

Producción y resistencia a la corrosión de recubrimientos de WC-Co y Fe-Nb-Cr-W, aplicados por la técnica de proyección térmica

Production and resistance to corrosion of Wc-Co and Fe-Nb-Cr-W coatings applied by insulating projection

LAURA MARCELA DIMATÉ CASTELLANOS¹, JHON JAIRO OLAYA FLÓREZ², EDWIN ALEXIS LÓPEZ COVALEDA³ Y JOSÉ ALFREDO MORALES TORRES⁴

1. Ingeniera física de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.

2. Ingeniero metalúrgico de la Universidad Libre de Colombia. Doctor en Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México. Doctorado en Ciencia y Tecnología de Materiales de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

3. Ingeniero mecánico de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

4. Ingeniero metalúrgico de la Universidad Libre. Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Naval, Marítima y Fluvial. Cartagena.

Recibido: 10/04/2010 Aceptado: 10/05/2010

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

Se depositaron los recubrimientos de WC-Co y Fe-Nb-Cr-W, aplicados por HVOF (*High Velocity Oxygen Fuel*) y arco eléctrico, respectivamente, sobre sustratos de acero SAE 4340. Se realizó un estudio comparativo sobre el desempeño de dichos recubrimientos en una atmósfera corrosiva para determinar su aplicabilidad en la industria naval. Para ello, se caracterizó la microestructura mediante microscopía óptica, microscopio electrónico de barrido (MEB), microscopio electrónico de transmisión (MET) y difracción de rayos X (DRX). La evaluación de la resistencia a la corrosión se determinó mediante pruebas electroquímicas de polarización potenciodinámica y espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE), utilizando un electrolito de NaCl al 3%. En ambos casos, los resultados indican una disminución de la resistencia a la corrosión de

los recubrimientos con respecto al sustrato; sin embargo, es factible su implementación para la recuperación de las piezas en ambientes marinos.

Palabras claves: proyección térmica, recubrimientos, WC-Co, resistencia a la corrosión.

Abstract

WC-Co and Fe-Nb-Cr-W coatings were applied on steel substrates using HVOF (*High Velocity Oxygen Fuel*) and electric arc spray, respectively. SAE 4340 was used as the substrate. We carried out a comparative study on how was the performance of these coatings inside of a corrosive atmosphere to know the possibility of

applying them in the naval industry. So, the coating microstructure was characterized by optical microscopy, Scanning Electron Microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD) and Transmission Electron Microscopy (TEM). Corrosion resistance was assessed by potentiodynamic polarization and Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) test using a NaCl electrolyte at 3 %. In both cases, the results show corrosion resistance in the coatings decreases in relation to the substrate; however, they can use to recover pieces in sea environments.

Keywords: insulating projection, coatings, WC-Co, corrosion resistance.

INTRODUCCIÓN

La proyección térmica se ha desarrollado como una tecnología de recubrimiento de superficies, que consiste en la deposición de material fundido o semifundido, realizada a gran velocidad sobre un sustrato, para producir un recubrimiento. El principal objetivo de esta técnica es proporcionar un aumento en la vida útil de los elementos, ofreciendo una extensa lista de materiales por depositar y de sustratos por recubrir. La velocidad y la temperatura con que impactan las partículas al sustrato definen las propiedades de adherencia, porosidad, dureza, rugosidad y resistencia al desgaste y a la corrosión del recubrimiento que se deposita.

Entre las técnicas más importantes de proyección térmica se encuentran los sistemas de arco y HVOF (*High Velocity Oxygen Fuel*), conocido con proyección térmica de alta velocidad. En el proceso de arco eléctrico, dos alambres del material por depositar cargados eléctricamente con polaridad contraria son llevados en forma simultánea hasta un punto de contacto, donde salta un arco eléctrico que funde los alambres; allí, gas a alta presión proyecta el metal fundido o semifundido en forma de gotas hacia el sustrato [4]. La proyección térmica por arco eléctrico es una de las técnicas más económicas para aplicar recubrimientos metálicos, resistentes a la corrosión, al desgaste, y con buena adherencia [5]. Los bajos costos energéticos y las elevadas tasas de producción la hacen una técnica competitiva respecto a otros sistemas de proyección [6,7].

La utilización de materiales nanocompuestos aplicados por la técnica de arco eléctrico ha sido de gran interés durante la última década, debido a sus inusuales y excelentes propiedades [1]. Estos materiales están constituidos por una o más fases de tamaño menor

que 100 nm, embebidos en una matriz amorfa [8,9]. En esta investigación se depositó un recubrimiento de nanocomposito a base de hierro, que adicionalmente contiene presencia significativa de cromo, tungsteno y niobio, los cuales proporcionan resistencia al desgaste y a la corrosión; se espera que el reducido tiempo de solidificación dé lugar a estructuras de muy corto alcance o nanocompuestas.

La técnica de HVOF quema un combustible como hidrógeno o propano en presencia de oxígeno a alta presión en el interior de una cámara de combustión; dentro de ella o en el escape de los gases se suministra el recubrimiento en forma de polvo que se funde con las altas temperaturas y se dirige a alta velocidad hacia el sustrato junto con los productos calientes de la combustión; con este sistema se logra la combinación de la transferencia de energía térmica y cinética, fundiendo y acelerando a una velocidad de entre 400 y 1000 m/s las partículas sobre el sustrato. El recubrimiento aplicado por esta técnica es WC-Co, un cerámico con elevada resistencia al desgaste, pero difícilmente aplicado como recubrimiento; la técnica de HVOF es una de las pocas en capacidad de depositar estos recubrimientos debido a las elevadas temperaturas de proceso.

En esta investigación se utilizó el sistema de arco eléctrico para producir recubrimientos de Fe-Nb-Cr-W, con el objetivo de formar una estructura de nanocompositos y evaluar su desempeño para proponerlo como remplazo a los recubrimientos de alta resistencia, pero con elevados costos que se logran con el sistema de alta velocidad. Para ello también se utilizará el sistema HVOF con miras a producir un recubrimiento cermet WC-C, en el cual las partículas duras de WC forman el mayor constituyente de la resistencia al desgaste, mientras que el Co actúa como aglutinante, proporcionando resistencia y adherencia [11]. En esta forma se aplicaron dos materiales con propiedades mecánicas muy similares, pero con composición química diferente y usando dos técnicas distintas de proyección térmica: arco eléctrico y HVOF, con el fin de obtener recubrimientos con aplicaciones para la industria naval y comparar los resultados.

La caracterización de los recubrimientos se realizó mediante microscopía óptica, microscopio electrónico de barrido (MEB), microscopio electrónico de transmisión (MET) y difracción de rayos X (DRX); adicionalmente, se determinaron la rugosidad, dureza

y resistencia a la corrosión por medio de pruebas electroquímicas.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Obtención de los recubrimientos

Antes de la deposición de los recubrimientos se preparó la superficie de los sustratos por medio de un disco abrasivo, con el objetivo de limpiar la superficie y lograr la rugosidad apropiada para mejorar la adherencia del sistema. Se utilizaron sustratos de acero AISI SAE 4340 con composición química Fe 1,65 Ni, 0,7 Cr, 0,2 Mo, 0,4 C, 0,6 Mn. El recubrimiento usado en la técnica de arco eléctrico es un alambre de diámetro 0,16 cm tubular, con cuerpo de hierro y relleno de polvos. La composición aproximada del alambre más el polvo es de 40 Fe, 25 Cr, 5 B, 6 Mo, 15 W, 3 Mg, 4 C, 12 Nb, 2 Si y comercialmente se conoce como 140 MXC.

Para mejorar la adherencia se aplicó un recubrimiento base de composición química 95Ni 5Al, que proporciona mejor adherencia al sistema. Los parámetros utilizados para el recubrimiento 140 MXC fueron presión de aire primaria 344,7 kPa, voltaje 29 V, corriente 220 A y distancia de proyección de 200 mm, aplicados con un equipo Eutronic ArcSpray 4. Para el caso del recubrimiento aplicado por la técnica de HVOF, se empleó polvo sinterizado con composición química de 88 WC 12 Co, de forma esférica, con un tamaño promedio de partícula de malla 325 (-44 μm). Los parámetros utilizados para la producción del recubrimiento fueron presión de oxígeno 1723,6 kPa, presión de nitrógeno 275,7 kPa, presión de aire de 137,8 kPa y tasa de deposición de 3,2 kg/h, usando un equipo Tafa ST 4000.

