

Consumo eléctrico diario en granjas de vacuno lechero

D.J. Bartolomé^{1,2}, M.J. Tabernero de Paz¹, R. Posado¹, S. Olmedo¹,
J.J. García¹ y R. Bodas^{1,*}

¹ Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León-Subdirección de Investigación y Tecnología. Consejería de Agricultura y Ganadería. Junta de Castilla y León. Carretera de Carbajosa S/N-Bajo. 37008 Salamanca (España)

² Dirección actual: Instituto Europeo de Cultura Agroambiental (www.inocua.es)

Resumen

Con el objetivo de estudiar la distribución del consumo eléctrico a lo largo del día en explotaciones de ganado vacuno lechero con diferente sistema de ordeño (espina de pescado, paralelo, automático (robot), rotativo, circuito de ordeño y tándem), se llevaron a cabo auditorías energéticas en 61 explotaciones de Castilla y León ($74 \pm 8,4$ vacas, $2.284 \pm 265,2$ l/día y $29,3 \pm 0,91$ l/vaca y día). Se registró información sobre el tipo de explotación y sala de ordeño, producción de leche, número de animales en lactación, horarios, equipos asociados a la producción y detalles de la factura eléctrica. Asimismo, se midió el consumo de electricidad mediante la utilización de analizadores de red situados a la entrada de las explotaciones. Se calcularon los índices de utilización de la electricidad por vaca y por litro de leche producido, el consumo medio para cada hora del día y para cada día. Aunque el consumo eléctrico fue muy variable a lo largo del día, la mayoría de los sistemas mostraron un pico máximo de consumo a las 8:00 h. y otro a las 20:00 h.; el pico mínimo se registró entre las 12:00 y las 18:00 h. Los sistemas de ordeño automático tuvieron un consumo diario más constante, aunque, junto con el sistema de circuito de ordeño, presentaron los mayores consumos por unidad de producción. El tiempo de funcionamiento del sistema de ordeño y del tanque, así como la potencia y dimensionado de este último son los factores de mayor importancia a considerar para optimizar el consumo eléctrico.

Palabras clave: Ordeño, leche, eficiencia, sala, tanque refrigerador, analizador de red.

Abstract

Daily electricity consumption in dairy cattle farms

In order to study the distribution of electricity consumption throughout the day, 61 dairy cattle farms in Castille and León ($74 \pm 8,4$ cows, $2.284 \pm 265,2$ l/day and $29,3 \pm 0,91$ l/cow and day) using different milking systems (herringbone, parallel, automatic milking system –AMS–, rotary, round the shed and tandem) were audited for the energy consumption. Information on the type of farm and milking system, milk production, number of lactating animals, schedules... was recorded. Moreover, electricity consumption was measured using network analyzers located at the entrance of the farm. Electricity usage rates per litre of milk yielded or milking cow and hourly average consumption were calculated. Although electricity consumption was highly variable throughout the day, most of the systems showed a maximum peak at 8:00 am and another at 8:00 pm; the minimum peak occurred between 12:00 am and 6:00

* Autor para correspondencia: bodrodra@itacyl.es

<http://dx.doi.org/10.12706/itea.2015.017>

pm. Automatic milking systems have a constant electricity consumption throughout the day; however, this system together with round the shed system, have the highest consumption per cow. The time that milking system is running together with the capacity and power of cooling tank are the key factors to be considered to optimize electricity consumption.

Key words: Milking, milk, efficiency, parlour, cooling tank, power analyzer.

Introducción

El objetivo de los diferentes sistemas de ordeño es obtener, de la manera más segura y eficiente posible, leche que cumpla los máximos requisitos de calidad e higiene. El sistema elegido para el ordeño (dejando aparte los sistemas manuales) no parece tener una influencia clara sobre la cantidad o la calidad de leche obtenida de cada vaca (Wagner et al., 2001). Considerando, además, que esta instalación representa la inversión más cara de aquellas relacionadas con el ordeño de los animales, la elección de uno u otro sistema dependerá de un conjunto de factores, tales como la capacidad de inversión, el número inicial de animales y las posibilidades de crecimiento, la disponibilidad de espacio y de mano de obra, etc. (Wagner et al., 2001). El tipo de sistema instalado condicionará el número de vacas ordeñadas por trabajador y hora, las necesidades de mano de obra, las rutinas de la explotación y su eficiencia energética. Así, por ejemplo, las salas de ordeño convencionales proporcionan una rutina de ordeño diaria más estructurada que los sistemas de ordeño automáticos (conocidos como robots de ordeño), donde cada vaca decide su propio intervalo entre ordeños (pudiendo ser ordeñada más de dos veces al día) y es más independiente de la mano de obra (Wagner-Storch y Palmer, 2003; Castro et al., 2012). Sin embargo, la idoneidad de la instalación de un sistema de ordeño automático dependerá del tamaño del rebaño (recomendable entre 50 y 120 vacas) y del número potencial de veces que una vaca pueda ser ordeñada para mantener un nivel de producción de leche (Rotz et al., 2003).

