

## **AUTOMATIZACIÓN EN LA INDUSTRIA AZUCARERA DE BRASIL. Nelson Luis Cappelli<sup>1</sup>; Cláudio Kiyoshi Umezu<sup>2</sup>; Leonardo Alvarado Mora<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Professor Associado. Doutor. Departamento de Máquinas Agrícolas. Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, SP, Brasil. E-mail: cappelli@agr.unicamp.br*

<sup>2</sup> *Professor Titular. Doutor. Engenharia de Computação. Faculdade Integrada Metropolitana de Campinas, METROCAMP, Campinas, SP, Brasil. E-mail: umezu@agr.unicamp.br*

<sup>3</sup> *Ingeniero Agrícola. Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. E-mail: lealmo34@hotmail.com*

### **Resumen**

Este texto presenta una historia resumida del desarrollo de la industria azucarera en Brasil, con énfasis en la producción de alcohol. Se muestra también, la composición de la matriz energética brasilera y la contribución de la energía proveniente de la biomasa, en especial la del alcohol combustible. Los procesos para la obtención de azúcar y de alcohol son presentados de forma resumida y son destacados algunos sistemas de automatización utilizados.

**Palabras claves:** Caña de azúcar, industria azucarera, automatización y control.

### **Abstract**

## **AUTOMATION IN THE SUGARCANE INDUSTRY OF BRAZIL**

This text provides an overview of the development of sugarcane industry in Brazil, with emphasis on the production of ethanol. It also shows the composition of the brazilian energy matrix and the contribution of energy from biomass, including fuel alcohol. The procedures for obtaining the sugar and the ethanol are briefly presented and some automation systems used are highlighted.

**Key words:** Sugarcane, sugarcane industry, automation and control.

### **Introducción**

**Historia.** (União da Indústria de cana-de-açúcar - ÚNICA, 1997). Hace más de 500 años, el

azúcar tenía un valor tan alto como el oro en toda Europa, porque su producción era limitada a cantidades que no satisfacían la demanda del mercado. Asimismo, la siembra de caña de azúcar era un negocio bastante rentable, pero no era apto para las condiciones de Europa, principalmente, por cuestiones climáticas.

Los ingenios en Brasil funcionaban como fábricas de azúcar y comprendían las siguientes instalaciones: casa grande, donde vivía el dueño del ingenio, sus familiares y personal del servicio; una capilla para celebraciones religiosas cristianas; alojamientos para los esclavos; en el propio ingenio, con diversas construcciones destinadas a las distintas fases de procesamiento de azúcar.

La producción de azúcar comenzaba por el acto de moler la caña, que era exprimida por cilindros movidos por ruedas de agua o por yuntas de bueyes. Después, el caldo era llevado a los hornos, donde era concentrado en ollas de cobre y transportado a moldes, donde el azúcar cristalizaba. La masa resultante del proceso era purificada y dividida en panes de azúcar - forma en que el producto era comercializado en Brasil. Para la venta en el mercado externo y desembarque en los puertos europeos, era necesario triturar y secar los panes de azúcar al sol para transportarlos en cajas.

En el siglo XIX, Brasil, que ya había sido el mayor productor mundial de azúcar, cayó al quinto lugar, quedando solamente con 8% de la producción mundial. En el siglo XX, con el fin del Ciclo del Café, hubo una retoma del cultivo de caña para producción de azúcar enfocada al mercado interno. São Paulo y Rio de Janeiro pasaron a abastecer el sur del país, haciendo que la actividad disminuyera en la zona Nordeste del país.

Para atenuar la crisis provocada por la multiplicación de centros productores y refinerías, en 1933 fue creado en Brasil el Instituto de Azúcar y de Alcohol (IAA), cuya principal función era controlar la producción para mantener los precios en niveles adecuados, es decir, cada ingenio solo podía producir dentro una cantidad preestablecida. Con la propagación de la producción de azúcar por

el mundo y las ineficientes medidas para asegurar una mejor competitividad para la producción brasilera sumadas a la primera crisis del petróleo, en 1973, el sector de azúcar y alcohol del país encontró una alternativa particular: la producción de alcohol combustible o etanol.

En 1975, el gobierno brasilero creó el Programa Nacional de Alcohol (Proálcool), que diversificó la actuación de la industria azucarera y llevó a cabo grandes inversiones apoyadas por el Banco Mundial, una de ellas fue la ampliación del área plantada con caña de azúcar y la puesta en funcionamiento de destilerías de alcohol. La experiencia sirvió como alternativa para disminuir la vulnerabilidad energética del país, evidenciada en la crisis mundial del petróleo.

El desarrollo de la ingeniería nacional, después de la segunda crisis del petróleo en 1979, permitió el surgimiento de motores especialmente desarrollados y concebidos para funcionar con alcohol hidratado. En 1984, los carros a alcohol pasaron a responder por 94,4% de la producción de las ensambladoras instaladas en Brasil.

Desde 1986, la reducción del impacto de la crisis del petróleo y los planes económicos internos para combatir la inflación estimularon una curva descendiente en la producción de carros a alcohol, que culminó con la crisis de abastecimiento de 1989. Debido a esto, la participación anual de los vehículos a alcohol cayó a 1,02% en 2001.

La caída de la demanda de alcohol hidratado fue recompensada por un uso mayor del anhídrido (sin agua) mezclado con gasolina, acompañado del crecimiento de la flota brasilera de vehículos ligeros. En más de 25 años de historia de utilización de alcohol a gran escala, Brasil desarrolló tecnología en motores y la logística sin precedentes en el mundo, con una red de más de 28 mil estaciones de servicio con alcohol hidratado disponible. En marzo de 2003, fue lanzado el carro Flex-Fuel, alimentado con alcohol, gasolina o con cualquier porcentaje de mezcla entre los dos, iniciando una nueva onda de crecimiento del

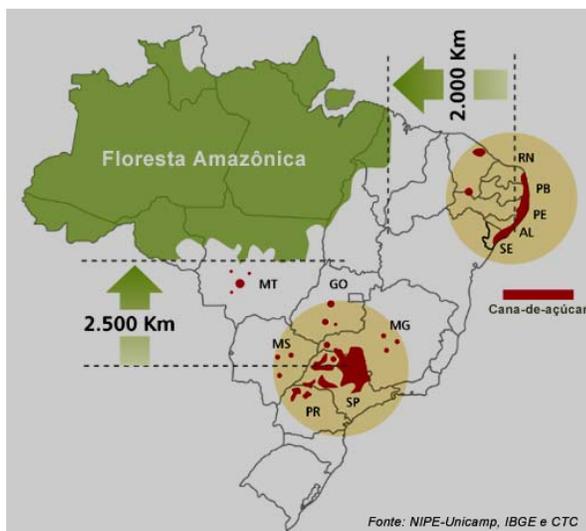
sector. Además de esto, el aumento de la preocupación con la disponibilidad y el precio de los combustibles fósiles, las preocupaciones con el medioambiente y el calentamiento global, han hecho que el etanol sea una alternativa renovable de combustible para Brasil y el mundo.

**Cultivo de caña de azúcar hoy.** La caña de azúcar ocupa cerca de 7 millones de hectáreas con cerca del 2% de todo el suelo arable del país, siendo de esta forma el mayor productor mundial, seguido por India, Tailandia y Australia. Las regiones de cultivo son: Sudeste; Centro-Oeste; Sur y Nordeste, permitiendo dos cosechas por año. Brasil cuenta durante todo el año con la posibilidad de producir azúcar y etanol para los mercados interno y externo.

Con el fin de la regulación gubernamental, se inició el régimen de libre mercado, sin subsidios, lo que hizo que los precios del azúcar y del alcohol pasaran a ser definidos según las oscilaciones de la oferta y la demanda. Fue así como los precios de la caña de azúcar pasaron a depender de su calidad y de su participación porcentual en los productos finales.

Para administrar y equilibrar la producción y las demandas sectoriales, la empresa privada ha buscado crear instrumentos de mercado, como operaciones futuras, y desarrollar nuevas oportunidades para el azúcar y el alcohol, por medio de la caída de las barreras proteccionistas y del empeño en transformar el alcohol en una 'commodity' ambiental (ÚNICA, 1997).

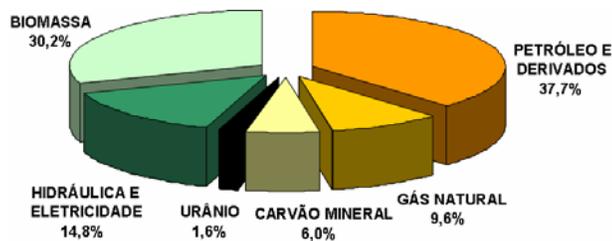
**Mapa de la producción de caña de azúcar en Brasil.** La producción de caña de azúcar se concentra en las regiones Centro-Sur y Nordeste de Brasil. El mapa presentado en la Figura 1 muestra en rojo las áreas donde se concentran las plantaciones e industrias productoras de azúcar, etanol y bioelectricidad, según datos oficiales del IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estadística), UNICAMP (Universidade Estadual de Campinas - SP) y del CTC (Centro de Tecnologia Canavieira).



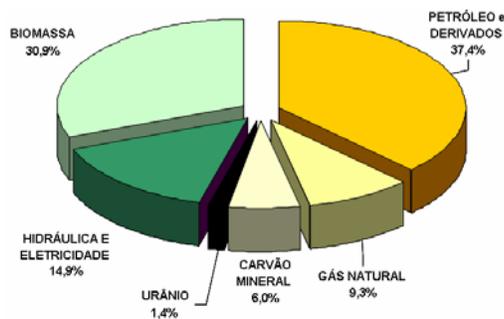
**Figura 1.** Mapa de producción de caña en Brasil (Adaptado de UNICA, 1997).

**Matriz energética brasileira.** Llama la atención, la enorme participación de fuentes renovables en la Matriz Energética Brasileira (45,1%) comparada con el promedio de los países de la OECD (Organisation for Economic Cooperation

and Development) (6,2%) y con el promedio mundial (12,7%). Del 30,2% de la energía proveniente de la biomasa, cerca del 14,5%, en 2006, fueron provenientes de los productos de la caña de azúcar (Figuras 2 y 3).



**Figura 2.** Matriz energética brasileira en 2006 (Adaptado de Ministerio de Minas y Energía - Brasil, 2006).



**Figura 3.** Matriz energética brasileira en 2007. Datos preliminares (Adaptado del Ministerio de Minas y Energía - Brasil, 2007).

Levantamientos preliminares indican que la Oferta Interna de Energía (OIE), en 2007, alcanzó 238,3 millones de TEP - toneladas equivalentes de petróleo - incrementando en un 5,4% al verificado en 2006 y equivalente a 2% de la energía mundial.

El aumento en la demanda total por energía se dio con el incremento en el uso de las fuentes renovables (hidráulica, biomasa y otras). De hecho, hubo un crecimiento de 7,2% en la energía proveniente de esas fuentes, mientras que las no renovables crecieron 3,9% (petróleo y derivados, gas natural, carbón mineral y uranio). Con esto, la energía renovable pasó a representar, en 2007, 45,8% de la Matriz Energética Brasileña (Ministerio de Minas y Energía - Brasil, 2007).

Respecto a la energía proveniente de la biomasa, los datos preliminares de 2007, indican que 12% fueron obtenidos a partir de madera, 15,7% de los productos de la caña y 3,2% de otras fuentes.

Cabe anotar que en 2007, hubo un aumento considerable de la energía proveniente de la caña de azúcar con relación a 2006, 14,5% en 2006

contra 15,7% en 2007. Es posible también indicar que la caña de azúcar ya es la segunda principal fuente de energía de Brasil, atrás solamente del petróleo y delante de la energía hidráulica y eléctrica.

De toda la energía generada por la caña de azúcar, cerca del 25% representa el consumo de alcohol combustible. El restante es fruto de la generación de electricidad y vapor para uso en procesos industriales, principalmente en la producción de azúcar. La participación de los productos de caña en la oferta de electricidad, está actualmente próxima a 3% (Correio Popular, 2008).

Hoy con un poco más de 3 millones de hectáreas, que representa cerca de 1% de las tierras arables, Brasil produce alcohol suficiente para abastecer 50% del consumo de alcohol/gasolina del país.

Nuevas inversiones han sido realizadas en el sector; se encuentran en fase de ejecución cerca de 86 proyectos de nuevos ingenios y destilerías y la ampliación de parte de las existentes, esto conlleva a que la productividad agrícola e industrial haya aumentado históricamente (Figura 4).



**Figura 4.** Evolución de la productividad agrícola e industrial a partir de la producción de alcohol en Brasil (Adaptado de UNICA, 1997).

Esta expansión creciente del sector ha creado nuevas oportunidades para las empresas y profesionales del área de instrumentación y control, entre otras, nunca antes visto en Brasil.

### Fabricación de azúcar y alcohol en Brasil

La fabricación del azúcar y del alcohol en Brasil envuelve dos etapas. La primera corresponde a la

parte agrícola, donde la caña de azúcar, como materia prima, es cultivada, cosechada y transportada, hasta la industria. La segunda es la parte industrial, donde la caña de azúcar es sometida a diversos procesos hasta la obtención del azúcar, del alcohol y de los subproductos provenientes de varios procesos. Este texto aborda principalmente la parte industrial de producción, fase en la cual se presenta la mayor utilización de sistemas de automatización y control.

**Recepción y preparación de la caña de azúcar** (Basetto, 2006). Después de cosechada, manual o mecánicamente, la caña es transportada del campo hasta la unidad industrial por camiones, y descargada directamente en la mesa auxiliar de la banda transportadora de alimentación del molino.

Los camiones que transportan la caña hasta la industria, cargan caña entera (cosecha manual) o caña picada en pedazos de 20 a 25 cm (cosecha mecanizada). Los mismos son pesados antes y después de la descarga y algunas cargas son aleatoriamente seleccionadas, para su posterior determinación del contenido de sacarosa. El objetivo del pesaje es permitir el control agrícola, el control de la molienda, el cálculo del rendimiento industrial y, junto con el contenido de sacarosa, efectuado el pago de la caña al productor.

Las cañas pueden ser lavadas o no. Aunque existen actualmente sistemas de limpieza de caña con aire seco a través de ventilación que substituye el lavado de esta, evitando la pérdida de sacarosa debido al agua.

Después del lavado, la caña pasa por un proceso de preparación, que consiste en una serie de picadores que trituran los tallos y desfibradores que abren las células de la caña, preparándola para la molienda.

El objetivo de la preparación de la caña para molienda es aumentar la capacidad de los molinos por el aumento de la densidad de masa de alimentación, haciendo que se compacte y sea más homogénea; romper la estructura de la caña para que la extracción del caldo sea más fácil y

efectiva y; producir un bagazo, en que la acción de la humidificación sea más eficaz.

Hay un aumento en la extracción con la preparación previa de la caña, pues se rompe la estructura del tallo, haciendo más fácil la salida del caldo contenido en las células. La preparación de la caña puede ser realizada utilizando cuchillas rotativas y desintegradoras.

**Proceso de extracción del caldo.** La extracción del caldo, tanto en la producción de alcohol como de azúcar, es una de las etapas más importantes del proceso. En él, la caña desfibrada es enviada a la molienda para extraer el caldo.

Tradicionalmente, la extracción del caldo es hecha por dispositivos denominados molinos, en los cuales la caña es prensada entre grandes cilindros, separándose el caldo del bagazo. En los últimos años, otro sistema de extracción, llamado difusor, fue introducido en algunas unidades azucareras en Brasil. En el difusor, la caña es colocada sobre una cama donde es levemente prensada a la entrada, separando el caldo del bagazo de caña, a través de la adición de agua de humidificación y vapor, en un proceso de lixiviación (Paioti y Nebra, 2004).

La molienda, como proceso de extracción del caldo, es el sistema más utilizado, estando presente en por lo menos 95% de las industrias y destilerías de Brasil, siendo estas las más competitivas del mundo. Este nivel de competitividad de las industrias azucareras brasileñas, fue obtenido como consecuencia de varios factores, destacándose: la mejora de la calificación técnica de las personas, de las industrias y de las destilerías, los programas computacionales y la evolución tecnológica de los equipos (Serviço Brasileiro de Resposta Técnica, 2008).

Un asunto bastante cuestionado es la comparación entre la extracción por molino y por difusión. En general, los difusores son concebidos como una fuente de mayor extracción, menor mantenimiento y mayor disponibilidad para venta de energía eléctrica que las moliendas.

El diseño de los difusores cambió poco en estos últimos años. Las instalaciones más recientes pueden tener arreglos físicos innovadores o pueden adoptar materiales más sofisticados, aunque en el fondo los equipos son esencialmente los mismos. Los niveles de extracción también se mantuvieron, es decir, en la práctica los difusores ya alcanzaron su punto máximo en cuanto a la capacidad de extracción. Se puede también afirmar que los difusores no cambiaron prácticamente, desde su implantación en Brasil (Proknor Engenharia, 2008).

Aunque el difusor no haya evolucionado, los molinos están pasando por innovaciones significativas en los últimos años. Un conjunto de molinos en sí es prácticamente el mismo, con excepción de la relación diámetro/longitud de las camisas que han sido aumentadas gradualmente. Sin embargo, los grandes cambios están ocurriendo en el accionamiento de estos molinos. Debido a la creciente utilización del accionamiento individual en los ejes por medio de motores eléctricos con inversores de frecuencia, surgen innumerables posibilidades que antes no eran siquiera consideradas (Proknor Engenharia, 2008). En este trabajo fue considerada solamente la extracción del caldo a través de la molienda.

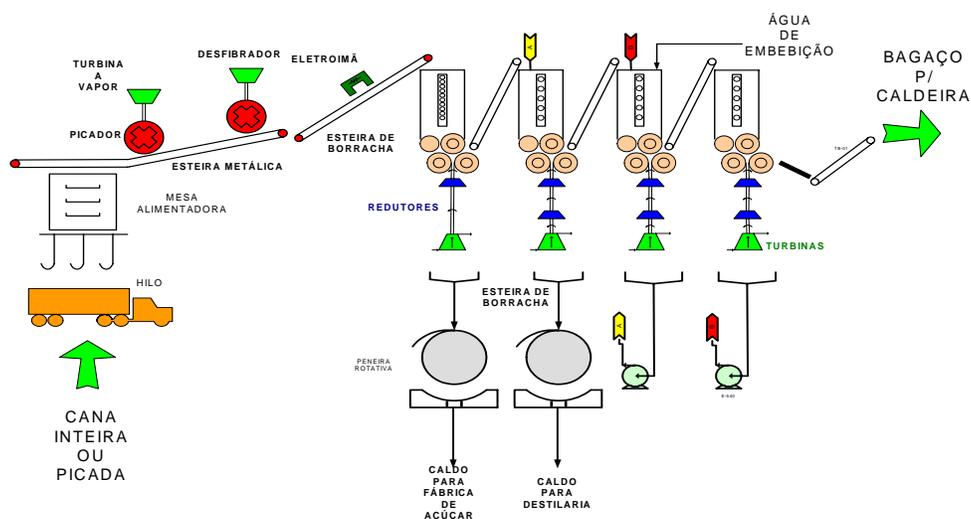
cierta presión; expulsando el caldo del interior de las células, sufriendo varias compresiones, resultando de esa operación, caldo mezclado con bagazo. Un conjunto de rodillos (rodillo superior, rodillo inferior de entrada, rodillo inferior de salida y rodillo de presión), constituye un conjunto de molienda. El sector de extracción puede tener de cuatro a siete conjuntos de molindas. Para aumentar la extracción de la sacarosa, es utilizado el sistema de humidificación compuesta, que consiste en la utilización de agua en el último conjunto molienda, allí es extraído el caldo que es utilizado para humedecer el bagazo del conjunto anterior hasta el segundo conjunto.

El caldo extraído es conducido para el proceso de tratamiento del caldo y el bagazo para las calderas, donde es quemado, generando vapor para todo el proceso productivo.

Para todas las necesidades de energía del sector industrial, la demanda es satisfecha con el uso de vapor, en diversos niveles de presión, y de electricidad. Se puede en parte traducir la eficiencia energética de una industria azucarera por su excedente de bagazo, índice que depende de las diversas eficiencias sectoriales de la producción.

**Molienda** (Basetto, 2006). En la molienda, la caña desfibrada es dispuesta entre rodillos sometidos a

La Figura 5 ilustra las principales etapas de la preparación y molienda de caña de azúcar.



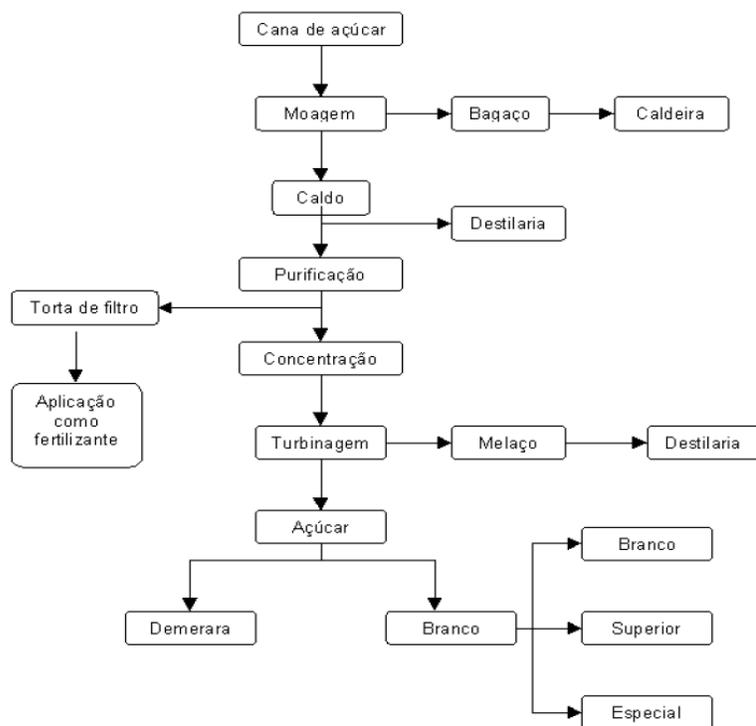
**Figura 5.** Diagrama de las etapas de preparación y molienda en un ingenio azucarero.

**Proceso de fabricación de azúcar de caña de azúcar** (Piacente, 2005). El caldo que es extraído de la caña es una solución de sacarosa diluida con impurezas, la operación de purificación tiene como finalidad eliminar esas impurezas a través de tamices y de la clarificación química del caldo. Esa separación física retira las impurezas más grandes del caldo como piedras, tierra y bagazo. En la clarificación, ocurre la precipitación de impurezas menores a través de la introducción de anhídrido sulfuroso, enseguida el caldo pasa por decanadores y por una corrección del pH. Posteriormente, el caldo es filtrado y las impurezas que precipitaron, denominadas torta de filtro, son recogidas.

Con la eliminación de las impurezas del caldo, este pasa a ser una solución diluida de sacarosa. Para que ocurra la cristalización de esa sacarosa, se debe retirar el agua que es el elemento soluto. La concentración de la sacarosa consiste en elevar la temperatura del caldo evaporando el agua contenida en la mezcla. Hecho esto, el caldo es cocido de forma que ocurra la cristalización

espontánea de la sacarosa. El producto final de esa operación es una mezcla de cristales y miel.

La cristalización complementaria hace que los cristales ganen nuevos estratos y aumenten de tamaño, eso ocurre a través de un cuidadoso enfriamiento y de la circulación controlada de agua. Luego, la masa cocida con cristales y miel es sometida a una máquina centrífuga, la cual genera una mezcla que es introducida en el centro de un cesto perforado y giratorio, a medida que la masa se va desplazando para las paredes del cesto la miel atraviesa la pantalla perforada y es conducida para el proceso de cocimiento. Los cristales de azúcar, quedan retenidos en el cesto y son conducidos para el secado, acondicionamiento y almacenamiento. La miel proveniente de la masa de menor pureza, que fue varias veces cocida y centrifugada, es denominada melaza o miel final y es enviada para la destilería para la producción de alcohol, o comercializada como subproducto *in natura*. La Figura 6 ilustra el flujograma del proceso de fabricación de azúcar.

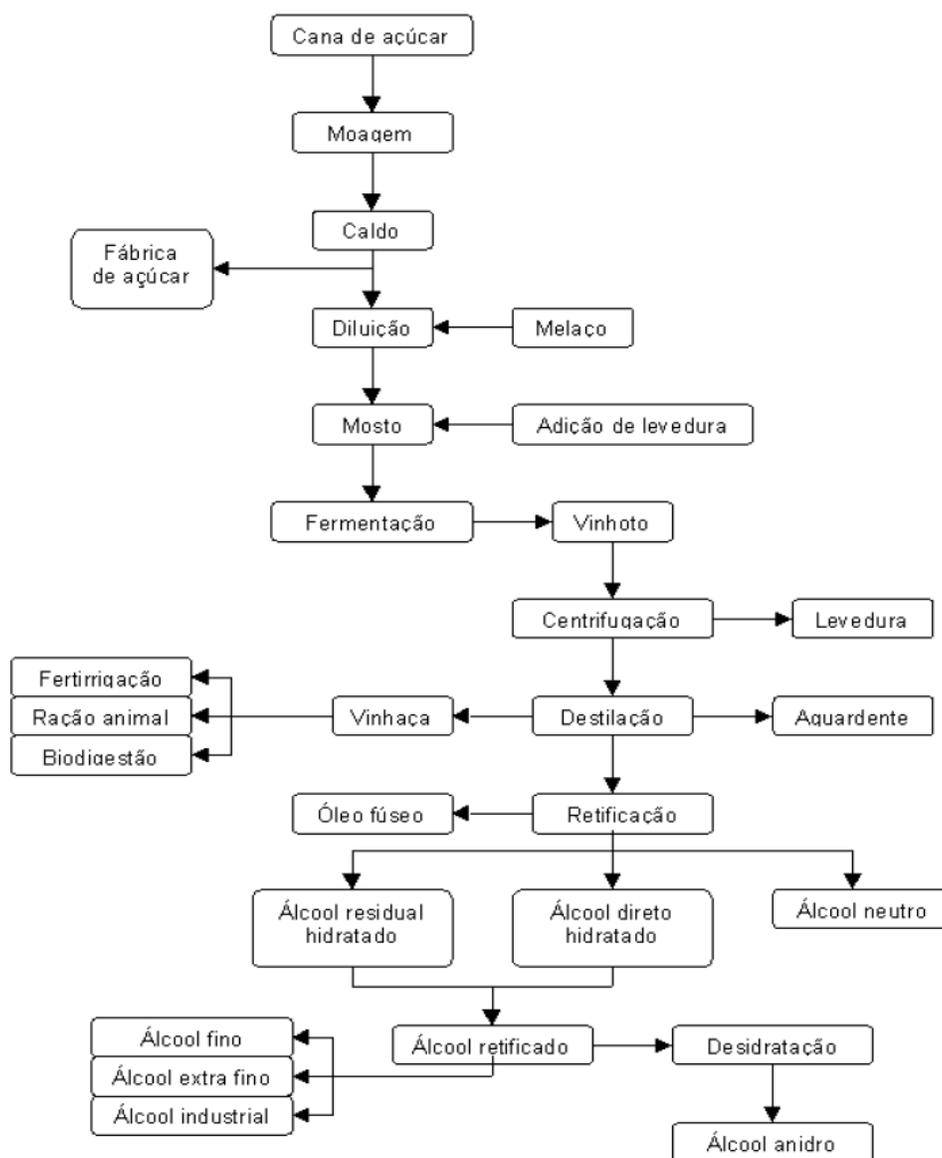


**Figura 6.** Flujograma de la producción de azúcar en Brasil (Basetto, 2006).

**Proceso de fabricación de alcohol de caña de azúcar** (Piacente, 2005). En Brasil la fabricación del alcohol de caña es por vía de fermentación basada en el aprovechamiento de la miel final o melaza de las industrias azucareras en la utilización directa de la caña de azúcar, o en la producción por la inversión del azúcar. La etapa de fabricación del alcohol de caña, resumidamente se divide en las operaciones de extracción del caldo, preparación del jugo antes de completar su fermentación, preparación del

fermento, fermentación, destilación, rectificación y deshidratación.

El jugo, que puede ser de caldo mixto o de melaza solamente, es un líquido que contiene azúcar disuelto y apto para la fermentación. Para la preparación se hace necesaria la corrección de acidez y la correcta adición de nitrógeno y fósforo. Además, este jugo de caldo mixto debe sufrir tratamientos térmicos para la eliminación de los microorganismos contaminantes.