Después de depositar los recubrimientos se midieron los valores de dureza y rugosidad. Los resultados promedio de microdureza Knoop fueron de 550,25, 671,97 y 256,66 $\text{HK}_{0,05}$ para los recubrimientos 140 MXC, WC-Co y el sustrato de acero 4340, respectivamente. Mediante un rugosímetro se determinaron los valores de rugosidad, R_a , que en promedio fueron de 5 μm para los recubrimientos 140 MXC y 3,5 μm para el recubrimiento WC-Co.

Caracterización microestructural

Los recubrimientos se caracterizaron estructuralmente mediante difracción de rayos X con un equipo X-pert

Pro Panalytical en modo haz rasante con la línea monocromática $k\alpha$ del cobre (1,540998Å) trabajando a 45 kV y 40 mA. La medición del espesor y la porosidad cualitativa se hizo con un microscopio óptico Leco de lentes convexas, mediante corte transversal de los recubrimientos. Éstos se estudiaron superficialmente a través de microscopía electrónica de barrido con un equipo FEI Quanta 200 en alto vacío y a un voltaje de 30 kV. El estudio químico se realizó con el mismo equipo electrónico en modo EDS con un voltaje de 20 kV. El recubrimiento 140 MXC se caracterizó por medio de microscopía electrónica de transmisión con el equipo FEI Tecnai 20 Twin, con energía de 200 kV en modo difracción y 100 kV para observación y mapeo.

Finalmente, la evaluación de la resistencia a la corrosión se efectuó con el equipo Gamry Reference 600 Potenciostat/Galvanostat/ZRA, utilizando un contraelectrodo de grafito de alta pureza y un electrodo de referencia de calomel saturado (SCE), siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM G5 [12]. El electrolito empleado fue NaCl al 3% y el área expuesta a la solución electrolítica fue de 0,79 cm^2 . En los ensayos de polarización potenciodinámica se hicieron barridos entre -0,3 y 1,0 V con respecto al potencial de reposo, con una variación de 0,5 mV/s. Para las pruebas de espectroscopia de impedancia electroquímica el barrido se realizó con una frecuencia inicial y final de 10 mHz y 100 kHz, respectivamente, empleando una perturbación de 10 mV.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 1 se muestra la sección transversal de los recubrimientos 140 MXC y WC-Co, con espesores de 936,5 μm y 1384,7 μm para la capa base y recubrimiento 140 MXC, respectivamente, y 51,81 μm para el WC-Co. Se observó buena adherencia del recubrimiento al sustrato, mayor porosidad en el recubrimiento 140 MXC y formación de óxidos en la capa base, los cuales se observan como zonas oscuras en las micrografías de secciones transversales [13]. El recubrimiento aplicado por HVOF es más homogéneo y posee pocos defectos.

La figura 2 presenta las micrografías de MEB para 140 MXC a diferente magnificación (se indican con letras mayúsculas los lugares donde se tomó composición química). En la figura 2a) y b), se observa la presencia de partículas semifundidas, no fundidas comúnmente,

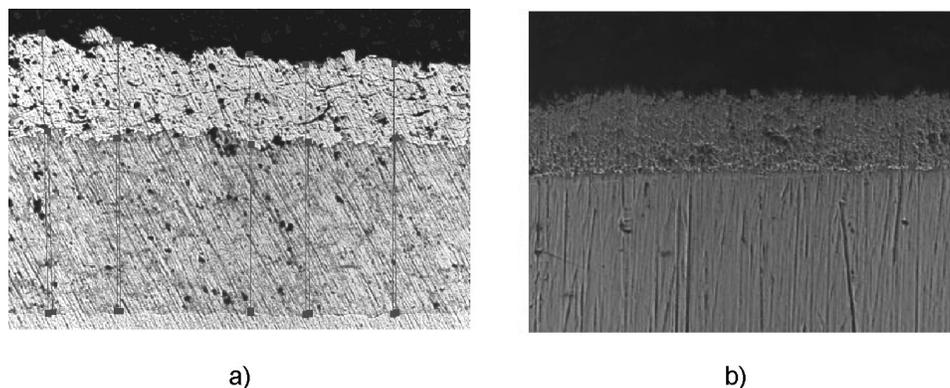


Figura 1. Micrografía óptica de medición del espesor de los recubrimientos a) 140 MXC y b) WC-CO a 500X.

llamadas satélites, poros y óxidos, los cuales se corroboraron con DRX. Es posible observar que el material depositado se proyectó en forma de gota y posteriormente fue aplastada por deformación por contacto con las gotas vecinas, formando láminas que producen un recubrimiento sólido y compacto. En la figura 2b) se observan morfología tipo venas que se forman cuando se enfría el material y no se alcanza a formar la estructura lenticular, lo cual puede ocurrir porque el recubrimiento base Ni-5Al tiene menor punto de fusión [14-16]. En la figura 2c) no se presentan microgrietas superficiales, sin embargo se observan defectos como venas y óxidos. Estos defectos pueden ser causados por no alcanzar la temperatura de fusión del material, la baja temperatura del sustrato al momento de la deposición, o baja velocidad de partículas durante la proyección.

En la figura 3 se muestran las microestructuras obtenidas del recubrimiento 140 MXC, las cuales revelan una estructura con partículas nanométricas de tamaño

entre 7 y 10 nm, con composición aparentemente homogénea y sin segregación de elementos.

Se puede observar que el patrón de difracción es difuso e indica cristalinidad sin orientación preferencial [17]. Es probable que este material esté compuesto por cristales BCC de cromo y niobio, orientados en los planos (413) y (332). Los diámetros atómicos de estos elementos son similares al del hierro y no son alotrópicos; si se tiene en cuenta la composición porcentual del recubrimiento, es posible que la aleación entre los elementos de los polvos y el hierro del alambre no se haya realizado completamente [18]. Es poco probable que estos cristales pertenezcan al hierro BCC, debido a las transformaciones alotrópicas propias de este elemento y a las rápidas tasas de enfriamiento que propician elevadas tasas de nucleación y reducidas tasas de crecimiento [19]. Es posible la presencia de la estructura HCP de hierro gamma deformada con diferentes relaciones a/c , que pueden ocurrir por los diferentes

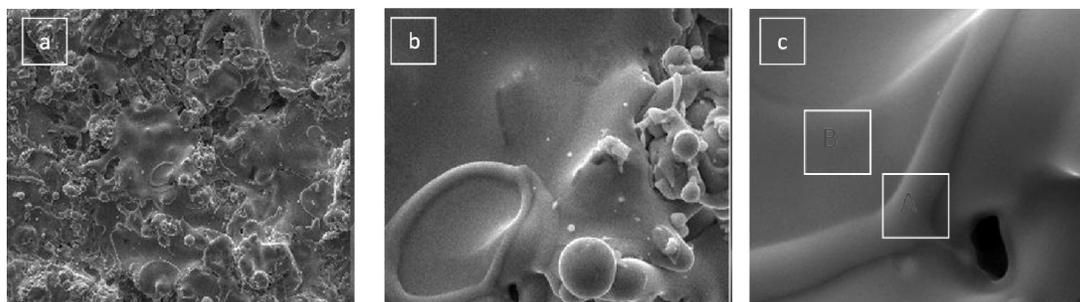


Figura 2. Micrografía SEM del recubrimiento 140 MXC: a) 500X; b) 3000X; c) 10.000X.

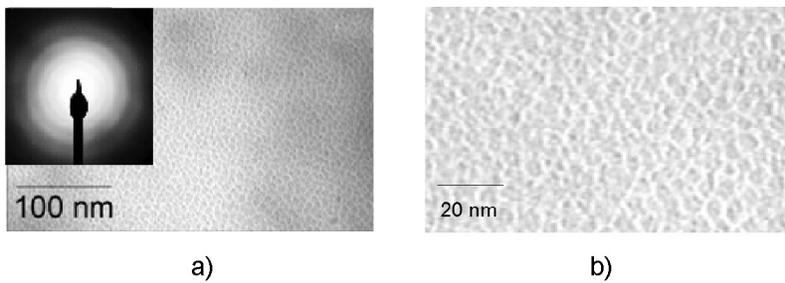


Figura 3. Radiografías TEM del recubrimiento 140 MXC a) utilizando 100 kV y difracción de electrones tomada con 200 kV, y b) utilizando 100 kV.

elementos que se encuentran en la aleación con radio atómico similar al del carbono. Las estructuras HCP se pueden relacionar por la presencia en el plano (103) con relación c/a 1,095, 1,265, 1,51 y 1,89 y el plano (310) que no depende de la relación c/a .

