



Robótica

la nueva frontera tecnológica en lechería de precisión

Santiago A. Utsumi

Michigan State University
santiago_utsumi@yahoo.es

Juan R. Insua

Unidad Integrada Balcarce
 (FCA, UNMdP - EEA Balcarce INTA)
 CONICET
insua.juan@inta.gob.ar

La intención de este artículo es describir las bases y principios que rigen el funcionamiento de los robots en lechería, utilizando datos e información colectada durante 10 años de trabajo en el tambo robótico de la Estación Experimental “W.K. Kellogg Biological Station” de Michigan State University, Estados Unidos.

Introducción

En el actual contexto de precios y costos en la lechería los robots de ordeño, conocidos por las siglas en inglés AMS (*Automatic Milking Systems*) o VMS (*Voluntary Milking Systems*), continúan ganando adeptos frente a la necesidad constante de obtener mayor eficiencia y se van posicionando como la tecnología “de punta” elegida por el sector lechero. Hoy se estima que en el mundo hay unos 60.000 robots operativos y que 3,5 millones de vacas son ordeñadas por robots, una cifra inimaginable pocas décadas atrás.

La primera instalación de tipo comercial se realizó en 1992 en Holanda y luego la tecnología se

expandió rápidamente hacia el resto de Europa, en tambos predominantemente familiares y estabulados. De allí, los robots pasaron a sistemas de mayor escala como son los tambos pastoriles y mixtos de Nueva Zelanda y Australia, y los tambos estabulados de Canadá y Estados Unidos. La adopción de la robótica lechera en los países de Latinoamérica y Caribe es un proceso más incipiente, pero en plena expansión.

El sistema robótico de ordeño introduce la automatización de procesos donde cada vaca tiene libertad plena para establecer su propia rutina de ordeño de manera individual, distribuida y voluntaria. Este concepto, que es sumamente novedoso y transformador, se presenta en la región como una nueva plataforma tecnológica que parece ser que llegó para quedarse.

Su principal atractivo sigue siendo la flexibilización de los procesos y el reordenamiento del trabajo. Por un lado, hay una reducción substancial en el trabajo físico para ordeñar vacas, que en tambos convencionales puede representar el 40 a 60% del tiempo de trabajo. Por otro, permite flexibilizar la frecuencia de ordeños y aumentar hasta 20% la producción individual por vaca. Otra virtud de la automatización y robótica es la estandarización de la rutina de ordeño, entre vacas y por cuarto, eliminando casi por completo la ocurrencia de sobre-ordeño o sub-ordeño. En cuanto a la inversión inicial, el monto de una instalación robótica es generalmente 10 a 15% mayor que el de un sistema convencional de igual capacidad. Sin embargo, se estima que la inversión es fácilmente recuperable mediante el incremento de 12% en la producción individual y reducción

Figura 1 | Automatización de la rutina de ordeño: a) limpieza de pezones, b) identificación de pezones y colocación de pezoneras, c) ordeño, d) desinfección de pezones.



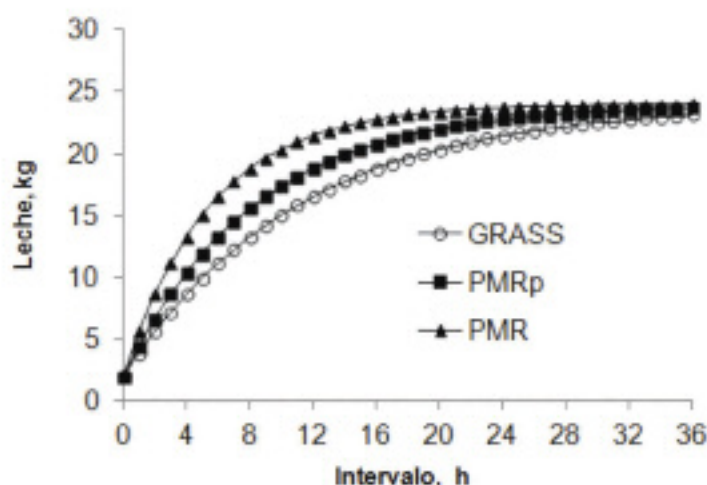
del 20% en la mano de obra directa.

