

Elección del sistema de refrigeración en instalaciones de vacuno lechero

Introducción

Son varios los trabajos que hemos publicado en esta revista sobre el manejo del estrés térmico, analizando las necesidades térmicas de las vacas lecheras, sus mecanismos de producción, eliminación e intercambio de calor, así como los distintos métodos para mitigarlo (Frisona Española nº 196). Asimismo, en el último número (Frisona Española nº 207) exponíamos los principales efectos del estrés calórico (en adelante, EC) en la fisiología digestiva y reproductiva, en el rendimiento y en el comportamiento del animal, así como las consecuencias económicas derivadas.

En este nuevo trabajo expondremos distintas opciones para poder aumentar la pérdida de calor por parte del animal, puesto que los métodos para reducir la ganancia térmica (principalmente sombreado y manejo de la alimentación) ya han sido expuestos en otros trabajos.

Un sistema de mitigación del calor tiene que proporcionar cuatro elementos básicos:

1. Sombra
2. Intercambio de aire (ventilación)
3. Maximizar la pérdida de calor por convección
4. Eliminar calor por evaporación

Si se asume que la estructura de la nave proporciona una sombra adecuada, entonces el proceso

de selección del sistema para evitar el EC se resume en tres pasos:

- a. Selección del sistema de ventilación
- b. Selección del sistema para aumentar la velocidad del aire
- c. Selección del sistema de enfriamiento evaporativo.

La selección de estos sistemas no debe considerar únicamente el diseño y dimensionamiento de los mismos, sino que también deben tener un peso importante en la decisión la inversión y el coste de su funcionamiento con respecto al retorno estimado en producción de leche y en mejor salud de los animales.

Ventilación

Lo fundamental es que la ventilación sea correcta. No puede considerarse ningún sistema de refrigeración por convección o evaporación si no se satisfacen las necesidades de ventilación del alojamiento (ver Frisona Española nº 197).

En primer lugar, se puede utilizar un árbol de decisión (Figura 1) que permita evaluar la calidad de la ventilación del alojamiento y la posible necesidad de añadir un sistema de eliminación de enfriamiento por convección.

No debe considerarse este procedimiento de selección sino como una herramienta que ayude a tomar una decisión, sin olvidar que cada alojamiento es único y que podrá necesitarse consultar otras referencias para el diseño final del sistema de refrigeración.

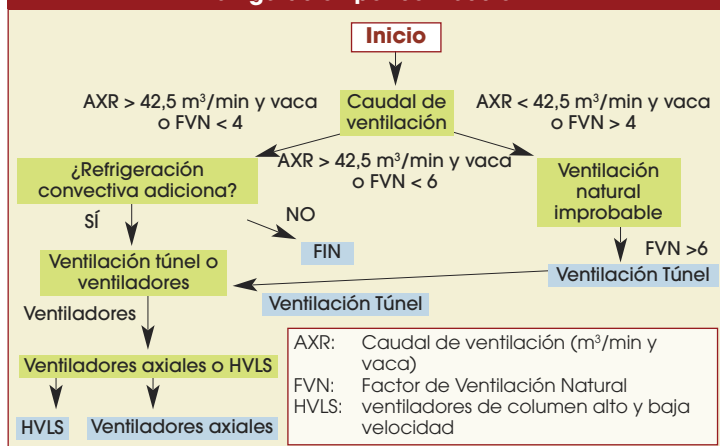
En el caso de naves con ventilación natural, el valor FVN se explicó en el número 197 de esta revista, ya citado. Si se trata de naves de ventilación dinámica, AXR corresponde al caudal máximo disponible según la capacidad de los ventiladores instalados al efecto dividido entre el número de vacas alojadas en dicha nave

Una vez tomada la primera decisión, podremos utilizar un segundo árbol de decisión (figura 2) para evaluar la necesidad de seleccionar un sistema de enfriamiento evaporativo. Cada una de las posibles decisiones será posteriormente analizada.