**Figura 7.** Flujograma de la producción de alcohol en Brasil (Basetto, 2006).

La preparación del fermento es de fundamental importancia para una satisfactoria multiplicación de las levaduras capaces de transformar los azúcares del jugo en alcohol y gas carbónico. Se adiciona la levadura al jugo, dando inicio la primera etapa del proceso continuo de fermentación; posteriormente el producto es concentrado en un decantador donde se eliminan parte de las bacterias sobrantes. El exceso de fermento es nuevamente aprovechado en el proceso, y el producto de la fermentación, es llamado vinaza y luego encaminado para la destilería. En la destilería, la vinaza es limpiada dos veces en una columna de destilación, en la primera se eliminan los ésteres y aldehídos, y en la segunda es fraccionado en vinaza y en flema que es el producto principal de la destilación. Este es nuevamente destilado en una compleja operación de purificación denominada rectificación, obteniéndose el alcohol bruto o de segunda y en los residuos flemaza y aceite de fúsel.

Para la obtención del producto final, al alcohol bruto se le adiciona benzol y se fracciona esa mezcla en una columna de destilación, resultando el producto final: el alcohol anhidro y, como residuo, el alcohol bruto que es reprocesado.

Cada proceso de transformación resulta en un producto final, que es llevado a la fase siguiente y un subproducto que no siempre puede ser reaprovechado por el sistema, generando un residuo que debe ser descartado. La Figura 7 ilustra el flujograma del proceso de fabricación de alcohol.

#### ***Automatización típica de algunos procesos.***

Generalmente, las operaciones de preparación y molienda son responsables por la mayor parte del consumo energético de una industria azucarera. La automatización es un aspecto fundamental en la optimización del proceso de molienda y está presente en los ingenios azucareros modernos e industrias de alcohol.

A continuación se destacan los principales tipos de automatización presentes en algunos procesos.

***Recepción y pesaje de la caña.*** Seguimiento del producto (identificación, camiones, cargador, etc.), registro de peso y contenido de sacarosa, verificación de conformidad, emisión automática de informes.

***Preparación y molienda.*** Rotación de mesas alimentadoras, comandos e interbloqueamientos, sincronismo de esteras; protección de exceso de velocidad en el picador y desfibrador, protección de la preparación de caña, control de nivel de caña en el primer conjunto de molienda; control de nivel de bagazo del segundo al último conjunto de molienda, control de caudal y temperatura de agua de remojo, velocidad de las turbinas; caudal de agua de remojo, nivel del tanque del caldo; división del caldo para fábrica y destilería; limpieza automática de molienda y tamizado rotativo; fluctuación del rodillo superior de los conjuntos de la molienda; temperatura de los rodamientos de los ejes, presión del aceite de lubricación de los ejes, temperatura y presión de vapor para las turbinas, presión de vapor para las turbinas, bandas y turbinas, determinación de la humedad del bagazo.

***Tratamiento del caldo.*** pH del caldo sulfatado, pH del caldo tratado con cal, temperatura del caldo, separación del caldo para los decantadores, dosificación de polímeros para los decantadores, retirada de lodo de los decantadores, nivel del tanque de lodo, nivel de la caja de lodo en el filtro rotativo, comando e interbloqueamientos.

***Utilidades, energía y vapor.*** Rotación de la turbina, frecuencia eléctrica, tensión del generador y redes, sincronización de fases y frecuencias, actuación sincronizada de disyuntores, potencia generada en función del consumo, exportación e importación de energía, vibración del conjunto turbina y generador, aumentos eléctricos del generador y cabinas de distribución.

Para la automatización y control de procesos envueltos en la producción de azúcar y de alcohol en Brasil, normalmente son utilizados controladores lógicos programables y sistemas supervisores. Los principales protocolos para comunicación en redes de los controladores y

dispositivos remotos son: DeviceNet, Ethernet, Profibus DP, CANopen, AS-Interface (ASi) e Modbus-RTU, siendo el más utilizado en el momento el Profibus.

Los equipos utilizados en la automatización y en control de los procesos existentes en las industrias de azúcar y alcohol son fabricados por empresas brasileras o extranjeras sin tener predominancia por un fabricante específico. Con esto hay en el mercado empresas especializadas en automatización y control, denominadas integradoras, que ofrecen soluciones completas, incluyendo el proyecto, la integración de equipos y sistemas de diversos fabricantes, junto con la instalación y el mantenimiento.

### **Agradecimientos**

Los autores agradecen a los organizadores del XI Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola y Áreas Afines, la invitación para participar en la Sesión de Conferencias - Área temática: Agroindustria, Manejo de Subproductos y Medio Ambiente.

### **Bibliografía**

Basetto, Nayara Zago. 2006. SEPPA – Sistema especialista para planta de produção de álcool. Dissertação Mestrado, Faculdade de Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas, 91 p.

Correio Popular, Brazil. 2008. Cana ultrapassa hidrelétricas como fonte de energia no país. Edição de 9 de maio de 2008. Campinas, Brazil. Ministério das Minas e Energia - Brasil. 2008. En: <http://www.mme.gov.br>; Consulta: Julio, 2008.

Paioti, Pedro Ivo de Souza; Nebra, Sílvia A. 2004. Comparação entre sistemas de extração de caldo de cana através da análise exergética na indústria sucroalcooleira. En: XII Congresso Interno de Iniciação Científica da UNICAMP, Campinas, Brazil.

Piacente, Erik Augusto. 2005. Perspectivas do Brasil no mercado internacional de etanol, Campinas, Planejamento de Sistemas Energéticos, Dissertação Mestrado, Faculdade de

Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 149 p.

Procknor Engenharia. 2008. En: <http://www.procknor.com.br/stabjanfev06.htm>. Consulta: Julio, 2008.

Serviço Brasileiro de Resposta Técnica. 2008. En: <http://sbrtv1.ibict.br>; Consulta: Julio, 2008.

União da Indústria de Cana-de-Açúcar - ÚNICA. 1997. En: <http://www.unica.com.br>; Consulta: julio de 2008.

### **CONTROL AMBIENTAL Y LA AGROINDUSTRIA DE PRODUCCIÓN ANIMAL EN EL BRASIL Y AMERICA LATINA. Ilda Ferreira Tinoco<sup>1</sup>; Jairo Alexander Osorio Saraz<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Professora Doutora. Departamento de Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil. E-mail: [iftinoco@ufv.br](mailto:iftinoco@ufv.br)

<sup>2</sup> Profesor Asistente. Departamento de Ingeniería Agrícola y de Alimentos. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. E-mail: [aosorio@unalmed.edu.co](mailto:aosorio@unalmed.edu.co)

### **Resumen**

La búsqueda de tecnologías cada vez más nuevas y absolutamente particulares para las condiciones del clima de América del Sur, generarán una tipología de alojamientos predominantemente abiertos y sin aislamientos térmicos, con un uso cada vez mayor de paisajismo circundante como elemento armonizador, resultando una industria natural confortable y proporcionadora de bienestar para los animales y las personas. Así, este trabajo tiene como objetivo dar a conocer los sistemas de acondicionamiento ambientales (condiciones internas del clima y alojamientos), compatibles con la agroindustria de producción animal en los climas tropicales y subtropicales, típicos de las condiciones de Brasil y América del Sur, además, de discutir las actuales demandas del mercado consumidor, en cuanto a la calidad del producto generado por la actividad pecuaria, y su influencia en la calidad del ambiente, dando un especial énfasis en las producciones de Brasil y de Colombia.

**Palabras claves:** Bioclimática, producción pecuaria, agroindustria en América del Sur.

## **Abstract**

### **ENVIRONMENTAL CONTROL AND ANIMAL PRODUCTION AGRIBUSINESS IN BRAZIL AND LATIN AMERICA**

The search for new technologies particular to weather conditions in South America, will generate a type of accommodation predominantly open and without thermal insulation, with an increasing use of the surrounding landscape as a harmonizing, resulting in a natural industry comfortable for animals and people. Thus, the aims of this paper is to raise awareness of environmental conditioning systems (internal conditions of climate and accommodations), consistent with agribusiness animal production in tropical and subtropical climates, typical of conditions in Brazil and South America, beside that, to discuss the current demands of the consumer market, in terms of product quality generated by the livestock, and their influence on the quality of the environment, giving special emphasis on production in Brazil and Colombia.

**Key words:** Environment climate, livestock production, agroindustry in South America.

## **Introducción**

Hablar de la agroindustria del Brasil y, por consiguiente, de la agroindustria de toda América del Sur, es como hablar de uno de los mercados emergentes más importantes y con mayores oportunidades de negocios, en la actualidad. Según tendencias mostradas por el Banco de Compensaciones Financieras (BIS), al 30 de junio de 2008, Brasil creció en un 4,8% en este año, con una tasa de inflación del 6,4%. Sobre todo el conjunto de América Latina, el BIS prevé que el crecimiento será del 4,5% y tendrá una tasa de inflación del 6,3%, de acuerdo a análisis realizados en el 78° Velatorio Anual del grupo, en el cual se analizó la situación de la economía global entre el 1 de abril de 2007 al 31 de marzo de este año. El BIS, también

entiende que los últimos aumentos colocaron la inflación por encima de los objetivos previstos para América Latina en el 2008, lo que se debe principalmente, al aumento de precios de las materias primas, en virtud del crecimiento de la demanda, que no fue suplida por los aumentos de la oferta.

El BIS, es la institución financiera internacional, más antigua en el mundo, e integrada por 55 bancos centrales con derecho al voto, y ésta fue fundada el 17 de mayo de 1930. Esta institución incentiva la cooperación monetaria y financiera internacional, y actúa como banco para los bancos centrales, los cuales son sus clientes.

Con base en los datos y perspectivas mundiales, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), en junio del 2008, anunció que América Latina tiene una nueva oportunidad de mantener su desarrollo y colocar en práctica una transformación productiva que permita a la región, aprovechar los crecientes espacios abiertos en la economía mundial, especialmente en los referidos a la producción de alimentos, destacándose la producción de productos de origen animal. En el 2008, buena parte de América Latina completará seis años con un crecimiento sostenido, con un PIB medio superior al 3,5%, favorecido por condiciones externas que se traducirá en una mayor demanda, abundante liquidez de los mercados financieros, mejores precios de las materias primas y un fuerte crecimiento de las remesas, dejando claro que la situación y las perspectivas actuales para América Latina y del Caribe son las mejores de las últimas décadas.

Sin embargo, es preciso considerar los peligros generados por los efectos del aumento de los precios del petróleo y de los alimentos. Ambos factores serán sentidos en países latinoamericanos, principalmente hasta final del año en curso y del siguiente. De acuerdo a un documental de la CEPAL, después de acompañar los cambios tecnológicos en el sector manufacturero y desarrollar sus exportaciones, las economías latinoamericanas deben promover ahora

una transformación productiva, para aprovechar un aumento de la demanda de consumo sin precedentes. Lo anterior, hace necesario que los países de América Latina transformen sus procesos productivos, incorporando mayor valor agregado en sus importaciones de materia primas, junto con el desarrollo de innovaciones tecnológicas, un aumento de los niveles de educación de sus habitantes, y un mayor fomento de programas de formación del más alto nivel entre sus profesionales (Tinoco, 2001).

En este aspecto, las Universidades y Centros de Investigación de América Latina, requieren cambiar sus acciones, acompañando el imperativo desarrollo agroindustrial, debiendo estar atentas a los sectores de producción de energía, relacionando la expansión de los mercados de biocombustibles (sector cañero, ingenios para producción de etanol y azúcar), sector de la producción de alimentos de origen vegetal y animal y otros insumos, procesos fortalecidos por el incremento de los precios de esos productos. Es reconocida la gran aptitud de América del Sur, en la producción de alimentos de origen animal, y que el escenario mundial nunca estuvo tan favorable para el crecimiento de esta área agroindustrial.

### **Objetivos**

Es reconocido que desde el punto de vista industrial de Brasil y América del Sur, sectores vitales como la producción de alimentos, son esenciales en términos de abastecimiento y seguridad alimentaria de la población, por tanto deben ser siempre priorizados. En lo pertinente a la producción animal, las condiciones de crianza y del clima, adaptados para América del Sur, hacen que las instalaciones requieran un control ambiental, muy diferente de aquellas instalaciones adaptadas en otras regiones productoras del mundo, llevando así, soluciones específicas y propias de la región. Basado en lo expuesto con anterioridad, este trabajo tiene como objetivo dar a conocer los sistemas de acondicionamiento ambientales (condiciones internas del clima y alojamientos), compatibles con la agroindustria de producción animal en los

climas tropicales y subtropicales, típicos de las condiciones de Brasil y América del Sur, además de discutir las actuales demandas del mercado consumidor, en cuanto a la calidad del producto generado por la actividad pecuaria, y su influencia en la calidad del ambiente, dando un especial énfasis en las producciones de Brasil y de Colombia.

### **Panorama general del Brasil y su agroindustria - aptitud en la producción animal**

El Brasil tiene una de las mayores economías mundiales, y cuenta con una extensión territorial que alcanza 8,5 millones km<sup>2</sup>, ocupando casi la mitad (47%) del área de América Latina, y es el quinto país de mayor tamaño en el mundo, después de Rusia, Canadá, China y EEUU de América, además, posee el 20% de la biodiversidad mundial, y esta en el quinto lugar de los países más poblados del mundo, con cerca de 186 millones de habitantes. El Brasil, es una puerta de entrada para el MERCOSUR y posee frontera con diez países: Colombia, Argentina, Bolivia, Guyana Francesa, Guyana, Paraguay, Perú, Surinam, Uruguay y Venezuela.

Según los datos del Instituto Brasileiro de Geografía y Estadística (IBGE) (2008), el PIB del Brasil creció 5,8% en el primer semestre de este año, en relación al mismo período del año pasado. La agroindustria creció el 4,6% y el sector agropecuario el 2,4%, comparado con el período entre enero y marzo del año 2007.

El hecho de que el Brasil posea la mayor y más diversificada base industrial de América Latina y del Caribe y sea el mayor productor mundial de café, naranja y caña de azúcar, abriga la mayor industria de base forestal de América Latina y sea el tercer productor mundial de calzados, con una industria de cuero altamente competitiva, posea la quinta industria de caucho, la séptima química y la décima mayor de papel y celulosa. En el área de producción animal, el Brasil es el tercero mayor productor de pollo, el séptimo de huevos, cuarto porcícola y mayor exportador de carne de pollo y bovina del mundo.

Colombia, con una población aproximada de 42 millones de personas, tiene una de las economías más estables de América Latina, lo cual se demuestra con su crecimiento económico, en los últimos años, que está encima del promedio de la región, ya que entre el 2006 y 2007 tuvo un aumento del 6,8% (Según el Banco de la República). Además de lo anterior, los indicadores macroeconómicos reflejan la estabilidad del país, demostrada a través de la reducción de la tasa de inflación en los últimos años, llegando al 4,5% en el 2006, y una reducción en la divisa externa de más del 20%.

Colombia es conocida como una de las democracias más antiguas y estables de toda la región andina, ya que de acuerdo con el World Competitiveness Yearbook 2006, ésta ocupó el primer lugar dentro de los países de la región latina, en términos de una consistencia y transparencia de sus políticas gubernamentales.

La inversión extranjera en Colombia exhibió una tendencia creciente gracias a la estabilidad macroeconómica, a una política bien definida en materia de seguridad democrática y a un régimen favorable para esa inversión extranjera. El país está localizado estratégicamente como punto intermedio entre América del Norte y del Sur, teniendo costas tanto en el océano Pacífico como en el Atlántico y cuenta con modernas infraestructuras portuarias. Este tiene un fácil acceso al mercado norteamericano. La zona horaria de Colombia, también representa una ventaja frente a otros países, ya que tiene la misma de la costa este de los EEUU, lo cual facilita las actividades de Call Center y de Business Process Outsourcing (BPO), desde Colombia para otro continente.

La economía colombiana está basada principalmente en la actividad agrícola y pecuaria. El país es considerado como el tercero más rico de América del Sur y sus recursos naturales son muy abundantes.

El café es el principal producto agrícola producido en el país, siendo éste el mayor productor mundial de café suave lavado. Colombia

compite con Vietnam por ser el segundo mayor productor de café, en general (verde, soluble, tostado y otros tipos), después del Brasil. La actividad pecuaria del país está favorecida por las planicies, donde son criados bovinos, caprinos y equinos. La actividad porcícola y la crianza de aves también son muy importantes para la economía colombiana.

### **La producción animal en América del Sur y sus nuevas demandas de los mercados consumidores**

El crecimiento mundial del consumo de alimentos, jalonado por el buen desempeño de las economías de los países en desarrollo, el uso de productos agrícolas para la producción de combustibles, el alza de los precios internacionales de las *commodities* y la creciente inserción de los productos agropecuarios brasileños y suramericanos en el exterior, contribuyeron para el avance de las exportaciones (IBGE). Según estadísticas de la Secretaría de Comercio Exterior (SECEX/MDIC), en el 2007, el volumen exportado de los principales productos de la agroindustria suramericana, presentó variaciones positivas para carne de bovinos, pollo, cerdos y sus derivados. En el 2008, América del Sur representada por el Brasil, se constituyó en el mayor exportador de carne de pollo y de ganado en el mundo.

**Seguridad alimentaria.** Se entiende que existe seguridad alimentaria en un país cuando toda la población, tiene en cualquier momento, acceso físico y económico hacia alimentos seguros, nutritivos y suficientes para satisfacer sus necesidades dietéticas y preferencias alimentarias, con el fin de llevar una vida activa y saludable (Tinoco, 2001).

En el caso de América del Sur, los grandes desafíos en el área de seguridad alimentaria, son erradicar la pobreza, el hambre, para garantizar el acceso de su población hacia los alimentos.

Por tanto, como grande exportador de alimentos y productos agrícolas, América del Sur no se puede eximir de intentar tener una nueva

configuración en el comercio internacional, orientada hacia la seguridad sanitaria de los alimentos, sobre el enfoque de la cadena productiva. Eso dado, porque inicialmente, se trataban las legislaciones nacionales de manera independiente y a partir de 1995, pasó a ser reglamentada por la OMC (Organización Mundial del Comercio), a partir del acuerdo de medidas sanitarias y fitosanitarias (SPS), y en 2003 adquirió respaldo de la FAO (Organización para la Agricultura y la Alimentación de las Naciones Unidas), y de la OMS (Organización Mundial de la Salud), por lo que no es demasiado afirmar que el acompañamiento de todas las etapas de producción animal y su registro (rastreadibilidad) irá a constituirse en un diferencial de competitividad en un futuro próximo, principalmente en los mercados de países desarrollados.

***Manejo de los residuos, preservación ambiental y calidad del aire y uso de energías alternativas (menos contaminantes) en la actividad de producción animal.*** Es importante también resaltar las crecientes preocupaciones ambientales de los mercados consumidores mundiales relacionados con el manejo de los residuos, preservación ambiental y emisiones de contaminantes atmosféricos generados en las actividades de producción animal. En este sentido, se deben considerar las fuentes alternativas de energía demandada en el proceso de la crianza del animal, no solo en los sistemas de calentamiento y enfriamiento del ambiente, sino también la demandada por el accionamiento de equipamientos, comederos, bebederos e iluminación, entre otros. También se deben constituir inversiones prioritarias, para la obtención de soluciones propias para climas tropicales y subtropicales de América del Sur, relativas a sistemas de tratamientos de residuos, vislumbrando la reducción de cargas contaminantes y la generación de energías o biofertilizantes naturales (Fonseca, 1998 y Rivero, 1986). En lo relativo a la calidad del aire, América del Sur precisa invertir en la elaboración de un inventario real de emisiones de gases por la actividad de producción animal, con el fin de definir la contribución de dicha actividad en la contaminación general de una región determinada o del planeta.

***Bienestar animal.*** Otras exigencias importantes de los mercados internacionales importadores de la carne brasilera, se refiere al bienestar animal (Tinoco, 2005).

Existen pocos indicios de la total convergencia de la legislación mundial acerca del bienestar animal, ya que la definición de protección animal en las explotaciones pecuarias varía de país a país, en función del contexto cultural, científico, religioso, económico y político. Con todo lo anterior, se deben ofrecer las mejores bondades para satisfacer las exigencias de los clientes.

Los principales países importadores, ya disponen de leyes específicas que tratan del bienestar y exigen que el mercado se adecúe a estas imposiciones, para no vetar sus importaciones. Dentro de los procesos de formación de las leyes, las adoptadas en la Comunidad Europea son bastante avanzadas. En estas reglamentaciones se busca garantizar los siguientes derechos a los animales: 1) libertad fisiológica (ausencia de hambre y de sed), 2) libertad ambiental (ambiente adecuado), 3) libertad sanitaria (ausencia de enfermedades y fracturas), 4) libertad de su comportamiento (posibilidad de mostrar comportamientos normales), 5) libertad psicológica (ausencia de miedo o de ansiedades) (Tinoco, 2005).

Con todo lo anterior, se debe entender que las normas de bienestar animal no pueden contener restricciones que no hagan viable la producción, ni tampoco desvincular el fundamento científico o fundamentarse en patrones antropomórficos.

Así, en lo propuesto en la Norma Federal Brasilera de bienestar animal, se puede encontrar en el artículo tercero que: "se constituyen objetivos básicos de las acciones de protección a los animales: la prevención, la reducción y la eliminación de las causas de sufrimientos físicos y mentales de los mismos, la defensa de los derechos de los animales, el bienestar animal". En este aspecto, en su artículo cuarto relata que: "los animales deben ser mantenidos en ambientes que garanticen cada fase de su desarrollo, considerando la edad y tamaño de las especies,

debiendo ser consideradas las condiciones sanitarias y ambientales, de temperatura, humedad relativa, cantidad y calidad del aire, niveles de luminosidad, exposición solar, ruido, espacio físico, alimentación, enriquecimiento ambiental y seguridad, conforme a las necesidades físicas, mentales y naturales de los animales”.

Dentro de lo expuesto con anterioridad, la producción animal de América del Sur, posee varias ventajas, sobre la producción animal de Europa y América del Norte, para ofrecer condiciones de bienestar animal de forma natural y sin gasto excesivo de energía. El clima tropical y subtropical de América del sur, permite que las instalaciones sean abiertas en buena parte del tiempo, favoreciendo la producción intensiva con las asociaciones entre ventilación natural y artificial, iluminación y obtención de las mejores condiciones de salubridad y calidad del ambiente. Entre las ventajas se pueden mencionar la reducción en la concentración de los contaminantes atmosféricos, como el material particulado, amonio, monóxidos y dióxidos de carbono y otros gases nocivos, los cuales se constituyen en factores críticos en la actividad debido a los daños causados a la salud de los animales y de los trabajadores.

### **Ambiente e instalaciones de producción animal en América del Sur**

La industria de producción animal del Brasil y de América del Sur, en general, no tiene absolutamente nada de modesto. El hecho es que el incansable e incesante esfuerzo de los productores, conjuntamente con las instituciones de enseñanza e institutos de investigación nacional, en la búsqueda de tecnologías cada vez más nuevas y absolutamente particulares para las condiciones de clima de América del Sur, generan una tipología de alojamientos predominantemente abiertos y sin aislamiento térmico, con un uso cada vez más presente y fuerte de paisajismos circundantes, como elementos armonizadores, resultando (igualmente en los sistemas de climatización más sofisticados) en una industria natural, confortable y proporcionadora de bienestar a los animales (Curtis, 1983; Whitaker, 1992; Wiersma y Stott, 1983).

Estas conquistas fueron más aceleradas especialmente a partir de los 80, cuando se intensificaron las preocupaciones relativas al ambiente, llevando a un gasto mínimo de energía en los procesos de acondicionamiento térmico, con una calidad sanitaria y del aire para la mayoría de las etapas de los ciclos productivos, y con intensidades lumínicas y con sistemas de manejos comparativamente más humanizados.

Se puede afirmar que este singular estilo de la producción natural animal, practicado en América del Sur, se constituye en la mayor fuerza diferenciadora en relación al resto del mundo en la promoción del bienestar animal. Algunos ejemplos de la tipología adoptada en alojamientos animales brasileños y en América del Sur, se presentan en las Figuras 1 y 2. En la Figura 3, se presentan las principales diferencias en las topologías de los alojamientos animales usados en América del Sur y usados en Europa y Estados Unidos de América.

### **Acondicionamiento térmico del ambiente en la actividad de la producción animal en América del Sur**

***Los animales domésticos y su ambiente.*** Los animales domésticos (aves, bovinos y cerdos), exigen del medio en que habitan, condiciones de ambiente, tales como temperatura, humedad, presión, luminosidad, nivel sonoro, contenido de oxígeno y nitrógeno. Cada individuo tiene poderes específicos de adaptación, que le permiten (hasta cierto nivel de adversidad), sobrevivir cuando algunas de las variables se modifica, donde estos parámetros dependen de diversos factores, tales como la aclimatación del ave, edad y sexo, para que no ocurran en su desempeño, siempre es posible establecer límites dentro de los cuales la especie se desarrolla en su plenitud (Costa, 1982; Muller, 1982).

Dentro de los factores ambientales, los factores térmicos, representados por la temperatura del aire, la humedad, la radiación térmica y el movimiento del aire, son aquellos que afectan más directamente al animal, ya que comprometen su función vital más importante, que es la manutención de la propia homeotermia.



**Figura 1.** Tipología de los aviarios brasileiros. Galpones abiertos con concepción arquitectónica adecuada y uso intensivo del acondicionamiento térmico natural a través del paisajismo circundante como promotor de confort térmico, intensificación de ventilación natural, renovación de la calidad del aire y consecuentemente bienestar animal (Fotos obtenidas de la Perdigão Agroindustrial S/A- Sur de Brasil).



**Figura 2.** Tipología de los aviarios brasileiros. Galpones abiertos con uso intensivo del acondicionamiento térmico natural a través del paisajismo circundante como promotor del confort térmico, intensificación de ventilación natural, renovación de la calidad del aire y consecuentemente del bienestar animal (Fotos obtenidas de la Perdigão Agroindustrial S/A- Sur de Brasil).

### Estados Unidos y Europa



### Brasil (America del Sur)



**Figura 3.** Acondicionamiento térmico ambiental en el Brasil y América del Sur. Diferencias especiales en el tipo de alojamiento animal. Tipología de los aviarios brasileros. Galpones abiertos con un uso intensivo del acondicionamiento térmico natural a través del paisajismo circundante como promotor de confort térmico, intensificación de ventilación natural, renovación, calidad del aire y consecuente bienestar animal (Fotos obtenidas de la Perdigoão Agroindustrial S/A- Sur de Brasil).

Así, los animales homeotérmicos necesitan mantener la temperatura interna del cuerpo en niveles relativamente constantes, en ambientes cuyas condiciones temohigrométicas son más variables, a través de mecanismos orgánicos de control representados por severas compensaciones fisiológicas. Estos ajustes son hechos en contra de la producción de estos animales, que en lugar de emplear los nutrientes para la síntesis, los utilizan para producir o disipar calor. Cuando no ocurre ningún desperdicio de energía, sea para compensar el frío, o para accionar su sistema de refrigeración para combatir el exceso de calor del ambiente, se dice que el animal está en condiciones de confort y consecuentemente, de máxima productividad, fuera de la zona de confort ocurre una disminución en su productividad, siendo que estando en condiciones extremas de frío o calor, puede llevarlo a condiciones letales (Clark, 1981; Tinoco, 2001).

***El albergue animal: condiciones ideales de infraestructura.*** Adecuar la edificación animal al clima de un determinado lugar, significa crear espacios tanto interiores como exteriores, ajustados a las necesidades de los individuos que la ocupan y que posibilitan las mismas condiciones favorables de confort. El proyecto debe mitigar las condiciones de desconfort, que son generadas por fuertes climas, tales como excesivo calor, frío o viento, como también propiciar ambientes, los cuales sean minimamente tan confortables como los espacios al aire libre en climas amenos, para que sean alcanzados altos índices de productividad.

La utilización cada vez más frecuente de ambientes controlados en instalaciones cerradas, hace suponer que por lo menos, para determinadas especies animales, como es el caso de aves y cerdos, todas las explotaciones del futuro

van a disponer de este tipo de instalaciones, pero la realidad en el corto y mediano plazo es que la crianza de animales en el Brasil y América del Sur, ocurren predominantemente en instalaciones abiertas, sin ambientes controlados y los proyectos deberían adecuarse a esta realidad. En el caso de Brasil y de Colombia, la amplitud térmica es pequeña, comparativamente con los países de climas templados, lo que sugiere que en el futuro, la climatización total del ambiente de crianza de animales debe ser necesario y priorizado.