Rutina de ordeño robótico

El principal motivo de las vacas para visitar el robot es el ‘apetito’ y el deseo por ‘recompensas’ alimenticias. Cuando una vaca previamente identificada recibe permiso de ordeño, entra de manera voluntaria al robot y obtiene de manera inmediata una recompensa de alimento concentrado, cuya cantidad y composición se determina individualmente. Luego, el brazo robótico utiliza un sistema de cámara y sensor láser para localizar cada pezón y proceder a la limpieza (Figura 1a). Terminada la misma, el brazo fija cada pezonera (Figura 1b) y procede al ordeño individualizado de cada cuarto, el cual concluye al alcanzar un flujo de leche pre-determinado (Figura 1c). Luego del ordeño, el robot retira las pezoneras y aplica una solución desinfectante a cada pezón (Figura 1d). Finalizado dicho proceso la vaca se retira voluntariamente del robot dejando lugar a la próxima vaca en espera, y este proceso de ordeño se repite rutinariamente durante todo el día y la noche. Después del ordeño, la leche es colectada y transferida a un tanque principal, o en su defecto separada automáticamente si se trata de una vaca bajo tratamiento o se detecta calostro u otra anomalía.

Cada unidad robótica está equipada con un sistema de vacío y pulsado inteligente, un sistema de limpieza automático y una serie de sensores que permiten el monitoreo constante del flujo y producción de leche, el tiempo de ocupación y la duración del ordeño, la ingesta del concentrado, y la determinación de calidad de leche mediante el monitoreo de color, temperatura y conductividad eléctrica, o eventualmente mediante estimación indirecta de grasa, proteína y células

Figura 2 | Efecto del intervalo de ordeño sobre la tasa y acumulación total de leche en tres sistemas de alimentación: 80% pasturas + 20% concentrado pelletizado (GRASS), igual concentrado + reemplazo parcial (PMRp) o total (PMR) de pastura por una ración totalmente mezclada.



somáticas. También, dependiendo de la disponibilidad de sensores y modelo de robot, existe la posibilidad de coleccionar información del peso y condición corporal, la actividad motora y de rumia, y la estimación individualizada de consumo y producción de metano entérico de cada vaca.

Optimización y eficiencia

El beneficio productivo y económico del robot depende casi exclusivamente de su eficiencia de uso. Hay dos componentes fundamentales que hacen a la eficiencia de un robot: la cantidad de leche cosechada y el tiempo de ocupación (TO). Por un lado, la cosecha de leche no solo depende del estado nutricional y sistema de alimentación, del número y fase de lactancia, de la raza y mérito genético, sino que también varía marcadamente con el intervalo entre ordeños (Figura 2). Por otro lado, el TO está afectado marcadamente por

la carga animal (vacas/robot), la duración y frecuencia del ordeño.

Tiempo de ordeño

Uno de los principales desafíos de manejo es optimizar la capacidad del robot. Esta capacidad usualmente se expresa en función del tiempo de ocupación (TO) o porcentaje del día en que el robot se encuentra ordeñando. Por ejemplo, un 85% de TO significa que el sistema se encuentra ordeñando 20,4 horas al día. El 15% restante (3,6 horas) se distribuye aproximadamente de la siguiente manera: 1 hora se destina a realizar dos ciclos de lavado completo de máquina y sistema, y 2,6 horas son para los enjuagues post-ordeño y el tiempo ocioso asociado a rechazos de vacas que no cumplen con los requisitos para el permiso al ordeño (vacas cuyas visitas ocurren en un intervalo de tiempo que es menor al intervalo de ordeño pre-determinado). Adicionalmente, este



tiempo ocioso sirve como tiempo libre para evitar sobrecargas y largas demoras al ordeño a determinadas horas del día y para que las “vacas tímidas” (frescas y primerizas) tengan más chance de visitar la unidad de manera voluntaria.