Refrigeración por convección

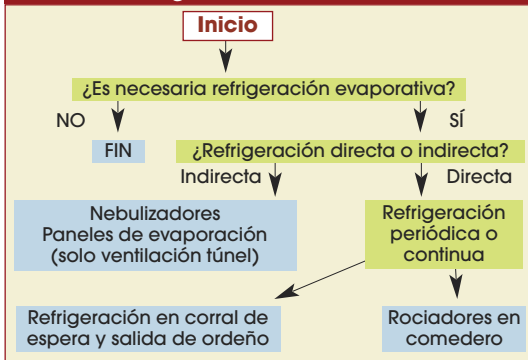
Cuando el factor natural de ventilación es mayor de 6 no hay otra solución que instalar un sistema de ventilación mecánica. Incluso en naves con una buena ventilación natural, en las épocas de calor será necesario aumentar la velocidad del

Figura 1. Árbol de decisión para evaluar la ventilación y la refrigeración por convección



Antonio Callejo Ramos. Dr. Ingeniero Agrónomo
Dpto. de Producción Agraria-E.T.S.I.A.A.B.-UPM
antonio.callejo@upm.es

Figura 2. Árbol de decisión para evaluar la necesidad y seleccionar un sistema de refrigeración evaporativa



aire para evitar que las vacas entren en EC. El objetivo será que las vacas tengan un balance energético igual a cero durante las 24 horas del día. La pregunta es ¿qué sistema se instala?

Ventilación-Túnel

Este sistema se ha ido adoptando cada vez en más granjas a partir de los años noventa, particularmente en climas calurosos y húmedos y con ventilación natural escasa. En este sistema se colocan grandes ventiladores en un extremo de la nave que extraen el aire desde el otro extremo, por donde entra (Figura 3). Por razones prácticas de diseño, las entradas de aire, los ventiladores, o ambos, pueden instalarse en los extremos de las paredes laterales. Las diferencias de funcionamiento son escasas.

La ventilación en túnel es un buen método para lograr aumentar la velocidad del aire sin necesidad de aumentar el caudal de ventilación. La ecuación que liga ambos parámetros es:

$$V \left(\frac{m}{s} \right) = \frac{Q \left(\frac{m^3}{s} \right)}{S \left(m^2 \right)}$$

Por tanto, si el caudal de aire circula entre un extremo y otro de la nave, la sección transversal que atraviesa tiene menor superficie que la sección longitudinal que atravesaría si el aire circulase desde una fachada lateral hacia la otra (ventilación transversal). Al ser inferior la superficie S , de la ecuación se deduce que el caudal de aire de ventilación circulará a mayor velocidad. Puede lograrse una renovación completa del aire de la nave prácticamente cada minuto. La ecuación también puede usarse para, una vez fijada la velocidad a la que se desea que circule el aire y conocida la superficie de entrada del mismo, calcular el caudal que deben proporcionar los ventiladores.

La velocidad mínima del aire para lograr un efecto de enfriamiento del animal es de 1,55 m/s, por lo que se debería disponer de 0,9 m² de superficie entrada de aire por cada 100 m³/min de caudal de ventilación para compensar las inevitables pérdidas de velocidad por rozamiento que el aire experimenta al desplazarse por el interior de la nave y lograr el efecto deseado.

Para evitar que gran parte de la masa de aire que circula de extremo a extremo de la nave lo haga a una altura excesivamente lejana de los animales y éstos puedan aprovechar todas las ventajas del sistema, es recomendable utilizar pantallas o "baffles" colgados del techo de la nave cada 15-20 metros con el fin de conducir el aire a la altura de los animales (Figura 4).