Así, al proyectarse una instalación animal para una determinada región climática de América del Sur, el primer cuidado que se debe tener en cuenta es el comportamiento del acondicionamiento térmico natural, basado en el conocimiento de las posibilidades de intervenir sobre las variables del medio para mejorar la habitabilidad térmica de los espacios, por medios puramente naturales a la localización, la forma y la orientación de las instalaciones, conjuntamente con los dispositivos que controlan la radiación solar, la selección adecuada de los materiales y procedimientos constructivos, la previsión de una ventilación perfectamente controlada y la explotación del paisajismo, son todos elementos que muchas veces definen la composición y también la arquitectura de una región.

Entre los parámetros indicadores de las características térmicas de una región, y que deben ser conocidos por los proyectistas, se destaca claramente la temperatura del aire, la cual depende la latitud, de la proximidad del mar o de las zonas húmedas, del paisajismo, de la nubosidad y de la altitud. Todos estos factores, generan eventuales cambios en las grandes masas de aire, que hacen alterar la temperatura bruscamente, hacen que difícilmente se encuentren en el planeta lugares de condiciones climáticas iguales.

Las temperaturas máximas y mínimas medias mensuales, y las amplitudes medias mensuales, deducidas estas últimas por la diferencia entre las temperaturas máximas media y la mínima

media mensual, y las temperaturas máximas y mínimas absolutas, son buenos índices de las variaciones del clima.

La amplitud media es elevada en los climas secos, y baja en los climas húmedos. Este parámetro significa que en los climas secos se tendrá necesidades de cerramiento que amortiguarán las oscilaciones térmicas en una ventilación diferenciada para el día y la noche, los sistemas evaporativos, que posibilitan el enfriamiento de la temperatura del aire por vía latente, pueden ser empleados satisfactoriamente en el combate del calor. En el caso del Brasil, se encuentran por ejemplo, gran parte del Estado de Goias, Mato Grosso y el Triangulo Minero.

En los climas húmedos, las propiedades de amortiguamiento no son necesarias, requiriendo en las zonas calientes, una renovación rápida y continua del aire. Los sistemas adiabáticos evaporativos generalmente no generan buenas soluciones, a no ser en casos específicos, en las horas más calientes del día, cuando la humedad del aire decrece naturalmente. Este es el caso del norte de Brasil, tal como el Estado de Pará.

Se deben conocer también, la velocidad y dirección de los vientos, teniendo en cuenta la orientación de los volúmenes para favorecer la ventilación en los períodos calientes o controlarlos en los períodos fríos, o en la fase inicial de la vida del ave.

También es importante conocer la humedad relativa del aire en el momento de mayor estrés calórico, que es entre las 12 y las 15 horas, con el fin de verificar la viabilidad del empleo de sistemas de resfriamiento por evaporación.

***Concepción arquitectonica de las instalaciones para producción animal y confort térmico.*** No existe un tipo de instalación animal que sea ideal para combatir el estrés por calor o frío y que pueda ser adaptada en todas las regiones del mundo, porque cada región climática impone una exigencia propia de arreglos con vista al confort térmico.

Así, dentro de América del Sur, se observan situaciones muy diferentes. Un ejemplo de esto se puede citar al Brasil, el cual debido a su gran territorio, posee extensas regiones de clima predominantemente caliente y todo el año acompañado de alta humedad relativa, otra permanentemente caliente y con baja humedad y aun extensas regiones con veranos muy calientes e inviernos muy fríos. Consecuentemente será exigido un tipo de arquitectura diferente para cada una de estas regiones.

Para regiones de clima muy caliente en el verano y expuestas a grandes variaciones de temperatura durante todo el año, como es el caso de Argentina, la arquitectura deberá eliminar los efectos de radiación especialmente en verano, y los materiales de construcción del galpón deberán tener una buena capacidad de enfriamiento, y la ventilación deberá contar con dispositivos que permitan un régimen de ventilación diferente de día y de noche, en el invierno y en el verano.

En las regiones con clima caliente y húmedo durante todo el año y sin muchas ampliaciones térmicas, las respuestas arquitectónicas, englobando las modificaciones o sistemas auxiliares, deben buscar la eliminación permanente de la radiación solar y una ventilación continua y abundante, como los galpones son abiertos, la utilización de materiales con mayor amortiguamiento térmico, no es tan necesario mientras se elimine la radiación solar, como la utilización de sombreado natural en las cabeceras, laterales y cobertura de los galpones. En este caso, los cerramientos pueden ser contruidos con materiales leves; sin embargo, con alguna resistencia térmica, en el caso en que sean usados equipamientos de refrigeración, como las ventilaciones tipo túnel, comunes de sistemas "dark house" para matrices, o en la producción de pollos de corte en alta densidad o para regiones con vientos nocturnos fríos, principalmente para animales jóvenes (De Paula y Esmay, 1981; Timmons y Baughman, 1984; Zanolla, 1998).

Para las regiones que están caracterizadas por climas calientes y secos, y poseen mayor am-

plitud térmica, los procesos de enfriamiento de la temperatura del aire por evaporación, que son adecuadamente dimensionados, pueden ser adecuados sin inconvenientes. De la misma manera, materiales de construcción con mayor amortiguamiento térmico, especialmente en la cobertura, es fundamental.

Así, el tipo de alojamiento animal no será concebido de la misma forma para regiones climáticas diferentes y en la atenta observancia de este hecho, residirá en el éxito de la instalación y en la mejora de las condiciones de confort, compatibles con las exigencias animales.

***Estrategias para modificar el ambiente térmico de las instalaciones animales.*** Se distinguen dos clases de modificaciones ambientales. Las llamadas primarias son aquellas relacionadas con el abrigo y que permiten proteger al animal durante periodos en que el clima se presenta extremadamente caliente o frío, ayudándolo a aumentar o a reducir las pérdidas de calor corporal. Se pueden citar como principales las coberturas para sombra, rompe vientos, la utilización de ventilación natural y todos los tipos de cerramiento como cortinas, y también paisajismos circundantes. Las modificaciones primarias corresponden al acondicionamiento térmico natural. Estos llevan en consideración la localización de los alojamientos, su orientación en relación a la posición de la tierra en relación al sol, a la distancia entre predios, a la topografía del terreno, a la arborización del entorno, al tipo de material de cobertura y a los materiales en general, etc (Curtis, 1983; Tinoco, 2002).

Las modificaciones secundarias corresponden al manejo del microambiente interno en las instalaciones. Generalmente envuelven niveles más altos de sofisticación y comprenden diferentes procesos artificiales de ventilación (por presión negativa o positiva), sistemas diversos de calentamiento o de enfriamiento. Existen aspectos positivos en este tipo de modificaciones, como el mejor aprovechamiento de espacios físicos y de la mano de obra, así como mejor control de las condiciones térmicas, a pesar de un mayor consumo de energía y mayor costo de implemen-

tación del proyecto. Las modificaciones secundarias, con todo, deben ser realizadas después de acabados todos los recursos de las modificaciones primarias, y cuando se pretende aumentar la densidad de alojamiento de los animales.

El detalle de cómo se puede proceder a realizar el acondicionamiento térmico natural y artificial para las condiciones del clima tropical y subtropical de América del Sur, no serán presentados en este trabajo. Por el momento, en síntesis, los puntos que deben ser alertados en ambos sistemas de acondicionamiento del ambiente, para que se tome la mejor decisión para las condiciones específicas de las diferentes regiones de América del Sur, son el hecho de que el ambiente en que son criados los animales corresponde a determinar las mejores posibilidades para obtener mayores beneficios con la aplicación de las tecnologías conquistadas por el sector en América Latina.

La selección de los diferentes sistemas de acondicionamiento ambiental, o sea, si son totalmente naturales o climatizados o semi climatizados, va a depender de muchas variables, tales como los niveles de adversidad climáticas, instalaciones, disponibilidad y calidad de la mano de obra, capacidad ya instalada de sistemas auxiliares como ventiladores y aspersores, nivel de automatización deseada y volúmenes de la empresa.

Finalmente, solamente un cuidadoso estudio sobre el microclima local, en términos de amplitud térmica, temperaturas máximas y mínimas, medias y absolutas, además, de la humedad relativa del aire, en asociación con los parámetros técnico económicos, los cuales son propios de cada empresa y que permitan tomar la mejor decisión para cada región de América del Sur, son necesarios para cualquier tipo de proyecto pecuario.

### **Consideraciones finales**

El crecimiento mundial del consumo de alimentos, jalonado por el buen desempeño de las economías de los países en desarrollo y la cre-

ciente inserción de los productos agropecuarios brasileros y sur americanos en el exterior, contribuyeron para el avance de las exportaciones. En el 2007, los volúmenes exportados de los principales productos de la agroindustria suramericana, presentaron variaciones positivas para la venta de carne de ganado, de pollo y de cerdos. En lo que va del 2008, América del Sur, representada por el Brasil, se constituye en el mayor exportador de carne bovina y de pollo del mundo.

Entre tanto, América del Sur, no se puede eximir de intentar para una nueva configuración del comercio internacional, orientada por la seguridad sanitaria de los alimentos, sobre el enfoque de la cadena productiva. Así, se debe tener en cuenta la rastreabilidad del producto y las crecientes preocupaciones ambientales, relacionadas con las emisiones de contaminantes atmosféricos generados en la producción animal. En este sentido, se deben considerar las fuentes alternativas de energía demandadas en el proceso de crianza de animales, procurando una reducción de emisiones de gases nocivos. Otras exigencias importantes de los mercados internacionales importadores, se refieren al bienestar animal, por lo que América del Sur se debe adecuar a las exigencias de sus clientes.

La búsqueda de tecnologías cada vez más nuevas y absolutamente particulares para las condiciones del clima de América del Sur, generarán una tipología de alojamientos predominantemente abiertos y sin aislamientos térmicos, con un uso cada vez mayor de paisajismo circundante como elemento armonizador, resultando (igual que en los casos de sistemas climatizados más sofisticados), en una industria natural confortable y proporcionadora de bienestar para los animales. Estas conquistas fueron más aceleradas especialmente a partir de la década de los 80, cuando se intensificaron las preocupaciones relativas al medio ambiente, llevando un gasto mínimo de energía en los procesos de acondicionamiento térmico, con una calidad sanitaria y del aire muy buena para la mayoría de las etapas de los ciclos productivos, y con intensidades lumínicas y condiciones de manejo más humanizados.

Se puede afirmar que este singular estilo de la producción animal natural practicado en América del Sur, se constituye en la mayor fuerza diferencial en relación al resto del mundo, en la promoción del bienestar animal. De esta manera, la producción animal intensiva practicada en el Brasil, Colombia y en algunos otros países de América del Sur, se constituye para la gran mayoría de las empresas, en un ejemplo de tecnología y manejo para toda la actividad de producción animal mundial. Se sabe con todo lo anterior, que aún existe mucho por hacer, y permanentemente, se debe reevaluar y avanzar buscando vencer los nuevos desafíos.

## **Bibliografía**

- Clark, J.A. 1981. Environmental aspects of housing for animal production. British Library Cataloguing in Publication Data, Nottingham, England. 510 p.
- Costa, E.C. 1982. Arquitetura ecológica, condicionamento térmico natural. 5ª ed. Edgard Blücher, São Paulo. 264 p.
- Curtis, S.E. 1983. Environmental management in animal agriculture, 2<sup>nd</sup> ed. The Iowa State University Press, Ames, Iowa. 407 p.
- Fonseca, J.M. 1998. Efeito do sistema de ventilação em túnel no conforto ambiente e na produção de frango de corte em alta densidade. Dissertação Mestrado em Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Viçosa, UFV. Viçosa, MG. 88 p.
- Moraes, S.R.P. 1998. Associação de aspersão, forro, pintura e materiais isolantes à diferentes tipos de telhados e efeitos sobre o conforto térmico de galpões avícolas. En: Conferência Apinco 1998 de Ciência e Tecnologia. FACTA - Fundação Apinco de Ciência e Tecnologia, Campinas, SP. p. 71.
- Muller, P.B. 1982. Bioclimatologia aplicada aos animais domésticos. Sulina, Porto Alegre. 158 p.
- Oliveira, J.L. and Esmay, M.L. 1981. Systems model analysis of hot weather housing for livestock. American Society of Agricultural Engineering, St. Joseph, Michigan. 17 p. (Paper 81-4564).
- Rivero, R. 1986. Condicionamento térmico natural: arquitetura e clima. D.C. Luzzatto Editores, Porto Alegre. 240 p.
- Timmons, M.B.; Baughman, G.R. 1984. A plenum concept applied to evaporative pad cooling for broiler housing. Trans. ASAE 42(2): 1877-1881.
- Tinôco, I.F.F. 2005. Ambiência e construções para matrizes pesadas. p. 11-34. In: Marcos Macari; Ariel Antônio Mendes (eds.). Manejo de matrizes de corte. FACTA, Campinas, SP. 414 p.
- Tinôco, I.F.F. 2004. A granja de frangos de corte. In: Ariel Antônio Mendes; Irenilza de Alencar Naas; Marcos Macari (eds.). Produção de frangos de corte. Fundação APINCO de Ciência e Tecnologia Avícola, Campinas, SP. p. 1-345.
- Tinôco, I.F.F. 2002. Novas tendências em projetos para a avicultura industrial (no prelo). p. 1-101. In: FACTA. (Org.). Novas tendências em projetos para a avicultura industrial. Jaboticabal, SP.
- Tinôco, I.F.F. 2001. Ambiência e instalações na produção de matrizes avícolas. p. 1-74. In: Iran José Oliveira da Silva (ed.). Ambiência na produção de aves em clima tropical. FUNEP, Piracicaba, v. 2. 185 p.
- Whitaker, J.H. 1992. Agricultural buildings and structure. 4<sup>th</sup> ed. Heston Publishing Company, Heston, Virginia. 302 p.
- Wiersma, F. and G.H. Stott. 1983. Evaporative cooling. p.103-118. In: Hellickson, M.A.; Walker, J.N. (eds.). Ventilation of agricultural structures, 2<sup>nd</sup> ed. ASAE, St. Joseph, Michigan. 370 p.
- Zanolla, N. 1998. Sistema de ventilação em túnel e sistema de ventilação lateral na criação de frangos de corte em alta densidade. Dissertação Mestrado em Engenharia Agrícola, Área de Construções Rurais e Ambiência. Faculdade Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, UFV. Viçosa, MG. 82 p.

## **PROSPECTIVA DE LOS MATERIALES ALTERNATIVOS EN LAS CONSTRUCCIONES RURALES. Ilda Ferreira Tinoco<sup>1</sup>, Marcos Oliveira de Paula<sup>2</sup>, Jairo Alexander Osorio Saraz<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Profesora Departamento de Ingeniería Agrícola. Universidad Federal de Viçosa-Brasil. E-mail: iftinoco@ufv.br

<sup>2</sup> Professor Substituto. Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, Brasil. E-mail: modep@vicosa.ufv.br

<sup>3</sup> Profesor Asistente. Departamento de Ingeniería Agrícola y de Alimentos. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. E-mail: aosorio@unalmed.edu.co

### **Resumen**

El uso de los materiales alternativos, o la composición de los mismos con materiales convencionales, en construcciones rurales, se puede constituir en una solución adecuada para grandes y pequeños productores rurales, en el caso en que se deseen minimizar los impactos ambientales, o para el caso en que se desee la incorporación de ciertas características a los materiales, tales como inercia térmica, durabilidad, entre otros. Este trabajo pretende dar a conocer los principales materiales usados en las construcciones agropecuarias, así como los considerados en la actualidad como alternativos y las perspectivas de estos para su uso en el futuro.

**Palabras claves:** Materiales alternativos, construcciones rurales, materiales de construcción.

### **Abstract**

## **PROSPECTIVE OF ALTERNATIVE MATERIALS IN RURAL CONSTRUCTIONS**

The use of alternative materials, or the composition of the same materials conventional in buildings livestock, can constitute an adequate solution for large and small rural producers, in cases where they may wish to minimize environmental impacts, or for If their want the incorporation of certain characteristics to materials such as thermal inertia, durability, and others. This work aims to ascertain the main materials used in farm buildings, as well as those considered at present as alternatives and prospects of these for future use.

**Key words:** Alternative materials, farm building, construction materials.

### **Introducción**

Según previsiones del Banco de Compensaciones Financieras (BIS), la agroindustria latinoamericana crecerá considerablemente en los últimos años, por la creciente demanda de los alimentos, dentro de las cuales América del Sur juega un papel importante, por lo que se espera también un gran crecimiento de sus agroindustrias.

Es importante recordar que este crecimiento de la agroindustria es benéfico para América del Sur, pero trae consigo problemas que deben ser gerenciados y resueltos: El primero de ellos es que el crecimiento de la infraestructura constructiva, de la forma como convencionalmente se ejecutan las construcciones, puede ser muy contaminador para el medio ambiente y puede ser también antieconómico. El segundo problema, es que la agroindustria, además de las actividades agropecuarias y forestales, abriga actividades también como la generación de alcohol, minera, entre otras, que generan grandes cantidades de residuos contaminantes que siempre son peligrosos para la conservación de los ecosistemas (De Paula, 2006).

Gran parte de esos residuos pueden ser reciclados, reutilizados, transformados e incorporados, de modo de producir nuevos materiales de construcción, y atender la creciente demanda tecnológica alternativa de construcciones más simples, eficientes, ecológicas y económicas, para favorecer principalmente a los medianos y pequeños productores (Oliveira, 2006).

Debido a lo anterior, se entiende que se debe actuar simultáneamente en: a) mejorando las técnicas y materiales de construcción de manera que estos sean más económicos y menos contaminantes, b) encontrando materiales con características térmicas, acústicas y de resistencia compatibles con las instalaciones y con el clima de la región en que están establecidas las obras (Curtis, 1983; Osorio *et al.*, 2005; Tango,

1996); c) reduciendo y reciclando los residuos generados de la propia agroindustria o generados de procesos constructivos, minimizando el impacto ambiental a través de la reutilización de estos subproductos, en nuevas técnicas de edificación. Estos materiales así constituidos, son denominados "materiales alternativos de construcción", y pueden sustituir muchas veces los materiales tradicionales con algunas ventajas, y lógicamente con sus desventajas.

El uso de los materiales alternativos, o la composición de los mismos con materiales convencionales, en construcciones rurales, se puede constituir en una solución adecuada para grandes y pequeños productores rurales, en el caso en que se deseen minimizar los impactos ambientales, o para el caso en que se desee la incorporación de ciertas características a los materiales, tales como inercia térmica, amortización, durabilidad, entre otros (Freire, 2003).

Es importante estimar que un material alternativo de hoy, se puede considerar un material convencional en el futuro y viceversa, y que los niveles de sofisticación de los materiales y las técnicas alternativas o convencionales del futuro pueden variar. El pronóstico, para un futuro breve, es que surjan materiales de construcción extremadamente inteligentes para atender la demanda exigente de los mercados.

## **Objetivo**

Con base en lo expuesto, este trabajo busca dar a conocer los materiales alternativos de construcción, de uso más frecuente y sus aplicaciones en estructuras rurales, así como también algunos de los materiales alternativos previstos para un futuro.

## **Parte I. Materiales alternativos de uso más frecuente en las construcciones rurales**

Se entiende que un material alternativo puede ser evaluado en función de algunas características tales como: si el material es producido en bloques o es total o parcialmente importado, si el material requiere máquinas o equipamientos especiales

para su manufactura, si puede ser producido a bajo costo en el local de construcción, si su producción requiere alto consumo de energía, con producción de residuos, si es contaminante, si el material y la técnica constructiva reúne condiciones bioclimáticas (amortecimiento, inercia térmica, resiliencia, etc), aceptables en términos del producto generado, si el material y la técnica constructiva garantizan suficiente seguridad contra las interperies, resistencia mecánica, al fuego, entre otros (Silva, 1995).

Reuniendo las características anteriores, los materiales alternativos presentes actualmente y desarrollados en sistemas constructivos rurales se encuentran.

**Tierra cruda para la construcción.** La tierra es uno de los materiales más abundantes del planeta, motivo por el cual su utilización como material de construcción, se remonta desde los tiempos primitivos (Freire, 2003), las ventajas asociadas a la tierra como material de construcción, son: resistencia al fuego, material más barato que la mayoría utilizado en la construcción de paredes, su disponibilidad, presenta buenas características de aislamiento térmico y acústico, fácil de trabajar no exigiendo equipamientos especiales o mano de obra especializada, generación mínima de contaminación, y bajo consumo energético, entre otros (Mekonnen y Hailu, 1997).

Pese a lo anterior, el uso de la tierra presenta algunas desventajas cuando es usada como material de construcción: es sensible a la presencia de humedades, lo cual puede presentar desintegración del material y fallas estructurales, presenta altas tasas de expansión y contracción; lo que lleva al apareamiento de fisuras, cuando el material permanece expuesto a condiciones climáticas variables, posee baja resistencia a la abrasión y requiere mucho mantenimiento (Scrivener y Van Damme, 2004).

Afortunadamente, en la actualidad, esas desventajas son superadas con el uso de aditivos estabilizadores del suelo, y es mezclado con finallidades de cimentar las partículas del suelo,

reducir los movimientos de expansión y contracción del suelo que provocan indeseables variaciones dimensionales, tornar el suelo lo mínimo permeable al agua. Entre estos estabilizadores se encuentran estabilizadores naturales como pajas, fibras vegetales, estiércol animal, entre otros, estabilizadores manufacturados como cal, puzolanas, cemento portland, yeso, entre otros (Silva, 1995).

El uso de la tierra como material alternativo, aun cobra fuerza, para realizar construcciones alternativas y amigablemente ambientales, un ejemplo de esto es el uso de sistemas de floristería análoga, en el cual la tierra juega un papel importante.

**Fibras vegetales como materiales de construcción.** El uso de materiales alternativos en la construcción civil, reforzados con fibras naturales, se esta ampliando rápidamente en razón del buen comportamiento mecánico que esos materiales poseen, además de la gran disponibilidad de esos productos. En el caso de países en desarrollo, donde existe escasez de habitaciones y edificios, la aplicación de esos materiales de construcción, podría disminuir el déficit habitacional (Heinricks *et al.*, 2000).

El uso de los materiales fibrosos en la construcción civil, sólo se dio de una forma industrializada con la introducción del cemento portland en el mercado en el comienzo del siglo XX. Se puede afirmar que este tipo de materiales fue de hecho estudiado en la Ingeniería Civil a penas a partir de 1960, en los países desarrollados. Los primeros productos con fibras artificiales fueron comercializados en los mediados de los 70. Algunas fibras han sido evaluadas en las matrices del cemento, y han tenido buena durabilidad, pero con precios elevados, como las de carbono, poli-acrilonitrilo de acrilatos y de "kevlar" (poliamida).

La mayor parte de los estudios de durabilidad de los materiales reforzados con fibras naturales vegetales, busca comprender el mecanismo de degradación de las fibras y desarrollar técnicas de protección por medio de impregnación o revestimiento con diferentes sustancias. La im-

pregnación busca mineralizar las fibras tornándose resistente a la acción de la alcalis, o sirviendo como elemento saturador de poros, impidiendo la penetración de la acción alcalina. La eficiencia de esas técnicas de protección de las fibras que serán sometidas a los procesos mecánicos convencionales, de mezcla para la composición de compuestos es dudosa. De hecho, aún no se han publicado resultados satisfactorios al respecto, pues inicialmente se anda buscando la relación fibra en la matriz de cemento más ideal y de mejor comportamiento y posteriormente la durabilidad de la fibra dentro de la matriz (Osorio, Varon y Herrera, 2007).

Otra técnica, es la de impedir la entrada de agua en el compuesto, mediante la obstrucción de los capilares o por impermeabilización de una superficie externa, los cuales son procesos que no justifican, ya que el empleo de las fibras naturales se debe a sus bajos costos. De una u otra manera el abordaje de los estudios de fibras naturales está en disminuir la agresividad al medio en que están y proteger las fibras propiamente dichas (Rivero, 1986).

**Los materiales reforzados con fibras.** Con la adición de fibras en las matrices (pastas, argamasas y concretos), es posible mejorar las propiedades mecánicas, tales como resistencia a la tracción, a la flexión y al impacto. Sin embargo, la duda es el mayor beneficio obtenido por reforzar una matriz frágil con fibras y la alteración del comportamiento del compuesto después de la fisuración. El compuesto en lugar de romperse súbitamente después del inicio de la fisura, puede presentar una deformación plástica considerable, tornándose un material adecuado para la construcción. Para que eso ocurra, las fibras deben ser adicionadas en volúmenes, longitudes y formatos adecuados, de acuerdo a modelos descritos en la literatura (Bentur y Mindess, 1990).

Normalmente, el volumen de las fibras con excepción de las del asbesto, adicionadas a las matrices frágiles, tienen un valor inferior al 3%. Pero para la obtención de mejores resultados, existen estudios que han buscado adicionar hasta

un 12% en volumen, para alterar significativamente el comportamiento de la matriz antes de su fisuración (Mobasher, Stang y Shah, 1990).

La durabilidad es una propiedad básica para viabilizar el empleo de las fibras vegetales en la construcción, debido a su fragilización a lo largo del tiempo en razón de la descomposición de las fibras en un medio alcalino, en el caso, del agua contenida en los poros de las matrices con cemento. Así, para aumentar la durabilidad de los compositos, se sugieren acciones sobre la fibra o sobre la matriz, como aplicar a las fibras oleos, resinas, silicatos, sulfatos, como agentes bloqueadores buscando impermeabilizar también la matriz con agentes internos o externos, reducir la alcalinidad de la matriz para que tenga un pH inferior a 9, por medio de carbonatación acelerada, adicionar escorias o puzolanas, entre otros (Beraldo, 1987; Gram, 1988; Osorio, Varón y Herrera, 2007).

**Las fibras vegetales.** Dentro las fibras producidas en una región, es necesario seleccionar aquellas con propiedades adecuadas para el empleo en la construcción civil. Las propiedades son relacionadas al comportamiento mecánico, a las características físicas (masa específica y absorción de agua), a las relaciones entre las dimensiones, a la adecuación al clima para facilidad de producción y a la durabilidad en ambientes naturales. Desafortunadamente, estos datos no están disponibles para la mayoría de las fibras.

Con base en estudios hechos, se tienen algunas fibras que han demostrado buena relación al ser usadas como compuestos, como son las de bambú, coco, celulosa, yuta y sisal (Beraldo, 1987; Ghavami *et al.*, 2003; Osorio, 2007; Rivero, 1986). Dentro de estas fibras es importante resaltar el bambú, las fibras de coco y el sisal.

**Bambú.** Entre los materiales de construcción disponibles en la mayoría de los predios rurales, el bambú (familia: Gramineae o Poaceae, subfamilia: Bambusoideae) puede venir a ocupar un lugar destacado desde que sean más estudiadas y conocidas sus características básicas, siendo

muy utilizada en Colombia para construcciones civiles y rurales, y últimamente para la elaboración de laminados. Dentro de los principales géneros sobresale la *Guadua angustifolia* Kunth (Osorio *et al.*, 2005).

Los bambues del género *Guadua*, tienen una importancia crucial en la economía de Ecuador y Colombia. Es una especie conocida por los nativos, hace por lo menos 5.000 años. Anteriormente incluidos en el género *bambusa*, este bambú nativo de América, posee especies con muy buena resistencia, la *G. angustifolia* Kunth, siendo catalogada como un excelente material de construcción.

Contrariamente en los países asiáticos y en ciertos países de América, en el Brasil, se utiliza el bambú predominantemente en el medio rural. En el medio urbano, ha sido destacado el uso de especies de bambues de pequeño porte en paisajismo, o en pequeñas industrias de fabricación de muebles (Ghavami *et al.*, 2003).

Dentro de las características favorables para el uso en la arquitectura y en la ingeniería, se pueden citar: bajo costo energético de producción, comparado con otros materiales como hierro, concreto y madera; corto ciclo de crecimiento, con gran y eficiente productividad; bajo peso específico, lo que reduce el costo de su manipulación y transporte; forma tubular acabada, estructuralmente estable para las más diversas aplicaciones constructivas (Gram, 1988), además de una aceptable resistencia a la tensión, especialmente en su capa externa, donde presenta una mayor concentración de fibras, así como buena resistencia a la flexión en sentido radial y tangencial que hace que el material tenga buenas propiedades cuando es usado como laminado, y en su forma geométrica original se convierte en una buena alternativa de construcciones rurales que no van a ser sometidas a grandes cargas (Osorio *et al.*, 2005; Osorio *et al.*, 2007).