Carga animal

Teóricamente, los litros de leche cosechados por robot pueden incrementarse a través de aumentos de carga animal (vacas/robot), frecuencia de ordeño o producción individual. En la práctica, sin embargo, el incremento de carga generalmente se asocia a un impacto negativo sobre la frecuencia de ordeño y la producción individual debido a que a mayor número de vacas dentro del sistema mayor es la competencia por el uso del robot. Por el contrario, una baja carga produce mayor tiempo ocioso y menor TO. De esta forma, el productor debe resolver el desafío de responder al dilema entre aumentar la carga y la producción por robot o aumentar la frecuencia de ordeño y la producción individual, lo cual varía con el sistema de producción.

Duración y eficiencia de ordeño

También se puede argumentar que un manejo eficiente del robot va ser aquel que pueda optimizar la duración del ordeño individual, de manera tal que maximice la eficiencia de cosecha de leche por ordeño (relación entre los litros de leche y la duración del ordeño). La duración de ordeño es función lineal de dos componentes claves, el tiempo fijo que usa el brazo robótico para detectar, limpiar los pezones y colocar las pezoneras (1,5-2,5 minutos, varía según programación y

Figura 3 | Producción de leche por robot en función de la variación en la cosecha de leche con una ocupación promedio del 88% por vacas Holstein manejadas en sistema estabulado con galpón de tipo freestall y alimentadas con dieta convencional a base de pellet concentrado en el robot y ración totalmente mezclada.

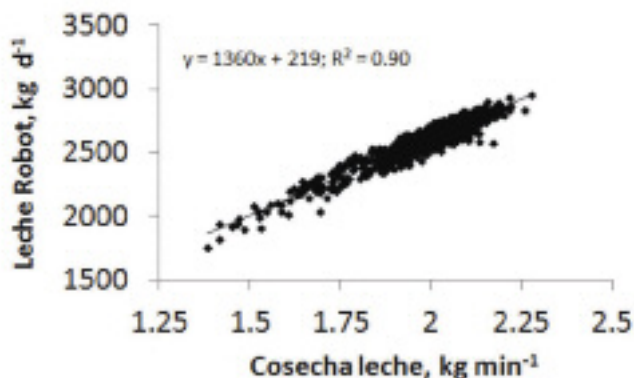
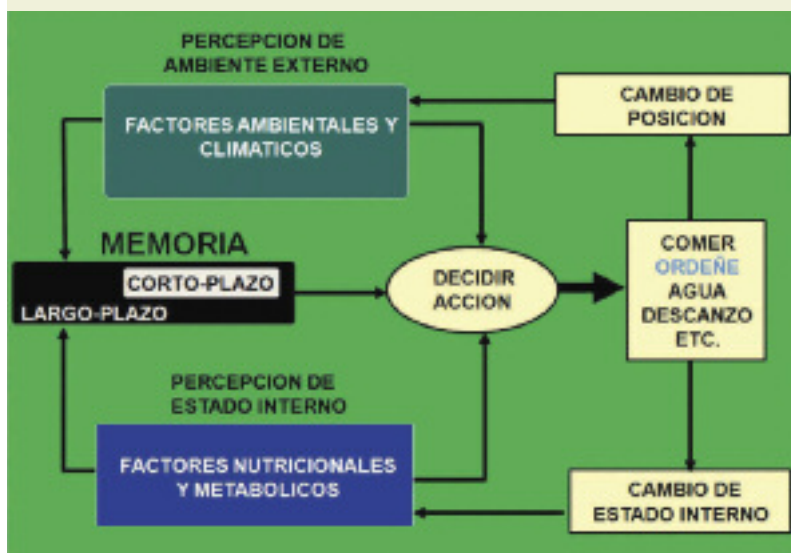


Figura 4 | Modelo conceptual de comportamiento animal y tráfico de vacas en un sistema robótico.



marca/modelo de robot) y un tiempo de ordeño directo que puede variar de manera significativa (3-7 minutos), pudiendo disminuir con el uso de pulsado inteligente (5-15% de mejora por uso de pulsado variable en función del flujo de leche) y con la selección y uso de vacas con mayor velocidad de leche (rango típico es 1-3 kg/min). De esta forma, la asignación y duración del tiempo de ordeño no sólo afecta la frecuencia y producción individual de cada vaca, sino que también puede afectar de manera muy significativa el total de litros de leche/día cosechados por robot (Figura 3).