En la micrografía del recubrimiento WC-CO (figura 4), se observa un recubrimiento uniforme, con pequeñas inclusiones de óxidos, poros, diferentes tamaños de partícula y, en ciertos casos, cavidades. Algunos investigadores han encontrado que las zonas claras se relacionan con la fase WC del cermet depositado [20].

Sobre las imágenes SEM en las figuras 2c) y 4c), se tomaron espectros de EDS en áreas diferentes. En la tabla 1 se presentan los resultados semicuantitativos de composición para el recubrimiento 140 MXC y se compararon con las reportadas por el fabricante. Se puede observar que no hay un cambio significativo en la composición química entre regiones.

En la tabla 2 se presentan las composiciones químicas semicuantitativas del material cermet WC-Co. Se observa un cambio en la composición de Co en diferentes regiones morfológicas.

Tabla 1
Composición química en distintas regiones del recubrimiento 1040 MXC

Composición fabricante	Región A		Región B		
	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	
Elemento	en peso	en peso	atómico	en peso	atómico
O	---	5,23	16,95	5,47	17,56
Al	---	0,7	1,34	0,6	1,14
Si	<2	0,12	0,21	0,06	0,11
Nb	<12	9,54	5,32	10,37	5,73
Cr	<25	26,96	26,86	30,04	29,66
Fe	Balance	50,9	47,22	47,72	43,88

En la figura 5a) se observa el espectro de DRX para el recubrimiento 140 MXC. En estos resultados se encontró que es probable la presencia de estructuras BCC de Cr_3O y HCP y BCC del hierro. En la figura 5b) se muestra el difractograma obtenido del recubri-

Tabla 2
Composición química del recubrimiento WC-Co

Región	Composición fabricante		Área		Puntual	
	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje
Elemento	en peso	en peso	atómico	en peso	atómico	atómico
C	---	3,8	32,58	14,75	67,57	67,57
Co	12	11,44	19,98	10,9	10,18	10,18
W	---	84,76	47,44	74,35	22,25	22,25

miento WC-Co, en el cual se observa principalmente la presencia de fases secundarias de W y W_2C , debido al proceso de descarburización durante la proyección [21].

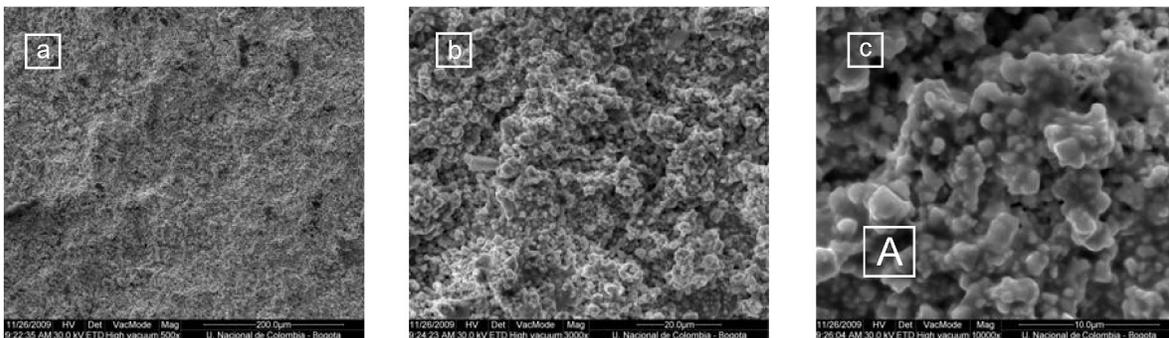


Figura 4. Micrografía SEM del recubrimiento 1342: a) 500X; b) 3000X; c) 10.000X.

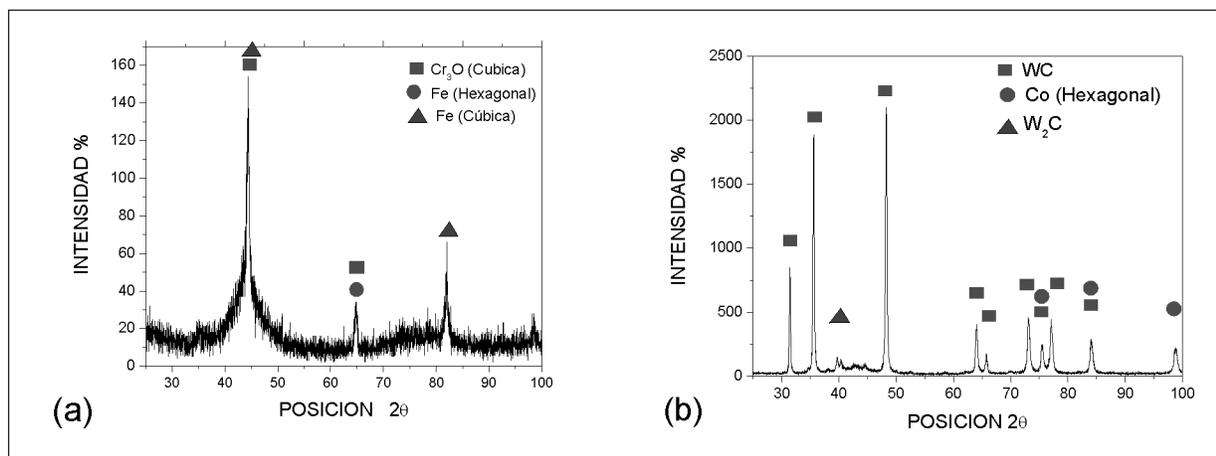


Figura 5. Difractograma de XRD: a) recubrimiento 140 MXC, b) recubrimiento WC-Co.

Es posible una transición de fases del recubrimiento a causa de que el carbono se separa de la fase WC, permitiendo la formación de la fase W₂C y la fase metálica W, desarrollando así regiones amorfas-nanocristalinas que posiblemente se forman como consecuencia de la disolución del carbono o el tungsteno y de la difusión dentro de la matriz [22]. También se observa la presencia de la fase hexagonal del Co, que mejora la adherencia del compuesto.

En la figura 6 se registran la curva de polarización potenciodinámica y la gráfica de Bode (frecuencia vs. modZ) para el recubrimiento 140 MXC, WC-Co y el acero SAE 4340. En estas gráficas se puede apreciar que el sustrato es el que ofrece mejor resistencia a la corrosión, es decir, tiene los valores del potencial de corrosión más positivos, los valores más altos de impedancia y las densidades de corriente más pequeñas. Estos resultados se presentan cuantitativamente en la tabla 3.

Relacionando los resultados de los recubrimientos se observa menor resistencia a la corrosión en los recubrimientos 140 MXC, que puede tener que ver con la mayor porosidad que se genera en los recubrimientos producidos por la técnica de arco. Los defectos –como los poros– le permiten a la solución electrolítica penetrar

y atacar el sustrato mediante la generación de un par galvánico, la degradación del sustrato y la pérdida de adherencia del recubrimiento. Sin embargo, es importante observar que la diferencia en los valores electroquímicos que valoran la resistencia a la corrosión es lo bastante estrecha para pensar en aplicar indistintamente estos recubrimientos para la recuperación de piezas en la industria naval.

Por otro lado, en la región de polarización potenciodinámica anódica de los recubrimientos se aprecia una zona de disolución, seguida del aumento de la polarización; se presenta también la posible formación de una zona de transpasivación, asociada con el cambio de pendiente [23]. En los resultados de impedancia se observan dos pendientes que están relacionadas con dos tiempos de relajación. Generalmente, la pendiente que se presenta a mayores frecuencias se atribuye a la capacitancia de la zona de transferencia de carga que está relacionada con un recubrimiento que presenta porosidades y el valor de dicha capacitancia es el del recubrimiento. La siguiente pendiente se presenta a bajas frecuencias y se relaciona con propiedades eléctricas que se generan en la interfase sustrato - recubrimiento a través de los poros del recubrimiento [24].