A pesar de lo anterior, el bambú presenta algunas desventajas, tales como cuando tiene un contacto permanente con la humedad, comienza un proceso de pudrimiento y es fácilmente ata-

cado por insectos, lo cual hace que una vez el material se corte, sea sometido a una serie de tratamientos como el curado, secado e inmunización. El bambú es un material altamente combustible cuando está seco, por eso debe ser recubierto con una sustancia a prueba de fuego. El bambú al envejecer pierde su resistencia cuando no es tratado adecuadamente, el material al secarse se contrae en su diámetro, acarreado problemas en el concreto cuando es utilizado como refuerzo, las uniones de sus partes estructurales no pueden ser hechas con perfección y requieren de sistemas adicionales como pernos o perfiles en acero que ayuden a mejorar su resistencia a momentos cortantes y flectores (Beraldo, 1987; Osorio *et al.*, 2007).

Pese a las desventajas, éstas pueden ser superadas con la aplicación de preservativos adecuados, aliados a un buen proyecto estructural, además de la opción de utilizar las fibras del bambú o el bambú en forma de lámina (esterilla) o natural (elemento cilíndrico), como elemento de refuerzo en concretos, o como material estructural combinado con materiales como los polímeros.

**Residuos como aglomerantes.** Innumerables residuos de diferentes procesos industriales pueden ser contaminantes con el medio ambiente. Los residuos debido a su composición química o al estado vítreo, presentan reactividad al medio acuoso, resultando en endurecimiento, pueden ser reutilizados y utilizados como aglomerantes. El reciclaje de estos residuos representa muchas ventajas, reduciendo el volumen de subproductos destinados a rellenos sanitarios y asimismo el riesgo de contaminación. El reciclaje también reduce el volumen de extracción de las materias primas necesarias en la producción de aglomerantes, preservando los recursos naturales, y la liberación de CO<sub>2</sub> para la atmosfera, generado en gran cantidad, durante la producción del cemento portland y la extracción de cal por la descarbonación de la roca calcárea (De Paula, 2006).

Diferentes residuos pueden ser utilizados en la producción de aglomerantes, dentro de los cuales están: la escoria granulada de altos hornos, residuos de la extracción de hierro, cenizas

volátiles, productos de calcinación del carbón vegetal mineral en calderas de lecho fluidizado empleadas normalmente en la producción de energía termoeléctrica, cenizas vegetales como las de cáscaras de arroz (Cook, 1986), y las de bagazo de caña de azúcar (De Paula, 2006), cal de carbureto, generada durante la producción del gas acetileno, o químico obtenido durante la remoción del SO<sub>x</sub> de gases generados en procesos industriales, son ejemplos de residuos que producen aglomerantes aéreos como la sílice activa, el ferro silicio entre otros.

De la quema del bagazo de caña en las calderas, para fines de generación de energía en las industrias de alcohol y azúcar, se produce ceniza como material residual. Del total del bagazo quemado casi el 10% se transforma en ceniza, que debido a su elevado contenido de sílice puede ser utilizada como puzolanas.

La aplicación del bagazo de caña como fuente de cenizas para adicción mineral obedece a dos factores: el rendimiento de ceniza alrededor del 15% y su constitución química en torno al 80% de SiO<sub>2</sub>. Además la sílica contiene álcalis y trozos de óxido de hierro, aluminio, calcio y magnesio (Freitas *et al.*, 1998).

En estudios adelantados por Freitas *et al.* (1998), se concluyó que la adición de ceniza procedente del bagazo de caña de azúcar, puede sustituir el cemento hasta en un 20%, sin perjudicar la resistencia, y además, la adición hasta de un 30% puede ser hecha siempre y cuando la resistencia que se exija no sea la del 100% del cilindro de los cuerpos de prueba.

**Materiales reciclados en la construcción civil.** La construcción civil es una de las actividades más antiguas de las que se tiene conocimiento y desde el principio de la humanidad fue hecha de manera artesanal, generando grandes cantidades de subproductos. Este hecho despertó la atención de los constructores en la época de edificación del imperio romano, y desde esa época se tienen registros de la reutilización de los residuos materiales en las construcciones para nuevas obras (Levy, 2007).

La composición básica del escombro de obras de construcción civil, puede variar en función de los sistemas constructivos y de las disponibilidades regionales, o sea, de los materiales, la mano de obra, la tecnología que pueden ser empleadas en la ejecución de la obra. Los residuos generados poseen diversos materiales como asfalto, argamasas, vidrio, bloques de cemento y de ladrillo, papeles tintas, plásticos, metales, pigmentos, suelos, entre otros.

***Agregados leves y concretos alternativos.*** Los llamados agregados leves, tienen como finalidad principal favorecer la fabricación de concretos leves, considerados como un material alternativo en la construcción civil, principalmente cuando es fabricado con agregados originarios de residuos industriales, como escorias de altos hornos, el lodo de aguas residuales, así como son los concretos con fibras incorporadas, tales como las de vidriolas y algunas vegetales, y aún aquellas fabricadas especialmente con fibras de polipropileno y de acero (Dantas, 2003).

En cuanto al uso de agregados leves para la producción de concretos, de una manera general se puede decir que los principales objetivos han sido alcanzar una disminución del propio peso, o de sus secciones menores, la reducción de sus fundaciones, la facilidad de manejo, el aumento de la productividad y el aislamiento térmico.

Desde el punto de vista de durabilidad, se sabe que el agregado leve tiene una participación activa en la formación de estructuras resistentes del concreto, interactuando con la pasta del cemento y resultando una interfase compacta y homogénea, favoreciendo una zona de transición con elasticidad compatible. El resultado práctico de esa compatibilidad es una reducción considerable de microfisuras, contribuyendo así a la estabilidad de la estructura (Vayburd, 1996).

Por otro lado, esas condiciones varían de un material a otro. El término general agregados leves, engloba una gran variedad de productos, que van desde los naturales hasta los sintéticos, pasando por los subproductos y residuos industriales.

***Otros materiales.*** Los materiales residuales fueron o han sido utilizados como materia prima para fabricación de nuevos materiales de construcción, así como para otra finalidad. Sin embargo, su viabilidad técnica estuvo comprobada a través de numerosas investigaciones realizadas en campo o laboratorio, conducidas por décadas, su viabilidad económica depende de las fluctuaciones en los precios a que están sometidos los mercados (Freitas, 1998).

En función de las actividades diarias del hombre en la sociedad, se producen residuos compuestos básicamente de restos alimenticios, papeles, papelones, plásticos, trapos, cueros, maderas, latas, vidrios, lamas, gases, jabones, etc, a los cuales se les da el nombre genérico de residuos, los cuales se pueden tornar peligrosos contaminantes del suelo y de las aguas, por lo que se necesita su disposición o uso adecuado.

***Productos reciclados provenientes de residuos poliméricos.*** Como ejemplos de poliméricos pueden ser citados: plásticos, cauchos (elastómeros), adhesivos, botellas plásticas, fibras poliméricas, espumas, tintas, y llantas. Los residuos poliméricos, se han tornado en un problema de difícil solución para toda la humanidad, ya que no son biodegradables y permanecen en el lugar donde son depositados por muchos años (Heinricks, 2000).

Algunas investigaciones tendientes a determinar la viabilidad de uso de estos materiales en la construcción, vienen siendo desarrolladas realizando por ejemplo reciclaje de PET, para ser utilizado en unidades habitacionales con buen comportamiento térmico, entre los cuales se han desarrollado paneles para paredes, formando columnas verticales y que reducen el uso de argamasas y mejoran su desempeño térmico. Los resultados, han mostrado que la viabilidad técnica de los sistemas constructivos, que reduce los desperdicios, aumenta la productividad y crea condiciones favorables para una construcción más sostenible (Mekonnen, y Hailu, 1997; Mobasher, Stang, y Shah, 1990).

En Manaus, el profesor y físico Newton Lima, propuso el ladrillo PET, hecho con arena con

gran contenido de cuarzo, cemento y garrafas de pet. El PET funciona como un aislante térmico, haciendo que el ladrillo sea adecuado para regiones calientes.

**La producción de madera plástica.** Otra aplicación para los residuos poliméricos, es la producción de madera plástica, utilizada en sustitución de madera natural, colaborando así en la conservación de bosques naturales. Uno de los procesos de fabricación de esta madera es la poltrusión, que se trata de un método de fabricación continuo, mecanizado para productos de sección uniforme en resina de poliéster, epóxicos o fenolitos, reforzada con fibras de vidrio, y tienen un desempeño equivalente al de las maderas convencionales, ya que el proceso ofrece resistencia necesaria en direcciones longitudinales y transversales. Las resinas pueden ser obtenidas del embalaje de plástico como polietileno teraftalado (PET), y polietileno de alta densidad (PEAD).

La madera plástica puede durar cerca de los 400 años con degradación mínima, superando las maderas convencionales. Además, ésta no contiene ninguna sustancia tóxica encontrada en madera tratada. Desde el punto de vista estrictamente económico, la sustitución de la madera plástica por la convencional, puede ser ventajosa, debido al elevado costo, sin embargo, se deben considerar aspectos como durabilidad, inserción de sustancias tóxicas, aspectos como el mantenimiento, entre otros, los cuales hacen que esa comparación sea más equilibrada.

**La madera plástica.** El aprovechamiento de subproductos de la madera en la confección de aglomerados, ya tiene varios años de existencia, pero la adición de plástico como aglutinante en esa composición, es un avance que está en estudio hace algún tiempo, por investigadores del Instituto Brasileiro del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (IBAMA). El compuesto madera-plástico, es el producto de los residuos de la actividad maderera con polímeros de baja densidad, donde el plástico funciona como aglutinante haciendo cohesionar la madera.

**Productos reciclados provenientes de residuos de llantas.** Varios trabajos académicos han sido desarrollados, donde los investigadores confirman unánimemente que la sustitución de parte de los agregados naturales por los reciclados, provenientes de las llantas inservibles, es viable técnicamente. El caucho, reduce el módulo de deformación del concreto, al punto de absorber impactos en el caso de accidentes. Aún tales elementos pierden resistencia mecánica y no pueden ser utilizados en la producción de elementos estructurales. Como existen pocos estudios, utilizando caucho en las construcciones civiles, existe la necesidad de estudios más avanzados. Otro aspecto con el cual concuerdan los autores, es que la sustitución del agregado natural por el reciclado de caucho de llantas, conduce a una reducción de la masa específica del concreto proporcionalmente al tenor de los agregados sustituidos.

## **Parte 2. Materiales de construcción: perspectivas y desafíos futuros**

Los materiales de construcción han presentando una evolución tecnológica incremental. Los materiales empleados hoy, con excepción de los plásticos, fueron desarrollados hace más de 100 años. Es cierto que en ese período de tiempo, estos materiales han mejorado sus propiedades; sin embargo, hasta hace poco han sido mínimas las revoluciones en este tema de los materiales de construcción, pero este escenario ha estado cambiando rápidamente en los últimos años (John, 2007).

El sector de la construcción es una clave para el desarrollo sustentable, por la capacidad de retractar a la sociedad en la búsqueda de seguridad, confort y bienestar habitacional. Estas exigencias sociales animan a un sector económico particularmente amplio, constituido por cadenas productivas técnicas que exploran recursos renovables o no, transforman las materias primas en productos técnicos más evolucionados y montan en un producto final relativamente complejo. En esta perspectiva, de desarrollo sustentable, la sociedad deberá ser

capaz de encontrar las innovaciones necesarias para vencer desafíos tales como la contaminación, generar mayor economía de empleo, energías renovables, reducción de consumo de materiales no renovables y protección de la naturaleza, uso racional del agua y en general un mejoramiento de la calidad de vida.

Esos desafíos deberán transformar rápidamente en el sector, los materiales de construcción y sus componentes. Las señales de cambios son visibles, al igual que las que se dan en las construcciones destinadas en el medio rural (Scrivener y Van Damme, 2004).

Dentro de los avances producidos por la aplicación de la ciencia de los materiales a los productos de construcción, se pueden citar materiales de alta ecoeficiencia, concreto de post reactivos, maderas densificadas, materiales con grandes funcionalidades (FGM), materiales inteligentes o activos, materiales electro o magneto activos, materiales con memoria de forma, materiales cromo activos, materiales de cambio de fase (PCM-phase change materials), materiales multifuncionales y autolimpiantes.

Entre estos materiales, de alta ecoeficiencia, se permite el consumo de materiales significativamente inferiores a los materiales tradicionales, atendiendo las diferentes funciones estructurales, aislamiento térmico y acústico, etc, propiciando a la construcción un menor impacto ambiental en su ciclo de vida, permiten construcciones desmontables y reutilizables y presentan alta durabilidad en el ambiente en que son utilizados.

Un desarrollo reciente mas radical, que debe ganar mercado son los concretos de post reactivos o post reforzados con microfibras de acero, que consisten en un producto basado en cemento Portland convencional que puede alcanzar resistencias de 800 MPa y resistencia a tracción de 50 MPa, muy superiores a los concretos de alta resistencia.

Se debe esperar una sofisticación de esta industria en el futuro, pero todavía no se vislumbra la aplicación de este tipo de tecnologías en América del Sur.

El desarrollo y uso de cualquier tipo de estos materiales, principalmente aquellos que usan residuos provenientes del sector agroindustrial o forestal, se convierten en la aplicabilidad de los materiales del futuro en las estructuras rurales, ya que este tipo de compuestos, busca mejorar principalmente condiciones de confort térmico, a través del mejoramiento de sus características térmicas implícitas.

El mejorar las condiciones térmicas de las estructuras, principalmente aquellas que se encuentran ubicadas en climas tropicales y subtropicales ha sido y será desafiante, en el sentido de que estas estructuras son abiertas con condiciones internas difíciles de controlar, a diferencia de las estructuras en países europeos y en Estados Unidos que son en su mayoría cerradas; por tanto, los materiales juegan papeles importantes en la reducción de cargas térmicas y en alcanzar condiciones de confort animal que permitan mayores producciones.

En este sentido, durante la presentación del trabajo se dará a conocer los avances logrados en investigaciones que buscan mejorar las características térmicas y estructurales de los materiales, bajo empleo de materiales convencionales con subproductos o con fibras naturales y sintéticas, para lo cual se han realizado algunos adelantos.

A continuación se describirá de una manera breve, los principales tipos de materiales que se encuentran dentro de la perspectiva de utilización en el futuro:

***Materiales con gradaciones funcionales (FGM).*** De una forma general, los materiales empleados en la ingeniería tienen propiedades homogéneas; sin embargo, pueden presentar alguna anisotropía. En buena parte de los materiales, las propiedades son variables de acuerdo con las necesidades. Ese aspecto es claro en algunos materiales como el bambú, donde las porosidades en la parte interna del material son altas y van disminuyendo a medida que se acercan a la periferia o zona externa, donde se tiene un mayor contenido de fibras, haciendo

que soporte elevados esfuerzos de tensión y compresión. Las fibras de la celulosa también son mayores en su periferia. Esos abordajes tienen gran potencial en materiales de construcción, ya que permiten la optimización de los recursos.

Estos conceptos son utilizados por investigadores como John (2007); Savastano, Warden y Coutts (2003), quienes lo han puesto en práctica en la elaboración de tejas onduladas de fibrocemento y hasta en chapas planas, donde se hacen con una mayor concentración de fibras en el borde que en el centro, permitiendo una reducción del empleo de un 40% de fibras, sin alteración significativa de la resistencia a flexión, con una reducción en la energía de fractura, además, encontrando reducciones significativas en los costos de producción.

Ese tipo de abordajes, trae la necesidad de desarrollar métodos de producción adecuados para la producción de gradaciones funcionales.

***Materiales “inteligentes” o activos.*** No existe una división clara entre materiales activos o inteligentes y materiales funcionales. Los primeros son aquellos que poseen características programables y son capaces de reaccionar o adaptarse a las condiciones ambientales. Los materiales funcionales son capaces de cumplir más de una función simultánea. En la práctica muchos materiales activos son multifuncionales (Rivero, 1986).

Un material o sistema activo debe ser sensible, adaptativo y evolutivo, y se puede comportar como sensor (detector de señales), actuador (efectúa una acción sobre el ambiente), o procesador (trata de procesar datos). Ese material puede ser capaz de cambiar sus propiedades físicas como dimensiones, viscoelasticidad, color, en respuesta a solicitudes naturales. Actualmente existen varios tipos de esos materiales llamados inteligentes, que ya han encontrado aplicaciones en varios sectores, entre los cuales se pueden citar:

***Materiales electro o magneto activos.*** Son aquellos que reaccionan frente a campos eléc-

tricos o magnéticos, un ejemplo típico de estos son los piezoeléctricos. Generalmente hechos en cerámica o polímeros y son capaces de convertir energía térmica o mecánica en eléctrica.

***Materiales con memoria de forma.*** Los materiales con memoria de forma son generalmente ligas metálicas, pero también pueden ser polímeros o cerámicas. Esos materiales son capaces de cambiar su forma con aplicación de estímulos externos, pudiendo volver a la forma original cuando se les quita el estímulo, el cual puede ser variación de la temperatura, de campo eléctrico o magnético de luz o de reacción química.

***Materiales cromo activos.*** Los materiales cromo activos producen cambios de color en respuesta a una solicitud externa, tal como una diferencia de potencial, radiación ultravioleta, variación de la temperatura o de la presión. Así, por ejemplo, una ventana podrá, no solamente asegurar una función de regulación óptica o térmica al variar su transparencia, sino que también podrá variar sus funcionalidades adicionales, tales como captación y almacenamiento de energía, entre otros.

***Materiales de cambio de fase (PCM – Phase Change Materials).*** Son materiales que pasando por determinada faja de temperatura, cambian de fase, se licuafectan o se solidifican, liberando o absorbiendo energía. Dentro de esos materiales se encuentran algunos de origen inorgánicos como el  $Mn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  el  $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ , y otros orgánicos como ceras y parafinas.

Estos son muy útiles en el control de ganancias o pérdidas de calor en las estructuras, pudiendo propiciar grandes reducciones de los costos de energía de condicionamiento térmico asociados a la generación de energía.

***Materiales multifuncionales.*** Son materiales que cumplen simultáneamente más de una función. La aplicación de este concepto ha propiciado el desarrollo de nuevos materiales porosos capaces de transformar fluidos y simultáneamente resistentes a esfuerzos.

**Materiales autolimpiantes.** Una serie de materiales autolimpiantes han sido lanzados en el mercado, incluyendo vidrios, tintas y productos a base de cementos. Estos materiales operan con base en la combinación de superficies hidrofóbicas con rugosidades superficiales controladas.

### **Comentarios finales**

El tema de materiales alternativos aplicados a la construcción rural, es muy amplio, y por tanto difícil de agotar. Se entiende que un material alternativo de construcción, debe actuar simultáneamente a) mejorando las técnicas de construcción, tornándolas más económicas; b) posibilitando obras con características físicas, térmicas y acústicas y de resistencias compatibles, con el fin a que se destinan y con el clima de la región donde se desarrollan; c) reduciendo y reciclando los residuos generados de la propia agroindustria o generados de procesos productivos.

Un material alternativo en la actualidad, se puede considerar un material convencional en el futuro y viceversa, ya que los niveles de sofisticación de los materiales y las técnicas alternativas o convencionales del futuro pueden variar. El pronóstico, para un futuro breve, es que surjan materiales de construcción extremadamente inteligentes para atender la exigente demanda de los mercados. Muchos mercados nuevos llegaron a los mercados, y los ingenieros deben ser capaces de entender su funcionamiento y contribuir en la adecuación de las técnicas constructivas correctas.

Los materiales aunque sean alternativos, no significa que la calidad de estos sea inferior a los materiales convencionales. El gran desafío realmente en todos los estudios, es perseguir la idea contenida en la metodología de investigaciones y desarrollos para el reciclaje de residuos en productos pasibles y que estas metodologías sean inseridas en el proceso productivo, con el fin de buscar viabilidades económicas en la producción de nuevos materiales, ya que las viabilidades técnicas se han conseguido y se esta trabajando para descubrir cada día mas avances en este sentido.

### **Bibliografía**

- Bentur, A. and S. Mindess. 1990. Fibre reinforced cementitious composites. Elsevier, London. 449 p.
- Beraldo, A.L. 1987. Bambucreto - o uso do bambu como reforço do concreto. p. 521-530. En: Anais do XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola CONBEA, v.2. Jundiaí, São Paulo.
- Cook, D.J. 1986. Rice husk ash. In: Swamy, R.N. (ed.). Concrete technology and design. v. 3: Cement replacement materials. Blackie and Son, London. 171 p.
- Curtis, S.E. 1983. Environmental management in animal agriculture, 2<sup>nd</sup> ed. Iowa State University Press, Ames, Iowa. 407 p.
- Dantas, F.A.S. 2003. Agregados leves e concretos alternativos. Tecnologia e materiais alternativos de construção. Cap. 7. Editora da UNICAMP, Campinas, SP. 20 p.
- De Paula, M.O. 2006. Potencial da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. Tese de Mestrado em Engenharia Agrícola. Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Brasil. 60 p.
- Freire, Wesley Jorge. 2003. Materiais alternativos de construção. UNICAMP, Campinas, SP. 23 p.
- Freitas, E.G.A., E.H.V. Rodrigues, R.C.L. Araujo e I. Fay. 1998. Efeito da adição de cinzas de bagaço de cana na resistência à compressão de argamassa normal. p. 219-221. In: Anais XXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, Poços de Caldas, MG.
- Ghavami, K., e P. Barbosa. 2007. Bambu: características e aplicações. Materiais de construção e princípios de ciência e engenharia de materiais. Geraldo Cechella Isaia, São Paulo. 32 p.
- Ghavami, K., A.L. Beraldo, A. Azzini e M.A.R. Pereira. 2003. Bambu: características e aplicações. p. 253-319. In: Freire, W.J. e A.L. Beraldo (eds.).

- Tecnologias e materiais alternativos de construção. UNICAMP, Campinas.
- Gram, H.E. 1988. Durability of natural fibres in concrete. p. 143-72. In: Swamy, R.N. (ed.). Natural fibre reinforced cement and concrete. Blackie, Glasgow.
- Heinricks, H., R. Berkenkamp, K. Lempfer, and H.J. Ferchland. 2000. Global review of technologies and markets for building materials. p. 12. In: Moslemi, A.A. (ed.). Inorganic-bonded wood and fiber composite materials. In: Proceedings 7<sup>th</sup> International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference. University of Idaho, Moscow. 12 p.
- John, V.M. 2007. Materiais de construção e o meio ambiente. p. 95-118. In: Geraldo C. Isaia (ed.). Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. Ibracon, São Paulo.
- Levy, S.M. Materiais reciclados na construção civil. p. 1629-1657. In: Geraldo C. Isaia (ed.). Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. Ibracon, São Paulo.
- Mekonnen, A. and N. Hailu. 1997. Soil as building material: a study to improve aggregate stability and compressive strength of earthen materials. Tokyo, Japan, AMA - Agricultural Mechanization in Asia, Africa, Latin America. 28(3):68-71.
- Mobasher, B., H. Stang and S.P. Shah. 1990. Microcracking in fiber reinforced concrete. Cement Concrete Res. 20: 665-674.
- Osorio, J.A., F., Varon y A. Herrera. 2007. Comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibras de caña de azúcar. Rev. DYNA 153:69-79.
- Osorio, J.A., H.J. Ciro y J.M. Vélez. 2007. Estructura interna de la guadua y su incidencia en las propiedades mecánicas. Rev. DYNA 153:81-94.
- Osorio, J.A., H.J. Ciro y J.M. Vélez. 2005. Determinación de la resistencia mecánica de la *Guadua angustifolia* Kunth a tensión y cizalladura. Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín 58(1):2709-2715.
- Rivero, R. 1986. Condicionamento térmico natural: arquitetura e clima. D.C. Luzzatto Editores, Porto Alegre. 240p.
- Savastano Jr., H., P.G. Warden and R.S.P. 2003. Coutts potential of alternative fiber cement as building materials for developing areas. Cement Concrete Comp. 25(6):585-592.
- Scrivener, K. and H. Van Damme. 2004. Construction materials: from innovation to conservation. Mater. Res. Soc. Bull. 29(5): 308-310.
- Silva, H.D. 1995. Construção com terra crua: as técnicas construtivas, os modos de produção e a tipologia arquitetural decorrente. Workshop Arquitetura da Terra. Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e do Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, USO, São Paulo. p. 31-48.
- Stulz, E. and K. Mukerji. 1993. Appropriate building materials. 3<sup>th</sup> ed. Skat Publications, Intermediate Technology Publications, Reino Unido. 445 p.
- Tango, C.E.S. 1996. Dosagem de concreto. Métodos IPT, En: Anais do V Curso Internacional de Planejamento e Tecnologia da Habitação. IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Jica, São Paulo.
- Tinoco, I.F.F. 2001. Avicultura industrial: Novos conceitos de materiais, concepções e técnicas construtivas disponíveis para galpões avícolas brasileiros. Rev. Bras. Cienc. Avic. 3(1):1-25.
- Vaysburd, A.M. 1996. Durability of lightweight concrete bridges in severe environments. Concr. Int. 18(7):33-38.

## **INCORPORACIÓN DE AUTOMATISMOS EN LA MAQUINARIA AGRÍCOLA. Enrique Moltó García<sup>1</sup>**

*Doctor Ingeniero Agrónomo. Centro de Agro Ingeniería. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA). Moncada (Valencia), España. e-mail: molto@ivia.es*

### **Resumen**

Los avances científicos y tecnológicos han permitido colocar a la agricultura de los países

desarrollados en unos niveles que la sitúan muy por encima de los objetivos perseguidos anteriormente durante siglos. El abaratamiento de los componentes electrónicos ha permitido generalizar el empleo de las técnicas de automatización en la agricultura y la ganadería. Este artículo repasa los conceptos relacionados con el control automático de procesos y describe las múltiples aplicaciones de los mismos en la mecanización agraria. Por último, explica los desarrollos realizados por el Centro de Agroingeniería del Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (España) en este sentido.

**Palabras claves:** Sensores, control de procesos, máquinas, tecnologías de la información, sostenibilidad.

### **Abstract**

### **AUTOMATISMS INCORPORATION IN THE AGRICULTURAL MACHINERY**

Scientific and technological advances have allowed the agriculture of the developed countries to be situated above the levels of development previously prosecuted for centuries. The low price of electronic components has permitted to generalize the employment of automation technologies in agriculture and livestock farming. This article revises the concepts related to automatic control of processes and describes multiple applications of these in agricultural mechanization. At the end, different developments in this topic produced by Centro de Agroingeniería of Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (Spain) are explained.

**Key words:** Sensors, process control, machines, information technologies, sustainability.

### **Introducción**

Los avances científicos y tecnológicos han permitido colocar a la agricultura de los países desarrollados en unos niveles que la sitúan muy por encima de los objetivos perseguidos anteriormente durante siglos, consiguiendo una variedad de productos de mejor calidad, y un alivio

considerable del esfuerzo físico y de la dedicación que presta el agricultor. La evolución de este proceso se ha acelerado en los últimos treinta años, en los que se ha pasado de un objetivo de producción para abastecer a la población, a una situación excedentaria que genera graves problemas sociopolíticos y medioambientales.

En los últimos años se ha incrementado la presión sobre la seguridad alimentaria, la salud humana y la protección ambiental. En paralelo, la progresiva globalización de los mercados es inevitable, lo que significa que ciertos cultivos, tradicionales de determinadas regiones, dejan de ser económicamente rentables sin subsidios. Actualmente, la agricultura no sólo tiene que proveer los alimentos que los consumidores necesitan, a un precio razonable, en un mercado global, sino que, además, los consumidores se preocupan sobre cómo se han producido estos alimentos. De hecho, empiezan a aparecer los subsidios para la conservación medioambiental.

Los excedentes de producción de frutas y hortalizas y el aumento del poder adquisitivo del consumidor, han producido un considerable aumento de la exigencia de calidad para todos los productos agrarios en los países desarrollados. Si a ello añadimos la progresiva apertura de los mercados mundiales, las únicas alternativas para mantener la competitividad son:

- abaratar los costos de producción mediante la mecanización de las labores de campo y poscosecha,
- ofrecer productos de mayor calidad que la competencia, convenientemente diferenciados, en los que pueda garantizarse la calidad de manera objetiva.

