



Segmentación de imagen por color basado en Quorum Sensing bacterial

Color image segmentation based on bacterial Quorum Sensing

Fredy Hernán Martínez Sarmiento¹, César Augusto Hernández Suárez²,
Diego Mauricio Acero Soto³

Fecha de recepción: 11 de marzo de 2016

Fecha de aceptación: 23 de agosto de 2016

Cómo citar: Martínez Sarmiento, F. H., Hernández Suárez, C. A., & Acero Soto, D. M. (2016). Segmentación de imagen por color basado en Quorum Sensing bacterial. *Revista Tecnura*, 20(Edición especial), 55-63. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.SE1.a04

RESUMEN

Contexto: El sistema visual del ser humano es capaz de un elevado nivel de procesamiento de imágenes y extracción de información; por otro lado, muchos procesos de toma de decisiones se soportan en el análisis visual como herramienta primaria. Se propone, por lo tanto, un esquema de segmentación de imágenes de acuerdo al color que busca replicar funcionalmente este tipo de procesos a fin de identificar en imágenes el área relevante para la estimación de oxígeno al interior de hornos.

Método: El algoritmo está soportado por esquemas bio-inpirados de navegación autónoma. El sistema trata de imitar el comportamiento de las bacterias (agentes artificiales) cuando se desplazan en un ambiente desconocido en busca de alimento, considerando solamente las lecturas locales del ambiente. El objetivo es que los agentes se muevan hacia las áreas de interés, proceso que se acelera por la inclusión del Quorum Sensing (QS) que consiste en que las bacterias liberan información adicional en el medio cuando se supera un umbral poblacional, lo cual acelera la convergencia.

Resultados: El sistema ha sido aplicado exitosamente para segmentar un conjunto de imágenes provenientes del interior de un horno industrial. A un conjunto de imágenes tomadas al interior del horno de carbonización se le aplica segmentación del área correspondiente a la flama de acuerdo a patrones de referencia. El área a segmentar se identifica mediante el algoritmo propuesto de QS. Luego de remover el resto de la imagen, ésta se utiliza para estimar el contenido de oxígeno a partir de medidas de similitud utilizando el histograma e imágenes de referencia. Los resultados muestran una reducción en los errores de estimación con respecto al mismo proceso sin la segmentación de la imagen.

Conclusiones: Problemas presentes en las imágenes reales tomadas al interior del horno, tales como corrimientos y bajo contraste con el fondo, inciden en estimaciones erróneas del nivel de oxígeno en el proceso de combustión. Se ha demostrado que dichos errores pueden ser reducidos mediante pre-procesamiento de las imágenes, en particular, utilizando el algoritmo propuesto para aislar el área de la imagen con la información relevante.

- 1 Ingeniero Electricista, especialista en Gestión de Proyectos de Ingeniería, candidato a doctor en ingeniería – Sistemas y Computación. Docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: fhmartinezs@udistrital.edu.co
- 2 Ingeniero Electrónico, magíster en Ciencias de la Información y las Comunicaciones, magíster en economía, candidato a doctor en Ingeniería – Sistemas y Computación. Docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: cahernandezs@udistrital.edu.co
- 3 Ingeniero Electrónico, candidato a magíster en Ciencias de la Información y las Comunicaciones. Docente de la Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá, Colombia. Contacto: dacero@pedagogica.edu.co

Palabras Clave: Bacteria, Color, Exploración, Imagen, Segmentación.

ABSTRACT

Context: The visual system of the human being is capable of a high level of image processing and extraction of information; on the other hand, visual analysis is a primary tool in many decision-making processes. Therefore, we propose a color-segmentation scheme in images, which seeks to functionally replicate this type of processes in order to identify in the images the relevant area for the estimation of the amount of oxygen inside furnaces.