Tabla 3

Valores cuantitativos de las pruebas electroquímicas

Recubrimiento	I corr (A)	E corr (V)	Zmod
140 MXC	1,46E-05	-5,57E-01	1256,85
WC-Co	1,22E-05	-5,96E-01	2536,46
SAE 4340	2,77E-6	-7,73E-2	3380,46

CONCLUSIONES

El recubrimiento depositado por la técnica de arco eléctrico presentó estructuras nanoestructuradas sin orientación preferencial embebidas en matriz amorfa, característica propia de las deposiciones que involucran polvos. La formación de nanocristales se debe principal-

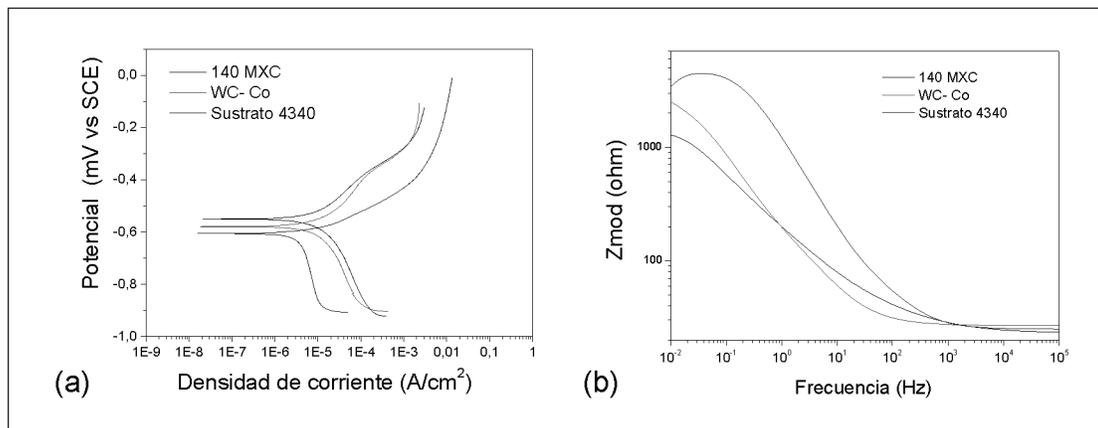


Figura 6. a) Curva de polarización potenciodinámica de los recubrimientos 140 MXC, WC-Co y el sustrato de acero SAE 4340; b) curva de impedancia de los recubrimientos 140 MXC, WC-Co y el sustrato de acero SAE 4340.

mente a elevadas tasas de enfriamiento, sus propiedades son similares a las del recubrimiento WC-Co producido por la técnica de HVOF, pudiendo utilizarse así cualquiera de las dos técnicas sin variación significativa de los resultados.

Los resultados de DRX y MET para el recubrimiento 140 MXC coinciden en indicar que el proceso de deposición está proyectando hierro sin fundir con estructura BCC y fundido con estructura HCP, cuya relación c/a no es constante debido a la presencia de múltiples elementos aleantes y elevadas tasas de enfriamiento. También es posible establecer que el depósito de 140 MXC contiene zonas amorfas homogéneamente distribuidas, obtenidas durante el rápido enfriamiento.

Además, se hace necesario utilizar un microscopio electrónico de transmisión de alta resolución (HR-TEM) para determinar la composición de los nanogranos obtenidos, así como para establecer de manera puntual la cristalografía y composición de cada uno.

El tamaño de los nanogranos obtenidos es similar al de los polvos que rellenan el alambre depositado por arco eléctrico, lo cual indica que posiblemente estos son los lugares de nucleación. La distribución de elementos es homogénea y no presenta segregación, por lo que se concluye que los parámetros de depósito están correctamente establecidos.

La formación de las regiones nanocristalinas en los recubrimientos mejora la resistencia a la corrosión de los recubrimientos, proceso que se debe a tres mecanismos: 1) rápido enfriamiento, 2) difusión de elementos, 3) que ambos procesos pueden ocurrir simultáneamente.

Los valores obtenidos de resistencia a la corrosión de los recubrimientos estudiados son similares, lo que los hace recomendables para aplicaciones navales, especialmente para recuperación dimensional en piezas de acero al carbono.

Teniendo presentes las características de los recubrimientos obtenidos por las dos técnicas, así como la tecnología e insumos propios de cada una, se hace factible la implementación de la proyección térmica por arco eléctrico en la industria naval colombiana.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo económico de Cotecmar, Indumil y el Grupo Social y Empresarial de la Defensa (GSED).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ajayan, P.M. & Braun, P.V. (2003). Nanocomposite science and technology. Weinheim, pp. IX-76.
- [2] Shipway, P. & McCartney, D. (2005). Sliding wear behavior of conventional and nanostructured HVOF sprayed Wc-Co coatings. *Wear*, vol. 259, pp. 820-827.
- [3] ASM International. *Handbook of thermal spray technology*, J.R. Davis & Associates (ed.).
- [4] *Handbook of Hard Coatings* (2003). Thermal Spraying and Detonation Gun Processes, tomo 3.
- [5] Marulanda, J. (2000). *El rociado térmico y sus aplicaciones* (publicación universitaria).
- [6] Dobler, K. (2006). *Reconditioning Power Generation Components with Thermal Spray Welding Journal*.
- [7] Department of the Army (2005). U.S. Army Corps of Engineers. *Thermal spraying: new construction and maintenance*. EM 1110-2-3401. Washington, DC, 20314-1000.

- [8] Kulisch, W., Colpo, P. & Rossi, F. (2004). Characterization of hybrid PVD/PACVD system for the deposition of TiC/Cao nanocomposite films by OES and probe measurements. *Surface & Coatings Technology*, vol. 188, pp. 714-720.
- [9] Shu, Y., Rong, T. & Akihiko, I. (2010). SiC-SiO₂ nanocomposite films prepared by laser CVC using tetraethyl orthosilicate and acetylene precursors. *Materials Letters*, vol. 64, pp. 2151-2154.
- [10] Tan, C., Looney, L. & Hashmi, M.S.J. (1999). Component repair using HVOF thermal spraying. *Journal of Materials Processing Technology*, 92-93.
- [11] Hyung-Jun, Kima, Chang-Hee, Leeb & Soon-Young, Hwanga (2005). Fabrication of WC-Co coatings by cold spray deposition. *Surface & Coatings Technology*, 191, 335-340.
- [12] ASTM G5 - 94 (2004). Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements.
- [13] Pina, J., Dias, A. & Lebrun, J.L. (2003). Study by X-ray diffraction and mechanical analysis of the residual stress generation during thermal spraying. *Materials Science and Engineering*, A347.
- [14] Newbery, A.P. & Grant, P. (2006). Oxidation during electric arc spray forming of steel. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 178, issues 1-3, 14.
- [15] Georgieva, P., Thorpe, R. Yanski, R. & Seal, A. (2006). Nanocomposite materials: an innovative turnover for the wire arc spraying technology. *International Thermal Spray & Surface Engineering*, vol. 1, issue 2.
- [16] Madaeni, S., Aalami-Aleagh, M. & Daraei, P. (2008). Preparation and characterization of metallic membrane using wire arc spraying. *Journal of Membrane Science*, 320, 541-548.
- [17] Galvan, D., Pei, Y.T. & De Hosson, J.Th.M. (2005). TEM characterization of a Cr/Ti/TiC graded interlayer for magnetron-sputtered TiC/a-C:H nanocomposite coatings. *Acta Materialia*, vol. 53, 3925-3934.
- [18] Leyland, A. & Matthews, A. (2010). Metal-Metal Nanocomposite Coatings with Enhanced Mechanical Properties. *IGR Report GR/N03495/02*.
- [19] Lianga, Bo, Dinga, C., Liaob, H. & Coddet, C. (2006). Phase composition and stability of nanostructured 4.7 wt.% yttria-stabilized zirconia coatings deposited by atmospheric plasma spraying. *Surface & Coatings Technology*, vol. 200, 4549-4556.
- [20] Lima, C.R. & Camargo, F. (2003). Evaluation of HVOF Coatings for Wear Applications. *Advancing the Science & Applying the Technology*.
- [21] Hyung-Jun, Kima, Chang-Hee, Leeb & Soon-Young, Hwanga (2005). Fabrication of WC-Co coatings by cold spray deposition. *Surface & Coatings Technology*, 191, 335-340.
- [22] Magnani, M., Suegama, P.H., Espallargas, N., Dosta, S., Fugivara, C.S., Guilemany, J.M. & Benedetti, A.V. (2008). Influence of HVOF parameters on the corrosion and wear resistance of WC-Co coatings sprayed on AA7050 T7. *Surface & Coatings Technology*, vol. 202, issue 19, pp. 4746-4757.
- [23] Fattah-Alhosseini, A. & Attarzadeh, N. (2011). The Mechanism of Transpassive Dissolution of AISI 321 Stainless Steel in Sulphuric Acid Solution. *International Journal of Electrochemistry*, vol. 2011.
- [24] Flores, J.F., Valdez, B., Schorr, M. & Olaya, J.J. (2006). Corrosion protection of steels by PVD TaN thin films. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, vol. 53, issue 2, pp. 88-94.