El aumento gradual en el consumo de energía en estas explotaciones de ganado vacuno lechero está motivando la búsqueda de alternativas que permitan reducir el consumo de energía para hacer la explotación energéticamente más eficiente (Upton et al., 2010) y económicamente más competitiva (Murgia et al., 2008). Así, el establecimiento de un sistema de ahorro, bien mediante la instalación de nuevos elementos, como por ejemplo variadores de velocidad en los motores, o bien mediante la adopción de prácticas de manejo para optimizar el uso de la energía (Bartolomé et al., 2011), debe estar basado en el conocimiento de los procesos que tienen lugar en la explotación y el consumo asociado a cada uno de ellos.

Es sabido que el consumo eléctrico de los diferentes equipos varía ampliamente entre explotaciones, si bien los procesos relacionados con la obtención de la leche (bombas de vacío, sistema de ordeño, enfriamiento de la leche) representan siempre un porcentaje elevado, mientras la contribución a dicho consumo de otros procesos (como por ejemplo la iluminación) es mucho menor (Bartolomé et al., 2011, 2013; Béguin et al., 2008; EECA 2009; Ludington y Johnson, 2003; Murgia et al., 2008; NSAC, 2011; Upton et al., 2010; WDATCP, 2006). Sin embargo, aunque en la práctica y de forma tradicional se dan por sentados determinados patrones de consumo eléctrico, existe un desconocimiento de su distribución en estas explotaciones a lo largo del día, y cómo el tipo de explotación, condicionado fundamentalmente por el sistema de ordeño instalado, puede influir sobre esta distribución. Un adecuado conoci-

miento del consumo a lo largo del día permitiría a los ganaderos poder contratar una tarifa eléctrica en las condiciones más ventajosas para las características de su explotación (con o sin discriminación horaria, en función de las necesidades particulares en cada caso).

Por consiguiente, el objetivo de este trabajo fue estudiar la distribución del consumo eléctrico a lo largo del día en explotaciones de ganado vacuno lechero con diferente sistema de ordeño.

Material y métodos

Se llevaron a cabo auditorías energéticas durante el mes de mayo en 61 explotaciones de ganado vacuno lechero de Castilla y León seleccionadas aleatoriamente y en las que estuvieran presentes los sistemas de ordeño más frecuentemente utilizados: espina de pescado, paralelo, sistema de ordeño automático (robot), rotativo, circuito de ordeño (ordeño en plaza) y tándem. Las características productivas medias de las explotaciones se muestran en la Tabla 1. Salvo las explotaciones que disponían de robot de ordeño, en las demás se realizaban 2 ordeños al día (comenzando aproximadamente a las 7:45 y 19:45 h); en todas ellas la recogida de leche era diaria, a primera hora de la mañana (entre las 8:00 y las 10:00 h). Las auditorías, diseñadas conforme a lo señalado por IDAE (2010) y Murgia *et al.* (2008), se realizaron para recoger información concerniente a los siguientes aspectos: tipo de explotación (manejo y alimentación), producción de leche (litros diarios y anuales), número de animales en lactación, tipo de sala de ordeño, horario de funcionamiento y limpieza, bombas de vacío (potencia y horas de uso), tanques de frío (volumen, potencia y horas de uso) y otros equipos asociados a la producción de leche (bomba de descargue de leche, bomba de agua, termo eléctrico) y detalles de la fac-

tura eléctrica (potencia contratada, potencia demandada, tarifa, exceso de potencia, energía activa y reactiva consumida, alquiler de equipos de medida, impuestos) (Bartolomé *et al.*, 2013). Además, se midió el consumo de electricidad mediante la utilización de analizadores de red (CIR-e3, Circutor, Viladecavalls, Barcelona, España), que estuvieron colocados durante un periodo de 3,5 (\pm 0,31) días a la entrada de las explotaciones (para monitorizar el consumo de la sala de ordeño, el circuito y la refrigeración de la leche, descartando oficinas o viviendas anexas, calefacción o aire acondicionado), en el mes de mayo. Estos equipos registraron el valor de la potencia activa (W) consumida cada 10 minutos, calculándose a partir de estos datos el momento del día en que se producía el consumo máximo y mínimo, así como el consumo en cada hora del día.

Cálculos y análisis

A partir de las mediciones de consumo eléctrico diario y de los datos obtenidos en las auditorías, se calcularon los índices de utilización de la electricidad por vaca productora y por unidad de leche producida (Edens *et al.*, 2003; Ludington y Johnson, 2003; Murgia *et al.*, 2008). Se calculó el consumo eléctrico medio para cada hora del día y se estimó, para cada explotación, el momento del día en que se producían los picos de máxima y mínima demanda de energía. Se realizó un análisis descriptivo de los datos de consumo diario (medias, percentiles), además de una representación gráfica del consumo eléctrico en cada hora a lo largo del día. Los datos de producción de leche, número de animales en ordeño, consumo medio por vaca y por litro de leche producido se sometieron a un análisis de varianza de una vía, con el tipo de sistema de ordeño (espina de pescado, paralelo, robot, rotativa, tándem, circuito de ordeño) como fuente de variación. Se realizó un análisis de correlación múltiple entre el consumo de

Tabla 1. Características (producción de leche, vacas en ordeño, consumo de electricidad, potencia contratada) (media \pm error estándar de la media) de las explotaciones estudiadas, de las 10 con mayor y con menor consumo eléctrico
Table 1. Characteristics (milk yield, milking cows, electricity consumption, contracted power) (mean \pm standard error of the mean) of studied farms and the 10 farms with the highest and the 10 farms with the lowest electricity consumption