Method: Bio-inspired schemes of autonomous navigation support the algorithm. The system tries to imitate the behavior of the bacteria (artificial agents) when they move in an unknown environment in search of food, considering only the local readings of the environment. The objective is for the agents to move to the areas of interest, so we include Quorum Sensing (QS), which consists of the bacteria releasing additional information in the medium when a population threshold is exceeded, and this speeds up the convergence.

Results: The system was successfully applied to segment a set of images from the interior of an industrial furnace. We apply segmentation of the area corresponding to the flame to a set of images taken inside the carbonization furnace, according to reference patterns. The area to be segmented is identified by the proposed QS algorithm. After removing the rest of the image, we used it to estimate the oxygen content from similarity measurements using the histogram and reference images. The results show a reduction in the estimation errors with respect to the same process without the segmentation of the image.

Conclusions: Problems present in the images taken inside the furnace, such as slides and low contrast with the background, produce erroneous estimates of the oxygen level in the combustion process. We performed tests and could conclude that such errors can be reduced by pre-processing the images, in particular using the proposed algorithm to isolate the image area with the relevant information.

Keywords: Bacterium, Color, Exploration, Image, Segmentation.

INTRODUCCIÓN

Los sentidos en el ser humano son capaces de captar gran cantidad de información, la mayor parte de ella inútil y redundante para su actividad racional. En el caso del sistema visual, por ejemplo, se posee un sensor altamente sofisticado que se adapta al ambiente, identifica colores, profundidad, objetos cercanos, características físicas de los objetos, actividad de los objetos en el ambiente, ... todo esto es información innecesaria cuando, por ejemplo, se busca la puerta de salida de un cuarto. Cuando se piensa en dotar un sistema artificial con un sensor visual, tanto el sistema como el sensor deben lidiar con esta cantidad de información, extrayendo aquella información mínima y suficiente para completar la tarea, lo cual es aún más crítico

en aplicaciones en tiempo real (Luna, Silva, y Costa, 2016).

El ser humano resuelve el problema utilizando un filtro natural: la atención (Luna *et al.*, 2016). La retina humana tiene alrededor de cinco millones de conos receptores que son responsables de la visión a color. También posee unos 100 millones de bastones que detectan el contraste monocromático, que es sumamente importante para la nitidez de la imagen. Además, cada ojo puede moverse horizontalmente un promedio de 120 grados, y verticalmente un promedio de 60 grados. Esto proporciona al cerebro una gran cantidad de información, la cual es captada en forma continua. Ciertamente el cerebro no procesa toda esta información; por el contrario, fija su atención en solo una pequeña área de la cual hace un gran

procesamiento, mientras que al resto de la *fotografía* le dedica muy poca atención. Este es el tipo de modelo que se está utilizando en una gran variedad de sensores robóticos (Arrabales y Sanchis, 2008; Burt, 1988).

Esta es una característica importante en un sistema artificial que busca un nivel de inteligencia a nivel del ser humano (*human-level intelligence*, HLI), es decir, un sistema que resuelve el mismo tipo de problemas utilizando el mismo tipo de inferencias (claro, con mecanismos diferentes a los humanos). Sin embargo, no es la única característica, y llegar a un sistema artificial con tal grado de inteligencia requiere un sistema híbrido que combine varias características (Cassimatis, 2007). El elemento clave sigue siendo la atención. El sistema debe poseer un manejo de la atención tal que le permita ejecutar diversos algoritmos de acuerdo con un objetivo o tarea. Esto permite solucionar las debilidades de un determinado algoritmo con otro algoritmo, haciendo que el sistema muestre un mayor nivel de inteligencia.

Este es el principio de diseño que actualmente aborda el grupo de investigación. En particular, esta investigación se centra en el problema de la segmentación por color de una imagen, algoritmo que hace parte de un sistema de control mucho mayor. La aplicabilidad inmediata es en el pre-procesamiento de imágenes que se utilizan para estimar en nivel de oxígeno en el interior de un horno de carbonización (Martínez, Rendón y Guevara, 2016), pero se pretende utilizar en otros sistemas, como el de navegación autónoma de robots y esquemas de agarre en manos robóticas. Es de particular interés la posibilidad de utilizar el algoritmo sobre un sistema embebido en tiempo real (Giral, Romero y Martínez, 2015; Bravo, Navarro y Jacinto, 2010).