Frecuencia e intervalos de ordeño

La reducción del intervalo entre ordeños (o aumento de frecuencia) es una práctica que se sugiere con el objetivo de aumentar la producción individual y la eficiencia del robot. Se han reportado incrementos de hasta 40% en la producción individual al aumentar el ordeño de una a dos veces por día, y de hasta 20% cuando se aumenta de dos a tres veces por día. La principal causa de estos incrementos es el acortamiento del intervalo entre ordeños y su efecto positivo sobre la excreción de leche como consecuencia del aumento en la síntesis de hormonas, reducción de la presión intra-mamaria y disminución del efecto regulador (o de *feedback*) por acumulación de los componentes de leche. La tasa de secreción y acumulación de leche, y su respuesta a cambios en la frecuencia de ordeño variarían con la raza y mérito genético, la fase y número de lactancia, y la nutrición y sistema de alimentación, como se mostró en la Figura 2.

Tráfico y uso del robot

El uso de sistemas de tráfico que faciliten el tránsito de vacas al robot es crítico para alcanzar una alta ocupación de máquina y de eficiencia del ordeño. El término tráfico se refiere al movimiento y distribución de las vacas con relación al robot que resulta de un proceso de decisión jerárquico y complejo (Figura 4). Este proceso de decisión involucra coordinación por mecanismos cognitivos (aprendizaje, memoria, etc.) altamente complejos y sensibles a *feedbacks*, tanto internos (señales viscerales del apetito y saciedad) como externos al animal (información del ambiente y clima).

Tabla 1 | Producción de leche en sistemas robóticos que ofrecieron 80% pastura + 20% pellet concentrado (GRASS), o el mismo concentrado y remplazo parcial (PMRp) o completo (PMR) de la pastura por una ración totalmente mezclada del tambo robótico experimental de Michigan State University. Medias seguidas por letra diferente difieren entre sí ($P < 0,05$).

Respuesta	SISTEMA DE PRODUCCIÓN		
	GRASS	PMRp	PMR
Leche, kg/día	27,2 ^c	32,7 ^b	41,2 ^a
Frecuencia, ordeño/día	2,4 ^c	2,7 ^b	3,2 ^a
Peso corporal, kg	566 ^b	574 ^{ab}	614 ^a
Actividad por acelerómetro, registros/día	415 ^a	284 ^a	245 ^c



Unidad robótica de ordeño voluntario DeLaval

Del mismo modo, los cambios en el tráfico por modificaciones en la actividad (comer, descansar, ordeñar) o de actitud social (altruismo) serán el resultado de *feedbacks* que operarán dentro del límite de los requerimientos individuales (nutrición), las necesidades fisiológicas (termorregulación), las demandas afectivas y sociales (agregación) y los condicionantes ambientales (cantidad, calidad y distribución del alimento, o tipo y diseño de galpón) y climáticos (calor, frío, viento, lluvia).

El alimento como principal estímulo de tráfico

Sea en confinamiento o en pastoreo, el correcto uso de incentivos alimenticios es fundamental para el manejo de tráfico y uso voluntario del robot. Este es un aspecto crítico debido a que el beneficio de facilitar ruti-

nas de trabajo al incorporar robots se puede perjudicar rápidamente si se hace un mal manejo de los incentivos alimenticios ya que el operario necesitará destinar varias horas al día para buscar y arrear vacas hacia el robot. Es numerosa la evidencia experimental y de campo que confirma que el alimento ofrecido en el robot, o eventualmente luego de este, es el principal estímulo que provoca la respuesta condicional (motivación) para visitar la máquina de ordeño (aprendizaje condicional). De este modo, tanto el manejo de la alimentación como el sistema de tráfico empleado jugarán un rol preponderante en la ocupación y eficiencia de uso del robot.