	Todas las explotaciones	Explotaciones con consumo eléctrico	
		mayor (n = 10)	menor (n = 10)
Producción media de leche			
l/año	806.053 \pm 93.575	2.000.935 \pm 200.395	261.614 \pm 22.735
l/día	2.284 \pm 265	5.673 \pm 576	717 \pm 62
l/vaca y día	29,3 \pm 0,91	32,7 \pm 0,91	25,7 \pm 0,96
Nº vacas en ordeño	74 \pm 8,4	1764 \pm 21,3	28 \pm 2,2
Consumo medio			
kWh/día	91,1 \pm 11,66	258,9 \pm 23,39	21,9 \pm 1,84
kWh/vaca y día	1,20 \pm 0,065	1,64 \pm 0,244	0,85 \pm 0,108
kWh/vaca y año	437 \pm 23,6	599 \pm 88,9	309 \pm 39,4
Wh/litro producido	42,5 \pm 2,52	50,4 \pm 7,67	33,9 \pm 4,73
Potencia contratada (kW)	18,6 \pm 2,34	32,1 \pm 6,08	6,6 \pm 3,30
Tipos de sala de ordeño			
Espina de pescado		3	8
Paralelo		2	
Robot		2	
Rotativo		2	
Circuito de ordeño			2
Tandem		1	

electricidad y las características de utilización del tanque de frío, la bomba de vacío, la bomba de agua (caso de haberla), la potencia del termo eléctrico (caso de haberlo) y las horas dedicadas a la limpieza de la sala. Asimismo, se realizó un análisis de regresión lineal entre el consumo eléctrico medio (por

día, vaca y litro de leche producido) y las características del tanque de frío y la bomba de vacío: horas de funcionamiento, potencia nominal y volumen (en el caso del tanque) nominal. Todos los análisis se realizaron utilizando el software SPSS 16.0 para Windows (IBM Corp., Nueva York, EUA).

Resultados y discusión

El consumo diario de electricidad, medido con los analizadores de red, varió considerablemente entre las 61 explotaciones analizadas, como puede verse en la Figura 1.a). El consumo del 50% de las explotaciones se situaba, aproximadamente entre los 30 (cuartil 1 = 29,5, Q1) y 130 (cuartil 3 = 133,2, Q3) kWh por explotación y día. El consumo diario de electricidad depende, entre otros factores, del número de animales en ordeño, la cantidad de leche producida, el tipo de sala, el dimensionado de los equipos, el tipo de tanque y, sobre todo, la eficiencia de los procesos de ordeño, enfriado de la leche y limpieza de la sala, como se desprende de trabajos anteriores (Bartolomé et al., 2013).

Sin embargo, cuando el consumo se expresó por litro de leche producido (Figura 1.b)), la mayoría de las explotaciones se situaban en un rango más estrecho, entre los 33,3 (Q1) y 50,5 (Q3) Wh/l de leche producido al día. No obstante, dado el número de explotaciones auditadas y la diversidad de manejos, existen valores extremos, tanto por arriba como por debajo de esos límites. Este rango es ligeramente inferior al publicado por otros autores, si bien es conveniente destacar que las variaciones serán mayores cuantos más factores entren en juego (sistema de producción, de alimentación, prácticas habituales de ordeño, etc.) que, además, varían entre los diferentes países (y estudios) considerados. Por ejemplo, el consumo medio se situaba en 88 Wh/l en Canadá (NSAC, 2011), alrededor de 70 Wh/l en Francia (Béguin et al., 2008) o de los 50 Wh/l en Reino Unido e Italia (Murgia et al., 2008; Trimble, 2009).

La descripción de las características de las granjas con mayor y menor consumo de electricidad (Tabla 1) muestra que el mayor consumo por litro de leche producido coincide también con unos valores mayores de producción de leche total y una mayor potencia contratada.

Hay que tener en cuenta, como se recoge en la Tabla 2, que, si bien la mayoría de las explotaciones tenían salas de ordeño tipo espina de pescado, y en torno a 55 animales en ordeño, el rango en función del tipo de sistema de ordeño es muy amplio. Así, las explotaciones con circuito de ordeño, ordeñaban de media 30 animales, mientras que las que tenían salas rotativas o en tándem ordeñaban, de media, 180 animales. Consecuentemente, y en relación directa con el número de vacas ordeñadas, la producción media de leche también varía (entre los 675 litros diarios para una explotación con circuito de ordeño y los 6.200 de la explotación con sistema tándem), sin que lo haga de forma estadísticamente significativa (aunque sí numéricamente, $P > 0,10$; Tabla 2) la producción de leche por vaca y día.

En términos de consumo de electricidad por vaca ordeñada y día, los sistemas en paralelo y sala rotativa son los que tendieron a mostrar los menores valores, mientras que el robot (sistema de ordeño automático) tendió a presentar el mayor consumo por vaca y día ($P < 0,10$; Tabla 2). De forma análoga, el consumo de electricidad por litro de leche producido fue numéricamente menor en las salas en paralelo, rotativa y tándem, mostrando el robot de ordeño los mayores consumos y situándose las salas en espina de pescado en una posición intermedia ($P > 0,10$; Tabla 2).