Gooch y Stowel (2003) no encontraron dema-

siadas diferencias en la reducción del calor alcanzada en naves con una ventilación en túnel o en otras con una ventilación natural bien diseñada y con ventiladores de tipo axial. Por ello, la decisión será económica, comparando los costes de inversión y de funcionamiento de ambos sistemas. No obstante, y como ya indicábamos anteriormente, la ventilación túnel implica cerrar completamente los laterales y los frentes de la nave, en un extremo de la cual se colocarían los ventiladores que extraen el aire; en el otro extremo o frente se situaría la entrada de aire.

La ventilación túnel presenta el inconveniente de no adaptarse bien a temperaturas más suaves pues con los laterales de la nave cerrados, los ventiladores deben estar funcionando de manera continua para conseguir un adecuado intercambio de aire. Cuando las temperaturas bajan, el sistema debe poder abrir automáticamente los cierres laterales, desconectar los ventiladores y mantener el intercambio de aire mediante ventilación natural, si la anchura de la nave lo permite.

Ventiladores de circulación con ventilación natural

La alternativa a la ventilación túnel es lograr el movimiento adecuado del aire colocando ventiladores a lo largo del interior de la nave, capaces de generar una velocidad del aire de aproximadamente 2,2 m/s a la altura de las vacas en el área de reposo y en la línea de comederos, áreas donde los animales pasan el 75% del tiempo. La pérdida de calor se incrementa, aproximadamente, en 380 W/m² cuando la velocidad del aire sobre el animal aumenta de 0,1 a 2,2 m/s (Hillman y col., 2001) y el ritmo respiratorio desciende en 7 respiraciones/min. Chastain y Turner (1994) no encontraron aumento de refrigeración con velocidad del aire superior a 2,2 m/s.

Figura 3. Esquema de funcionamiento de la ventilación túnel

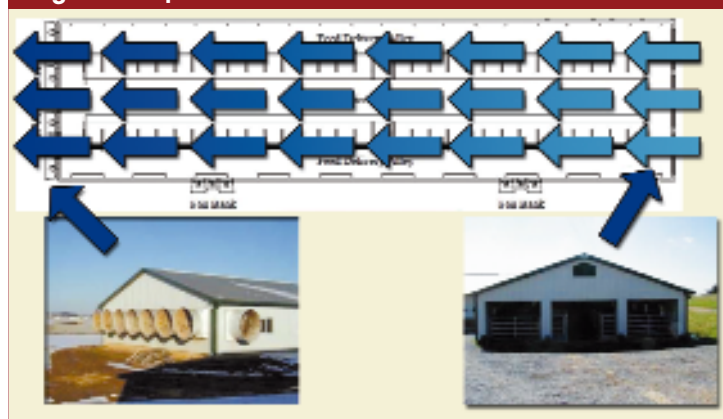
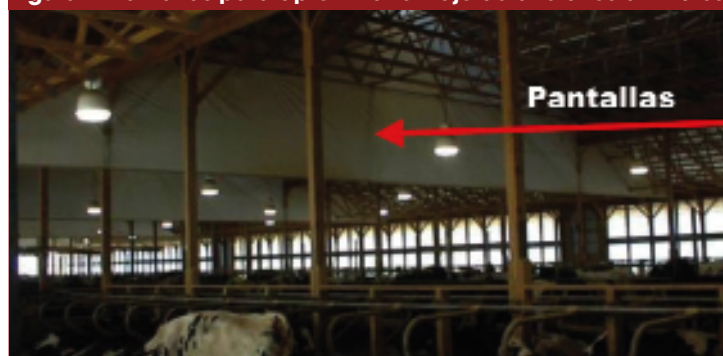


Figura 4. Pantallas para aproximar el flujo de aire a los animales



Elección del sistema de refrigeración

La ventilación se maximiza disponiendo de amplias fachadas para la entrada de aire (se recomienda 4,5 a 5 m de altura) y caballete en la cumbre, de una anchura comprendida entre 3 y 5 cm por cada metro de anchura de nave. Para mover el aire existen dos sistemas alternativos: los ventiladores axiales y los ventiladores HVLS (High Volumen Low Speed - volumen alto a baja velocidad).