En el esquema propuesto se busca identificar una región de interés (*region of interest*, ROI) en las imágenes capturadas por una cámara digital imitando el mecanismo de atención biológico, es decir, utilizando un modelo de atención visual, en principio, funcionalmente similar al sistema

visual humano (Jing, Lei, Li, y Zhenwei, 2013). Para duplicar esta funcionalidad se utilizan bacterias artificiales que exploran la imagen calculando el desempeño del área en la que se encuentran de acuerdo con lecturas locales (básicamente de acuerdo con métricas respecto a referencias). La convergencia del algoritmo se acelera incluyendo *Quorum Sensing* (QS) en el comportamiento de las bacterias (Martínez y Delgado, 2010).

La segmentación de una imagen consiste en fraccionarla en regiones de acuerdo con un determinado criterio (Meurie, Lezoray, Khoudour y Elmoataz, 2010). Dentro del procesamiento de imágenes la segmentación automática es un problema central ya que, en forma similar a la atención en el ser humano, permite enfocar el sistema en un área de interés para extraer de allí la información requerida. En los esquemas tradicionales se considera los espacios de color para aplicar operaciones morfológicas como erosión y dilatación (Comer y Delp, 1999; Ortiz, Torres, Angulo y Puente, 2001; Tsalides, Vardavoulia y Andreadis, 2002).

El artículo se encuentra organizado en la siguiente forma. En la sección 2 se formula el problema estudiado y se presentan algunos conceptos preliminares, el perfil funcional y algunas otras consideraciones de diseño. En la sección 3 se detalla completamente el diseño del sistema, incluyendo los criterios de selección y las especificaciones finales adoptadas. En la sección 4 se presenta la evaluación del desempeño observado en laboratorio del prototipo. Finalmente, la sección 5 concluye el artículo.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

A fin de facilitar la extracción de información relevante en tiempo real de imágenes, se busca una estrategia para cuantificar los colores sin degradar significativamente la calidad del color. El objetivo es utilizar unos cuantos colores representativos que puedan utilizarse para diferenciar regiones en la imagen.

Luego de la cuantificación, a los colores codificados se les asigna etiquetas para conformar categorías de colores (*class-map*) limitadas por distancias entre colores, utilizando alguna métrica. El mapa de categorías puede verse como un conjunto de datos puntuales localizados en un plano 2D. Cada punto se caracteriza por su posición (x, y) y su valor de color, un conjunto de tres matrices en algún espacio de color.

Más formalmente, supóngase un modelo discreto de percepción de imágenes en donde $O(x, y)$ corresponde a la salida i con coordenadas (x, y) de valor $y^*u^*v^*$ en algún espacio de color (idealmente un espacio de color uniforme de tal forma que se permita superposición lineal). $O(x, y)$ toma valores dentro de un conjunto limitado de etiquetas de clasificación.

Si I_k es el k -ésimo color para la imagen I , entonces el plano de color de la imagen percibida es la ecuación (1).

$$P_k(I) = W_k \times I_k \quad (1)$$

donde W_k es el *kernel* de percepción.

Ahora, el plano de colores cuantificado del sistema discreto de percepción está limitado a un número discreto $Y \subset P_k$. La cuantización se define como una asignación de pixeles a los colores cuantizados mediante función de pertenencia.

En el algoritmo propuesto, la asignación de pixeles al *class-map* se realiza mediante una búsqueda aleatorizada imitando el comportamiento de bacterias biológicas. La evaluación de cada pixel en esta exploración utiliza métricas de similaridad.