Modelo de inventarios y espacio en góndola en puntos de venta para productos de abarrotes en una cadena de supermercados (2a. parte) Inventory and shelf space model in points of sale for grocery stores chain

CARLOS RODRIGO RUIZ CRUZ¹, ARNULFO ZAMORA VIVAS²
Y CARLOS JULIO VIDAL HOLGUÍN³

1. Escuela Colombiana de Ingeniería. Centro de Estudios en Producción, Facultad de Ingeniería Industrial. Bogotá, D.C., Colombia.
2. Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería Industrial y Estadística. Cali, Colombia.
3. Caja de Compensación Familiar del Valle del Cauca (Comfandi). Departamento de Informática. Cali, Colombia.

Recibido: 28/11/2009 Aceptado: 22/01/2010
Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

La gestión de inventarios es uno de los campos más estudiados desde el punto de vista teórico, pero la aplicación práctica de sus desarrollos aún es limitada. En este proyecto se aplican conceptos y técnicas de la gestión de inventarios al manejo de miles de ítems en una cadena de venta minorista. Inicialmente se analiza el problema desde sus antecedentes y después se estudian diferentes factores que afectan la demanda de los ítems, con el propósito de identificar comportamientos que deban manejarse dentro del modelo propuesto; para esto se utiliza una muestra representativa de ítems del catálogo. A continuación se propone la aplicación de una clasificación ABC de los ítems y de los puntos de venta, con el fin de priorizar con este criterio las decisiones relacionadas. Luego se analizan varias alternativas de pronósticos de demanda, que permitan estimar el comportamiento futuro de ésta y que sirvan de insumo principal para la definición del modelo de inventarios. Como elemento adicional e innovador en este proyecto, se propone un modelo para establecer el espacio óptimo en góndola que se va a asignar a cada ítem. Por último, se plantea un sistema de control de inventarios (R, S), donde se consideran los efectos de los factores previamente identificados, y se proponen acciones administrativas para garantizar el adecuado funcionamiento del modelo.

Palabras claves: control de inventarios, ventas al por menor, productos de consumo masivo, espacio en góndola.

Abstract

Inventory management has been considerably studied from a theoretical perspective; however, we note a limited application in real world. This project is oriented to apply such concepts and techniques to a retail store with several points of sale and thousands of items. First, we have reviewed the background. Then we have studied related factors affecting demand to identify the effects that should be included in the proposed model. For this purpose, we used a sample from the catalog. Next, we have made an ABC analysis to classify both items and points of sale, and to give priority to related decisions. We have proved several demand-forecasting techniques to anticipate its behavior and allow establishing the inventory model. As an additional and innovative proposal, we have developed a model of shelf space allocation. Finally, a (R, S) inventory system is developed, considering all factors previously identified. Managerial issues are proposed to keep the system in good working order.

Keywords: inventory control, retailing, mass consumption items, shelf space.

MODELO DE ESPACIO EN GÓNDOLA

El espacio es uno de los más importantes recursos para el negocio minorista, y como todo recurso escaso, el objetivo que se debe perseguir es optimizar su uso. El correcto manejo del espacio en góndola no sólo puede contribuir a reducir los niveles de inventario, sino también a mejorar las relaciones con los proveedores y consumidores.

Buttle (1984) destaca cinco factores en la asignación de espacio que deben considerarse para aumentar las ventas y, por consiguiente, las utilidades:

- Distribución de las localizaciones del punto de venta.
- Localización de las categorías de productos.
- Localización de ítems dentro de las categorías.
- Exhibición fuera de góndola.
- Soporte promocional.

Diferentes autores han identificado el efecto de otros factores, entre los que sobresalen los siguientes:

- *Elasticidad del espacio* (Curhan, 1973). Se define como el coeficiente de cambio relativo en la demanda ante cambios en el espacio en góndola. Este factor ha sido uno de los más estudiados y sobre el cual se han conducido más experimentos (Doyle y Gidengil, 1977; Dreze et ál., 1994), por medio de los cuales se ha demostrado el gran impacto que tiene el tamaño de la exhibición, así como la localización, en la demanda de un ítem (Corstjens y Doyle, 1981 y 1983).
- *Efecto visual*. Phillips y Bradshaw (1993) demostraron que el espacio y la ubicación de un producto tienen influencia sobre la decisión de compra, debido a que la visión periférica de una persona caminando por el pasillo de un punto de venta logra, de una manera subconsciente, que se escaneen las góndolas por las cuales se transita, de modo que un producto con un amplio espacio de exhibición y en una posición cercana al plano visual, tendrá más probabilidad de ser elegido en la compra, y con mayor frecuencia. Esto ratifica a Muller et ál. (1953), quienes establecieron que los consumidores compran un 22% más cuando las góndolas están completamente abastecidas; este efecto también se conoce como *efecto psíquico* (Larson y DaMarais, 1990).
- *Localización del punto de venta*. Hoch et ál. (1995), Montgomery (1997) y Mulhern et ál. (1998) demostraron que la composición demográfica del área de influencia del punto de venta puede tener un alto impacto en la reacción de los consumidores ante los precios, promociones y ofertas. El análisis de este factor puede aprovecharse para mejorar el desempeño de una cadena a través de estrategias de variedad de surtido en los diferentes puntos de venta, ajustando la oferta de los productos a las características propias de su zona de influencia, y adaptando la asignación de recursos, como presupuestos promocionales, publicidad, personal, espacio, según las necesidades propias del punto de venta.
- *Atracción relativa*. Muchas categorías de productos generan un efecto doble sobre la demanda del punto de venta, pues en primer lugar logran atraer consumidores e influyen en sus patrones de consumo (Chen et ál., 1999), y en segundo término, el efecto de la presentación de una categoría de productos puede tener un efecto más allá de las ventas de la propia categoría, impulsando la venta de otras presentes en el punto de venta; en otras palabras, se pueden lograr sinergias entre categorías.
- *Manejo de materiales*. El tiempo y los costos relacionados con el resurtido de las góndolas dependen no sólo del espacio asignado, sino también de la presentación y forma de exhibición de los productos. Se conocen pocos estudios sobre el efecto de este factor y su manejo (Van Zelst et ál., 2006).
- *Elasticidad cruzada*. Se define como el coeficiente de cambio relativo en la demanda de un ítem ante cambios en el espacio en góndola de otro ítem (Abbott y Palekar, 2007). Su efecto puede ser positivo, en cuyo caso la presencia de un producto estimula la venta de otro, por lo que se pueden considerar productos complementarios. En el caso contrario, elasticidad cruzada negativa, la presencia de un producto disminuye las ventas de otro, de tal forma que se pueden considerar productos sustitutos.
- *Elasticidad del espacio vacío*. Se define como el coeficiente de cambio relativo en la demanda de un ítem ante cambios en la cantidad de espacio vacío (Abbott y Palekar, 2007).
- *Nivel de servicio*. Este es un elemento fundamental para garantizar la lealtad del consumidor, debido al efecto psicológico negativo que generan los faltantes, puesto que en este tipo de negocios, en general, éstos

se convierten en ventas perdidas (Reyes y Frazier, 2007).

- *Sensibilidad al precio.* El consumidor regularmente prefiere precios bajos, aunque en algunas ocasiones no es la única característica del producto que influencia la compra. Reyes y Frazier (2007) la definen, en su modelo de asignación de espacio, como el efecto que tiene el cambio de precio sobre la demanda de un producto dentro de una categoría.
- *Disponibilidad de bodega en el punto de venta.* Hariga et ál. (2007) incluyeron dentro de la decisión de asignación de espacio la disponibilidad de un área de bodega en la trastienda del punto de venta, adicional al propio espacio de exhibición, y lo integran dentro de las decisiones de nivel de inventarios.

El problema de asignación de espacio en la góndola a los diferentes ítems se puede considerar del tipo *Shelf Space Allocation Problem* (SSAP), se asemeja al problema *knapsack*, pero con restricciones adicionales a la capacidad (Yang, 2001); esto conlleva una complejidad NP-hard en la búsqueda de soluciones óptimas.