Ventiladores axiales

Estos ventiladores se colocan ligeramente inclinados hacia abajo (10-30°) de forma que el flujo de aire se dirija hacia las vacas (Figura 5 y 7). Bottcher y col (1995a,b) demostraron que un ventilador axial puede mantener la velocidad de 2,2, m/s a una distancia aproximada de 10 veces su diámetro y en una anchura de 3 veces su diámetro. También comprobaron que los ventiladores de transmisión directa generan un "chorro" de aire más largo y estrecho que los de transmisión por correas, debido a diferencias en el diseño de las aspas y su velocidad.

Por tanto, estos ventiladores deben instalarse a una distancia de 10 veces su diámetro y a una altura de 2,2-2,4 m para evitar que las vacas puedan tocarlos. Normalmente se instalan sobre las líneas de cubículos y sobre las líneas de comederos. Es muy

importante mantenerlos en un estado de limpieza correcto para que su rendimiento y vida útil no disminuyan (Figura 6).

Para establecer la cantidad de ventiladores a colocar en una nave determinada se debe multiplicar el caudal de ventilación necesario por animal por la cantidad de animales y dividir por el caudal del ventilador seleccionado.

Ejemplo:

Número de vacas: 200

Necesidades de ventilación por vaca:

> 42,5 m³/min para tener un FNV inferior a 4

Caudal del ventilador: 34.000 m³/h

$$\frac{42,5 \text{ m}^3/\text{min}/\text{vaca} \times 60 \text{ min}/\text{h} \times 200 \text{ vacas}}{30.000 \text{ m}^3/\text{h}} = 15 \text{ ventiladores}$$

Ventiladores HVLS

Este tipo de ventilador se coloca en el techo, con las aspas paralelas al suelo y giran alrededor de un eje vertical. Las aspas son largas, alcanzando el conjunto un elevado diámetro y moviendo un gran volumen de aire girando a baja velocidad; de ahí su denominación (Figura 8). La velocidad del aire tampoco es uniforme, sino que se crean zonas más o menos concéntricas alrededor del ventilador, de distinta velocidad (Figura 9).



Figura 5. Ventiladores axiales

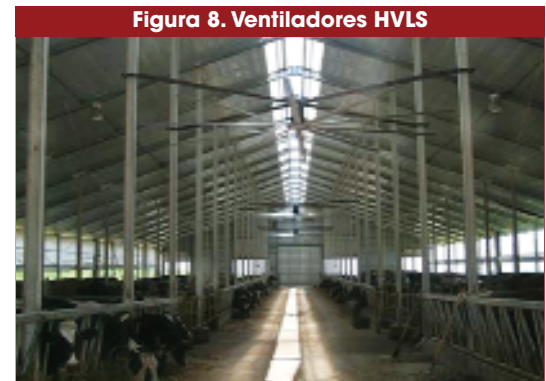


Figura 8. Ventiladores HVLS



Figura 6. Pobre mantenimiento



Figura 7. Colocación adecuada de ventiladores, dirigidos hacia abajo (Gallardo y Valtorta, 2011)

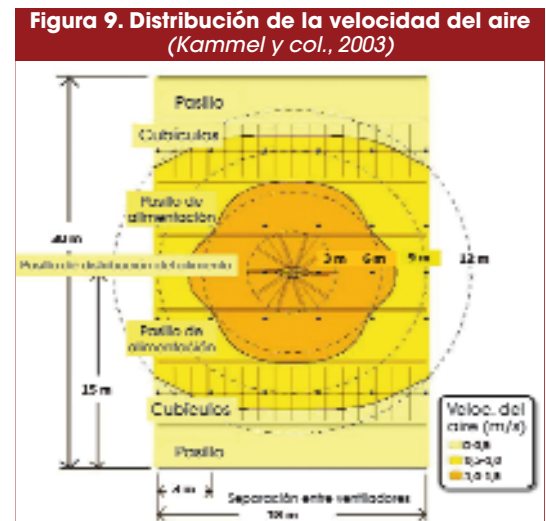


Figura 9. Distribución de la velocidad del aire (Kammel y col., 2003)