Como consecuencia de esta evolución, han aparecido nuevas orientaciones técnicas, económicas, financieras y sociológicas en la agricultura. Entre ellas se destaca la producción integrada. En los sistemas de producción integrada se intenta mantener la perspectiva de todo el proceso productivo, desde la preparación del

terreno hasta la comercialización del producto, optimizando el aprovechamiento de los medios de producción y manteniendo un registro detallado de las actividades realizadas, con el fin de garantizar la trazabilidad del producto.

La necesidad de trazabilidad es una consecuencia directa de la demanda de seguridad y calidad en la alimentación: si surge un problema higiénico-sanitario o de ausencia de calidad, los sistemas trazables permiten identificar qué partidas han sido afectadas y ayudan a la detección del origen del problema. Asimismo, los sistemas trazables pueden ser inspeccionados por entidades de certificación, para garantizar la calidad del producto.

La investigación agroalimentaria en general intenta responder a estos nuevos retos. En particular, la investigación en ingeniería y la aplicación de las tecnologías de la información permite llevarlas a la práctica y conseguir la reducción de los costes totales de producción, el incremento y el aseguramiento de la calidad y la reducción del impacto medioambiental de la actividad de este sector.

### La electrónica aplicada al control de los medios de producción. Sensores y sistemas de control automático

El control automático de los procesos industriales se realiza, desde hace varias décadas, utilizando diversas tecnologías electrónicas e informáticas, buscando la optimización de la producción y la racionalización de la gestión de los recursos. El abaratamiento de los componentes electrónicos ha permitido generalizar el empleo de las técnicas de automatización en la agricultura y la ganadería. En la actualidad no es raro ver incorporados sistemas de éste tipo en actividades tan diversas como la producción animal, los sistemas de riego, los tractores o la maquinaria para tratamientos fitosanitarios.

El control de un proceso consiste en ejecutar las acciones pertinentes para conservar o modificar su estado inicial, en función de unas necesidades previamente establecidas. Por tanto, es necesario:

a) conocer los parámetros físicos que describen el estado del sistema, mediante una serie de sensores; b) determinar las acciones necesarias según una estrategia de control y enviar órdenes a dispositivos actuadores para modificar el estado del sistema.

Un sistema de adquisición de datos consiste en un conjunto de elementos de software y hardware, capaz de acondicionar y almacenar las señales de los sensores para su tratamiento informático. Un actuador es un elemento que se encarga de ejecutar las órdenes dadas por el sistema de control (por ejemplo, un motor eléctrico, una electroválvula que accione cualquier mecanismo, etc).

El sistema de control, a partir de la información que procede de los sensores, emplea una serie de normas preestablecidas (estrategia de control), para decidir una respuesta y transmite las órdenes necesarias a los actuadores para su ejecución.

Así pues, un sistema de control se encarga de modificar el estado de un sistema físico, según una estrategia de control (Figura 1). El sistema de control recibe información del medio físico a través de unos sensores, y produce una o varias señales de salida sobre unos actuadores que modifican el sistema físico.

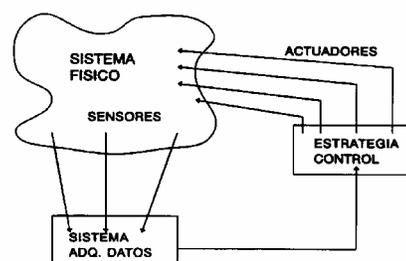


Figura 1. Esquema básico de un sistema de control.

Por ejemplo, para controlar el microclima de un invernadero hay que conocer la temperatura, humedad relativa del aire interior y exterior, concentración de CO<sub>2</sub>, temperatura del suelo o

sustrato, etc., de modo que se mantengan en unos intervalos adecuados para el desarrollo de las plantas. Para ello se instala un conjunto de sensores, agrupados en un sistema de adquisición de datos, que proporcionan esta información a un sistema de control, que ha de ejecutar unas acciones correctoras previamente establecidas (lo que se denomina una estrategia de control) a través de los actuadores, que permiten abrir o cerrar ventanas, conectar o desconectar humidificadores, iniciar o finalizar el riego, etc. Se llama sensor o captador a todo dispositivo capaz de realizar una medida directa o indirecta de un fenómeno físico. Se denomina transductor a todo sistema capaz de transformar una magnitud física en otra más fácilmente observable o manipulable.

Otro ejemplo, la dirección del movimiento de un tractor (sistema físico) se modifica a través de la posición de las ruedas (actuadores) mediante el mecanismo de dirección (sistema de control), en función de la posición del tractor en la carretera, que conocemos a través de nuestra visión (sensores).

### **Aplicación de los avances tecnológicos en la mecanización agraria**

Se pueden distinguir dos líneas de desarrollo en el empleo de sistemas electrónicos de control en la maquinaria agrícola:

- Equipamiento de máquinas tradicionales (tractores, máquinas arrastradas, automotrices, etc.) con elementos "inteligentes", que permiten controlar las condiciones operativas y de funcionamiento. En la mayoría de los casos, estos elementos suelen ser pasivos, es decir, se limitan a dar información al operario de eventuales anomalías a través de diversos indicadores, dejando que sea el conductor quien decida la intervención correctora.

- Al mismo tiempo, se están introduciendo cada vez más los dispositivos capaces de intervenir directamente, mediante los oportunos actuadores, para llevar a la máquina a su estado

óptimo de funcionamiento. El fin último de esta tendencia es el diseño de máquinas 'inteligentes', en la que la intervención humana se limita a la supervisión.

A continuación, sin pretender ser exhaustivos, indicaremos algunas aplicaciones que ya están en el mercado o en una avanzada fase de investigación.

**Tractores.** La investigación para la mejora de las características de los tractores está orientada a la disminución del consumo de combustible, el aumento de la eficiencia del motor, la reducción de los tiempos muertos y la protección ambiental. Actualmente se pueden monitorizar, empleando los sensores adecuados, los siguientes parámetros:

- velocidad de giro del motor,
- consumo de combustible,
- velocidad angular de las ruedas motrices,
- velocidad real de avance, para mejorar la distribución y ahorrar enmiendas, fertilizantes, semillas y tratamientos fitosanitarios,
- par en la toma de fuerza,
- fuerza de arrastre y la profundidad de trabajo para conseguir una mejor uniformidad en el suelo labrado.

Con ellos se puede medir:

- el resbalamiento de ruedas motrices,
- el consumo de combustible instantáneo y acumulado,
- la potencia desarrollada por el motor,
- la capacidad de trabajo,
- la eficiencia de las labores,
- el requerimiento energético de los aperos,
- la autonomía de combustible.

Los elevadores con control electrónico sustituyen a los sistemas tradicionales hidráulicos de carga y profundidad utilizando sensores de tiro en los puntos de enganche inferiores y de posición, con lo que se eliminan todos los mandos mecánicos, lo que hace que el nuevo sistema sea extremadamente fiable e insensible al desgaste en el tiempo. Asimismo, el sistema electrónico tiene mayor rapidez de respuesta y añade funciones

operativas tales como la limitación de la altura máxima de elevación del apero, para evitar ángulos excesivos para la junta cardán, el bloqueo del elevador en la posición de máxima elevación o la posibilidad de accionamiento del elevador desde fuera de la cabina, para facilitar el enganche y desenganche del apero, lo que aumenta la ergonomía y seguridad de la operación.

También, se han automatizado las operaciones de bloqueo y desbloqueo del diferencial aumentando la seguridad en la conducción. En algunos tractores también se activa automáticamente la doble tracción en la frenada, lo que aumenta su eficiencia y se optimiza el efecto de retención del motor.

Igualmente se emplea el control electrónico para la protección de la transmisión. Para ello se colocan sensores capaces de medir el resbalamiento de los embragues, modulando la presión de aceite que los accionan para mantenerlo alrededor del 2%, independientemente de la carga aplicada.

Una nueva posibilidad es la regulación global de la transmisión, que consiste en elegir la combinación óptima de relación de transmisión (marcha) y revoluciones del motor. El sistema se basa en la definición previa, a partir de las gráficas de par-velocidad del motor y las curvas de isoconsumo específico, de las áreas de consumo mínimo.

Estas curvas se introducen en el controlador que, mediante los sensores de régimen del motor, par suministrado y velocidad de giro de las ruedas, calcula la relación de transmisión que se está empleando. Conocido el punto de funcionamiento en la curva par-rpm y en la de consumo específico, la unidad de control verifica si este punto está entre los de consumo específico mínimo y, en caso contrario, busca sobre la curva de consumo mínimo otro punto de prestaciones equivalentes. En este caso, el instrumento indica en una pantalla el régimen de motor y marcha correspondiente a dicho punto óptimo.

Aunque todavía no existen dispositivos comercializados que permitan el guiado del tractor

sin necesidad de un conductor, existen actualmente diversas líneas de investigación para conseguir este propósito y, sin duda alguna, en los próximos años veremos sistemas de guiado automático. Actualmente la investigación se centra en:

- Guiado referido a las acciones precedentes: fundamentalmente están basados en sensores que exploran la línea de separación entre la superficie labrada y la no labrada (palpadores mecánicos, eléctricos, ópticos, acústicos, etc). Tienden a amplificar cualquier irregularidad producida anteriormente, lo que hace necesaria una intervención para corregir estos defectos después de un cierto número de pasadas.
- Guiado sobre una línea de referencia: utilizando rayos láser, o hilos eléctricos enterrados (filoguiado). El filoguiado ya se está empleando con éxito en la industria, aunque en agricultura presenta los problemas derivados del tipo de suelo sobre el que circulan los tractores y la necesaria colocación a una cierta profundidad, para no interferir con las raíces de las plantas ni con las labores normales.
- Guiado sobre puntos fijos de referencia situados en la parcela, del mismo modo que funcionan los navegadores automáticos por satélite en náutica. También se emplea esta técnica para el guiado de equipos móviles en invernaderos.

**Sembradoras y abonadoras.** En el mercado existen diversos sistemas para la detección de semillas. Se basan, generalmente, en sensores fotoeléctricos colocados en cada uno de los tubos de distribución. El paso de las semillas interrumpe un rayo luminoso, lo que hace que el receptor envíe un impulso eléctrico al panel de control. Este, mediante indicadores luminosos, informa al operario el funcionamiento del flujo de semillas de cada unidad de siembra.

Sistemas más sofisticados, conocida la distancia entre filas y la velocidad de siembra, determinan la densidad media de semillas por hectárea.

Los últimos modelos de sembradoras regulan dicha densidad conociendo la velocidad de avance mediante un sensor de radar. Otra característica que se les añade es la del control automático de la "línea de referencia" ("tramline"), que consiste en dejar, a intervalos oportunos, líneas sin sembrar, que coinciden con las huellas de las ruedas del tractor. De este modo se reduce la zona de compactación. El controlador deja automáticamente las líneas de referencia a la distancia que el operario ha fijado previamente.

También se aplican en la tolva algunos sensores de nivel, para informar al operario de la necesidad de abastecimiento. El control automático de la profundidad para sembradoras y cultivadores se realiza mediante ruedas palpadoras, provistas de un muelle, que siguen el perfil del suelo. Estas ruedas llevan potenciómetros lineales, que determinan su posición. También se emplean sensores de ultrasonidos para conocer la profundidad de la labor.

Las máquinas de distribución de fertilizantes granulados disponen de sistemas que permiten mantener constante la cantidad de producto que se quiere distribuir, independientemente de la velocidad de avance. Estos dispositivos consisten en un sensor magnético para medir la velocidad de rotación de la rueda delantera del tractor y un servocomando eléctrico que regula el flujo del distribuidor. El sistema de control se encarga de variar el caudal del producto en función de la velocidad de avance. Estos sistemas requieren un tarado cuidadoso, ya que la regulación del distribuidor depende de la naturaleza y granulometría del producto.

***Máquinas para la distribución de productos fitosanitarios.*** El control en la aplicación de los productos fitosanitarios es importante por motivos ecológicos y económicos. Los excesos en las dosis y la inexactitud de la localización de los productos sobre las plantas, hacen que una gran parte de ellos se vierta sobre el suelo, el agua y los trabajadores que los aplican, contaminando el medio y dando lugar a diversas intoxicaciones. Estas pérdidas, además, tienen una innegable repercusión económica sobre los agricultores.

Generalmente, un equipo de tratamiento consta de un depósito, una bomba, unos conductos de distribución y unas boquillas pulverizadoras. El agricultor elige la dosis según las recomendaciones del fabricante, el cultivo que trate y las características de su suelo. Realizado esto, selecciona la presión, el diámetro de la boquilla que empleará y la velocidad de trabajo que le proporcionarán dicha dosis.

Los dos primeros factores se ajustan de forma relativamente precisa y fácil, pero es prácticamente imposible trabajar a la velocidad deseada de avance, debido a las variaciones en el deslizamiento de las ruedas y a las modificaciones de la pendiente del suelo. Esto hace que determinadas zonas reciban una cantidad excesiva de producto y en otras no se llegue al nivel deseado.

Con mayor o menor variación, el sistema de control electrónico de la distribución del tratamiento consta de sensor de caudal, sensor de velocidad, circuito de control y controladores de caudal (servoválvulas, válvulas proporcionales, etc.). Actualmente estos sistemas son capaces de mantener automáticamente los valores de distribución deseados, empleando técnicas de control en bucle cerrado.

La velocidad de avance se suele conocer gracias a los radares de efecto Doppler. Otros sensores de velocidad que se emplean son las ruedas locas provistas de captadores magnéticos inductivos.

Asimismo se incorporan caudalímetros que permiten conocer tanto la dosis instantánea que se aplica, como la dosis acumulada, o la cantidad de producto que queda en el tanque.

Otra incorporación consiste en sensores para regular la inclinación de la barra, con el fin de mantener su horizontalidad.

Últimamente han aparecido máquinas de pulverización para frutales provistas de sensores sonar que son capaces de interrumpir la aplicación del producto cuando no hay masa vegetal entre dos árboles, o ajustar la dosis en función de la masa vegetal.

**Máquinas para la recogida de forraje.** En dichas máquinas se están incorporando detectores de pequeños objetos metálicos que, aunque no dañan la máquina, podrían constituir un peligro para los animales. Para ello se dispone de un generador de campo magnético y sensores del mismo. El paso de material ferroso genera una variación del campo que se detecta y se indica al operario.

Otro sistema más sofisticado consiste en un protector de plástico contra el que choca el producto. Un detector acústico se encarga de distinguir el ruido del impacto de los objetos contra el mismo, lo que permite identificar objetos no ferrosos recogidos accidentalmente por la máquina. Ambos dispositivos pueden accionar instantáneamente un deflector, que desvía temporalmente el producto hacia el terreno.

En las empacadoras, los sensores de presión y de dimensiones de la paca, permiten regular exactamente las dimensiones y densidad de las pacas producidas.

**Cosechadoras de granos.** Además de los sensores de velocidad y par que se incorporan a los distintos órganos de la máquina para indicar situaciones anómalas, se están comercializando ya monitores para el control de las pérdidas de grano.

Existen diversas formas de medir el caudal volumétrico y másico. La información sobre el rendimiento instantáneo puede unirse a la de situación que se obtiene mediante GPS, para generar los mapas de rendimiento. Asimismo se monitoriza la velocidad de avance de la máquina y el nivel de grano de la tolva (generalmente empleando sensores de presión).

También están incluyéndose sensores de cuerpos extraños, similares a los ya vistos en las máquinas recolectoras de forrajes y sensores de altura de la barra de corte.

Se está investigando en palpadores mecánicos dispuestos sobre la barra, capaces de distinguir la línea de separación entre las plantas cortadas y no cortadas, o bien la línea de las plantas y que

actúan sobre el dispositivo hidráulico de dirección de la máquina, como un paso hacia la total automatización del guiado.

**Robótica agrícola.** La difusión y éxito de las aplicaciones robotizadas, el abaratamiento de los componentes electrónicos, el alto costo que representa la mano de obra y la tendencia a evitar trabajos penosos a los operarios han sido las principales razones que han impulsado el desarrollo de robots destinados a la agricultura.

Los robots que han de trabajar en un entorno natural o que tratan con productos naturales, se han de enfrentar con problemas mucho más complicados que los industriales. Entre ellos cabe citar:

- la gran variabilidad de las condiciones del entorno natural (luminosidad, temperatura, etc), en contraposición a la posibilidad de crear un medio artificial prácticamente constante cuando se trabaja en la industria o laboratorio,

- la gran diversidad de formas, tamaños y/o colores de los productos naturales (desde agrupaciones de células a frutas),

- la irrepetibilidad de los sucesos y la necesidad de un control "inteligente" del movimiento del robot. Por ejemplo, no se puede programar la situación de los frutos en un árbol, mientras que un robot de soldadura siempre pone los puntos en el mismo lugar del espacio, por lo que no necesita visión artificial. Pese a la complejidad que esto supone y a la menor dotación de medios para la investigación en robótica agrícola, en la actualidad existen proyectos muy avanzados para la robotización de algunas labores, tales como la micropropagación, la recolección o el ordeño.

### **Tecnologías aplicadas en la agricultura de precisión**

**Los sistemas de ubicación ('posicionamiento') geográficos (GPS y DGPS).** La Agricultura de Precisión comienza en los años setenta, cuando el Departamento de Defensa Norteamericano crea el Sistema de Posicionamiento

Global (GPS), para dirigir los misiles a sus blancos y permitir que los submarinos determinen su posición, empleando satélites que orbitan a unos 18.000 km sobre la tierra y transmiten información de su posición orbital y de tiempo. Los receptores GPS situados en tierra interpretan las señales de al menos 3 satélites para calcular la posición actual mediante triangulación. Para evitar otras fuentes de error, se han desarrollado los DGPS (GPS diferencial), que utilizan una base terrestre fija, de posición conocida, para corregir dicho error y alcanzar la precisión requerida.

**Los mapas de rendimiento.** Los mapas de rendimiento se obtienen a partir de los datos recopilados por una cosechadora que incluye un sistema DGPS junto con un sistema de sensores que calculan la cantidad de grano cosechado. Una vez obtenidos los datos y almacenados, éstos pueden ser procesados por medio de varias técnicas geoestadísticas (generalmente Kriging) y transformados en un mapa de rendimiento. A partir de los mapas de rendimiento, se deducen las necesidades de las restantes operaciones de cultivo.

**Implementación de las técnicas de aplicación variable.** Las técnicas de aplicación variable (VRA, Variable Rate Applications) consisten en la aplicación a medida de un tratamiento a una pequeña zona, en vez de tratar toda la parcela de manera uniforme. Las VRA se basan en el uso del mapa de tratamiento. Si bien el conseguir el mapa de tratamiento es relativamente sencillo, la optimización de su uso tiene algunas complicaciones, las cuales están intentando resolver las investigaciones actuales.

En esencia todas las VRA funcionan de manera similar. El mapa de tratamiento se almacena en una memoria, o en un disquete, y se inserta en el equipo del tractor. El equipo de a bordo emplea DGPS para determinar su ubicación y accede al mapa de tratamiento almacenado. El ordenador de a bordo compara ambas informaciones, establece cuál es el nivel de aplicación o acción que tiene que realizarse en ese punto concreto de la finca y envía las señales apropiadas al sistema de control de maquinaria. El operador, si puede

observar en una pantalla dentro de la cabina del tractor qué tasa de aplicación se está utilizando, no necesita realizar ningún ajuste. Actualmente se pueden realizar aplicaciones variables de:

- Fertilizantes. La tecnología VRA para fertilizantes está hoy en día razonablemente desarrollada desde el punto de vista de hardware y software. No obstante, todavía no se han desarrollado suficientemente los sistemas expertos para aconsejar el tipo y dosis de abono en función de cada tipo de suelo y cultivo.

- Tratamientos fitosanitarios. El control de plagas implica el uso de GPS y el rastreo para controlar insectos o enfermedades. Existen aplicaciones comerciales en las que el operario emplea GPS para realizar un mapa del terreno infectado y anotar las localizaciones con detalles específicos sobre el alcance de la plaga. A partir de estos datos se crea un mapa de tratamiento con las necesidades de insecticidas y se carga en el controlador del equipo de tratamiento. El equipo, conectado a un receptor GPS, aplica los productos sólo en aquellas zonas donde es necesario y en la cantidad que se necesita.

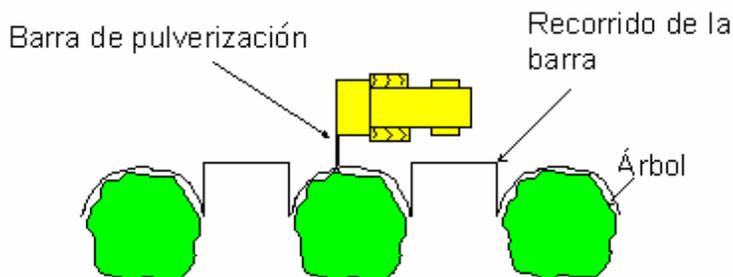
### **Algunos ejemplos de las aplicaciones de investigación en agroingeniería**

A continuación, sin pretender ser exhaustivos, indicaremos algunas aplicaciones sobre las que está trabajando el Centro de Agroingeniería del Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA). Algunas de ellas ya están en el mercado o se encuentran en una avanzada fase de investigación.

**Sistema para la pulverización de árboles a distancia constante y realización de tratamientos de parcheo.** La idea de desarrollar este prototipo surgió como respuesta a la necesidad de tratamiento del minador de las hojas de los cítricos (*Phyllocnistis citrella*, Stainton), una plaga que en el verano de 1995 se manifestó como potencialmente importante en árboles en crecimiento. El hecho de que esta plaga ataque a brotaciones vegetativas en desarrollo, que se encuentran presentes en el

árbol durante amplios periodos de verano, obliga a realizar múltiples tratamientos. Habitualmente, el agricultor realiza los tratamientos para combatir esta plaga, con un equipo hidráulico con manguera y "pistola" asistido por un aplicador.

Con la idea de realizar un tratamiento homogéneo y de evitar que el aplicador estuviera en contacto directo o cercano al pesticida, se diseñó un equipo capaz de pulverizar siguiendo automáticamente el contorno del árbol (Figura 2).



**Figura 2.** Forma de actuación del prototipo 1. La barra de pulverización sigue el contorno de los árboles automáticamente.

Se partió de un equipo de pulverización hidráulica, formado por una barra horizontal con un grado de libertad, a la que se añadió una barra vertical dotada de boquillas, un sensor de ultrasonidos para medir la distancia del equipo al árbol, una electroválvula que permitiese dejar de pulverizar en ausencia de vegetación, y un sistema mecánico que permitiese seguir el perfil del árbol mientras que el equipo avanza a lo largo de la calle. El conjunto se gobierna a través de un microcontrolador.

La máquina está dotada de un mecanismo que posibilita el acercamiento o alejamiento de la barra vertical al árbol, a través de la barra horizontal, que se extiende o retrae por accionamiento de un motor eléctrico. Este movimiento es coordinado por la unidad de control, que recibe información de la distancia entre el árbol y la máquina gracias al sensor de ultrasonidos. En el espacio entre árboles, detectado gracias a que la distancia entre la máquina y el árbol se hace muy grande, la barra se retrae y deja de pulverizar, debido al accionamiento de una electroválvula.

Una adaptación de esta máquina, permite la automatización de los tratamientos cebo a bajo

volumen, mediante la aplicación del producto de manera intermitente. El prototipo ha funcionado correctamente en campo durante dos campañas trabajando con diferentes configuraciones de árboles, en el control de poblaciones de *Ceratitis capitata*. Los ensayos de campo dieron resultados suficientemente buenos para propósitos comerciales.

Dado que los tratamientos cebo en parches producen un muy bajo impacto ambiental, podemos llegar a la conclusión de que los tratamientos realizados con el equipo diseñado, son una importante alternativa a las actuales prácticas de control de plagas (Figura 3).

#### ***Sistema de regulación de la pulverización en función de la masa vegetal.***

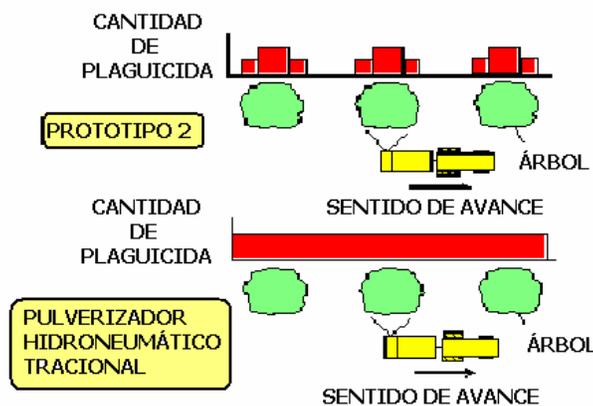
La idea de desarrollar este prototipo surgió como respuesta a la necesidad de dosificar el plaguicida en función de la cantidad instantánea de hojas que se encuentra el equipo en su avance. Se utiliza la medida de la distancia del equipo al árbol como referencia de la cantidad instantánea de follaje. El sistema desarrollado se basa en el principio de que la distancia que existe entre el equipo y el árbol es inversamente proporcional al volumen

de masa vegetal; es decir, cuanto mayor es el árbol, más cerca está su follaje de la trayectoria del pulverizador. En la Figura 4 se muestra la cantidad de producto aplicado por esta máquina y por un pulverizador hidroneumático tradicional a lo largo de una fila de árboles. Como se observa, el sistema aplica menos cantidad de producto al comienzo y

final de cada árbol, y además, no trata en el espacio entre árboles, lo que produce un doble ahorro. Los estudios económicos realizados demuestran que, dependiendo del tamaño y separación de los árboles, se pueden conseguir un ahorro de producto de entre el 30 y el 50% en las plantaciones de olivos.



**Figura 3.** Máquina automática para realizar tratamientos de parcheo.



**Figura 4.** Cantidad de producto aplicado por el prototipo 2 y por un turboatomizador tradicional.

La caja de control permite la apertura o cierre de sectores e informa sobre el estado del equipo. Asimismo permite la comprobación del circuito electrónico.

**Robótica agrícola.** Uno de los primeros proyectos en los que trabajó el Centro de Agroingeniería del IVIA a comienzos de los años

90 fue en el robot de recolección CITRUS (Figura 5). Posteriormente, también trabajó en el desarrollo de un robot para la eliminación de malas hierbas mediante métodos no químicos de escarda. Aunque ambos robots quedaron en fase de investigación, han sido la base y el campo de pruebas para el desarrollo posterior de sistemas y máquinas inteligentes.



**Figura 5.** El robot de recolección "Citrus".

***Tecnología poscosecha: La inspección automática de productos mediante visión artificial.*** La incorporación de nuevas tecnologías al sector de la maquinaria de confección para los almacenes hortifrutícolas permite aumentar su competitividad, así como frenar la importación de tecnología extranjera, proveniente fundamentalmente de EE.UU.

El empleo de la visión artificial para la inspección de productos agrícolas se ha extendido durante los últimos años. Actualmente existen sistemas automáticos basados en estas técnicas capaces de clasificar frutos por tamaño, color, presencia de defectos, etc. La detección de golpes y magulladuras es crucial para la evaluación de la calidad. En naranjas, melocotones y las manzanas también es de gran interés detectar los pedúnculos largos, con el fin de cortarlos para evitar daños a otra fruta (melocotones o cítricos), o porque su ausencia podría implicar una pérdida de calidad (manzanas). Además, el pedúnculo puede ser confundido con imperfecciones o daños reales de la piel.

El trabajo del Centro de Agro Ingeniería del IVIA en los últimos años, se ha dedicado a desarrollar técnicas de análisis de imagen para medir rápidamente varios parámetros de calidad de naranjas, mandarinas, melocotones y manzanas, tales como el color, la identificación y

cuantificación de las áreas dañadas en la piel, la presencia y posición del pedúnculo, etc.