Los modelos de solución propuestos en la bibliografía existente consideran, o excluyen, de diferente manera los factores antes mencionados. Entre ellos Abbott y Palekar (2007) proponen modelos lineales, donde adicionalmente proponen el término “cantidad mínima de presentación” (MPQ, *minimum presentation quantity*) para referirse al mínimo de espacio en góndola asignado a un producto para generar las ventas correspondientes a su demanda inherente; según estos autores, el nivel de inventario en el punto de venta nunca debería caer por debajo de este nivel. Yang y Chen (1999) proponen la solución de un modelo de programación lineal entera mixta a través de un procedimiento por etapas, para reducir la complejidad inherente.

Los modelos no lineales son comunes en la literatura. La solución de éstos incluye reglas de decisión (Sharp, *shelf allocation for retailers' profit* [Bultez y Naert, 1988]), algoritmos eficientes derivados del problema de *knapsack* (Yang, 2001), métodos heurísticos de búsqueda por gradiente y algoritmos genéticos (Hwang et ál., 2005), minería de datos (Chen et ál., 2006) y programación por objetivos (Reyes y Frazier, 2007).

Dos enfoques opuestos se pueden asumir para la solución de este problema (Desmet y Renaudin, 1998): el primero de tipo “ascendente”, en el cual se asigna espacio a cada producto de acuerdo principalmente

con los costos de manejo y restricciones de visibilidad, y luego sucesivamente se agregan los productos, y su espacio asignado, en familias, categorías, etc., hasta llegar al nivel de punto de venta; este enfoque es eminentemente operacional. El segundo enfoque, de tipo “descendente”, empieza desde el análisis y asignación a cada punto de venta y desagrega los resultados hasta llegar al nivel de productos.

Desde el punto de vista de la gestión operativa, el problema de asignación de espacio en góndola es de una naturaleza tan compleja que la mayoría de las cadenas no tienen suficiente conocimiento para tomar decisiones adecuadas. Como alternativa de apoyo se encuentran comercialmente paquetes de *software*, entre los cuales se pueden mencionar Apollo (IRI) y Spaceman (Nielsen). La desventaja de estos sistemas es la limitada funcionalidad en lo referente a soporte en la toma de decisiones por su concentración en aspectos puramente contables y no operativos (Yang y Chen, 1999).

Modelo propuesto

El enfoque propuesto es del tipo descendente y por etapas, de manera que se busca una solución a diferentes niveles jerárquicos, lo que implica cierto nivel de agregación de la información; a medida que se desciende a través de los niveles se desagrega la solución del nivel superior y se busca una nueva solución en tal nivel. El modelo de clasificación de la empresa agrega los ítems de la cadena, y de cada punto de venta, en categorías, siendo la más general la sección, la cual consta de familias, subfamilias, grupos, subgrupos, hasta llegar finalmente al nivel de ítems.

Supuestos

- Se conocen *a priori*:
 - Los ítems que componen el catálogo de cada punto de venta.
 - El planograma de distribución del punto de venta.
 - Las características de las góndolas.
 - Las familias y subfamilias asignadas a cada sección (pasillo o góndola) del punto de venta.
- No se consideran los efectos de las promociones y ofertas.

- No se tiene en cuenta la exhibición fuera de góndola (exhibición de piso, extremos de pasillos, etc.). El modelo propuesto se representa en la figura 3.

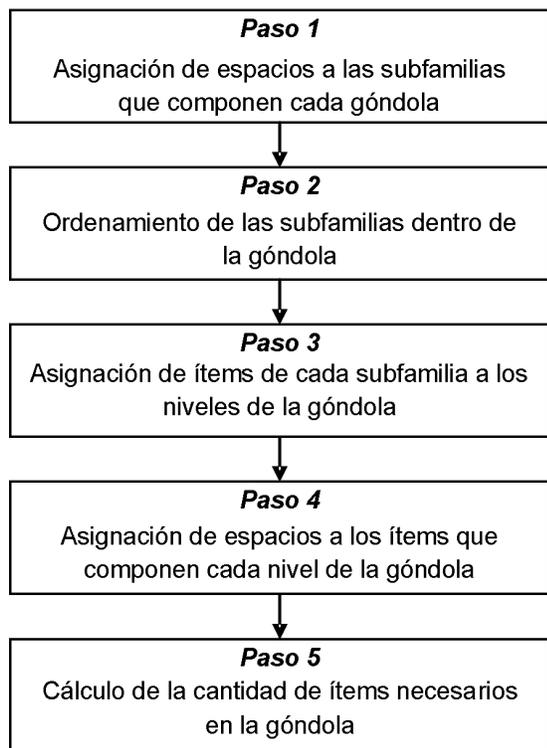


Figura 3. Modelo propuesto de asignación de espacio en góndola.

Paso 1. Asignación de espacios a las subfamilias que componen cada góndola

El objetivo de este primer paso es maximizar la utilidad generada por la góndola, una vez conocidas las subfamilias que la componen, la utilidad generada por cada subfamilia en función del espacio asignado (se asume lineal), el mínimo de espacio por asignar a cada subfamilia y el espacio longitudinal disponible de la góndola (figura 4).

Parámetros

- n: número de subfamilias asignadas a la góndola.
- u_i : utilidad promedio generada por unidad de espacio longitudinal asignado a la subfamilia i .

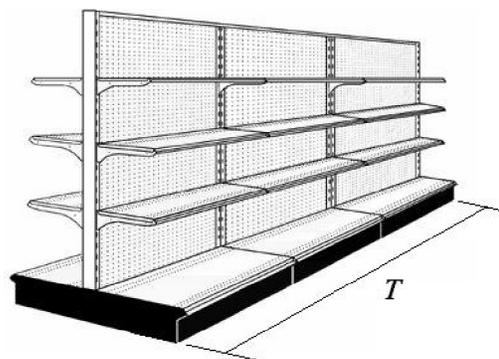


Figura 4. Longitud total de la góndola.

T: longitud total de la góndola.

L_i : límite inferior de espacio longitudinal asignado a la subfamilia i .

S_i : límite superior de espacio longitudinal asignado a la subfamilia i .

Variable de decisión

l_i : unidades de espacio longitudinal asignadas a la subfamilia i .

Función objetivo

Maximizar:

$$U_{TOT} = \sum_{i=1}^n u_i l_i$$

sujeto a

$$\sum_{i=1}^n l_i = T$$

$$L_i \leq l_i \leq S_i \quad \forall i$$

$$l_i \geq 0 \quad \forall i$$

Por tratarse de un modelo lineal, se reduce la complejidad de la solución y se puede garantizar una solución óptima.

Paso 2. Ordenamiento de las subfamilias dentro de la góndola

Conocidos los espacios asignados a cada subfamilia es necesario definir la distribución de cada una de ellas a lo largo de la góndola, para considerar las consecuencias que puede tener la proximidad sobre subfamilias con efectos de complementariedad o sustitución. Para ello se propone un modelo que considera los efectos que

la ubicación espacial tiene sobre las demandas de cada subfamilia que compone la góndola. No existe una relación funcional que articule los efectos de la adyacencia de una categoría de productos sobre otra y que se ajuste a todas las situaciones; algunos autores proponen modelos de elasticidad cruzada, pero añaden complejidad a los modelos debido a la naturaleza exponencial de tales funciones. En este modelo se propone manejar dicho efecto con un factor de sensibilidad a la adyacencia entre subfamilias que relacione el efecto de la demanda de una subfamilia sobre la demanda de otra, así:

- D_{it} : tasa de demanda de la familia i en el tiempo j .
- D_{jt} : tasa de demanda de la familia j en el tiempo j .
- C_{ij} : sensibilidad de la demanda de la subfamilia i a la demanda de la subfamilia j .

donde

$$C_{ij} = \left(\frac{D_{it}}{D_{jt}} \right)^\lambda$$

Se propone un valor de 0,5 para λ , debido a que con esto se logra que la adyacencia de una subfamilia que no genere ningún efecto sobre la demanda de otra tenga un valor de sensibilidad C_{ij} igual a 1, lo cual sería una característica deseable de este parámetro. Igualmente, se puede presumir que el comportamiento de este parámetro se puede analizar así:

- Si $C_{ij} < 1$, entonces la subfamilia j se comporta como sustituta de la subfamilia i .
- Si $C_{ij} > 1$, entonces la subfamilia j se comporta como complementaria de la subfamilia i .
- Si $C_{ij} = 1$, entonces la subfamilia i es indiferente a la subfamilia j .

La definición de los valores para cada C_{ij} en la cadena, y en cada punto de venta, deberá ser, inicialmente, intuitiva debido a la inexistencia de estudios que definan claramente estos valores, pero pueden ser objeto de futuros análisis que permitan una aproximación más exacta.