Sistemas de tráfico

Los robots pueden ser instalados en sistemas de *tráfico libre* o *tráfico guiado*. En el *tráfico libre* las vacas circulan sin restricciones al área de

robots, a la pista de alimentación o al área de descanso (freestalls). Por lo tanto, en este tipo de sistemas no existe preselección alguna que condicione el paso de las vacas al robot, siendo el alimento concentrado ofrecido en el mismo el principal incentivo de tráfico. Por el contrario, en *tráfico guiado*, la motivación de visitar el robot con alimento concentrado puede ser reforzada por el acceso a otro incentivo alimenticio como acceso a pista de ración totalmente mezclada, estaciones de alimentación de concentrado o pastura fresca. El sistema de tráfico guiado más utilizado es el “*ordeño prioritario*”. En este sistema el paso hacia el robot ocurre mediante puertas inteligentes que garantizan el paso de vacas al área de robots (aquellas con permiso de ordeño) o a la pista alternativa de alimentación (rechazos que aún no cumplen con los requisitos para recibir permiso de ordeño). De esta manera, en comparación al tráfico libre, el *ordeño prioritario* permite reducir la cantidad de concentrado y el tiempo destinado a rechazar vacas sin permiso de ordeño (usualmente 5-10% de la capacidad operativa). En tambos de base pastoril, el sistema de tráfico predominante es *ordeño prioritario*, pues la condición de ordeño completo (sin fallas) es el principal requisito para que las vacas puedan acceder a pastura fresca. La ubicación de pistas de alimentación, aguadas y tinglados o dormitorios para provisión de sombra y ventilación en aéreas contiguas al robot, son estrategias (incentivos) muy efectivas para mejorar el tráfico y uso del robot (Figura 4).

Recomendaciones para sistemas estabulados, pastoriles y mixtos

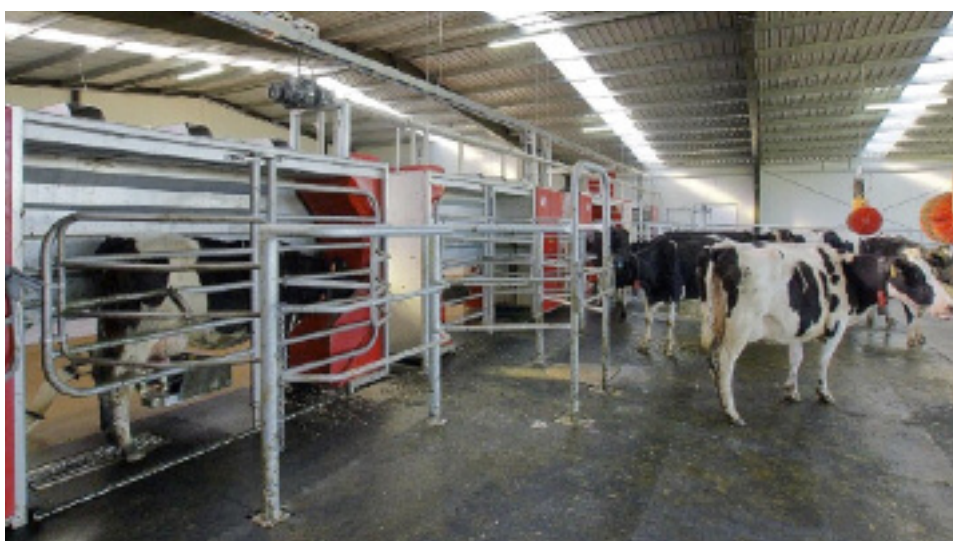
El efecto del sistema de alimenta-

ción sobre el tráfico, ordeño y producción de leche fue comparado usando una extensa base de datos de producción diaria individual (n= 61686) colectados con dos rodeos de vacas Holstein élite (días de lactancia 169

±13; partos 2,3 ±0,2, 67 ±8 vacas por rodeo) de *Michigan State University* (USA). Los sistemas fueron: i) 80% pastura más 20% concentrado pelletizado (GRASS), ii) mismo concentrado más remplazo parcial de pastura por

Tabla 2 | Indicadores de performance de robots de ordeño del tambó experimental de *Michigan State University* en tres sistemas de producción.