Los sistemas de visión artificial desarrollados en el IVIA requieren un sencillo entrenamiento por parte de un operario, utilizando una muestra representativa de la fruta que se va a clasificar. El operario selecciona diferentes ventanas sobre las imágenes y asigna todos los puntos de la ventana a una de las clases predeterminadas: fondo, piel, daño, pedúnculo, color secundario, etc. Posteriormente, mediante técnicas estadísticas, se crea un modelo mediante el cual, durante el trabajo en línea, se asignará automáticamente cada uno de los puntos de la imagen de una fruta a una de dichas clases. Durante el funcionamiento automático, empleando diferentes técnicas de análisis de imagen, se aíslan cada una de las regiones correspondientes a dichas clases y se calculan determinados parámetros geométricos (posición, tamaño, forma), a través de los cuales se decide a qué categoría pertenece la fruta. Por último, estos datos se envían al sistema que manipula la fruta y que la sitúa junto con las demás fruta de la misma categoría.

Los resultados obtenidos han demostrado que el sistema funciona perfectamente para determinar el tamaño y la forma de todas las frutas ensayadas (peras, manzanas, cítricos y melocotones). Asimismo, detecta correctamente el

pedúnculo de las mismas y no tiene problemas en la detección del color secundario en manzanas bicolors y melocotones. En la actualidad se está mejorando la detección e identificación de defectos. La clasificación de objetos de pequeño tamaño, como son las aceitunas, los gajos de mandarina o los granos de granada presentan la peculiaridad de que el sistema de visión artificial actúa sobre imágenes en las que aparecen varios frutos y debe estimar la calidad de cada uno de ellos. Las aceitunas, los gajos de mandarina o los granos de granada precisan de una clasificación adecuada y una calidad homogénea en los lotes.

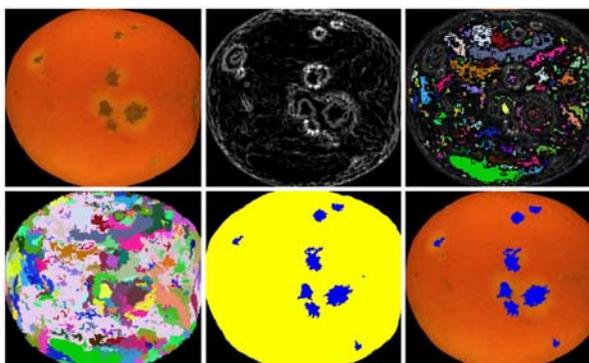
El Centro de Agro ingeniería del IVIA desarrolló una máquina automática para la clasifi-

cación de aceitunas de mesa, con una productividad de 2.500 kg/h, capaz de ser compatible con los requerimientos de las normas ISO 9002. Asimismo ha desarrollado una máquina de selección de granos de granadas que en la actualidad está en explotación comercial y en estado avanzado de investigación se encuentra la máquina clasificadora de gajos (Figura 6).

En la actualidad, los trabajos del Centro de Agro Ingeniería del IVIA en máquinas basadas en sistemas de análisis de imágenes incluyen no solo el espectro visible, sino también el ultravioleta y el infrarrojo cercano (Figura 7). De esta manera se están diseñando sistemas capaces de ir más allá de la visión humana en la detección de la calidad.



**Figura 6.** Máquina para la clasificación automática de gajos de mandarinas.



**Figura 7.** Desarrollo de sistemas de visión artificial para la identificación de defectos de la piel en frutas y hortalizas.

## **El impacto social de las nuevas tecnologías**

Muchas veces nos interrogamos sobre la repercusión social que puede tener la introducción de estas nuevas tecnologías en el sector y se debe dejar sin comentar este aspecto en el artículo. Es evidente que la automatización de las tareas de inspección conlleva la reducción de la intervención humana, con la consiguiente reducción de las necesidades de mano de obra no cualificada en el proceso productivo, aunque, simultáneamente, aumenta la productividad y la competitividad de las empresas usuarias de esta tecnología.

Al mismo tiempo, no hemos de olvidar que en todos los países competidores se están realizando esfuerzos similares para aumentar la competitividad del sector, por lo que si en un país no se realiza trabajo parecido, o bien se pierde competitividad, o bien se acaba por depender tecnológicamente del exterior, por lo que renunciar a la innovación tecnológica no parece oportuno.

Por estas razones, las sociedades modernas han de ser capaces de conseguir que los beneficios que obviamente trae la automatización (mejora de la productividad, mejora y homogenización de la calidad, disminución de riesgos laborales, eliminación de tareas penosas o tediosas) reviertan también en la creación de nuevos puestos de trabajo más cualificados (construcción de sensores y automatismos, mantenimiento, reparaciones, etc.) y en la mejora general del bienestar social.

## **Bibliografía**

Alamar, M.C., E. Bobelyn, J. Lammertyn, B.M. Nicolai and E. Moltó. 2007. Calibration transfer between NIR diode array and FT-NIR spectrophotometers for measuring the soluble solids content of apple. *Postharvest Biol. Technol.* 45(1):38–45.

Aleixos, N., J. Blasco, F. Navarrón and E. Moltó. 2002. Multispectral inspection of citrus in real-time using machine vision and digital signal processors. *Comput. Electron. Agr.* 33(2):121-137.

Blasco, J., N. Aleixos, J. Gómez and E. Moltó. 2007. Citrus sorting by identification of the most common defects using multispectral computer vision. *J. Food Eng.* 83 (3):384-393.

Blasco, J., S. Cubero-Garcia, S. Alegre-Sosa, J. Gómez-Sanchis, V. López-Rubira and E. Moltó. 2008. Short communication. Automatic inspection of the pomegranate (*Punica granatum* L.) arils quality by means of computer vision. *Spanish J. Agric. Res.* 6(1):157-163.

Blasco, J., S. Cubero, R. Arias, J. Gómez, F. Juste and E. Moltó. 2007. Development of a computer vision system for the automatic quality grading of mandarin segments. *Lect. Notes Comput. Sci.* 4478:460-466.

Blasco, J.; N. Aleixos and E. Moltó. 2003. Machine vision system for automatic quality grading of fruit. *Biosyst. Eng.* 85(4): 415-423.

Chueca, P., C. Garcera, E. Moltó and A. Gutierrez. 2008. Development of a sensor controlled sprayer for applying low-volume bait treatments. *Crop Prot.* 27(10):1373-1379.

Gómez-Sanchis, J., L. Gómez-Chova, N. Aleixos, G. Camps-Valls, C. Montesinos-Herrero, E. Moltó and J. Blasco. 2008. Hyperspectral system for early detection of rottenness caused by *Penicillium digitatum* in mandarins. *J. Food Eng.* 89(1):80–86.

Gutierrez, A., J.A. Burgos and E. Moltó. 2007. Pre-commercial sorting line for peaches firmness assessment. *J. Food Eng.* 81(4):721-727.

Gutierrez, A., J.A. Burgos, C. Garcerá, A.I. Padilla, C. Zarzo, C. Chirivella, M.L. Ruiz and E. Moltó. 2007. Optimization of an aroma sensor for assessing grape quality for wine making. *Spanish J. Agric. Res.* 5(2):157-163.

Gutiérrez, A; J.A. Burgos and E. Moltó. 2008. Development of an immunosensor based on the measurement of fluorescence. *Sensor Actuat. B-Chem.* 131(2):621-626.

Moltó, E. and J. Blasco. 2003. Detección automática y no destructiva de semillas de mandarina mediante resonancia magnética. Levante Agrícola. Especial Postcosecha. (366):204-212.

Steinmetz, V., J.M. Roger, E. Moltó and J. Blasco. 1999. On-line fusion color camera and spectrophotometer for sugar content prediction of apples. J. Agr. Eng. Res. 73(2):207-216.

## **SENSORES PARA LA DETERMINACIÓN NO DESTRUCTIVA DE LA CALIDAD DE FRUTAS Y HORTALIZAS. Enrique Moltó García<sup>1</sup>**

*Doctor Ingeniero Agrónomo. Centro de Agro Ingeniería. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA). Moncada (Valencia), España. e-mail: molto@ivia.es*

### **Resumen**

Las operaciones de clasificación y envasado son las que precisan de una mayor atención para conseguir incrementar el grado de automatización de los almacenes actuales. Además, por lo general, se trata de tareas costosas, repetitivas, y tediosas para las personas. Los sistemas automáticos de clasificación de frutas y hortalizas se basan en sensores electrónicos que muchas veces simulan a los sentidos humanos. La disminución de los costos de los componentes electrónicos y el aumento considerable de sus prestaciones, hacen que la inspección automática del producto esté cada vez más introducida en el sector. Los sistemas automáticos de inspección no sólo permiten la selección a alta velocidad, sino también la aplicación de criterios objetivos de calidad que se mantienen constantes en el tiempo. Actualmente existen multitud de aplicaciones de sistemas de visión artificial con el fin de inspeccionar los procesos o supervisar los productos finalizados. El desarrollo de nuevos sensores, unido al avance de la electrónica y la informática, permite actualmente procesar una gran cantidad de datos en tiempo real, referidos no sólo a los aspectos visibles de la calidad, sino también a aspectos que no puede observar el ser humano sin la ayuda de instrumentos o sin estropear el producto.

**Palabras claves:** Calidad, inspección automática, sensores, frutas y hortalizas.

### **Abstract**

## **SENSORS FOR NON DESTRUCTIVE QUALITY OF FRUITS AND VEGETABLES**

The operations of classification and packing are those that require a major attention to increase the degree of automation of packing houses. In addition, these tasks are costly, repetitive, and tedious for the operators. Automatic systems for the classification of fruit and vegetables are based on electronic sensors, which often simulate the human senses. The decrease of the cost of electronic components and the increase of their performance make automatic inspection systems to be more and more introduced in this sector. Automatic inspection systems not only allow high speed sorting but also the application of more objective and constant quality criteria. Currently it is possible to find a large number of machine vision systems for inspection purposes. The development of new sensors and the advancement of informatics and electronics make possible to process large amounts of data in real-time. These data are not only related to the visible quality features but also to features that are impossible to observe to humans, without the use of instruments of without damaging the product.

**Key words:** Quality, automatic inspection, sensors, fruit and vegetable.

### **Introducción**

La importancia de la producción hortifrutícola, tanto desde el punto de vista económico como social y cultural, exige una actualización continua de las labores de producción y de poscosecha del producto, de forma que permita su adaptación a unos mercados cada vez más competitivos y exigentes. La demanda de productos de calidad por parte del consumidor obliga a dedicar más esfuerzos en los procesos de inspección, acondicionamiento y distribución de los mismos.

En la actualidad, una gran parte de las labores de inspección que se realizan en las centrales hortofrutícolas se lleva a cabo de forma manual. Mientras que las operaciones previas a la inspección como son la descarga, lavado, encerado, secado y cepillado presentan un nivel satisfactorio de mecanización, las tareas más críticas y determinantes de la calidad y de la capacidad de trabajo de una línea de confección, las operaciones de clasificación y envasado de las frutas y hortalizas, son las que precisan de una mayor atención para conseguir incrementar el grado de automatización de las centrales. Además, por lo general, se trata de tareas costosas, repetitivas, y tediosas para las personas.

El mercado exige normas comunes de calidad que permitan homogeneizar la producción europea. Por otro lado, las administraciones locales y las asociaciones de productores potencian la creación de sellos y etiquetas de garantía para regiones y productos específicos ligados a unas condiciones microclimáticas y a unas técnicas de cultivo dadas, que avalen su calidad frente a productos provenientes de mercados exteriores. Esta situación requiere unos criterios objetivos en la clasificación de los productos, que no se alcanzan de forma completa mediante la selección manual.

Más allá de las Normas de Calidad, la calidad comercial de las frutas y hortalizas se basa en propiedades relacionadas con:

- el aspecto externo, determinado por el tamaño, la forma, la firmeza, el color, la presencia y el tipo de daños,
- las cualidades organolépticas, definidas por propiedades como la acidez, el dulzor, el aroma, la textura o la jugosidad,
- el aspecto interno, especialmente la presencia de daños internos, o de pepitas, no visibles externamente,
- el valor nutritivo y el estado sanitario: ausencia de residuos tóxicos, contenido en vitaminas, minerales, proteínas, etc.

La inspección automática de la calidad, por lo tanto, debe dirigirse hacia la medición objetiva de parámetros que definan lo mejor posible esas propiedades. Excepto en lo que se refiere al aspecto externo, los controles de calidad actuales utilizan métodos destructivos, basados en muestras de cada partida de producto que intentan representar su estado global. Sin embargo, estos procedimientos no aseguran la calidad individual del producto y, a menudo, ralentizan considerablemente el proceso de selección.

Si nos centramos en las técnicas específicas empleadas para la detección de daños en frutas y hortalizas, tanto los debidos a lesiones mecánicas, a defectos o desórdenes fisiológicos, a ataques de insectos o a enfermedades criptogámicas, se pueden distinguir dos tipos de técnicas no destructivas:

- aquellas cuyo objetivo es la identificación de daños internos que no presenten una exteriorización visible en la superficie del producto. Para su puesta en práctica se necesitan sensores que posean capacidad de penetración en los tejidos vegetales,
- las técnicas orientadas a la identificación de lesiones externas que puedan observarse utilizando sensores sin capacidad de penetración en los tejidos.

Los sistemas automáticos de clasificación de frutas y hortalizas se basan en sensores electrónicos, que muchas veces simulan a los sentidos humanos. Uno de los sentidos que más se utiliza para clasificar los objetos es la vista. Así, actualmente, existen multitud de aplicaciones en las que se diseñan y construyen sistemas de visión artificial con el fin de inspeccionar los procesos o supervisar los productos finalizados. El desarrollo de nuevos sensores, unido al avance de la electrónica y la informática, permite actualmente procesar una gran cantidad de datos en tiempo real, referidos no sólo a los aspectos visibles de la calidad, sino también a aspectos que no puede observar el ser humano sin la ayuda de instrumentos o sin estropear el producto.

La disminución de los costos de los componentes electrónicos y el aumento considerable de sus características, hacen que la inspección automática del producto esté cada vez más introducida en el sector. Los sistemas automáticos de inspección no sólo permiten la selección a alta velocidad, sino también la aplicación de criterios objetivos de calidad que se mantienen constantes en el tiempo.

## **La maquinaria para la inspección de calidad**

**Estructura general del proceso de almacenamiento y confección.** Existen diferentes procedimientos de almacenamiento y confección en función de las características de las frutas y hortalizas, las exigencias específicas del mercado de destino, el tonelaje por hora de trabajo necesario, la forma de recepción de los productos del campo, la condición de recepción de los productos del campo, el costo y la disponibilidad de la mano de obra y las características del edificio del almacén. Independientemente de estas variantes, la función de cualquier almacén es común, y consiste en recibir el producto del campo, seleccionarlo, acondicionarlo y envasarlo debidamente para su posterior entrega a la red de distribución comercial. Detallando un poco más estas tareas, obtenemos la siguiente lista, aunque, en general, no todas ellas se realizan en todos los almacenes:

- recepción del producto del campo,
- pesado,
- pre-refrigeración,
- alimentación de la línea de confección,
- descarte previo y separación de elementos extraños (donde se eliminan los podridos, también llamada descarte de carro),
- operaciones de acabado complementario a la recolección (eliminación de tallos, hojas, pedúnculos, etc.),
- lavado, cepillado y encerado,
- clasificación por tamaño, peso y color, y distribución a los puestos de envasado y pesado (normalmente los sistemas de visión artificial se sitúan en este punto),
- confección de los envases de mercado,

- paletizado (apilado en tarimas),
- envío al mercado o almacenamiento en cámara.

**Las máquinas automáticas de selección.** Los sistemas para la clasificación de frutas y hortalizas que podemos encontrar en los almacenes actuales son de dos tipos: manuales y semi-automáticos. En los sistemas manuales, las trias las realiza el personal situado en diferentes puntos de la línea del calibrador. En los sistemas semi-automáticos, parte de la selección se realiza automáticamente, con sistemas de visión artificial u otros mecanismos, y el resto se realiza manualmente. Los sistemas semiautomáticos miden normalmente el tamaño, el peso y el color, aunque hay una fuerte tendencia a introducir sistemas que automaticen completamente el proceso de selección, debido a los altos costos de la mano de obra.

En los sistemas semiautomáticos más antiguos, la selección por color se lleva a cabo mediante células fotoeléctricas, integrando el color de toda la superficie del producto, lo que produce resultados erróneos cuando está semiverde. Después de ellos se han utilizado cámaras monocromas con filtros para la medición del color. La mayor parte de los sistemas modernos utilizan cámaras en color para la clasificación.

Atendiendo a la clasificación por calibre o tamaño del producto, las máquinas actuales incorporan mecanismos para clasificar:

- por métodos mecánicos, con sistemas de rodillos basculantes,
- por métodos electromecánicos, pesando el producto con una célula de carga,
- por métodos electrónicos, mediante técnicas de visión artificial.

## **La inspección de productos agrícolas mediante técnicas de visión artificial**

El desarrollo de las aplicaciones de las técnicas de visión artificial en la inspección de productos agrícolas se debe a la necesidad de encontrar una alternativa a los métodos de inspección manual, tradicionales. La introducción de estas técnicas permite:

- eliminar el contacto con el producto, evitando así daños mecánicos en los mismos,
- reducir la mano de obra en las tareas, con frecuencia tediosas, de inspección, reduciendo el subsiguiente coste económico,
- introducir cierta flexibilidad en las líneas, de forma que una misma línea pueda adaptarse a varios productos modificando la programación,
- una mayor fiabilidad y objetividad respecto a la inspección humana, ya que las decisiones tomadas por los operarios se ven afectadas por factores como el cansancio, los hábitos adquiridos, etc,
- evitar la inconveniencia de los métodos de control de calidad destructivos, que aumentan los tiempos de inspección y no aseguran la calidad individual del producto.

La inspección de productos agrícolas mediante visión artificial presenta algunas particularidades respecto a sistemas similares que se emplean en otros sectores. Por ejemplo, la gran variabilidad de los productos, debida tanto a diferencias entre especies y variedades como a diferencias individuales de forma, color, tamaño, etc. Asimismo, no hemos de olvidar la evolución fisiológica que continúa experimentando el producto tras la recolección, dada su condición de elemento vivo. Por otra parte, la selección de las características apropiadas para evaluar la calidad depende del tipo de producto y su fragilidad condiciona el tipo de máquinas y técnicas que se utilizan. La estacionalidad de la producción y los bajos beneficios medios obtenidos limitan las posibles inversiones en automatización.

***Parámetros de calidad que se pueden cuantificar con un sistema de visión.*** La mayoría de las frutas y verduras deben cumplir unos requisitos mínimos de calidad y presentación para poder ser comercializados. Dichos requisitos se especifican en las denominadas Normas de Calidad y pueden ser comprobados visualmente. Además, dichas normas definen categorías, que sirven para clasificar el producto como de mayor o menor calidad, lo que puede influir en el precio de venta del mismo. Los sistemas de visión artificial

que se incluyen en las líneas se utilizan para medir aquellos factores de la calidad relacionados con:

- el tamaño, el calibre o el volumen: El tamaño es, probablemente, el parámetro en cuya medición se ha alcanzado un mayor grado de automatización en las centrales de acondicionamiento. Para calcular el volumen se puede combinar la medida del calibre con la del peso, lo que nos puede dar una idea de la densidad del producto,
- la forma es también un factor de calidad que puede determinar el rechazo del producto. Si éste presenta deformaciones anormales no debe llegar al consumidor,
- el color externo es imprescindible para determinar no solo la categoría del producto, sino también es necesario para determinar su destino, sea éste la cámara de desverdización, la cámara de conservación o el transporte inmediato hasta el lugar de destino. Para conseguir un mayor valor añadido, puede ser necesario que el color de las frutas u hortalizas de una caja sea homogéneo,
- la presencia de defectos de la piel es uno de los factores más importantes a la hora de decidir la categoría del producto. Los defectos suelen estar tipificados y relativamente cuantificados en las definiciones de las categorías. Según la cuantía y gravedad del defecto, éste será directamente de descarte o pasará a las siguientes selecciones. Hay defectos de la piel, como las podredumbres, que se extienden rápidamente y con el tiempo contaminan toda la línea. Otros defectos, como las cicatrices secas de la piel no afectan al producto de alrededor.

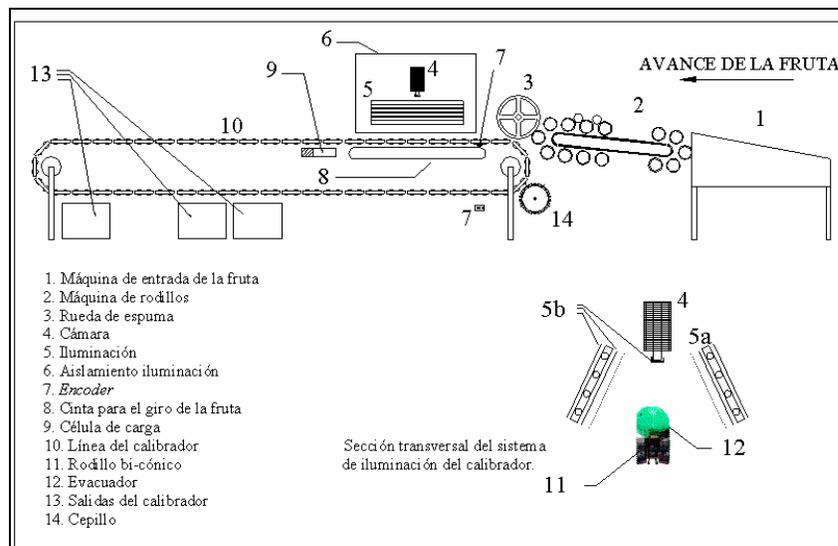
### **Descripción de los equipos de análisis de imagen utilizados en la inspección de calidad**

Un proceso de inspección o clasificación basado en imágenes consta de tres fases fundamentales la adquisición de las imágenes, el procesamiento por ordenador y la clasificación propiamente dicha de cada objeto. En las máquinas automáticas de clasificación nos encontramos con dos módulos, más o menos independientes:

- un módulo sensor que realiza propiamente la adquisición y el análisis de las imágenes y determina las características de cada elemento individual,
- un módulo de clasificación que, en función de los datos del módulo anterior, y a veces más otros datos provenientes de otros sensores, como el peso, decide a qué clase debe asignar cada pieza de producto y, por tanto, en qué salida de la línea se debe desviar.

Un esquema de conjunto se muestra en la Figura 1. Para el correcto funcionamiento del sistema, a menudo se incorpora algún meca-

nismo que permite individualizar el producto, lo que facilita el trabajo de análisis de imágenes. Además, es imprescindible que el módulo de clasificación pueda asignar una salida a cada elemento que viaja en la línea. Por este motivo, se requiere información sobre la posición del elemento en la línea, ya que se debe decidir en qué momento se tiene que desencadenar el mecanismo de actuación que produce su salida. La sincronización, tanto del disparo de la cámara como del mecanismo de evacuación se realiza gracias a que existe un sensor (codificador o encoder), que permite conocer la posición de la cadena de transporte.



**Figura 1.** Esquema de un sistema de inspección mediante visión artificial.

**La adquisición de la imagen.** La fase de adquisición de la imagen es fundamental en todo el proceso de análisis, ya que la información que se obtiene no puede ser mejorada en las fases posteriores. La correcta adquisición de imágenes depende de la iluminación de la escena y de las cámaras empleadas.

En cuanto a los sistemas de iluminación, podemos distinguir:

- la iluminación difusa, que se utiliza para obtener una luz uniforme en toda la escena,

evitando las zonas sombreadas y la saturación de otras zonas,

- la iluminación posterior, para facilitar la detección de contornos.

Según el tipo de iluminante empleado, se pueden encontrar sistemas basados en la radiación ultravioleta, visible e infrarroja. La longitud de onda de la energía utilizada como fuente de iluminación es importante, ya que las modificaciones estructurales y de composición de los tejidos periféricos de las frutas y hortalizas, causadas por lesiones y enfermedades, se traducen a menudo

en diferencias en la reflexión de la energía, tan sólo discernibles en determinadas zonas del espectro electromagnético. Así, la luz ultravioleta induce luminiscencia en áreas afectadas por podredumbre. El infrarrojo cercano se ha utilizado en prototipos de sistemas de análisis de imágenes aplicados a la detección de daños.

Los sistemas de inspección automática actuales constan de una o varias cámaras de vídeo, tarjetas de digitalización de la señal y memoria para almacenar las imágenes.

Las cámaras comúnmente utilizadas en estas máquinas están basadas en uno o varios CCD. Un CCD es un elemento sensor de silicio, compuesto por pequeños puntos individuales (píxeles) que convierten la información luminosa que reciben en información eléctrica. Según la disposición de los píxeles, las cámaras pueden ser lineales o matriciales, y éstas, a su vez, monocromas o en color.

El empleo de cámaras monocromáticas tiene numerosos antecedentes en la inspección de frutas y hortalizas. Son adecuadas para la determinación de la forma y el tamaño, para la detección de manchas o lesiones cuya intensidad es muy diferente a la de la zona sana, para caracterizar texturas diferentes, e incluso en la cuantificación de ciertos componentes del color mediante el empleo de filtros. Los CCD monocromáticos tienen una cierta sensibilidad en el infrarrojo cercano (NIR), por lo que se usan, a veces, para detectar los contornos.

La disponibilidad creciente de procesadores rápidos y la difusión y abaratamiento de la tecnología, permite el manejo de la mayor cantidad de información suministrada por las cámaras de color. En este caso, las imágenes se pueden obtener, bien con un CCD que contiene píxeles sensibles al rojo, verde y azul, o bien utilizando tres CCD monocromáticos, a los que se añaden los filtros respectivos. También, a nivel experimental, se está trabajando con imágenes multibanda, que se consiguen empleando varias cámaras monocromas provistas de filtros ópticos centrados en longitudes de onda específicas, o

con cámaras multiespectrales, que contienen varios CCD que reciben la imagen a través de filtros diferentes y permiten trabajar en varias zonas del espectro simultáneamente.

***El procesamiento de las imágenes.*** Una vez obtenida la imagen se procesa mediante un programa de ordenador diseñado al efecto. Las técnicas de segmentación se emplean para diferenciar e identificar los objetos de interés (que pueden ser las propias piezas de producto o partes determinadas de ellos, como el pedúnculo o las manchas de la piel). Las técnicas de segmentación más sencillas son las de umbralización, que se emplean para distinguir las zonas de interés de la escena simplemente por diferencias de luminosidad. La umbralización se emplea tanto en imágenes monocromas como en las bandas independientes (roja, verde y azul) de las imágenes en color.

Las técnicas de segmentación conllevan, por lo general, un proceso de aprendizaje supervisado, esto es, el empleo de una muestra de entrenamiento de clase conocida, a partir de la cual se obtienen parámetros que permiten la clasificación de muestras de similares características en el futuro. Para ello, utilizando un programa adecuado, un operario selecciona diferentes regiones de las imágenes y las asigna a las clases de interés (por ejemplo, fondo de la imagen, piel sana, podredumbre, etc.). Luego el sistema generaliza esta información y crea un modelo de segmentación que se aplica a todas las imágenes.

Una vez identificadas las zonas de interés de la imagen, se procede a su identificación en función de unos parámetros de interés. Las características que se extraen de estas zonas en los procesos de inspección de productos agrícolas pueden dividirse en los siguientes grupos: tamaño, forma, color o luminosidad y textura.

El color es un importante factor de calidad para la estimación de la madurez de algunas frutas y hortalizas, pero mientras que en algunas de ellas, el color está distribuido homogéneamente por toda la superficie, en otros casos el color es heterogéneo.

Las máquinas automáticas para la detección de los defectos de la piel deben ser capaces de distinguir entre los defectos reales y otras partes del vegetal que pueden confundir a un sistema de visión artificial, tales como el pedúnculo, el cáliz o las hojas. La detección de daños y magulladuras es un factor cada vez más importante para la evaluación de la calidad y habitualmente ha sido tratado junto con la estimación del color.

***Principales factores que afectan al rendimiento de los sistemas de inspección automática mediante en visión artificial.***

Para el correcto análisis de la imagen, se requiere que la iluminación de la escena sea uniforme, evitando sombras que puedan enmascarar el color o los defectos de la piel. Sin embargo, en este tipo de instalaciones siempre hay fuentes de luz externa que interfieren en la iluminación. El sistema de iluminación ha de ser lo suficientemente potente para iluminar adecuadamente toda la escena, lo que muchas veces produce ciertos brillos en la superficie del producto o en los rodillos de la línea, haciendo que el sistema de visión artificial proporcione resultados erróneos.

Una adecuada selección del color del fondo, que debe contrastar con el del producto, puede simplificar la inspección, pero se debe tener en cuenta que, al pasar éste por la línea, los rodillos, filtros y objetivos se cubren de polvo que, cuando es iluminado, produce efectos indeseados en la imagen, afectando negativamente a su posterior análisis.