El objetivo de este segundo paso es maximizar el efecto que tendría la adyacencia de subfamilias sobre la demanda total de la góndola.

Parámetros

- C_{ij} : sensibilidad de la demanda de la subfamilia i a la demanda de la subfamilia j .

- l_i : unidades de espacio longitudinal asignadas a la subfamilia i .

Variable de decisión

- x_i : distancia entre el centro de la ubicación de la subfamilia i y la línea de referencia vertical.
- x_j : distancia entre el centro de la ubicación de la subfamilia j y la línea de referencia vertical.

Función objetivo

Minimizar:

$$Z = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{1}{C_{ij}} |x_i - x_j|$$

sujeto a

$$|x_i - x_j| \geq \frac{1}{2}(l_i + l_j) \quad i = 1, \dots, n-1, \quad j = i+1, \dots, n$$

$$x_i, x_j \geq 0 \quad \forall i, \forall j$$

Este modelo es no lineal, pero se puede linealizar como se propone a continuación:

$$|x_i - x_j| = x_{ij}^+ + x_{ij}^-$$

$$x_i - x_j = x_{ij}^+ - x_{ij}^-$$

donde

$$x_{ij}^+ = \begin{cases} x_i - x_j & \text{si } x_i - x_j > 0 \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

$$x_{ij}^- = \begin{cases} x_j - x_i & \text{si } x_i - x_j \leq 0 \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

$$z_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } x_i < x_j \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Luego el modelo lineal resultante sería:

Maximizar:

$$Z = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n C_{ij} (x_{ij}^+ + x_{ij}^-)$$

sujeto a

$$\begin{aligned}
 x_{ij}^+ - x_{ij}^- + Mz_{ij} &\geq \frac{1}{2}(l_i + l_j) & i = 1, \dots, n-1, j = i+1, \dots, n \\
 -(x_{ij}^+ - x_{ij}^-) + M(1 - z_{ij}) &\geq \frac{1}{2}(l_i + l_j) & i = 1, \dots, n-1, j = i+1, \dots, n \\
 x_{ij}^+ - x_{ij}^- &= x_i - x_j \\
 x_{ij}^+, x_{ij}^-, z_{ij}, x_i, x_j &\geq 0 & \forall i, \forall j \\
 z_{ij} &\text{ binaria}
 \end{aligned}$$

Paso 3. Asignación de ítems de cada subfamilia a los niveles de la góndola

Considerando el efecto de la percepción visual, analizado por Phillips y Bradshaw (1993), los consumidores que caminan a lo largo del pasillo de un punto de venta tienen un cono de visión periférica a través del cual perciben, automática y subcientemente, los ítems exhibidos; de esta forma, los ítems que se exhiben a la altura de los ojos tienen mayor probabilidad de ser escogidos. En este sentido, se propone categorizar los diferentes niveles de la góndola según estos conceptos (figura 5).

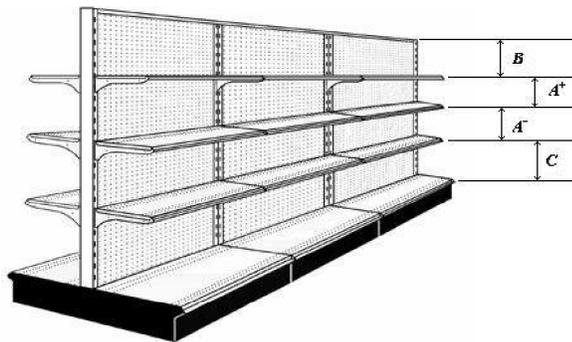


Figura 5. Clasificación de los niveles de la góndola.

En este paso se propone aplicar una clasificación ABC de los ítems según el margen de utilidad del ítem. Como consideración adicional, la clasificación de ítems tipo A se divide en dos subcategorías: A⁺ y A⁻, considerando la primera como aquellos que representan el 40% del margen de utilidad total y la segunda como los que representan el 30% del margen de utilidad total.

Paso 4. Asignación de espacios a los ítems que componen cada nivel de la góndola

De manera similar al paso 1, se propone un modelo para maximizar la utilidad generada por el espacio disponible para cada nivel de la góndola por cada subfamilia; conocidos los artículos asignados a cada nivel en el paso anterior, la utilidad generada por cada artículo en función del número de caras exhibidas de éste (se asume lineal), el mínimo número de caras visibles de cada producto que se deben exhibir y el espacio disponible en cada nivel.

Parámetros

- m: número de artículos asignados al nivel.
- v_k: utilidad unitaria del artículo k.
- l: unidades de espacio longitudinal disponible.
- N_k: número mínimo de caras visibles del artículo k.
- f_k: unidades de espacio longitudinal de la cara visible del artículo k.

Variable de decisión

y_k: número de caras del artículo k que se vana a exhibir en el nivel.

Función objetivo

Maximizar:

$$U_{TOT} = \sum_{k=1}^m v_k \cdot y_k$$

sujeto a

$$\begin{aligned}
 \sum_{k=1}^m y_k \cdot f_k &\leq l \\
 y_k &\geq N_k & \forall k \\
 y_k &\geq 0 \wedge \text{entero} & \forall k
 \end{aligned}$$

Este modelo se debe aplicar a cada subfamilia por cada nivel.

Paso 5. Cálculo de la cantidad de ítems necesarios en la góndola

A partir del número de caras exhibidas de cada artículo, la altura de cada nivel, la profundidad de la góndola (figura 6), así como la altura y profundidad de cada

artículo, se puede establecer la cantidad total de ítems necesarios para tener completamente abastecida la góndola. Se propone hacer este cálculo mediante el siguiente procedimiento:

Notación

- Q_k : número de artículos k necesarios para abastecer completamente la góndola.
- V_k : número de artículos k que se pueden ubicar usando la profundidad de la góndola.
- W_k : número de artículos k que se pueden ubicar usando la altura del nivel de la góndola.
- a_k : profundidad del artículo k .
- b_k : altura del artículo k .
- P : profundidad del nivel.
- H : altura del nivel.

Procedimiento

1. Calcular V_k como la parte entera de

$$V_k = \frac{P}{a_k}$$

2. Calcular W_k como la parte entera de

$$W_k = \frac{H}{b_k}$$

3. Calcular en Q_k como el producto

$$Q_k = y_k V_k W_k$$

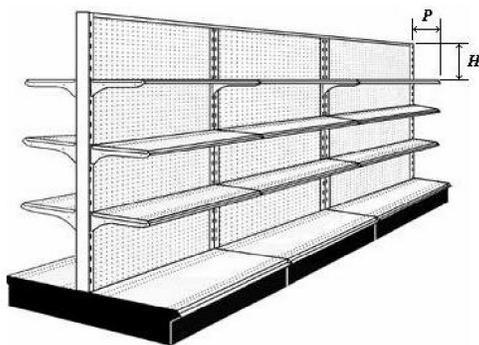


Figura 6. Profundidad y altura de los niveles.

MODELO DE CONTROL DE INVENTARIOS

El modelo que se propone es conocido como (R, S), adecuado cuando se requiere compartir recursos y se puede aplicar el control conjunto de ítems; consiste en revisar el nivel de inventario cada R unidades de tiempo y ordenar lo suficiente para alcanzar el inventario máximo S.

El valor de R puede definirse de manera óptima, de tal modo que se minimicen todos los costos relacionados con el modelo de inventarios, pero debido a implicaciones prácticas se propone que la revisión de los inventarios se haga cada semana para todos los artículos del inventario de cada punto de venta, coincidiendo con la frecuencia propuesta de cálculo de los pronósticos y con la frecuencia máxima de despacho de bodega a los puntos de venta.

El valor de S se calcula tal como lo proponen Silver et ál. (1998), de acuerdo con los siguientes supuestos:

- La demanda promedio varía poco con el tiempo, a pesar de que se asume una naturaleza probabilística de ésta. Esto no implica falta de reacción del modelo, ya que los parámetros pueden revisarse a lo largo del tiempo.
- El tiempo de entrega se supone constante.
- Los errores de pronóstico presentan una distribución normal insesgada.
- Es poco probable no tener demanda entre revisiones, por lo cual en cada periodo de revisión se hace un pedido.