No obstante, el planteamiento de elección de un tipo u otro de sistema de ordeño no debe basarse únicamente en el consumo eléctrico, sino que hay otros factores de similar importancia que deben ser considerados, como el número de trabajadores con que se cuenta, el número de animales a ordeñar y el tiempo disponible para ello, la inversión inicial, la disponibilidad de espacio o los costes de mantenimiento asociados al funcionamiento del mismo, entre otros (Gutiérrez, 2009; Wagner et al., 2001; Wagner-Storch y Palmer, 2003).

La distribución del consumo eléctrico diario (Wh/l) en función del sistema de ordeño se

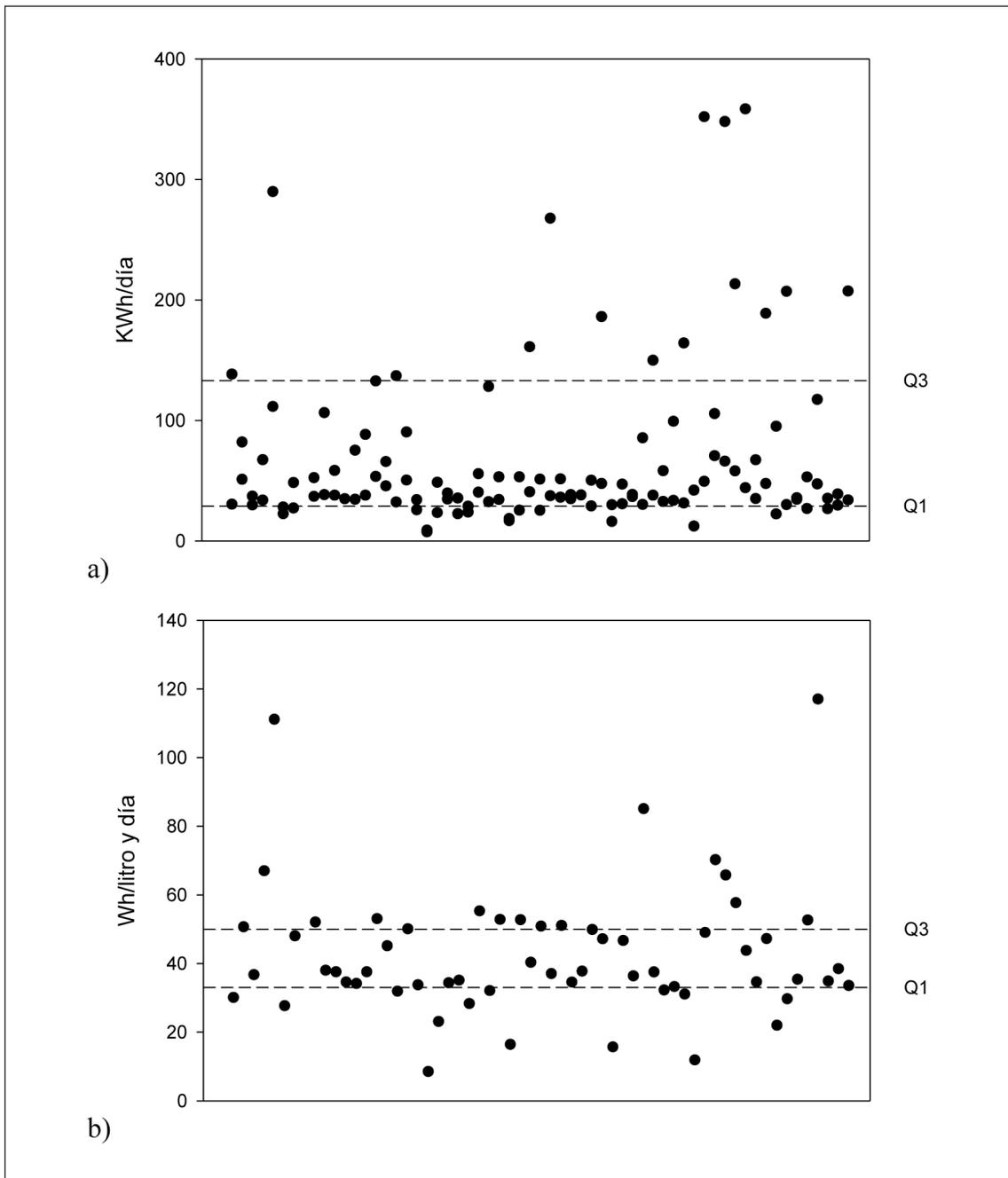


Figura 1. Dispersión del consumo total diario de electricidad por día (a) y por litro de leche producido (b). Cada punto representa una explotación auditada.

Figure 1. Scatter plots of total daily electricity consumption (a) and electricity consumption per litre of milk yielded (b). Each point represents one audited farm.