La resolución de las imágenes influye en la medida de los calibres y otras características geométricas y morfológicas, pero más aún en la detección de los defectos. Hay defectos que, a ciertas resoluciones, son imposibles de detectar. Por otro lado, a menor resolución, mayor velocidad en el procesamiento de las imágenes. La maquinaria actual trabaja con resoluciones muy bajas para cubrir las necesidades de tiempo real, lo que impide la detección de ciertos defectos. Por tanto, se debe llegar a una solución de compromiso entre velocidad de proceso y resolución.

Los errores de individualización del producto en la línea ocurren cuando hay más de un elemento en la misma copa, cuando unas piezas se montan encima de otras, o cuando, aún estando en copas distintas, las piezas se tocan debido a su gran calibre. Los sistemas actuales no realizan comprobaciones debido a los requerimientos de tiempo real, lo que produce errores en las salidas de los calibres.

No debemos olvidar que las imágenes de video que se obtienen son planas. Por lo tanto, no se dispone de información volumétrica, sino que se estima a partir de diferentes vistas del producto colocado en distintas posiciones. Pese a que se han ensayado muchas maneras de soslayar este problema, no hay en la actualidad ninguna máquina capaz de garantizar que cada pieza se ha podido inspeccionar en su totalidad, por lo que hay una parte de la superficie de la misma de la que no se tiene información, lo que puede conllevar su incorrecta clasificación.

La necesidad de procesamiento a muy alta velocidad es un problema a la hora de diseñar algoritmos de tratamiento de imagen. El costo temporal de estos algoritmos suele ser muy elevado, y depende de la cantidad de parámetros que se desee calcular, del número de imágenes que se procesen y de su tamaño. Para conseguir un sistema fiable, preciso y rápido, se puede utilizar un hardware específico para estas tareas, al mismo tiempo que se optimizan los algoritmos de visión. Esto añade otros problemas, sobre todo porque se requiere una programación específica (programación a bajo nivel), que, además, varía mucho según la arquitectura del procesador que se utilice.

**Las posibilidades de inspección en otras zonas del espectro electromagnético**

El espectro electromagnético abarca un amplio rango de ondas electromagnéticas, caracterizadas por una frecuencia o una longitud de onda, cuya propagación en el vacío es la velocidad de la luz. En el espectro electromagnético se pueden diferenciar las siguientes zonas o bandas:

- ondas de radio,
- microondas,
- infrarrojos,
- luz visible,
- ultraviolet,
- rayos X,
- rayos  $\gamma$ .

Cuando un sensor puede cuantificar la cantidad de energía que recibe en función de la longitud de onda, como resultado de su medida se obtiene lo que denominamos un espectro. En cambio, si el sensor es capaz de determinar estas intensidades en función de la posición espacial, obtenemos una imagen. En general, el sensor y la fuente de emisión de la radiación se sitúan convenientemente respecto del objeto que se va analizar, con el fin de medir la absorción, la reflexión o la transmisión de la energía que incide sobre el objeto.

La mayoría de los avances en la inspección automática de los productos agroalimentarios se han realizado gracias a la interpretación de los espectros y las imágenes que se obtienen en la zona del espectro electromagnético que es visible (por este motivo hablamos de visión artificial), ya que es la que los humanos percibimos inmediatamente. Sin embargo, se dispone de menos información proveniente de otras zonas del espectro, por estar menos relacionada con nuestros sentidos y no disponer de la tecnología necesaria para su adquisición. Actualmente, los avances tecnológicos permiten adquirir esta información adicional, que a menudo está relacionada con la composición química de la materia, lo que la hace de especial interés.

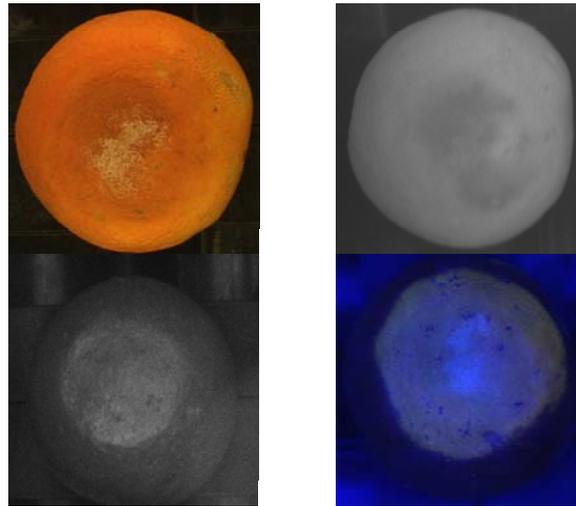
**Reflexión y absorción en el infrarrojo próximo (NIR).** El NIR es absorbido por los enlaces CH, NH y OH y, por lo tanto, se puede emplear para determinar la concentración de componentes tales como proteínas, agua, azúcares y grasas. Dado que esta absorción sólo es superficial, si se pretende representar la totalidad del producto, las muestras se han de moler, lo que limita su aplicación.

La aplicación de técnicas de regresión múltiple ha facilitado la calibración de instrumentos que funcionan en el IR próximo, según una combinación de funciones derivadas de las propiedades de reflectancia y transmitancia del material a determinadas longitudes de onda, es decir, usando técnicas espectrométricas.

En la actualidad se empiezan a comercializar sensores para la determinación del contenido en azúcar de las frutas que emplean técnicas de espectrometría infrarroja. Se han obtenido buenos resultados en manzanas, nectarinas y melocotones. Los cítricos presentan la dificultad de que la corteza es muy gruesa y su contenido en azúcar no está bien relacionado con el contenido de azúcar de la pulpa.

**Fluorescencia en el ultravioleta (UV).** La fluorescencia se utiliza en el análisis de productos agroalimentarios, en particular, para medir concentraciones de compuestos biológicos fluorescentes, tales como los metales y las vitaminas. La medida de la fluorescencia se ve afectada por las condiciones ambientales, por lo que es necesario preparar cuidadosamente la muestra y controlar temperatura, disolvente y el pH. Se investiga sobre la utilidad de técnicas de fluorescencia para el control de infecciones de hongos, control de determinados residuos de fitosanitarios en frutos, etc. La molécula de clorofila activada electrónicamente vuelve a su estado de reposo emitiendo un fotón. Esta fluorescencia de la clorofila está inversamente relacionada con la actividad fotosintética y puede usarse para el control de cultivos, a efectos de optimizar riegos y aplicación de nutrientes. Asimismo, se puede emplear para determinar el grado de envejecimiento en la cosecha.

En cítricos se utiliza la fluorescencia para detectar la rotura de las glándulas y consiguiente liberación de aceites esenciales de la piel (oleocelosis), que posteriormente deriva en un ennegrecimiento de la misma. Además, con iluminación UV pueden hacerse visibles algunos ataques por hongos. La Figura 2 muestra una imagen de una naranja, obtenida en diferentes bandas del espectro.



**Figura 2.** Imagen de una fruta obtenida en varias bandas del espectro.

**Rayos X.** Los rayos X (corta longitud de onda y alta energía) son capaces de atravesar tejidos biológicos opacos a la radiación visible. Esta radiación se disocia o se ioniza, según el grosor, densidad y otros parámetros de la muestra. La capacidad de penetración de los rayos X depende de su energía. Para productos agrícolas, de densidades relativamente bajas, por lo general, se usan de baja energía.

Se puede obtener información de la estructura sub-superficial de un amplio rango de muestras, por ejemplo, detección de granos de trigo infestados por insectos, evaluación de propiedades físicas de frutas, detección de patatas con "corazón hueco", control de calidad interna de troncos, composición de carnes (% de hueso, grasa y magro), etc. Otra aplicación es la detección de cuerpos extraños, como cristal, plástico, metal, piedras o huesos en productos alimentarios ya elaborados.

El análisis de imágenes de rayos X es complejo, ya que proporcionan una imagen bidimensional que puede ser confusa. La tomografía axial computerizada (TAC) permite la adquisición de imágenes de secciones transversales del producto. Se ha trabajado en la detección de la

calidad interna de varias frutas y hortalizas (cítricos, manzana, albaricoque, cebolla, col, etc.) utilizando escáners electrónicos industriales y obteniéndose buenos resultados, por ejemplo, para la detección del "bufado" en mandarinas y deficiencias hídricas internas de algunos productos hortofrutícolas.

**La resonancia magnética nuclear (RMN).** La resonancia magnética es un fenómeno que se debe a que los núcleos de los átomos que componen la materia se comportan como pequeños imanes. En estado natural, estos pequeños imanes se orientan al azar, sin ninguna preferencia espacial. Sin embargo, cuando un cuerpo se somete a un campo magnético suficientemente potente, producido por un imán adecuado, los núcleos de sus átomos se orientan en la dirección de dicho campo. Ocurre como con una brújula: la aguja imantada se orienta de modo que sigue el campo magnético terrestre y se coloca señalando al polo norte o sur.

Volviendo al cuerpo que queremos analizar, si lo situamos en un campo magnético, sus núcleos se orientan y giran sobre el eje del campo magnético. Si emitimos energía en forma de ondas de radio (similares a las que se emplean en las emisoras de radio comercial) sobre dicho

cuerpo, los núcleos absorben dicha energía y cambian de posición. Cuando cesa la emisión de las ondas de radio, los núcleos vuelven a su orientación inicial y devuelven la energía, de forma que se puede medir el fenómeno. Este proceso sólo se realiza con suficiente amplificación a una determinada frecuencia, que llamamos de resonancia (es como sintonizar una emisora de radio), que depende de la naturaleza de los átomos que componen el cuerpo. Igualmente, el tiempo que dura el fenómeno también depende de la naturaleza del cuerpo. Combinando las frecuencias de resonancia y observando los tiempos en los que se devuelve la energía, se pueden diferenciar, por ejemplo, los tejidos con mucho contenido en agua de los tejidos que tienen grasas.

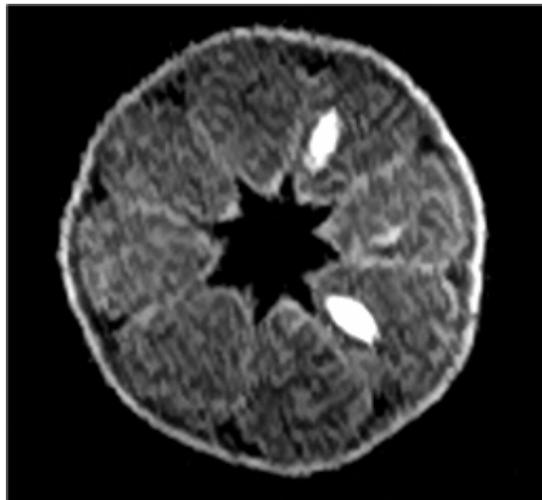
Por este motivo, la resonancia magnética se emplea en medicina: ciertos tejidos enfermos o dañados contienen cantidades anormales de agua. De este modo, se pueden distinguir los tejidos con mayor contenido en grasas, de los de mayor contenido en agua. Aprovechando esta propiedad de la materia, se pueden generar tanto espectros de emisión como imágenes del interior de los objetos.

Los espectros se obtienen midiendo la frecuencia y el desfase de la energía devuelta, mientras que las imágenes se obtienen aplicando un campo magnético que varía linealmente, lo que permite localizar espacialmente las propiedades anteriores y generar imágenes de 'rodajas', de tamaño variable, del cuerpo que se estudia.

Los espectros de resonancia magnética se han utilizado para estimar el contenido en azúcar de algunas frutas o para evaluar la madurez de los aguacates, midiendo la relación entre el contenido en aceite y el contenido en agua.

Se pueden obtener imágenes las que se aprecien las semillas de las frutas (con mayor contenido en grasas) diferenciadas de los demás tejidos (con mayor contenido en agua), lo que es muy útil para certificar que un lote de mandarinas se comercialice como 'sin semillas' (Figura 3). Esta técnica, en general, se puede emplear para determinar la composición y la estructura interna de

algunos alimentos para la industria de procesado, incluyendo la detección de lesiones en los frutos, los daños ocasionados por larvas, el estrés hídrico y la presencia de oquedades.



**Figura 3.** Imagen de resonancia de una mandarina. Se observan en blanco brillante las semillas.

**Imágenes ultrasónicas de alta frecuencia.** Se producen mediante ultrasonidos que pasan a través de materiales biológicos blandos. Se usan en medicina (ecografías) y presentan una serie de problemas, entre los que destacan la poca resolución de las imágenes que se obtienen y la necesidad de que el emisor esté acoplado acústicamente a la muestra. Por ello, las aplicaciones agrícolas son pocas (diagnóstico de gestación, exámen interno de madera). Puede tener interés para examinar productos que se transporten por medio de agua durante su manipulación o, por ejemplo, en acuicultura. Se han empleado ultrasonidos para la medida de la firmeza de frutas como manzanas o aguacates.

### **Técnicas basadas en las propiedades mecánicas**

Muchas frutas y verduras destinadas a la venta en fresco deben recolectarse en un determinado estado de madurez adecuado para minimizar los daños durante el encajado y transporte, pero además debe tener una calidad aceptable para el

mercado final. Para poder satisfacer ambas necesidades debemos tener en cuenta las propiedades mecánicas de la misma, concretamente lo que se denomina la firmeza.

En general, se entiende por firmeza la resistencia que ofrece el material a la penetración de una sonda. Por lo tanto, se caracteriza por la fuerza y la deformación producida.

La valoración de la firmeza de los productos hortifrutícolas se suele realizar mediante ensayos destructivos. Sin embargo, existen diferentes tipos de sensores electrónicos para la medida de esta característica, basados en:

- Vibraciones, utilizando un pequeño vibrador electromecánico, que aplica una serie de oscilaciones de frecuencia y amplitud determinadas. Las oscilaciones de entrada se monitorizan con un transductor de aceleración unido al vibrador. Otro transductor de aceleración se sitúa en el lado opuesto y el índice de firmeza se mide por la diferencia entre la oscilación de salida y la de entrada.
- Ultrasonidos: se coloca un emisor y un receptor a ambos lados de la pieza. La atenuación de las ondas emitidas y la firmeza están relacionadas de forma inversa.
- Deformaciones cíclicas. Estos sensores se basan en compresiones y descompresiones cíclicas dentro del límite elástico. El estudio de la pendiente de la curva de deformación obtenida sirve para estimar la firmeza.
- Basados en impactos, a través del estudio de la deceleración del impactador y la deformación del producto. Existen diferentes técnicas para determinar la firmeza de los productos a través de un sensor de impacto. Una técnica consiste en golpear la pieza con un pequeño percutor esférico con radio de curvatura y masa conocidos y midiendo la aceleración del mismo. Otra técnica consiste en dejar caer la fruta u hortaliza sobre una célula de carga, midiéndose la fuerza en función del tiempo.

## **La detección de sustancias volátiles relacionadas con la calidad**

Las características organolépticas de los alimentos son la conjunción de sensaciones visuales, táctiles, olfativas y gustativas mediante un complejo procesamiento de la información en el cerebro. Las sensaciones visuales, táctiles y olfativas influyen de una manera muy importante en la apreciación de la calidad en el momento de la selección y compra de los alimentos. Las características olfativas son probablemente una de las más importantes en nuestra apreciación de la calidad en el momento del consumo, ya que influyen enormemente en el sabor del producto.

Un aroma es un conjunto complejo de entre decenas y centenares de sustancias químicas (por ejemplo, se han aislado alrededor de 300 sustancias en el aroma de manzana, 400 en el del vino y 800 en el del café), en el que su proporción relativa es crítica. Normalmente, existe un grupo de compuestos, llamados mayores, que representan alrededor del 95 % de la masa de volátiles responsables del aroma. Sin embargo, en la mayoría de los casos, tienen una contribución muy débil en el aroma global de un producto, mientras que los compuestos que aparecen como trazas pueden tener una importancia fundamental en la percepción del aroma por las personas. La relación entre la estructura de las moléculas de los volátiles y su impacto en la sensación olfativa, todavía no se comprende a la perfección.

La detección y medida instrumental de los componentes mayoritarios de un aroma se aborda actualmente a través la separación de los volátiles mediante métodos cromatográficos. Sin embargo, la sensación aromática no suele estar relacionada con un solo compuesto, sino que depende de la interacción entre varios de ellos. La cromatografía presenta el inconveniente de ser muy complicada y costosa. Los instrumentos de control son a menudo muy sofisticados, frágiles y necesitan la presencia de personal muy cualificado. Por tanto, es prácticamente im-

posible la aplicación de estos métodos en tiempo real.

Los sensores de aromas pretenden imitar el proceso olfativo humano: mediante un conjunto de unos pocos sensores diferentes, que reaccionan de manera distinta en presencia de las moléculas de un gas, se genera un patrón o combinación de señales eléctricas que se compara con una base de datos preestablecida para determinar el estado de un producto. Por este motivo, se les suele llamar 'narices artificiales'. Estos sensores pretenden ser una alternativa para la caracterización rápida de los compuestos volátiles responsables del aroma de un producto. Tienen la ventaja de que son baratos y de que pueden realizar la detección 'en línea'. La aplicación de estos sensores en cualquier industria es muy prometedora.

Los sensores de aromas están compuestos por una serie de sensores de gases que reaccionan de manera no selectiva con diferentes familias de compuestos. A través del registro de las respuestas de dichos sensores ante los distintos productos a los que son expuestos, y comparándolas con las respuestas obtenidas con productos de calidades conocidas, se puede llegar a crear un sistema electrónico capaz de determinar automáticamente la calidad de una muestra.

Los sensores de aromas pretenden simular la forma en que los humanos percibimos los olores: no se procede al análisis de las sustancias presentes en la atmósfera, sino que se registra la información necesaria que permita reconocer un aroma. Los sensores de aromas deben producir, por tanto, un patrón de respuesta que caracterice los aromas que se estudian, es decir, deben generar un perfil característico de la muestra, sin necesidad de precisar su composición química.

Existen en el mundo varios grupos de investigación que han trabajado en el desarrollo de sensores de aromas para ser aplicados en la industria agroalimentaria. En la mayoría de los casos, estos trabajos todavía no han dado lugar

a equipos que se estén explotando comercialmente.

## **Bibliografía**

Alcañiz, M., V. Grau, M.C. Juan, C. Montserrat, J.M. Navarro y E. Moltó 1999. Procesamiento digital de imágenes. Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia, España.

González, R.C. and P. Wintz 1987. Digital image processing. Addison-Wesley Pub. Co. 954 p.

Moltó, E. y J. Blasco. 2008. Vision systems. In: Zude, M. (ed.). Optical methods for monitoring fresh and processed food. Taylor and Francis CRC Press. 576 p.

Moltó, E. y J. Blasco. 2007. Quality evaluation of citrus. p. 243-264 In: Sun, Da-Wen (ed.). Computer vision technology for food quality evaluation. 25 chapters, Elsevier, Amsterdam, the Netherlands.

Sarig, Y. 2000. Potential applications of artificial olfactory sensing for quality evaluation of fresh produce. J. Agr. Eng. Res. 77(3): 239-258.

## **UTILIZACIÓN DE SENSORES PARA BIORESPUESTAS. Nelson Luis Cappelli<sup>1</sup>; Cláudio Kiyoshi Umezú<sup>2</sup>; Carlos Eduardo Romanini Bites<sup>3</sup>; Leonardo Alvarado Mora<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Professor Associado Doutor. Departamento de Máquinas Agrícolas. Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, SP, Brasil. E-mail: cappelli@agr.unicamp.br

<sup>2</sup> Professor Titular Doutor. Engenharia de Computação. Faculdade Integrada Metropolitana de Campinas, METROCAMP, Campinas, SP, Brasil. E-mail: umezu@agr.unicamp.br

<sup>3</sup> Engenheiro Agrícola, Funcionário. Cia Adm. de Neg. Agrícolas do Brasil, FINAGRO, Brasil. E-mail: eduardo.romanini@gmail.com

<sup>4</sup> Ingeniero Agrícola. Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. E-mail: lealmo34@hotmail.com

## **Resumen**

Este texto trata de los biosensores y sensores de biorespuesta y discute su utilización en procesos de producción agrícola, especialmente en sistemas automatizados de control. Presenta el

principio de funcionamiento y algunos tipos de biosensores. Se define también la biorespuesta y discute los tipos de sensores para su cuantificación. Finalmente propone genéricamente un sistema de control basado en la biorespuesta de los organismos vivos y presenta un sistema dinámico de control para el proceso de incubación artificial de huevos.

**Palabras claves:** Biosensores, sensor de biorespuesta, automatización y control, proceso biológico.

## **Abstract**

### **SENSORS USE TO BIORESPONSES**

This text deals with biosensors and sensors of bioresponse and discusses their use in processes of agricultural production, especially in automatic control systems. It presents the principle of operation and some types of biosensors. Defines bioresponse and discusses the types of sensors for their quantification. Finally generally proposes a control system based on bioresponse of living organisms and presents a dynamic system of control to the process of artificial incubation of eggs.

**Key words:** Biosensors, sensor of bioresponse, automatic control systems, biological process

## **Introducción**

La agricultura se ha convertido cada vez más competitiva, ya que ha sido presionada por diversos factores, tales como: la reducción de las áreas disponibles; la necesidad de preservación del medio ambiente; el aumento de la productividad; el suministro de productos de mejor calidad a precios reducidos, entre otros.

La investigación ha buscado contribuir ofreciendo conocimientos y desarrollando nuevas técnicas y métodos de producción en el sentido de atender la alta demanda impuesta por el mundo moderno. Estos nuevos conocimientos han

permitido la producción de alimentos en ambientes protegidos, de forma controlada y optimizada.

El control de estos ambientes de producción ha sido tradicionalmente basado principalmente en el abastecimiento de los insumos necesarios y en las condiciones climáticas del medio. Debido a lo anterior, es claro que para un mejor desempeño de la producción y del sistema de control, sería conveniente también considerar la respuesta de los organismos vivos -biorespuestas- de cara a los disturbios dados en las condiciones de nutrición y del medio ambiente.

Por lo tanto, la utilización de biosensores o de sensores adecuados para cuantificar la biorespuesta de estos organismos vivos, es de suma importancia. Debido a que se trata de un área relativamente nueva, se tiene todavía la necesidad de realizar estudios en el sentido de alcanzar un mejor entendimiento de los procesos productivos y del desarrollo de sensores apropiados para este fin específico.

## **Definiciones**

**Biosensores.** Una definición concisa de biosensor puede ser encontrada en el diccionario on line de la Merriam-Webster (2008). Según este diccionario, un biosensor es un dispositivo que monitorea y transmite informaciones sobre un proceso vivo o, específicamente, un dispositivo constituido por componentes biológicos, tal como enzimas o bacterias, que reaccionan con una sustancia específica y genera una señal electroquímica que detecta los productos o subproductos resultantes.

La American Society of Agricultural and Biological Engineers – ASABE (2008) presenta una definición más completa para los biosensores. La ASABE define biosensor como un elemento constituido básicamente por un material biosensible y por un transductor que puede ser utilizado para la detección de agentes biológicos y químicos.

Las reacciones bioquímicas pueden ser cuantificadas utilizándose materiales biosensibles, tales como: enzimas; anticuerpos; sondas de ácidos

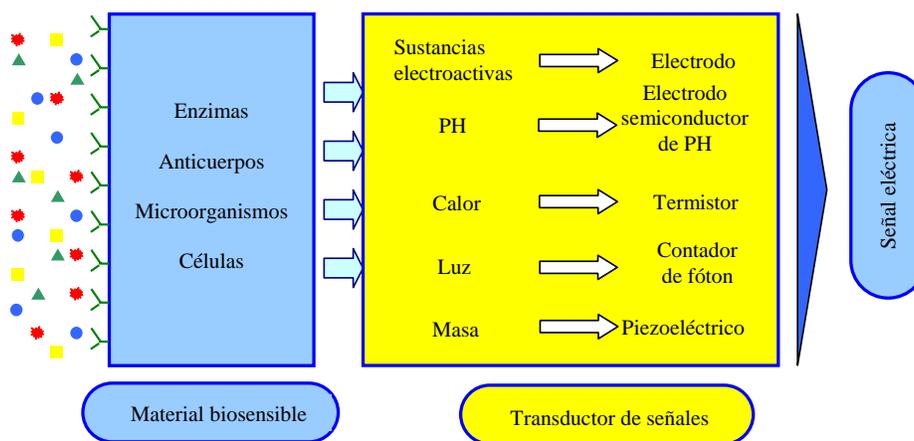
nucleicos; células; tejidos y organelas, capaces de reconocer selectivamente sustancias determinadas (analitos), asociadas a dispositivos transductores, tales como: electroquímicos; ópticos; piezoeléctricos; térmicos y magnéticos.

Los biosensores, integrados con las nuevas tecnologías en biología molecular, microfluídica, y nanomateriales, tienen aplicaciones en la producción agrícola, en el procesamiento de alimentos y en el monitoreo ambiental, para la detección, en campo y en tiempo real, de manera rápida, precisa, y barata de pesticidas, antibióticos, agentes patogénicos, toxinas, proteínas, olores y microbios, tanto en plantas, como en animales, alimentos, solos, aire y agua. Definición semejante a la anterior, fue presentada en el 10° Congreso Mundial sobre Biosensores, realizado en mayo de 2008 en Shangai – China (2008). En ese evento se definió biosensor como un dispositivo analítico que incorpora un material biológico (por ejemplo, tejido, microorganismos, organelas, receptores celulares, enzimas, anticuerpos, ácidos nucleicos, etc), un derivado de material biológico, o un material que simula el biológico, íntimamente asociado o integrado a un

transductor fisicoquímico o a un microsistema transductor, que pueden ser ópticos, electroquímicos, termométricos, piezoeléctricos, magnéticos o micromecánicos.

Los biosensores usualmente producen una señal eléctrica que es proporcional a la concentración de un analito específico o grupo de analitos. A pesar de que en un principio, la señal puede ser continua, los dispositivos pueden ser configurados para producir una única medición que satisfagan las necesidades específicas del mercado.

Los biosensores han sido aplicados a una gran variedad de problemas analíticos en la medicina, medio ambiente, alimentación, industrias transformadoras de seguridad y de defensa. En resumen, un biosensor consiste de un módulo sensor biológico con actividad catalítica (enzimas, organismos) o reacciones de afinidad (anticuerpos, receptores celulares) en íntimo contacto con un transductor físico. Este último convierte la señal química en una señal eléctrica. La Figura 1 muestra esquemáticamente el principio de funcionamiento de los biosensores.



**Figura 1.** Esquema básico de un biosensor.

Cuatro grandes tipos de transductores son utilizados en dispositivos biosensores (Tothill, 2001) electroquímicos (electrodos), ópticos, de masa (piezoeléctrico o dispositivos de onda acústica superficial) y calorimétricos (termistor o

sensores sensibles al calor). Un trabajo considerable está siendo realizado para mejorar el diseño de los transductores, con la fusión de diferentes tecnologías. Dispositivos electroquímicos normalmente miden la variación de la

corriente eléctrica (amperométricos), la variación del potencial eléctrico (potenciométrico), un cambio en la conductividad eléctrica (conductimétrico) o en la impedancia. Impedancia es la resistencia eléctrica al flujo de una corriente eléctrica alternada atravesando un determinado medio. Normalmente durante la medición, la impedancia disminuye, mientras la conductividad y la capacitancia aumentan. Los transductores ópticos utilizan una serie de principios, tales como los efectos del evento biológico en la absorción de la luz (espectroscopia de absorción), en la fluorescencia (espectroscopia de fluorescencia), en el índice de refracción o en otros parámetros ópticos (Tohill, y Turner, 1998). Dispositivos termométricos operan midiendo el cambio de la entalpía durante la reacción biológica. Sensores basados en el principio piezoeléctrico, usan el cambio en la frecuencia de resonancia de la propagación de ondas a través de un material piezoeléctrico. Estos principios pueden ser usados para medir cambios de masa, viscosidad o densidad en la superficie del sensor.

**Biorespuesta.** Los organismos vivos pueden tener su comportamiento alterado de cara a su propia actividad biológica, las alteraciones del medio en que se encuentran o las excitaciones de alguna manera forzadas. Estas alteraciones pueden ser denominadas como biorespuestas.

Se puede por lo tanto, definir biorespuesta como toda y cualquier alteración del comportamiento biológico, físico o químico de los organismos vivos o sustancias o productos por ellos producidos. La importancia del conocimiento de la biorespuesta de los organismos vivos, está en la necesidad del monitoreo y control de sus actividades.