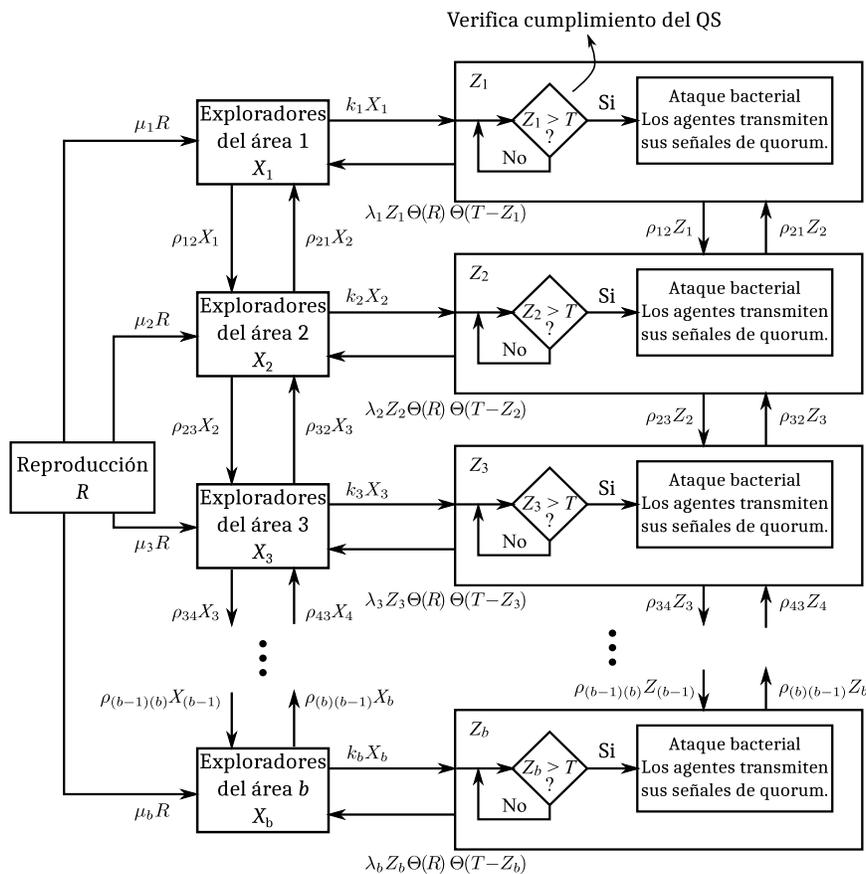


Figura 1. Arquitectura del sistema basado en QS para la segmentación de las imágenes.

Fuente: elaboración propia.

Inspirado por el comportamiento natural de una comunidad de bacterias, se propone una estrategia de exploración y detección de áreas de interés de acuerdo con el color, que permite segmentar imágenes rápidamente y con muy bajo costo computacional. La arquitectura del sistema se muestra en la figura 1.

El sistema está conformado por n bacterias (agentes). Todos los agentes son idénticos en estructura y autónomos. Los agentes adoptan uno de tres posibles comportamientos: reproducción (tamaño poblacional indicado por R); explorador (tamaño poblacional indicado por X_i , donde i indica el área que está explorando el agente); virulento (tamaño poblacional indicado por Z_i , donde i indica el área que está explorando el agente). El sistema comienza desde una bacteria en estado de reproducción, la cual se duplica hasta alcanzar el tamaño poblacional definido para el problema (es una variable definida por el programador). Los agentes pasan luego al estado de exploración en el cual se mueven aleatoriamente por el ambiente (por la imagen) y recopilan lecturas locales a fin de determinar el desempeño del área en la que se encuentran. El desempeño del área se evalúa según el valor del espacio de color y su similitud con imágenes patrón de acuerdo con su histograma. El desplazamiento del agente es inversamente proporcional a la distancia de similitud encontrada. Si la similitud es alta, el agente reduce su desplazamiento, y si, por el contrario, es baja, el agente aumenta su desplazamiento. Cuando la cantidad de agentes en un área i supera el valor T (umbral de QS), estos agentes emiten una señal adicional que puede ser detectada por otros agentes en la vecindad (autoinductores en el sistema biológico), exploradores que se encuentran cerca, pero fuera del área i . Esta señal aumenta el atractivo del área i , haciendo que los agentes cercanos ingresen al área. Las constantes μ , k , λ y ρ establecen la facilidad con que un agente cambia entre comportamientos. El modelo no contempla muerte bacterial, por lo que la suma de las diferentes poblaciones siempre será igual a n .

