósito, el aire de suministro de la caja de germinación se humedece con inyectores de agua hasta que se satura, de modo que cualquier potencial de secado del aire de suministro no pueda drenar el agua innecesariamente. Para esto se debe tener cuidado de que los inyectores atomicen el agua lo más finamente posible y se manejen con relativamente poca presión y poca cantidad de agua. Estas soluciones han sido probadas técnicamente y se pueden encontrar, por ejemplo, en invernaderos. Sin embargo, un sistema de este tipo consume los recursos hídricos, produce aguas residuales que deben tratarse, consu-

del aire se puede apagar. En el diagrama de Mollier, este área también está a la derecha de la línea azul en el campo verde.

- La condición del aire exterior no permite prescindir de la inyección del agua para lograr una saturación del 100 por ciento en la entrada de la caja de germinación. Sin embargo, si esta es menor en términos de entalpía que la entalpía del aire deseada en la entrada de la caja de germinación, en este caso 34,2 kJ/kg, la inyección del agua conduce a su vez a una absorción del agua adiabática y al enfriamiento del aire hasta la temperatura límite de enfriamiento, que está por debajo de la temperatura objetivo. Ahora se puede prescindir del funcionamiento del sistema de refrigeración. En el diagrama de Mollier actual, estas condiciones del aire están en el campo amarillo.

### Relativización del potencial de secado

Se puede ver cómo el conocimiento de las condiciones del aire, ¡con una medición requerida!, y la interpretación correcta con la ayuda del diagrama de Mollier pueden conducir a la optimización y al ahorro. Sin embargo, el temor de que el material de germinación en la caja de germinación se seque a menudo solo se centra en el secado debido al potencial de secado de un suministro de aire insaturado. Incluso si se hacen las cosas como se describió anteriormente, este secado solo tiene lugar en unos pocos centímetros en la capa más baja de la caja de germinación. Mas arriba el aire ya está saturado nuevamente. La medida para esto es la diferencia entre la carga de agua del aire entrante en g/kg y el nivel de saturación deseado, que puede ser aceptable en condiciones climáticas normales y con controles periódicos. El potencial de secado, que suele ser al menos tan grande, pero que generalmente es aún mayor, es la diferencia entre la carga de agua en la entrada y la salida del aire de la caja de germinación.

En el ejemplo anterior, la diferencia en el contenido de agua entre el aire entrante y saliente es de 12 °C a 17 °C, 100 por ciento de h.r. en cada caso, a 3,4 g/kg. Esto significa que el aire que fluye a través de la caja de germinación (con la densidad convertida a masa en kg) descarga 3,4 g/kg de agua. Con una salida de aire estándar de los ventiladores de la caja de germinación de 400 m<sup>3</sup>/h y una tn de cebada en germinación, se descar-

gan aproximadamente 40 kg de agua por tonelada de cebada en germinación en un día y se supone que el grado de remojo del 45,0 por ciento disminuirá a aproximadamente 43,5 por ciento. Sin embargo, si la temperatura en la caja de germinación aumenta debido a una falta de capacidad de enfriamiento de la caja de germinación o debido a otras circunstancias y la temperatura del aire de salida asciende, de 17 °C a 20 °C, por ejemplo, en lugar de descargarse 3,4 g/kg en la “fase de captura” se descargan ahora 6,0 g/kg (14,7–8,7 g/kg) y el grado de remojo en este ejemplo desciende al 42,5 por ciento. Esta gran pérdida de agua puede interrumpir el proceso de germinación más que el suministro de aire insaturado. En última instancia, se trata nuevamente de cuestiones fundamentales de dimensionamiento, diseño e inversión, así como de opciones de control y manejo que sean predictivas y con experiencia.

### Otras posibilidades de optimización

El diagrama de Mollier también proporciona excelentes funciones para casi todas las consideraciones energéticas en el tratamiento del aire del proceso. Para cada condición del aire se pueden leer también en el diagrama de Mollier la entalpía y la densidad del aire. Si se toma la diferencia en la entalpía del estado del aire antes y después de una parte de un proceso, por ejemplo, enfriar o calentar el aire, se puede saber cuánta energía en kJ por kg de aire se requiere para esto. Si por ejemplo se conoce el caudal volumétrico en m<sup>3</sup>/h como punto de funcionamiento en la curva característica del ventilador, se puede deducir, con el diagrama de Mollier, el flujo másico del aire de proceso en kg/h o en kg/s mediante la densidad en kg/m<sup>3</sup>. El producto de la diferencia de las entalpías en kJ/kg entre el flujo másico en kg/s da directamente la potencia requerida para esta parte del proceso en kW (recuerde: 1kW = 1kJ/s).

Es realmente interesante si se quieren comparar los efectos de las diferentes variantes tecnológicas de malteado que son posibles. Por ejemplo, para secar el cereal en germinación en el secadero, la cantidad de agua existente debe transportarse por el aire. El diagrama de Mollier muestra que la capacidad de captura del aire (delta x en g/kg) aumenta a medida que aumenta la temperatura de entrada. Si la temperatura de entrada se puede aumentar en el proce-

so de secado sin ninguna desventaja sobre la calidad, el proceso de secado se acorta con la misma potencia del ventilador. Si no se necesita esta ventaja de tiempo, se puede reducir el flujo de volumen del ventilador en la misma proporción. Como ya se ha descrito al principio, esto cambia el consumo de energía notablemente por el cuadrado de la relación del cambio en el flujo volumétrico.

Y si alguien desea entenderlo y evaluarlo con mucha precisión, puede utilizar también los valores del diagrama de Mollier para crear los ratios específicos, por ejemplo, cuánto calor debe usarse en diferentes variantes del proceso de secado para expulsar una cierta cantidad de agua (por ejemplo, kJ calor/g agua resultante del cociente delta h en kJ/kg y delta x en g/kg).

### Resumen

El aire juega un papel decisivo en el proceso de malteado y el tratamiento de este aire representa, en forma de electricidad y calor, hasta el 90 por ciento de los costes totales de energía de una maltería. Una característica relevante de la condición del aire es la presión del aire en una condición estacionaria y en movimiento. Además, en el diagrama de Mollier se muestran las condiciones del aire y los procesos que se dan en la fábrica de malta, como enfriamiento, calentamiento, humidificación y secado a presión constante. Si se muestran los pasos individuales del proceso en el diagrama de Mollier, se pueden identificar los potenciales de optimización tecnológica, técnica o energética.

Se puede demostrar por ejemplo que el calentamiento habitual de la sala de remojo en invierno para poner en marcha más rápidamente el proceso de germinación, ya de por sí lento, representa una pérdida de energía. Además, a partir del diagrama de Mollier se pueden definir áreas para las condiciones del aire exterior, que permiten prescindir del funcionamiento de los inyectores de humidificación del aire y del sistema de refrigeración al acondicionar el aire de suministro de la caja de germinación. La consideración del proceso de secado en el diagrama de Mollier también ofrece la posibilidad de mostrar los potenciales de optimización bajo aspectos tecnológicos con respecto al tiempo de secado, el consumo de electricidad y calor.

Así que la conclusión es: el diagrama de Mollier proporciona un servicio valioso en la maltería y, por lo tanto, siempre debería estar disponible como ayuda para el maltero. ■