Tabla 2. Producción de leche y consumo de electricidad (media \pm error estándar de la media) en función del sistema de ordeño
 Table 2. Milk yield and electricity consumption (mean \pm standard error or the mean) depending on the milking system

	N ¹	Producción de leche		Nº vacas en ordeño	Consumo medio	
		l/día	l/vaca y día		kWh/vaca y día	Wh/l
Espina de pescado	39	1635 \pm 230,9	29,4 \pm 1,20	54 \pm 7,3	1,20 \pm 0,079	42,4 \pm 2,82
Paralelo	6	4138 \pm 772,8	30,6 \pm 1,63	139 \pm 24,6	0,99 \pm 0,203	32,3 \pm 4,92
Robot	3	3500 \pm 1101,5	32,3 \pm 2,70	104 \pm 26,3	2,07 \pm 0,164	64,4 \pm 3,67
Rotativa	4	5374 \pm 1121,2	30,2 \pm 2,16	177 \pm 38,1	0,96 \pm 0,111	32,3 \pm 4,60
Circuito de ordeño	5	675 \pm 100,9	23,0 \pm 2,89	30 \pm 2,5	1,11 \pm 0,117	55,5 \pm 15,67
Tandem	1	6200	34,4	180	1,15	33,4
d.e.r. ²		1564,7	6,92	48,81	0,463	18,73
P-valor		<0,001	0,301	<0,001	0,056	0,142

¹ Número de explotaciones. ² Desviación estándar residual.

muestra en la Figura 2. Como puede observarse, la mayoría de las explotaciones presentan una gráfica de consumo a lo largo del día muy similar, posiblemente motivado por un ritmo de horas de ordeño semejante (2 ordeños diarios en momentos similares, excepto para el sistema de robot de ordeño). Así, las explotaciones con sala de ordeño tipo espina de pescado y rotativa o aquellas con circuito de ordeño tienen una distribución del consumo medio de electricidad muy similar a lo largo del día, si bien conviene destacar que éstas últimas son las que muestran los picos más elevados. Esto puede venir motivado por una baja eficiencia del sistema, ya que son el equipo de ordeño y el ordeñador quienes se mueven entre los animales (y no al revés) y, además, es necesaria una gran infraestructura de conducción de leche, con el consiguiente consumo de energía asociado a la bomba de vacío. En estos tres sistemas de ordeño, el consumo de electricidad comienza

a elevarse alrededor de las 7 de la mañana, alcanzándose un pico entre las 8:00 y las 10:00 h. Posteriormente, desciende para alcanzar el punto más bajo entre las 16:00 y las 18:00 h. En este momento, el consumo de electricidad comienza a subir, alcanzándose de nuevo otro pico de consumo entre las 20:00 y las 22:00 h, punto a partir del cual comienza otra vez a descender el consumo. El consumo eléctrico en las explotaciones que tienen implementado un sistema en paralelo sigue un patrón similar a las anteriormente descritas, con picos de consumo a las 8:00 y a las 20:00 h, si bien la magnitud de los mismos es menor que en éstas. Por otra parte, el consumo de electricidad de las salas con robot de ordeño (sistema de ordeño automático) presenta un patrón diario homogéneo, debido a que los animales pasan de forma libre y casi constante a lo largo del día, mostrando los picos de mayor actividad alrededor de las 3:00 h y las 11:00 h.

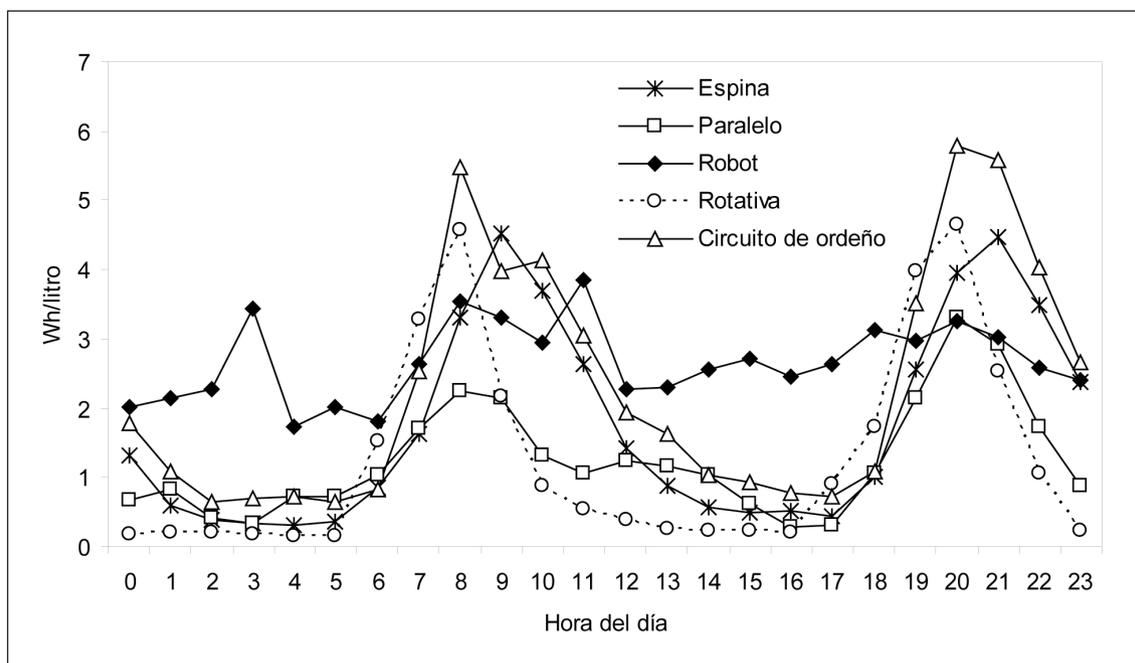


Figura 2. Distribución del consumo diario de electricidad por litro de leche producido.
 Figure 2. Daily electricity consumption per litre of milk yielded.