El área por segmentar de la imagen original es la unión de las n regiones circulares de radio r centradas en la posición de cada agente del sistema.

METODOLOGÍA

La estrategia opera sobre la descripción de la imagen en un espacio de color tridimensional. Existen varias alternativas de espacios de color, los cuales incluyen tonalidad-saturación-intensidad (*Hue-Saturation-Intensity*, HSI), YUV (que tiene en cuenta la percepción humana) y rojo-verde-azul (*Red-Green-Blue*, RGB). La selección del espacio del color está restringida por su utilidad en la aplicación y por el *hardware* de sensado. Dado que se busca que la aplicación sea robusta frente a variaciones de brillo e iluminación (algo común en aplicaciones de robótica), es ideal un espacio de color que codifique colores e intensidad por separado (casos del HSI y YUV, en donde la intensidad se codifica en una sola dimensión, en I y Y respectivamente). La cámara digital utilizada (GC2035 de GalaxyCore Inc.) suministra colores en RGB y YUV (CMOS con arreglo de pixeles de 1616V x 1232H), razón por la que se utiliza YUV como espacio de color en el sistema (el sistema no requiere transformación de espacio de color).

A partir del histograma de las imágenes de referencia se identifica el color característico de cada concentración de oxígeno (Figura 2). Este color se convierte en referencia para la exploración de áreas en la imagen, es decir, el algoritmo busca las áreas similares a los cuatro colores de referencia así:

- Flama con 0% de oxígeno
- Flama con 40% de oxígeno
- Flama con 80% de oxígeno
- Flama con 100% de oxígeno

El porcentaje de oxígeno se codifica de acuerdo con el nivel de aire que se alimenta al horno desde el quemador.