Variable	SISTEMA DE PRODUCCIÓN		
	GRASS	PMRp	PMR
Producción robot, kg/día	2312	2354	2349
Ocupación, %	85	85	85
Intervalo de ordeño, horas	11,7	10,2	7,8
Frecuencia de ordeño, ordeños/día	2,1	2,4	3,1
Carga animal, vacas/robot	85	72	57
Total ordeños/día	174	175	176



Vista parcial de un galpón de tipo freestall con robots Lely Astronaut. Buenas instalaciones robóticas deben contar con espacio amplio en cercanías de los robots para evitar cuellos de botella en el tráfico.

ración totalmente mezclada (PMRp) y iii) mismo concentrado más igual ración totalmente mezclada (PMR). En los tres sistemas las vacas tuvieron acceso a robots instalados en un galpón de tipo 'freestall' en tráfico libre y con pista lateral de alimentación para los sistemas PMR y PMRp.

El pellet (89% MS, 17,7% PB, 26% FDN, 15,5% FDA y 42% almidón) fue ofrecido en el robot con un saborizante a razón de 1 kg por cada 6 kg de leche. La composición química de la ración mezclada fue 50,2% MS, 16,7% PB, 37,4% FDN, 24% FDA y 21% almidón, que se ofreció sobre una pista de alimentación adyacente a los robots una (PMRp) o tres (PMR) veces por día. La tabla de permisos de ordeño fue la misma en los tres sistemas y consistió en un intervalo de ordeño mínimo de 6 horas o una producción esperada de 9,1 kg de leche. Como se esperaba, la producción, frecuencia de ordeño y peso corporal fue mayor para PMR comparado con PMRp y GRASS (Tabla 1). Por el contrario, la actividad de caminata por acelerómetro aumento 46 y 68% en GRASS comparado con PMRp y PMR, respectivamente (Tabla 1).

Un posterior trabajo de modelación de los datos mostró que en los tres sistemas comparados fue posible alcanzar altas eficiencias, pero integrando modificaciones de carga, intervalos de ordeño y producción individual. Tanto la producción por ordeño como la producción individual diaria son altamente dependientes del intervalo entre ordeños y varían marcadamente con el sistema de producción. El corolario es que con baja frecuencia de ordeño se compromete la producción diaria individual, siendo este efecto mayor en sistemas que ofrecen menor restricción al consumo de energía, como es el PMR (ver Figura 2). Por lo tanto, dadas las marcadas diferencias de respuesta en leche entre los tratamientos, el intervalo o frecuencia de ordeño y la carga animal deben ajustarse según los sistemas de alimentación. Así, para obtener un grado de ocupación deseable (85% de TO) se debe plantear de antemano un compromiso razonable entre la carga animal y la frecuencia de ordeño de modo que se logre un número objetivo de ordeños por día que maximice la producción por robot (Tabla 2). Se desprende entonces que para alcanzar un uso de robot equivalente se



Robots de ordeño DeLaval en un sistema estabulado de cama profunda o compost con tráfico guiado de ordeño prioritario.



Tambo robótico de la Michigan State University. La unidad consiste en un galpón de tipo freestall con robots Lely Astronaut 3 en tráfico libre y con acceso a pasturas mediante puertas selectoras inteligentes.

debe aumentar la carga animal y reducir la frecuencia de ordeño en sistemas pastoriles, o reducir la carga animal y aumentar la frecuencia de ordeño en sistemas de tipo estabulado. En trabajo comentado la máxima producción ajustada a un 85% TO se obtuvo con

85, 72 y 57 vacas/robot en GRASS, PMRp y PMR, respectivamente. Dicha ocupación se logró con 174, 175 y 176 ordeños/día, respectivamente. El trabajo también indica que lograr un 85% de ocupación resulta una medida de manejo viable y conservativa para tam-

bién minimizar posibles efectos adversos sobre el tráfico de las vacas o para dejar horas libres que pueden destinarse a la limpieza y mantenimiento de la máquina. Los resultados generados también informan que a un 85% de ocupación se puede producir de forma realística unos 2300 kg/día por robot y que por un manejo de ocupa-

ción más agresivo (90% ocupación) se podrían alcanzar producciones cercanas a 3000 kg/día. En toda instancia, cada productor deberá analizar la estrategia de manejo a utilizar en función a las propias expectativas sobre los robots y el sistema de producción.