Estos ventiladores deben ser colocados sobre las áreas mayoritariamente ocupadas por las vacas, aunque debe evaluarse la posible cercanía del techo y de postes y evaluar la utilidad de su colocación. Deben espaciarse una distancia igual a dos veces su diámetro para maximizar la velocidad del aire entre ellos. En la figura 9 observamos que la velocidad del aire encima de los cubículos que ocupan las vacas se sitúa entre 0 y 1 m/s, muy por debajo del valor de 2,2 m/s que se considera acon-

Elección del sistema de refrigeración

sejable. Incluso la máxima velocidad (1,5 m/s) conseguida sobre la línea de comedero queda por debajo. Sería más aconsejable colocar dos líneas de ventiladores, una sobre cada doble fila de cubículos.

Estos ventiladores consumen el 63% menos de energía que los ventiladores axiales, pero también son 2,5 veces más caros y la uniformidad de la ventilación es menor. Por ello, en cada caso habrá que realizar el correspondiente estudio económico y técnico de estas dos opciones, en función de las dimensiones de la nave y el número de ventiladores a instalar.

La elección de un sistema u otro de refrigeración por convección deberá estar también condicionada por el coste de instalación y el coste de funcionamiento.

Refrigeración por evaporación

En zonas con veranos calurosos, es probable que no sea suficiente la instalación de sistemas de eliminación de calor por convección explicados en el apartado anterior. Por ello, para reducir o evitar el EC de los animales será necesario incorporar la refrigeración evaporativa.

Este sistema trabaja aprovechando el calor de evaporación (o vaporización) del agua, el cual pasa de estado líquido a gaseoso captando calor del aire, reduciéndose la temperatura de éste y aumentando su nivel de humedad. Por esta razón, este sistema funciona con mayor rendimiento (en términos de reducción de temperatura) cuando la humedad relativa del aire es baja.

Refrigeración evaporativa indirecta

En este sistema de refrigeración se refrigera el aire, no la piel del animal. Una primera opción es pulverizar agua a alta presión sobre las vacas en forma de niebla, es decir, de gotas de agua muy pequeñas que enfrían el aire según se evaporan¹. Los ventiladores, instalados sobre los inyectores cada 6-10² metros y bajo la estructura de sombreado, crean la corriente de aire necesaria para distribuir esta agua. Las vacas inhalan aire más frío y pueden cederle el calor que tienen que eliminar.

Sin embargo:

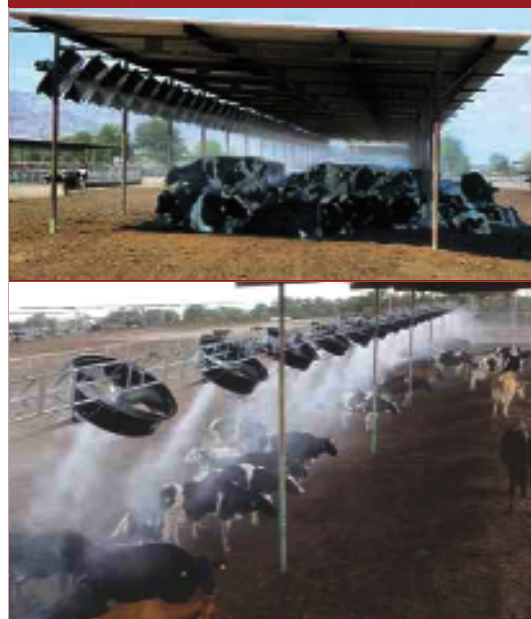
- La presencia de viento (o el propio flujo generado de aire generado por los ventiladores) arrastra estas gotas de agua fuera de la zona donde se ubican los animales.
- Si estas gotas no se evaporan antes de llegar a la superficie del animal, puede formarse una capa de aire entre esta "niebla" y el cuerpo del animal que le dificulta la eliminación de calor.
- Si la ventilación no es adecuada, este sistema puede dar lugar a problemas respiratorios.
- Los nebulizadores no pueden gotear sobre la cama del ganado. Si no se instalan en esta zona, se deja sin refrigeración una parte considerable de la superficie de la nave.
- El sistema es más complejo y costoso que otros.