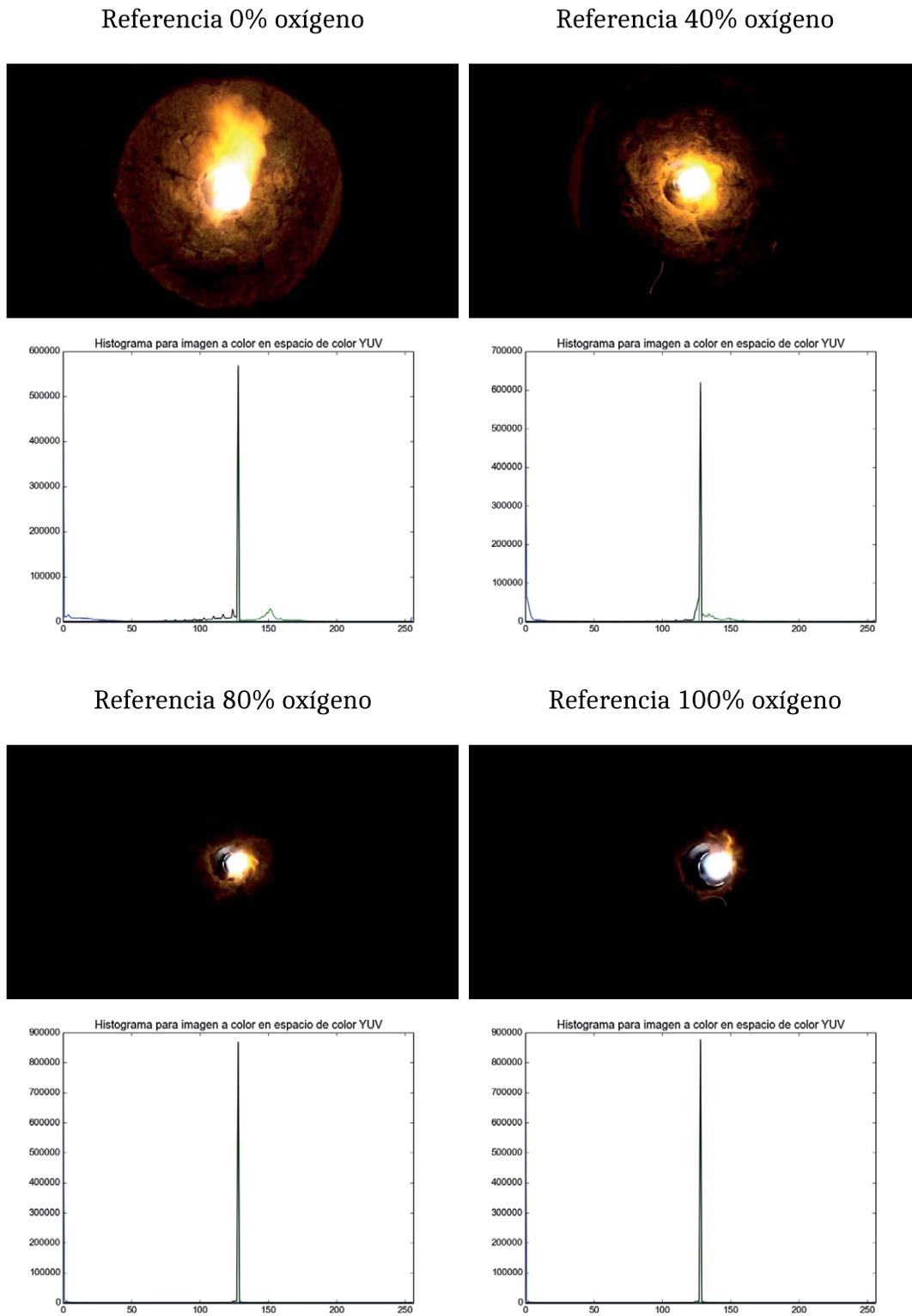


Figura 2. Imágenes de referencia y su histograma en el espacio de color YUV.

Fuente: elaboración propia.

Si el color de comparación se define como: Y_{S0} U_{S0} V_{S0} para el caso de 0% de oxígeno, Y_{S40} U_{S40} V_{S40} para el caso de 40% de oxígeno, Y_{S80} U_{S80} V_{S80} para el caso de 80% de oxígeno, y Y_{S100} U_{S100} V_{S100} para el caso de 100% de oxígeno, entonces el desempeño del pixel se calcula a partir de la distancia como (ecuación (2)).

$$d(i, [S0, S40, S80, S100]) = \min[d(i, S0), d(i, S40), d(i, S80), d(i, S100)] \quad (2)$$

Siendo también la función de desempeño de i . Esto significa que se calculan tres distancias por cada pixel para cada referencia, una por cada

Este es el elemento crítico del algoritmo puesto que impacta directamente su eficiencia, ya que esta operación se debe repetir para cada pixel visitado por un agente. La optimización está garantizada por el modelo QS, ya que no es necesario procesar todos los pixeles de la imagen.

dimensión en el espacio de color. Como la aplicación utiliza cuatro referencias, cada función de desempeño involucra el cálculo de 12 distancias.