Respecto a los picos mínimos de consumo de electricidad, éstos se distribuyen sobre todo entre las 12:00 y las 18:00 h (26 explotaciones) y entre las 0.00 y las 6:00 h (12 explotaciones) (Figura 3), posiblemente debido a que son las horas en las que el tanque de frío puede permanecer vacío en la mayoría de las explotaciones. En este sentido, conviene recordar que la recogida de leche se efectúa, en la mayoría de las ganaderías, por la mañana, permaneciendo el tanque refrigerador sin funcionar hasta que comienza el ordeño de la tarde, lo que explicaría que la mayoría de las explotaciones (45%) tuviera su pico mínimo de consumo eléctrico en este momento.

Por otra parte, el pico máximo de consumo se distribuye entre las 6:00 y las 12:00 h (23 explotaciones) y las 18:00 y las 23:00 h (32 explotaciones). Es dentro de estos horarios donde la mayoría de los ganaderos efectúan

las labores de ordeño. Sin embargo, adicionalmente, entre las 18:00 y las 23:00 h, la leche recién ordeñada llega al tanque vacío, que tiene que enfriarla, lo que hace que el consumo eléctrico sea con toda probabilidad ligeramente superior al asociado al ordeño de la mañana, lo que contribuiría a explicar que el 55% de las granjas tuvieran su pico de máximo consumo en este momento. Esta distribución de los picos máximos y mínimos de potencia podría servir de orientación para que los ganaderos hagan un estudio de las tarifas eléctricas disponibles en cada momento (y una revisión periódica de las mismas) para seleccionar aquella que más se ajuste a sus necesidades reales de consumo.

Respecto a la relación existente entre el consumo eléctrico total al cabo del día con las características de los equipos instalados en la explotación (implicados directamente con el

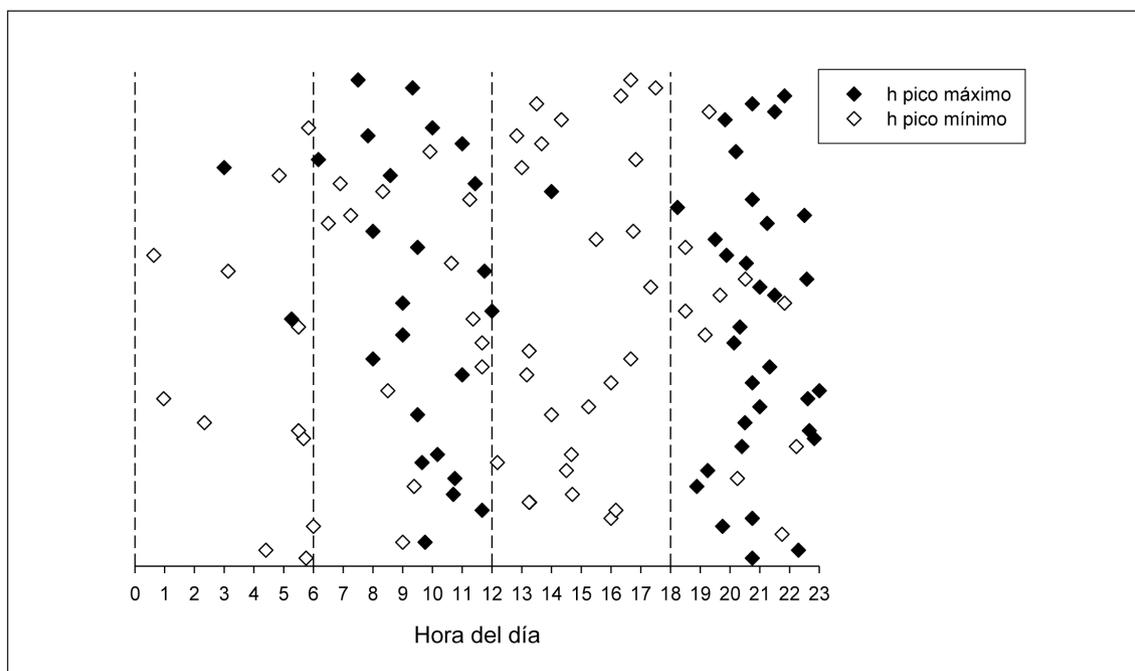


Figura 3. Momento del día en que se producen los picos máximo y mínimo de consumo de electricidad (cada punto representa una explotación auditada).

Figure 3. Time of the day at which maximum and minimum peaks of power consumption are reached. Each point represents one audited farm.

circuito de ordeño y la limpieza del mismo, la obtención de la leche y su refrigeración, sin tener en cuenta sistemas de calefacción o aire acondicionado para oficinas), estudios previos han señalado que más del 70% del consumo eléctrico se distribuía entre las labores dedicadas al ordeño (consumo mayoritario de las bombas de vacío) y al enfriamiento de la leche (tanque refrigerador) (Bartolomé et al., 2011, 2013). Como puede verse en la Tabla 3, el consumo de electricidad por día se correlacionó positivamente con casi todas las variables consideradas: número de vacas, potencia del tanque, horas de funcionamiento del tanque, potencia de la bomba de vacío, de la bomba de leche y de la bomba de agua y horas de funcionamiento de las mismas, así como con el volumen del

termo de agua caliente (aunque no con su potencia) y la producción de leche por vaca. Puede destacarse, asimismo, la correlación existente entre las horas de funcionamiento del tanque de refrigeración y de la bomba de vacío, el dimensionado de uno de estos elementos suele estar en concordancia con el otro, de tal manera que sistemas de ordeño con mayor capacidad van asociados a tanques de frío de mayor volumen, pero también a mayores cantidades de leche producida, lo que determina un mayor número de horas de funcionamiento de ambos equipos.