En naves con ventilación mecánica (por ejemplo con ventilación túnel) la refrigeración indirecta puede lograrse colocando la nebulización de agua en la entrada de aire. El objetivo es evaporar tanto agua y tan rápidamente como sea posible de modo que el aire enfriado sea conducido a lo largo de toda la nave. El inconveniente de este sistema es que si la nave no es suficientemente larga, parte

del agua nebulizada que entra saldrá por el otro extremo (donde están los ventiladores) sin evaporar y, por tanto, sin enfriar el aire.

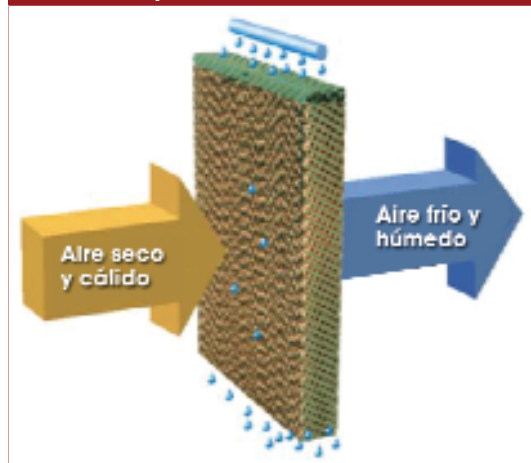
En regiones muy áridas, donde las vacas lecheras se ubican en grandes corrales de tierra compactada, las imprescindibles estructuras de sombra pueden ser dotadas de un sistema de nebulización y ventilación forzada que se va moviendo con el desplazamiento de la sombra proyectada (Figuras 10 y 11).

Figuras 10 y 11. Nebulización y ventilación bajo estructuras sombreadoras (Schaefer Ventilation Equip.)



Una segunda opción, y que también se ha utilizado muy satisfactoriamente, es la de paneles humectantes similares a los usados en naves de animales monogástricos, donde el aire caliente y seco atraviesa un panel de celulosa empapado de agua, saliendo más frío y más húmedo por el otro lado del panel, el que da al interior de la nave (Figura 12).

Figura 12. Esquema de funcionamiento de los paneles humectantes



La eficiencia de estos paneles es del 68 al 85%, dependiendo de la velocidad del aire a través del panel y del espesor del propio panel. Cuanto mayor es la velocidad, menor es el rendimiento, pues el aire tiene menos tiempo para evaporar el agua. Este sistema suele requerir que el aire sea extraído

¹ Al no llegar las gotas al suelo, este sistema puede instalarse para refrigerar aquellas zonas que no deben mojarse; p.ej., la cama o el comedero

² Según su diámetro

por ventiladores instalados en el lado opuesto al del panel. (Figuras 13 y 14).

El consumo de agua en este sistema de refrigeración fue estimado por Harner y col. (2009) en 0,19 l/min y m² de panel evaporador, con un valor medio de 49 l/día y plaza y un máximo de 85,8 l/día y plaza. Los datos recogidos sugieren que el consumo de agua en las horas de más calor puede triplicar el consumo medio, lo que hay que tener en cuenta a la hora de dimensionar las tuberías de suministro de agua al panel.