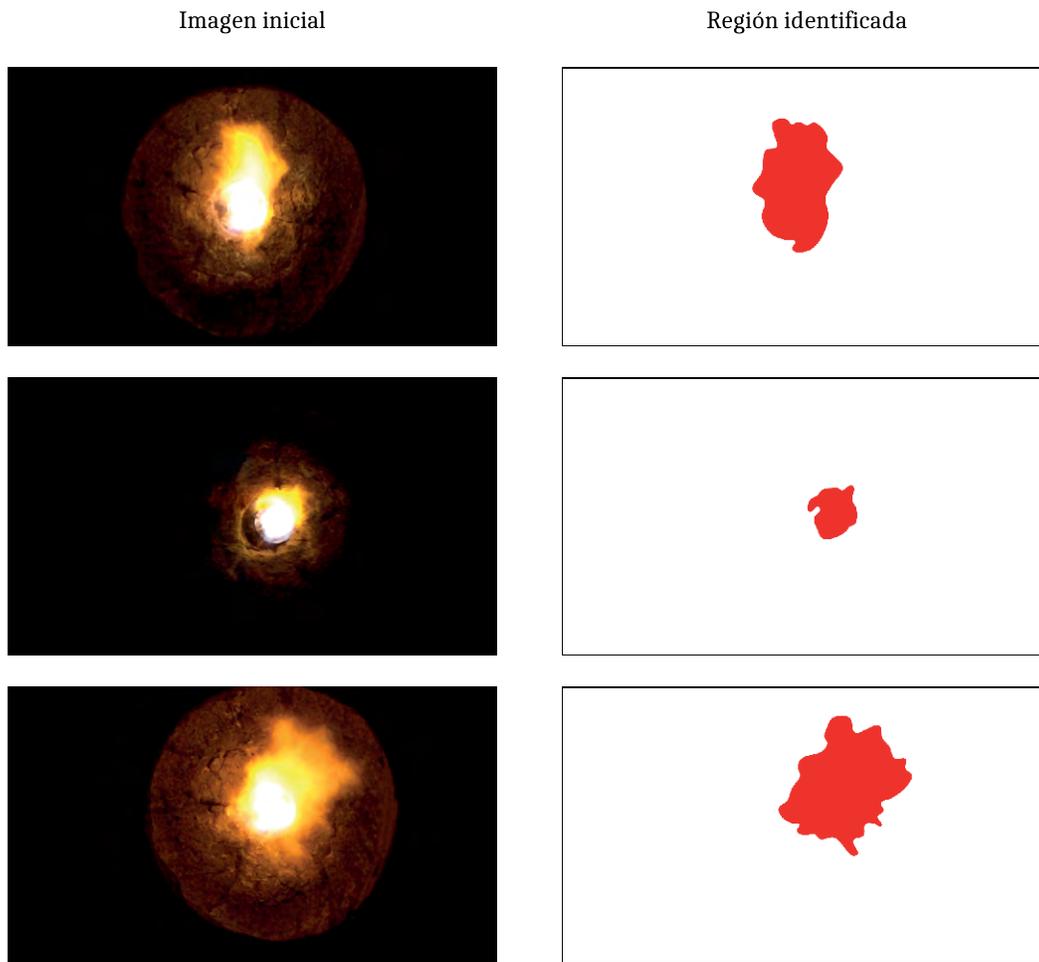


Figura 3. Resultado de segmentación del área de interés para tres estados del sistema.

Fuente: elaboración propia.

Las distancias se evaluaron utilizando cuatro métricas: correlación, chi-cuadrado, intersección y Bhattacharyya. Esta última se utilizó en el prototipo final dado el menor error presentado en la clasificación del área frente a las referencias, y la mejor codificación del universo de discurso de la variable.

RESULTADOS

La implementación del algoritmo se efectuó sobre un prototipo de sensor inteligente para la estimación de contenido de oxígeno en la flama de un horno industrial de carbonización para la producción de carbón activado (Martínez, Rendón, y Guevara, 2016). Este sensor se soporta en una plataforma embebida alrededor de un procesador Allwinner H3 quad core Cortex A7 a 1.2 GHz con un GPU ARM Mali-400MP2 GPU. El sistema operativo es una variante ARM de Linux Debian con *drivers* de captura de video en el *kernel*. El requisito de segmentado por color de la imagen se evaluó como alternativa para incrementar la confiabilidad y robustez del sensor. La plataforma utiliza un sensor CMOS GC2035 de GalaxyCore Inc. diseñado para teléfonos inteligentes y computadores portátiles. En las pruebas iniciales el sistema pudo procesar imágenes de 800 x 600 pixeles a 15 fps. La figura 3 muestra imágenes de ejemplo segmentadas utilizando el algoritmo propuesto.