Por otro lado, es destacable que la potencia del tanque no acabe de tener una correlación con la mayoría de las variables; los valores para este parámetro seguramente oscilan en un rango muy estrecho, mientras que el vo-

Tabla 3. Coeficientes de correlación (Pearson) significativos entre las diferentes variables
 Table 3. Significant correlation coefficients (Pearson) between the different variables

	PTE	HBL	HBV	PBV	HTR	VTR	PTR	NVO	PDL	kWD
VTE	0,78**	0,47*		0,59**	0,38*	0,45**		0,54**	0,57**	0,42*
HBL			0,88**	0,32*	0,34*					0,52**
LVD				0,27*			0,27*		0,37**	0,26*
PTE				0,48**						
PBL				0,38*	0,33*	0,36*		0,44**	0,46**	0,39*
HBV					0,72**	0,32*		0,34**	0,38**	0,51**
PBV					0,50**	0,60**	0,36**	0,68**	0,72**	0,53**
HTR						0,58**	0,33*	0,60**	0,64**	0,60**
VTR							0,65**	0,88**	0,88**	0,78**
PTR								0,50**	0,54**	0,56**
NVO									0,98**	0,87**
PDL										0,88**

PTE: potencia del termo eléctrico; HBL: horas de funcionamiento de la bomba de descargue de leche; HBV: horas de funcionamiento de la bomba de vacío; PBV: potencia de la bomba de vacío; HTR: horas de funcionamiento del tanque de refrigeración; VTR: volumen del tanque de refrigeración; PTR: potencia del tanque de refrigeración; NVO: número de vacas en ordeño; PDL: producción diaria de leche; kWD: consumo diario de electricidad; VTE: volumen del termo eléctrico; LVD: litros por vaca y día; PBL: potencia de la bomba de descargue de la leche.

lumen sí que guarda una relación directa con la producción de leche diaria. Análogamente, no es la potencia nominal del calentador eléctrico de agua caliente, sino el volumen de agua consumido lo que determina su relación con el consumo eléctrico. No obstante, en ambos casos, cuanto mejor dimensionado esté el equipo, más se optimizará el consumo eléctrico.

Cuando se realiza un análisis de regresión lineal entre el consumo diario de electricidad y el dimensionado, potencia y horas de funcionamiento de las bombas de vacío y el tanque refrigerador (presentes en el 100% de las explotaciones), se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 4. Las variables que

determinan el consumo diario de electricidad son el volumen del tanque y las horas de funcionamiento de la bomba de vacío, en concordancia con lo sugerido por Bartolomé et al. (2011, 2013). Por otra parte, cuando se considera el consumo de electricidad por vaca y día, éste se explica en función del número de horas de funcionamiento de la bomba de vacío, si bien el coeficiente de determinación obtenido es relativamente pequeño. Por último, el consumo de electricidad en relación al volumen de leche producido (teniendo en cuenta todas las explotaciones auditadas) se explica fundamentalmente en función de las horas de funcionamiento del tanque refrigerador. Por otra parte, si se considera únicamente el tipo mayoritario de sistema de or-

Tabla 4. Coeficientes (media y error estándar) obtenidos en el análisis de regresión lineal del consumo eléctrico medio y las características del tanque de frío y la bomba de vacío
 Table 4. Regression coefficients (mean and standard error) from linear regression analysis between electricity consumption and milk refrigeration tank and vacuum pump

	Consumo eléctrico medio			
	(kWh/día)	(kWh/vaca y día)	(Wh/l y día)	(kWh/día)
Sistema de ordeño	Todos	Todos	Todos	Espina de pescado
Variable independiente				
Tanque				
Tiempo (h/día)	-	-	7,69 (0,70)	-
Volumen (l)	0,019 (0,002)	-	-	0,021 (0,02)
Potencia (kW)	-	-	-	3,60 (0,94)
Bomba de vacío				
Tiempo (h/día)	5,41 (1,48)	0,037 (0,013)	-	-
Potencia (kW)	-	-	-	-
Constante	-14,19 (11,91)	1,02 (0,09)	-	-17,29 (7,31)
R ²	0,695	0,139	0,684	0,866
P-valor	0,001	0,005	0,001	0,001

deño presente en las explotaciones auditadas (espina de pescado), el consumo diario se explica en función del volumen y la potencia de tanque de enfriamiento. Es decir, asumiendo un correcto dimensionado del sistema de ordeño (las características y número de puestos estarían en concordancia con el número de animales que efectivamente se ordeñan), es el tanque refrigerador el elemento que más condiciona el consumo eléctrico de la explotación.