Refrigeración evaporativa directa

Este sistema difiere del anterior en que el objetivo no es enfriar el aire sino mojar directamente la piel del animal. Para ello, Chastain y Turner (1994) recomendaron aplicar 1,2 l/m² de agua sobre la superficie dorsal de la vaca. Las gotas de agua deben ser lo suficientemente gruesas para no que-

dar atrapadas y formar una fina capa de agua sobre el pelo, que atraparía una fina capa de aire entre aquella y la piel, que actuaría como aislante e impediría la eliminación de calor por el animal.

El sistema de evaporación directa más habitual es el que moja a las vacas mientras están en la línea de comederos con boquillas o rociadores de baja presión, alto volumen y gotas gruesas (Figura 15). Para aumentar más la capacidad de evaporación del aire, este rociado de los animales se combina con una ventilación forzada generada por ventiladores, generalmente de tipo axial (Figura 16).

Las especificaciones típicas de este sistema son boquillas de 2,3 l/min de caudal, a 140 kPa de presión, de 180° o inferior de salida de agua y colocadas como se indica en la Figura 17. Son perfectamente válidos los difusores que se utilizan en el riego de jardines. Un ángulo de salida de agua de 135° da excelentes resultados: consume menos agua y no moja la cabeza y cuello de los animales mientras están comiendo (Li y col., 2012).

Se realizan ciclos de mojado de 1 a 3 minutos, seguidos de secado con la ventilación forzada generada por los ventiladores durante 12 a 14 minutos. Estos ciclos deben acortarse conforme aumenta la temperatura.

La cantidad de agua necesaria en este sistema puede estimarse a partir de la siguiente ecuación:

$$Dw = FL \times CH \times H \times 1,9 \text{ l/m}^3 \text{ } ^{(3)}$$

donde:

Dw: Consumo de agua (l/día)

FL: Longitud total de comedero (m)

CH: ciclos/h de mojado-secado

H: horas/d de funcionamiento

Figuras 13 y 14. Refrigeración mediante paneles humectantes y extracción mecánica de aire