Para los resultados obtenidos en la figura 3 el algoritmo utilizó una población bacterial de $n = 50$, un umbral de QS de $T = 5$, y valores de conmutación entre comportamientos μ , k , λ y ρ todos iguales a 1.

CONCLUSIONES

Este artículo presenta una nueva estrategia para segmentación de imágenes por color que se caracteriza por su velocidad y bajo costo computacional, es decir, es adecuado para su uso sobre sistemas embebidos en tiempo real. La estrategia realiza una búsqueda aleatorizada de áreas con

similitud a patrones. Esto se logra aplicando una estrategia bio-inspirada que duplica la interacción bacterial. El QS se incluye en el modelo para acelerar la convergencia, lo que genera un agrupamiento de bacterias (agentes) en las diferentes áreas de interés. La principal contribución de este sistema está en que se diseñó para operar sobre un sistema embebido de bajos recursos y bajo costo (Allwinner H3 quad core Cortex A7 a 1.2 GHz con un GPU ARM Mali-400MP2). Frente a otras alternativas, tanto *hardware* como *software*, el sistema demuestra ventajas en desempeño y costo.

REFERENCIAS

- Arrabales, R., y Sanchis, A. (2008). Applying machine consciousness models in autonomous situated agents. *Pattern Recognition Letters*, 29(8), 1033-1038.
- Bravo, V.; Navarro, J., y Jacinto, E. (2010). Diseño e implementación de un codec digital de audio con FPGA, en formato PCM, de 2 canales con interfaz para usuario. *Tecnura*, 14(26), 56-68.
- Burt, P. (1988). Attention mechanisms for vision in a dynamic world. En: 9th international conference on pattern recognition.
- Cassimatis, N. (2007). Adaptive algorithmic hybrids for human-level artificial intelligence. *Advances in Artificial General Intelligence: Concepts, Architectures and Algorithms*, 157.
- Comer, M., y Delp, E. (1999). Morphological operations for colour image processing. *Journal of Electronic Imaging*, 8(3), 279-289.
- Giral, D.; Romero, R., y Martínez, F. (2015). Procesamiento paralelo en FPGA para convolución de imágenes usando Matlab. *Tecnura*, 19(43), 119-138.
- Jing, Z.; Lei, S., Li, Z., y Zhenwei, L. (2013). Pornographic image region detection based on visual attention model in compressed domain. *IET Image Processing*, 7(4), 384-391.
- Luna, E.; Silva, A., y Costa, C. (2016). An attentional model for autonomous mobile robots. *IEEE Systems Journal* (99), 1-12.

- Martínez, F., y Delgado, A. (2010). Hardware emulation of bacterial quorum sensing. *Advanced Intelligent Computing Theories and Applications, Lecture Notes in Computer Science*, 6215, 329-336.
- Martínez, F.; Rendón, A., y Guevara, P. (2016). Combustion quality estimation in carbonization furnace using flame similarity measure. *Similarity Search and Applications, Lecture Notes in Computer Science (LNCS) series*, 9939, 125-133.
- Meurie, C.; Lezoray, O.; Khoudour, L., y Elmoataz, A. (2010). Morphological hierarchical segmentation and color spaces. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 20(2), 167-178.
- Ortiz, E.; Torres, E.; Angulo, J., y Puente, S. (2001). Comparative study of vectorial morphological operations in different color spaces. *Proceedings of SPIE Intelligent Robots and Computer Vision XX: Algorithms, Techniques and Active Vision*, 4572, 259-268.
- Tsalides, P.; Vardavoulia, M., y Andreadis, I. (2002). Vector ordering and morphological operations for colour image processing: Fundamentals and applications. *Pattern Analysis & Applications*, 5(3), 271-287.