Como conclusión puede decirse que el consumo eléctrico en las explotaciones de ga-

nado vacuno lechero varía considerablemente a lo largo del día, si bien la mayoría de los sistemas muestran picos de consumo máximo en torno a las 8:00 h y a las 20:00 h, mientras que el consumo mínimo se sitúa, en la mayoría de las explotaciones, entre las 12:00 y las 18:00 h (coincidiendo en este caso con los momentos del día en los que el tanque no trabaja, por haberse recogido la leche antes de las 12:00 h en todas las explotaciones auditadas). Los sistemas de ordeño automáticos muestran un consumo de electricidad cons-

tante a lo largo del día; sin embargo, este sistema junto con el sistema de circuito de ordeño son los que muestran un mayor consumo de electricidad por unidad de producción. Finalmente, el tiempo de funcionamiento del sistema de ordeño y, sobre todo, las características del tanque (potencia, dimensionado y horas de funcionamiento) son los factores más determinantes del consumo eléctrico, aspectos que merecen especial atención para optimizar la utilización de la energía en las explotaciones de ganado vacuno dedicadas a la producción de leche.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias a un proyecto (DER 20101899960100166) financiado conjuntamente por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM) y por el Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER). "Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural: Europa invierte en las zonas rurales".

Bibliografía

- Bartolomé DJ, Posado R, Bodas R, Tabernero de Paz MJ, García JJ, Olmedo S (2013). Caracterización del consumo eléctrico en las granjas de vacuno lechero de Castilla y León. *Archivos de Zootecnia* 62 (239): 447-455.
- Bartolomé DJ, Posado R, García JJ, Bodas R, Fonseca B, Tabernero de Paz MJ, Río G (2011). Manual de buenas prácticas de ahorro y eficiencia energética en explotaciones de vacuno lechero. *Consejería de Agricultura y Ganadería. Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León*. 62 p.
- Béguin E, Caillaud D, Dollé JB, Capitain M, Chambaut H, Charroin T (2008). Les consommations d'énergie dans les systèmes bovins laitiers. *Repères de consommation et pistes d'économie. Institut de l'Élevage*. 32 p. Disponible en: http://www.orne-agri.com/iso_album/consommations_energie_systemes_laitiers_07_11_08.pdf
- Castro A, Pereira JM, Amiama C, Bueno J (2012). Estimating efficiency in automatic milking systems. *Journal of Dairy Science* 95: 929-936.
- ECCA (2009). Improving energy efficiency. A guide for New Zealand dairy farms. Energy Efficiency and Conservation Authority, Wellington, New Zealand. 24 pp. Disponible en: <http://www.eeca.govt.nz/sites/all/files/dairy-farm-energy-efficiency-guide-march-09.pdf>
- Edens WC, Pordesimo LO, Wilhelm LR, Burns RT (2003). Energy use analysis of major milking center components at a dairy experiment station. *Applied Engineering in Agriculture* 19 (6): 711-716.
- Gutiérrez P (2009). Manual práctico de manejo de una explotación de ganado vacuno lechero. Servicio de Formación Agraria e Iniciativas, Junta de Castilla y León. 124 p.
- IDAE (2010). Auditorías energéticas en instalaciones ganaderas. Parte 1: Manual para la realización de auditorías energéticas en instalaciones ganaderas. Serie "Ahorro y Eficiencia Energética en la Agricultura". Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Madrid. 83 p.
- Ludington D, Johnson EL (2003). Dairy farm energy audit summary report. New York State Energy Research and Development Authority. 25 pp. Disponible en: <http://www.nyserda.ny.gov/-/media/Files/Publications/Research/Energy-Audit-Reports/dairy-farm-energy.pdf>
- Murgia L, Caria M, Pazzona A (2008). Energy use and management in dairy farms. En: Innovation technology to empower safety, health and welfare in agriculture and agro-food systems. International conference. 15-17 Septiembre. Ragusa, Italia. Disponible en: http://www.ragusahwa.it/CD_2008/lavori/TOPIC9/orale/MUR-GIA.pdf
- NSAC (2011). Farm Energy Booklet Series, #2 Dairy Farms. Nova Scotia Agricultural College. Disponible en: http://nsac.ca/fens/factsheets/fens_energy_booklet_2_dairy.pdf
- Rotz CA, Coiner CU, Soder KJ (2003). Automatic milking systems, farm size, and milk production. *Journal of Dairy Science* 86: 4167-4177.

- Trimble D (2009). Report of Pilot Energy Benchmarking Project 2007/2008. College of Agriculture, Food and Rural Enterprise (CAFRE) Cuts Carbon. 6 p. Disponible en: http://www.dardni.gov.uk/ruralni/dairy_energy_report.pdf
- Upton J, Murphy M, French P, Dillon P (2010). Dairy farm energy consumption. En: *Dairying: Entering a decade of opportunity*. Teagasc National Dairy Conference 2010. Teagasc, Agriculture and Food Development Authority. pp. 87-97 pp. Disponible en: http://www.teagasc.ie/publications/2010/52/52_NationalDairy-Conf2010Proceedings.pdf
- Wagner A, Palmer RW, Bewley J, Jackson-Smith DB (2001). Producer satisfaction, efficiency, and investment cost factors of different milking systems. *Journal of Dairy Science* 84: 1890-1898.
- Wagener-Storch A, Palmer RW (2003). Feeding behaviour, milking behaviour, and milk yields of cows milked in a parlour versus an automatic milking system. *Journal of Dairy Science* 86: 1494-150.
- WDATCP. 2006. Dairy farm energy management guide. 51 p. Wisconsin Dept. of Agriculture, Trade and Consumer Protection. Disponible en: <http://www.wistatedocuments.org/cdm/singleitem/collection/p267601coll4/id/298>
- (Aceptado para publicación el 23 de diciembre de 2014)