A título de ejemplo, una alteración en el ambiente del confinamiento de animales puede llevarlos a un estado de tensión y estrés que se traducirá en la tasa de conversión alimenticia o, hasta en la aparición de enfermedades. El monitoreo de la biorespuesta de los animales, en este caso, es de interés para el control adecuado del ambiente de confinamiento.

**Sensores.** Un sensor es generalmente definido como un dispositivo que recibe y responde a un estímulo o una señal. No obstante, los sensores artificiales son aquellos que responden con una señal eléctrica a un estímulo o una señal. Un transductor es un dispositivo que convierte un tipo de energía en otra, no necesariamente en una señal eléctrica. Muchas veces un sensor es compuesto de un transductor y una parte que convierte la energía resultante en una señal eléctrica. Pueden ser de indicación directa (como un termómetro de mercurio o un medidor eléctrico) o en conjunto con un indicador (algunas veces indirectamente con un conversor de señal analógica para digital, un circuito electrónico y un display), de modo que el valor detectado sea legible por el hombre.

Como la señal es una forma de energía, los sensores pueden ser clasificados de acuerdo con el tipo de energía que detectan. Por ejemplo: sensores de luz, sensores de sonido, sensores de temperatura, sensores de calor, sensores de radiación, sensores químicos, sensores magnéticos, sensores de resistencia eléctrica, etc.

En asociación con el tipo de energía, existe una infinidad de dispositivos que permiten que el fenómeno físico, químico o biológico sea disponible para el hombre y de esta forma conocer adecuadamente el funcionamiento de las máquinas.

Todos los organismos vivos contienen sensores biológicos con funciones similares a las de los dispositivos mencionados arriba. La mayoría de estos son células especializadas que son sensibles a: luz, movimiento, temperatura, campos magnéticos, gravedad, humedad, vibración, presión, campos eléctricos, sonido, y otros aspectos físicos del ambiente. Son sensibles, también, a muchos aspectos del metabolismo, tales como: los niveles de glucosa; oxígeno; nutrientes; neurotransmisores; etc. Los sentidos humanos son ejemplos de sensores neurales especializados.

**Transductores.** Un transductor es un dispositivo que transforma un tipo de energía en otro tipo de energía, utilizando para eso un elemento sensor

que recibe los datos y los transforma. Por ejemplo, el sensor puede traducir información no eléctrica (velocidad, posición, temperatura, pH) en información eléctrica (corriente, tensión, resistencia).

**Sensores de biorespuestas.** Se pueden definir de forma amplia los sensores de biorespuestas como cualquier tipo de sensor utilizado para cuantificar algún tipo de comportamiento proveniente de los organismos vivos. Dentro de estos sensores se incluyen los físicos, los químicos, o los mismos biosensores.

Para mostrar un ejemplo, un sensor de una variable física convencional, como el termómetro de bulbo de mercurio, cuando es utilizado para medir la temperatura corporal de un animal, puede ser entendido como un sensor de biorespuesta, lo mismo sucede con una balanza convencional que pesa un animal para control de la tasa de conversión alimenticia.

### **Ejemplos de aplicaciones en el campo de la producción agrícola**

En la búsqueda de un incremento de la productividad, reducción de costos de producción, sustentabilidad y del mejoramiento de la calidad de los productos agrícolas, tanto vegetales, como animales, se genera la necesidad de la utilización de ambientes controlados que permitan el acondicionamiento del medio ambiente y el suministro de insumos de acuerdo con los requerimientos específicos de las plantas o animales en producción.

Tradicionalmente el control del medio ambiente de producción y el suministro de los insumos necesarios son hechos basados en resultados de investigaciones anteriormente realizadas con los vegetales o animales, donde se preestablecen rangos de parámetros ambientales aceptables, tales como: temperatura, humedad, iluminación, etc, y tipo y cantidad necesaria de nutrientes.

La experiencia ha indicado que una forma más conveniente de proporcionar la mejor manera de conducir la producción es monitorear, además de

aquellos parámetros convencionales, el propio comportamiento del animal o vegetal durante su crecimiento, es decir, hacer de los organismos vivos elementos activos del sistema de control.

En la metodología convencional de los sistemas de control, lo que se busca es modelar matemáticamente el proceso. Con el concepto de la biorespuesta, los organismos vivos pasan a ser parte integrante del sistema y el interés se centra en el mejor entendimiento de la interacción entre el ser vivo y el ambiente por el uso de sensores apropiados.

Por ejemplo, una planta con deficiencia nutritiva puede expresar esta carencia por la coloración de sus hojas; ya un animal puede mostrar que algo no está bien por medio de su comportamiento individual o social, o por la tasa de conversión alimenticia.

No obstante, en el ambiente comercial de producción, este monitoreamiento solo puede ser realizado utilizándose variados tipos de sensores - que por su aplicación, están aquí denominados como sensores de biorespuestas - capaces de captar la respuesta de los animales o vegetales a las alteraciones de las condiciones a ellos proporcionados, y transformar dicha respuesta en información útil para análisis y toma de decisiones.

Una de las dificultades impuesta se relaciona a partir de la identificación del problema, con la definición de cuál o cuales son las probables causas y cuál la mejor forma de corregirlas. En esta área la investigación tiene todavía mucho por avanzar.

Para profundizar en el concepto, se enfatiza en el campo de la producción animal.

La domesticación de animales para la alimentación fue parte integrante del desarrollo de la agricultura y de la humanidad. A lo largo de los años en los cuales los seres humanos han interactuado con los animales, se han dado una serie de cambios en estos últimos y en su manejo (Moura *et al.*, 2006).

Varios autores mencionan una notable mejora en la eficiencia de la producción de las aves domésticas y de otros animales llevada a cabo durante los últimos cincuenta años. En Estados Unidos, por ejemplo, el número de huevos producido por año por gallinas fue duplicado durante este período y la cantidad de alimentos consumida por cada huevo producido disminuyó en casi 50%. Debido a esta mejora en la producción de huevos y en la eficiencia alimenticia, se presentó un aumento del costo de los huevos al consumidor en solo 40% desde 1925, lo que fue considerablemente menor comparado con el aumento de los costos de la mayor parte de los otros bienes de consumo. Tendencias similares también ocurrieron con la carne bovina, carne de cerdo, carne de aves domésticas y con la producción lechera (Moura *et al.*, 2006).

Muchos factores contribuyeron para estas mejoras, tales como las sofisticadas técnicas de selección; avances en la detección, tratamiento y prevención de enfermedades; mecanización del trabajo, así como el desarrollo de alimentos nutricionalmente balanceados. El uso adecuado y la buena administración de la luz y de la temperatura en ambientes controlados ofrecieron protección a las condiciones meteorológicas extremas y permitió el control del fotoperíodo necesario para estimular el crecimiento y la reproducción.

Existe un concepto general de que el bienestar de los animales es dado por el equilibrio entre el animal y su propio medio ambiente. En la práctica, el bienestar de los animales puede ser obtenido cuando se les proporciona una adecuada salud y confort, y cuando se les evita estrés de cualquier orden. Hay una relación directa entre el bienestar animal y la producción. La salud, el bienestar y la productividad están por lo tanto íntimamente ligados.

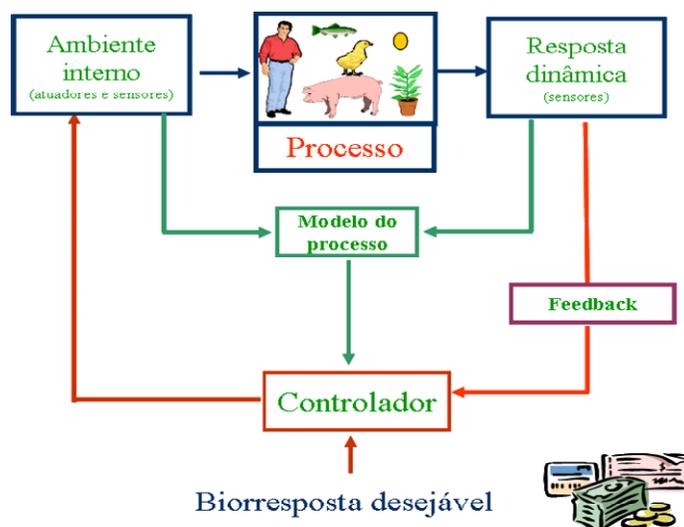
El bienestar de los animales depende de la forma como el animal percibe el medio ambiente en el que se encuentra, teniendo en cuenta no solamente los aspectos físicos del ambiente, sino también los aspectos sociales. Varios indicadores

pueden ser utilizados para evaluar el bienestar animal, tales como la salud (mortalidad, movilidad y el nivel de lesiones); el manejo (que tipo de tratamiento es dado a los animales); respuestas al estrés fisiológico (frecuencia respiratoria, temperatura corporal, variación en los niveles de cortisol), y en última instancia, la calidad de la carne (Moura *et al.*, 2006).

No obstante, la respuesta del comportamiento animal, es el indicador más efectivo de su bienestar. A partir del conocimiento de la respuesta del animal frente a las alteraciones del medio en el que vive y a otros parámetros de importancia, tales como alimentación y enfermedades, mediante investigación y experimentación, se pueden desarrollar modelos matemáticos del comportamiento (basados, por ejemplo, en las técnicas de inteligencia artificial como lógica Difusa o Redes Neuronales) con la finalidad de observar cuales son los parámetros que deben ser alterados y en cuanta proporción para que el confort del animal pueda ser reestablecido.

De esta forma, es posible implementar un sistema de control semejante al esquema presentado en la Figura 2, donde los sensores de biorespuestas ejercen una función esencial en la obtención de la dinámica del comportamiento del animal. El modelo matemático de este comportamiento, como base a las respuestas dinámicas del individuo y de los demás parámetros relativos al medio ambiente, indica al controlador electrónico cual o cuales son las variables que deben ser alteradas. Asimismo el controlador electrónico basado en la información de la biorespuesta económicamente deseada (set point) y en la adopción de una estrategia de control, actuará de manera adecuada en las variables indicadas por el modelo Matemático.

La tecnología de los sensores de biorespuestas que utiliza algún medio de comunicación inalámbrico, como forma de transmisión de las señales, interconectados a sistemas inteligentes de control, se constituirá en la base de los sistemas de producción del futuro.



**Figura 2.** Diagrama esquemático de un sistema de control basado en sensores de biorespuestas (Adaptado de Nääs, 2008).

**Proceso de incubación artificial de huevos.**

La industria avícola moderna, delante del mercado globalizado y de las exigencias crecientes en los aspectos de calidad y seguridad del producto, ha avanzado en los últimos años, especialmente por los altos niveles tecnológicos y por su competitividad. La incubación artificial es de fundamental importancia en este desarrollo, pues se constituye en el origen del proceso productivo y afecta la rentabilidad del mismo, caracterizando su estudio y perfeccionamiento como una condición necesaria para la continuidad

del desarrollo sectorial avícola (Romanini y Cappelli, 2008).

Las incubadoras modernas poseen como principales objetivos la maximización de la eclosión de los pollitos, siendo estos dos factores considerablemente afectados por el microambiente físico al rededor de los huevos (French, 1997). La Figura 3 muestra una máquina de etapa única, fabricada por CASP Industria y Comercio, con capacidad para 61920 huevos dispuestos en 12 carros.



**Figura 3.** Máquina utilizada para incubación artificial de huevos. Vista externa e interna (Cortesía: CASP S.A. Industria y Comercio).

Los nutrientes, las fuentes de energía y el agua utilizados en el desarrollo embrionario durante el proceso de incubación, están presentes en el interior de los huevos desde el inicio. No obstante, los huevos, necesitan de un calentamiento y de movimientos periódicos de rotación, para evitar la adherencia del embrión a la pared interna de la cáscara, además del transporte de tasas adecuadas de oxígeno de aire, vapor de agua, dióxido de carbono y también calor, que son provenientes del metabolismo de las células embrionarias durante las etapas del desarrollo (La Scala, 2003).

Es por esto que las incubadoras deben proporcionar durante la incubación artificial el control preciso de la temperatura, humedad relativa, flujo de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> y frecuencia de giro de las bandejas (Boleli, 2003).

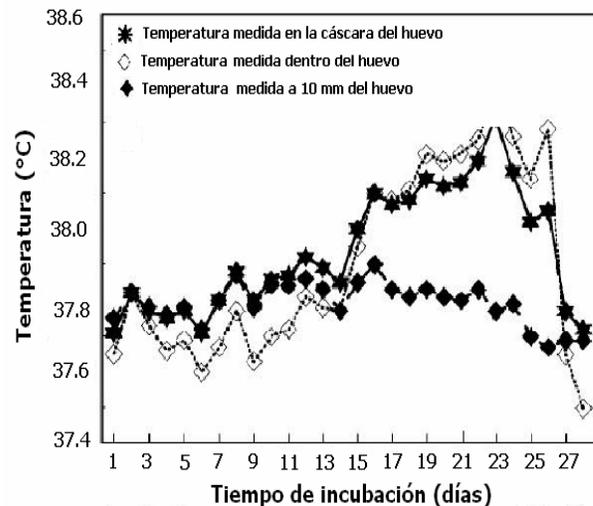
Debido a la tendencia actual del aumento de la capacidad de las incubadoras, se hace cada vez más difícil el control preciso, en el espacio y en el tiempo, de las variables ambientales del microambiente alrededor de los huevos, y consecuentemente se torna más complicado mantener la uniformidad en el volumen de la incubadora durante todo el período de incubación, perjudicando la producción (Van Brecht *et al.*, 2003).

Teniendo en cuenta que los embriones de las aves no pueden controlar directamente el intercambio térmico y másico, las variables del microambiente que influyen en la permeabilidad o en la conductancia de las cáscaras y membranas de los huevos, deben ser delicadamente ajustadas con relación a las demandas metabólicas de los embriones. Es por esto que para obtener mejoras en la eclosión y sincronización del nacimiento de los pollitos, los gradientes de temperatura deben ser reducidos y la calidad y distribución del flujo de aire deben ser mejoradas, pues solamente son permitidas pequeñas variaciones de las condiciones ideales de incubación (Decuyperre y Michels, 1992).

La producción de calor en el huevo depende de reacciones metabólicas durante el crecimiento del embrión. Esta producción de calor durante todo el

proceso de incubación se presenta como calor latente y calor sensible. El calor latente depende de la cantidad de agua evaporada que es determinada por la conductividad y por la diferencia de presión parcial sobre la cáscara, siendo esta, directamente proporcional a la cantidad de pérdida de agua que es determinada por la medición de la variación del peso del huevo.

La producción de calor sensible es reflejada en el aumento de la temperatura del embrión y depende de la suma del calor disipado por los tres mecanismos de transferencia de calor, considerando la convección como el principal. Debido a su condición de organismo de temperatura variable, que no permite que el embrión controle su propia temperatura, es indispensable durante el proceso de incubación suministrar y retirar calor (French, 1997; Romijn, y Lokhorst, 1960). La Figura 4 muestra la temperatura de huevos de pavos incubados a 37,5°C. Estas medidas son realizadas dentro del huevo, en la cáscara del huevo y a 10 mm de esta en función del tiempo de incubación.



**Figura 4.** Temperatura de huevos de pavos incubados a 37,5°C (Adaptado de French, 1997).

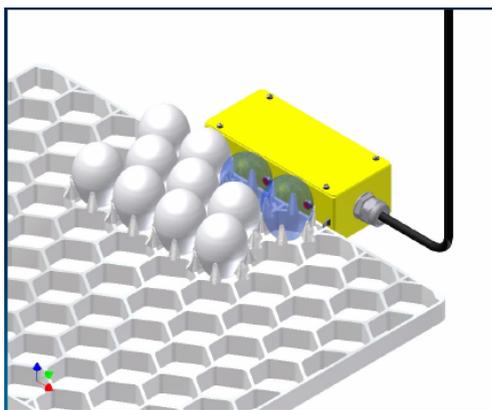
En la fase inicial del desarrollo embrionario, denominada fase hipotérmica (producción de poco calor embrionario), que se extiende desde el inicio de la incubación hasta el sexto día, los embriones

son altamente sensibles a las bajas temperaturas, donde ocurre la morfogénesis y la diferenciación de tejidos. En la fase isotérmica (producción de calor equivalente con el ambiente) que va del séptimo al décimo segundo día, los embriones pasan a producir calor y ocurre el crecimiento de los tejidos. En la última fase del desarrollo embrionario que va desde el décimo tercer al vigésimo primer día, sucede la fase hipertérmica (transferencia de calor para el ambiente), donde ocurre un aumento de la actividad lipolítica del hígado y los embriones son altamente sensibles a las temperaturas elevadas y más resistentes a las bajas (Neves, 2005).

Las máximas tasas de eclosión y sincronización del nacimiento, son obtenidas haciendo que la temperatura del embrión se mantenga constante durante todas las fases de la incubación. Para que esto ocurra, la máquina incubadora debe ser capaz de controlar la temperatura,

suministrando calor en la fase inicial de la incubación, manteniendo la temperatura en la fase intermedia y retirando calor en la fase final de la incubación.

La simple medición de la temperatura del aire en la cámara de incubación no es suficientemente precisa, para que el sistema de control de la máquina garantice el mantenimiento de la temperatura del embrión. Debido a que la medición de la temperatura interna del huevo genera problemas, pues provoca daños en la integridad estructural de la cáscara del huevo, es necesario el uso de sensores de temperatura en esta, que indiquen indirectamente y con un error mínimo (Figura 4), la temperatura del embrión y permitiendo que el control de la máquina sea operado adecuadamente. Normalmente son utilizados sensores de temperatura sin contacto para la determinación de esta biorespuesta, tal y como se muestra en la Figura 5.



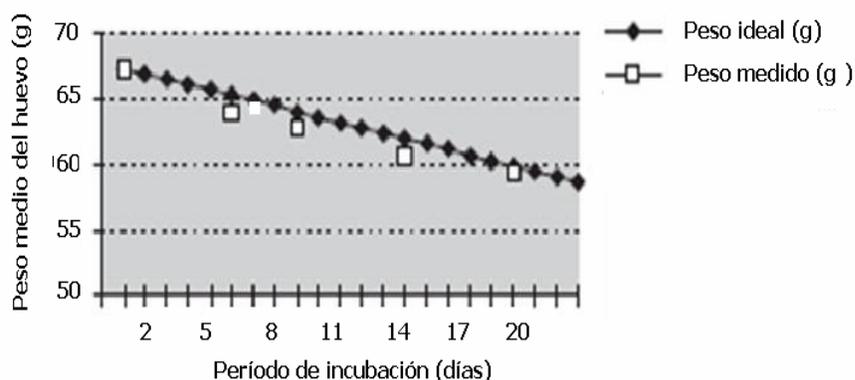
**Figura 5.** Sistema de medición sin contacto de temperatura del embrión. (Cortesía: CASP S.A. Industria y Comercio).

La humedad en el huevo es un factor importante, sin embargo no tan crítico como la temperatura. Esta depende en cierta medida de la humedad relativa de la cámara de incubación. El huevo no es uniforme en cuanto a la concentración de agua; la yema posee en su constitución de 42 a 65% de agua y la clara de 85 a 95%. El agua pasa entre diversos compartimientos y es reutilizada. También mucha agua es perdida a la atmósfera en forma de vapor. La humedad en la

incubación influye en la tasa de producción de calor metabólico del embrión, en el peso del pollito (relación peso del huevo por peso del pollito), en la flexibilidad de la membrana de la cáscara para la salida del pollito (elasticidad), en el desarrollo embrionario (indirectamente: cicatrización umbilical) y ayuda a inflar los pulmones después del nacimiento. Si la humedad relativa del aire en la incubadora es muy baja, ocasionará una pérdida de agua excesiva, atrasando la

eclosión y muchos embriones no podrían nacer, incluso estando plenamente desarrollados, y viceversa, si es excesiva, los embriones tienden a nacer precozmente, presentando muestras de alta humedad y en casos extremos nacer sin alcanzar el desarrollo completo. La pérdida de agua durante la incubación no es una variable independiente, pero si un componente del embrión que es afectada por la temperatura, por movimientos iónicos, por la concentración proteínica y por la porosidad de la cáscara (Neves, 2005).

La pérdida de peso del huevo es directamente proporcional a la pérdida de agua. En condiciones normales el huevo pierde de 13% a 15% de su peso entre el día de la postura y el día del rompimiento de la membrana interna. Esta pérdida de peso puede variar según el tipo de huevo, la ventilación, el manejo y la alimentación y la edad de la reproductora (French, 1997; Incubation Handbook, 2007). La Figura 6 muestra el valor de pérdida de peso ideal y medido durante la incubación.



**Figura 6.** Pérdida de peso del huevo. (Adaptado de Incubation Handbook, 2007)

La simple medición de la humedad en el interior de la cámara de incubación no es suficiente para que el sistema de control de la máquina garantice los niveles de humedad adecuados. Es necesario por lo tanto el acompañamiento del peso de los embriones durante el proceso de incubación.

La Figura 7 muestra un sistema para la determinación del peso de huevos durante la incubación. Consiste principalmente de células de carga fijadas entre el dispositivo de rotación y las bandejas de huevos que operan continuamente emitiendo señales al controlador electrónico de la máquina.



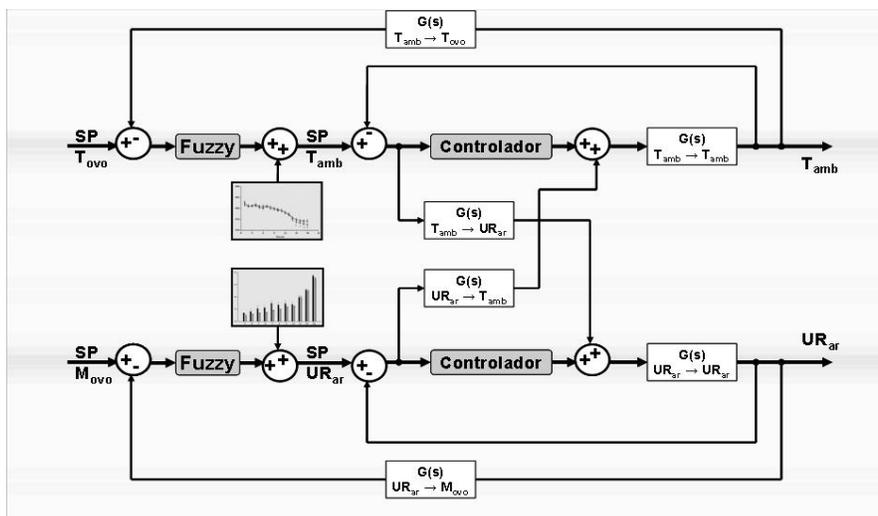
**Figura 7.** Sistema de medición de peso de huevos. (Cortesía: CASP S.A. Industria y Comercio).

La determinación de la biorespuesta del huevo con respecto a los dos principales parámetros de influencia en la eclosión y en la sincronización del nacimiento de los pollitos (temperatura e tasa de pérdida de peso) se puede establecer una estrategia para el control automático de la máquina de incubación con el fin de optimizar las condiciones del medio ambiente de incubación.

La Figura 8 sugiere un sistema de control dinámico, basado en modelos matemáticos que

utilizan la lógica difusa (*Fuzzy*), para establecer los valores de referencia o "set points" de temperatura y humedad del ambiente de incubación en función de la biorespuesta en términos de temperatura y tasa de pérdida de peso del embrión.

El sistema de control toma en consideración las interacciones entre la temperatura y la humedad relativa del aire y usa una estrategia de actuación PID convencional.



**Figura 8.** Diagrama esquemático de un sistema de control automático de temperatura y de humedad relativa del aire de una cámara de incubación de huevos.

El sistema de control presentado en la Figura 7, puede ser implementado considerando otras variables de interés en el proceso de incubación de huevos, tales como: índices de CO<sub>2</sub> y actuación en los *dampers* buscando la reducción del consumo de energía eléctrica.

## Conclusiones

La utilización de biosensores y de sensores de biorespuestas se ha tornado cada vez más en una herramienta esencial para las más diversas áreas de diagnóstico y producción que envuelven organismos vivos, en especial en la producción y manipulación de productos agrícolas.

El uso de estos dispositivos aún está poco explorada en las áreas de la producción vegetal y animal. Un gran esfuerzo se hace actualmente por parte de los investigadores en el sentido del entendimiento de la dinámica de los procesos biológicos, en el desarrollo de sensores más adecuados y de modelos matemáticos que permitan la implementación de estrategias eficientes de control en los equipos utilizados para la generación de productos agropecuarios en ambientes controlados.

Este es un campo de la investigación aplicado a la agricultura, con gran tendencia de crecimiento que conllevará a la obtención de beneficios

no solo económicos, sino también contribuirá con el sostenimiento de la producción de alimentos saludables para la población del planeta.

## **Agradecimientos**

Los autores agradecen a los organizadores del XI Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola y Áreas Afines la invitación para la participación en la Sesión de Conferencias - Área temática: Tecnologías emergentes: Sensores, Automatización y Agricultura de Precisión.

## **Bibliografía**

- American Society of Agricultural and Biological Engineers - ASABE. 2008. En: <http://asae.rymulti.com/abstract.asp?aid=21666&t=2>. Consulta: Julio, 2008.
- Boleli, Isabel Cristina. 2003. Estresse, mortalidade e malformações embrionárias. p. 472-498. In: Macari, M. e Gonzales, E. (eds.). Manejo da incubação. Fundação Apinco de Ciências e Tecnologias Avícolas. FACTA, Campinas, SP, Brasil. 537 p.
- Decuypere, E. and H. Michels. 1992. Incubation temperature as a management tool: A review. *World's Poult. Sci. J.* 48: 28-38.
- French, N.A. 1997. Modeling incubation temperature: The effects of incubator design, embryonic development, and egg size. *Poult. Sci.* 76: 124-133.
- Incubation Handbook. 2007. En: [http://www.brinsea.com/pdf/Brinsea\\_Handbook.pdf](http://www.brinsea.com/pdf/Brinsea_Handbook.pdf). Consulta: Septiembre, 2007.
- La Scala Jr., Newton. 2003. Aspectos físicos da incubação. In: Macari, M. e Gonzales, E. (eds.). Manejo da incubação. Fundação Apinco de Ciências e Tecnologias Avícolas. FACTA, Campinas, SP, Brasil.
- Merriam-Webster on Line. 2008. En: <http://www.merriam-webster.com/dictionary/biosen>. Consulta: Julio, 2008.
- Moura, D.J., I. A. Nääs, D.F. Pereira, R.B.T.R. Silva and G.A. Camargo. 2006. Animal welfare concepts and strategy for poultry production: a review. *Braz. J. Poult. Sci.* 8(3):137-148.
- Nääs, Irenilza de Alencar. 2008. A engenharia agrícola e a produção animal: A inserção do engenheiro agrícola na produção animal. Forum Agronegócio. En: <http://www.cori.unicamp.br/forums/agro/evento05/Irenilza-agroneg.ppt>. Consulta: Julio, 2008.
- Neves, Ana Carolina Ricieri Santos. 2005. Maximização do fluxo operacional em incubatórios comerciais. 46-53. En: VII Simpósio Goiano de Avicultura e II Simpósio Goiano de Suinocultura, Goiás, Brasil.
- Romanini, C.E.B. e N.L. Cappelli. 2008. Avicultura de precisão: Desenvolvimento de um sistema de controle Fuzzy no processo de incubação artificial de ovos. En: VI Workshop Pós graduação. Faculdade de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP.
- Romijn, C. and W. Lokhorst. 1960. Foetal heat production in the fowl. *J. Physiol.* 150:239-249.
- The Tenth World Congress on Biosensors. 2008. Shanghai, China. En: <http://www.biosensors.congress.elsevier.com/about.htm>. Consulta: Julio, 2008.
- Tothill, I.E. and A.P.F. Turner. 1998. Biosensors: new developments and opportunities in the diagnosis of livestock diseases. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria. p. 79-94.
- Tothill, Ibtisam E. 2001. Biosensors developments and potential applications in the agricultural diagnosis sector. *Comput. Electron. Agric.* 30:205-218.
- Van Brecht, A., J.M. Aerts, P. Degrave, D. Berckmans. 2003. Quantification and control of the spatiotemporal gradients of air speed and air temperature in a incubator. *Poult. Sci.* 82: 1677-1687.