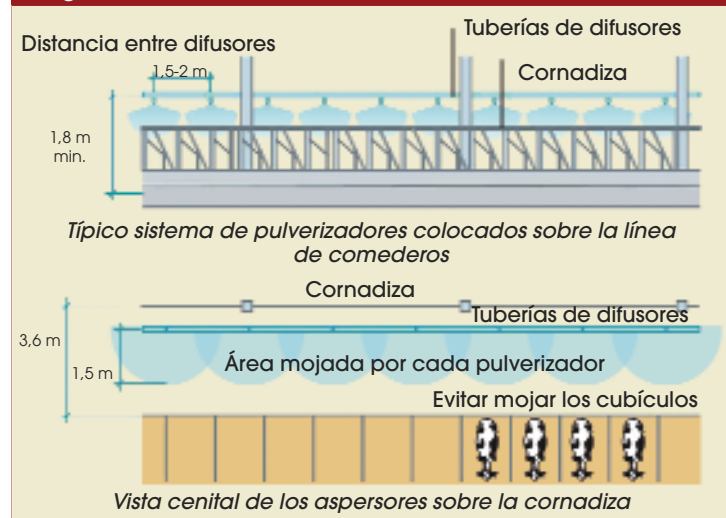
Figura 16. Rociadores y ventiladores



Figura 15. Rociadores en comedero

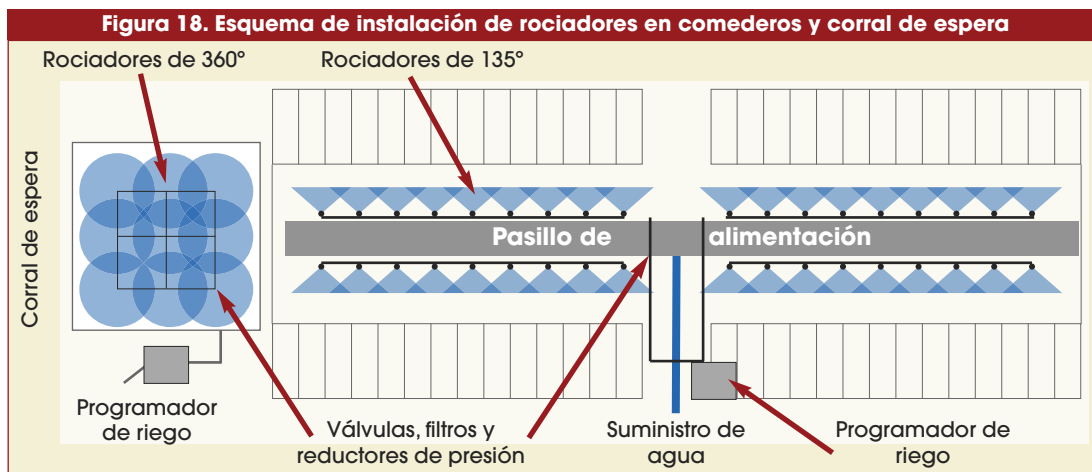


Figura 17. Colocación de los rociadores sobre la cornadiza



³ l/m representa la aplicación de 1,25 l/m² por cada ciclo de mojado-secado en una franja de 1,5 m de ancho a lo largo del comedero

Elección del sistema de refrigeración



Las observaciones realizadas en las granjas muestran que aproximadamente el 50% del agua utilizada no se evaporará en la piel del animal y escurrirá hacia el suelo y formará parte de la producción diaria de purín o de estiércol. Para limitar estas pérdidas de agua se deben ajustar los ciclos de mojado-secado, acortando el tiempo de mojado y aumentando el número de ciclos. Estos ciclos serán controlados por un termostato, que pondrá en marcha el sistema a una temperatura del aire determinada (entre 21 y 24 °C) y un programador similar a los que se utilizan para el riego de jardines, que abrirá una válvula colocada en la tubería de suministro de agua durante el tiempo de mojado y la cerrará durante el de secado.

Cuando las líneas de comederos son muy largas, conviene dividir la instalación en varios circuitos independientes, cada uno con una válvula solenoide y todas controladas por el mismo controlador. De esta manera, no se suman los consumos de agua de toda la instalación simultáneamente y se puede mantener suministrar un caudal instantáneo y una presión de agua más bajas (Figura 18).

Este sistema también puede instalarse en la sala de espera al ordeño (Figura 20) donde el hacinamiento de los animales antes del ordeño puede provocar un sensible aumento del ITH que debe evitarse. En este caso, los rociadores expulsan agua en un ángulo de 360° si se colocan en el interior del corral o de 180° si se instalan en los laterales (o ambos). Todo dependerá del diseño y de las dimensiones de la sala. Obviamente también se colocarán ventiladores para crear una corriente forzada de aire.

Finalmente, una tercera posibilidad para refrigerar directamente las vacas es colocar duchas accionadas automáticamente cuando los animales salen de la sala de ordeño a través de un pasillo (Figuras 20 y 11). Cuando la ducha es de libre acceso, su uso se incrementa con la temperatura (0,3h/°C), aunque hay una amplia variabilidad individual (Legend y col., 2011).

Deben recordarse las necesidades que deben cubrirse para el buen funcionamiento del sistema de evaporación:

- Amplio suministro de agua (175-265 l/vaca y día)
- Estructura cubierta
- Alojamiento diseñado para recoger y manejar el agua no evaporada (suelo de hormigón y con adecuada pendiente).
- Adecuado suministro eléctrico. Para evitar un pico excesivo de demanda eléctrica, los ventiladores deben ponerse en marcha de forma secuencial, no simultánea.

Figura 19. Sala de espera con rociadores y ventiladores



Figuras 20 y 21. Instalación de duchas en la salida de la sala de ordeño



- Alimento y agua en las proximidades del área que se enfría. El sistema sólo es eficaz si las vacas comen y producen más.

En el apartado "Artículos técnicos" de la web www.revistafri zona.com se puede consultar el **Ejemplo de selección del sistema de refrigeración**