Sistema de control de inventarios de bodega a punto de venta

Notación

- R: intervalo de revisión del inventario.
- S: inventario máximo.
- x_{R+L} : pronóstico de demanda durante el intervalo de revisión más el tiempo de entrega.
- σ_{R+L} : desviación estándar de los errores de pronóstico durante el intervalo de revisión más el tiempo de entrega.
- L: tiempo de entrega.
- k: factor de seguridad.
- ss: inventario de seguridad.
- $p_{uz}(k)$: probabilidad de que la distribución normal estándar tenga un valor superior o igual a k .

Estimación de σ_{R+L}

Sea σ_1 la desviación estándar de los errores de pronóstico; en el supuesto de normalidad de los errores, estimadores de este valor se definen como:

$$\hat{\sigma}_1 = 1.25MAD$$

$$\hat{\sigma}_1 = \sqrt{MSE}$$

De esta manera se puede encontrar igualmente el estimador de σ_{R+L} como:

$$\hat{\sigma}_{R+L} = (R + L)^c \hat{\sigma}_1$$

haciendo uso de los resultados de los pronósticos, se estima el valor del coeficiente c comparando los resultados de las desviaciones de los errores de pronóstico diario y semanal, y mediante una regresión lineal que establezca la relación entre ellas; a manera de ejemplo, en la figura 7 se presenta el resultado obtenido en uno de los puntos de venta utilizados en la muestra seleccionada para observar el desempeño de los modelos de pronóstico.

Buscando simplicidad en los modelos, y con base en la evidencia empírica, se sugiere adoptar el valor de c como 0,5, tal como lo soporta la literatura relacionada. Así se obtiene que:

$$\hat{\sigma}_{R+L} = \hat{\sigma}_1 \sqrt{R + L}$$

Cálculo del inventario de seguridad

Utilizando la notación y definiciones previas, el inventario de seguridad se puede establecer:

$$ss = k\hat{\sigma}_{R+L}$$

Para establecer el valor de k , se utiliza el enfoque basado en el nivel de servicio; de tal manera se define:

P_1 : fracción de ciclos en los cuales no sucede faltante.

Consecuentemente, un faltante se define como una ocasión en la cual el inventario a la mano cae por debajo de cero. De modo equivalente, la probabilidad de que suceda una ocasión de faltante será:

$$p_{n \geq}(k) = 1 - P_1$$

Así, se debe seleccionar un valor de k que satisfaga esta ecuación. Se propone que el nivel de servicio sea del 99% y común para todos los artículos del catálogo; se presume este valor debido a las características propias del negocio detallista, donde, entre otras particularidades, es muy difícil establecer la demanda no servida. Con esta definición:

$$P_1 = 0,99$$

$$1 - P_1 = 0,01 = p_{n \geq}(k)$$

$$k = 2,33$$

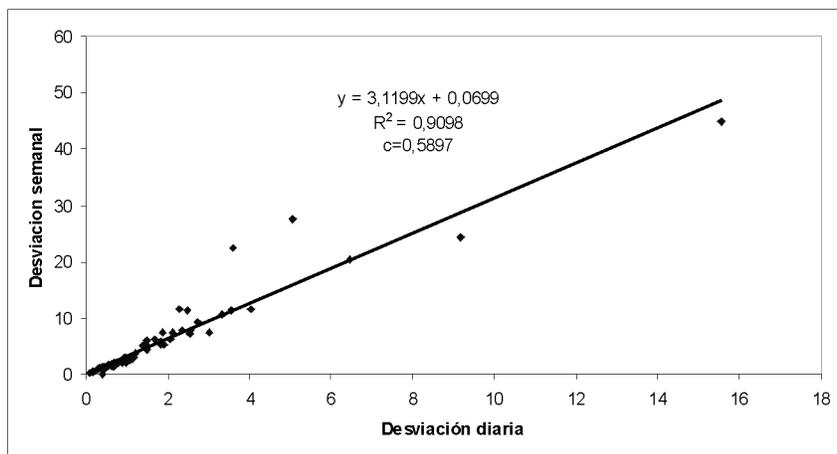


Figura 7. Estimación del coeficiente c .

Previamente se definió Q_k como la cantidad necesaria de cada artículo para abastecer una góndola, con el objetivo de optimizar su uso maximizando la utilidad esperada; así, este concepto estaría en concordancia con el concepto de *stock psíquico* (Larson y DeMarais, 1990), que propone una relación entre la propensión a la compra y la apariencia de tener una exhibición completamente abastecida. Tomando en cuenta que el inventario de seguridad se define como la protección contra demandas por encima del promedio durante el intervalo de revisión más el tiempo de entrega, se propone ampliar esta definición para considerar el efecto de la exhibición; de esta forma, tenemos:

ss : número de unidades en inventario a la mano para hacer frente a demandas por encima del promedio durante el intervalo de revisión más el tiempo de entrega, o bien para mantener la góndola completamente abastecida.

Así,

$$ss = \max(k\hat{\sigma}_{R+L}, Q_k)$$

Cálculo del inventario máximo y tamaño del despacho

Utilizando la notación y definiciones previas, el inventario máximo se puede establecer:

$$S = \hat{x}_{R+L} + ss = \hat{x}_{R+L} + \max(k\hat{\sigma}_{R+L}, Q_k)$$

Así, el tamaño del despacho de bodega a punto de venta sería:

q_k : tamaño del despacho del artículo k .
 I_{kR} : posición del inventario del artículo k en el intervalo de revisión R .

$$q_k = S_k - I_{kR} \quad \forall k$$

Este valor se determina en el supuesto de que el despacho se hace de manera total una vez establecido su tamaño, pero en la realidad no a todos los puntos de venta se hacen despachos con esta frecuencia, debido a restricciones de capacidad de almacenamiento en góndola, existencia de bodega en la trastienda,

capacidad de transporte de la flota de distribución, entre otras. En la práctica, la cadena tiene establecidas unas frecuencias de despacho a los puntos de venta, que varían en frecuencia; algunos son de una vez por semana, otros de dos veces por semana, otros de tres veces por semana y algunos almacenes, que no cuentan con trastienda, reciben despachos diarios de lunes a viernes.

Intuitivamente se podría pensar en dividir el valor de q_k entre el número de despachos programados para el punto de venta, pero como se demostró, la demanda diaria en los puntos de venta tiene un comportamiento claramente estacional a lo largo de la semana; por tanto, se propone utilizar los índices estacionales para determinar la proporción de q_k que se debe enviar en cada despacho, así:

S_t : índice estacional del día t .

q_{jk} : tamaño del despacho del artículo k .

a : día de la semana en el que se efectúa el despacho j .

b : día de la semana anterior a efectuar el despacho $j+1$.

$$q_{jk} = q_k \frac{\sum_{t=a}^b S_t}{\sum_{t=1}^7 S_t}$$

Los resultados de la aplicación de este método presentan como ventajas más evidentes sobre los despachos iguales, las siguientes:

- Si en un despacho se envía más cantidad de lo que proporcionalmente se consume durante el periodo que debe cubrir ese despacho, se generará un exceso de *stock* durante esos días, aunque luego, teóricamente, éste se consumirá.
- Si en un despacho se envía menos cantidad de lo que proporcionalmente se consume durante el periodo que debe cubrir ese despacho, existe mayor probabilidad de generar faltantes, siendo ésta la consecuencia más grave para el punto de venta, no sólo por los efectos financieros, sino también de imagen frente a los consumidores.

RESULTADOS PRELIMINARES DE LA IMPLEMENTACIÓN

Gran parte de las propuestas desarrolladas a lo largo de este proyecto se han implementado en la empresa, con resultados que se mencionan a continuación.

Al iniciar el proyecto, los almacenes se surtían en su mayoría de la bodega central y algunos productos de manera directa de los proveedores, por lo general perecederos. El proceso original de surtido, completamente manual y subjetivo, se reemplazó por un sistema de despacho sugerido, desde la bodega central, que redujo tareas, con el consiguiente impacto en la disminución de tiempos, eliminación de actividades repetitivas y monótonas para el personal, y dejó mayor disponibilidad para hacer tareas que agregan valor y permiten la intervención más efectiva en situaciones que requieren la toma de decisiones. Otros resultados obtenidos fueron los siguientes:

- Mejora del catálogo de artículos del punto de venta.
- Disminución de los niveles de inventario de cada punto de venta, hasta en un 8%.
- Aumento en la rotación de inventarios, hasta cuatro veces más.
- Mejora en las condiciones necesarias para implementar iniciativas como el *cross-docking* con ciertos proveedores.
- Detección de puntos débiles de vigilancia debido a la revisión periódica del inventario físico.

CONCLUSIONES

- La aplicación de técnicas matemáticas y estadísticas permitió comprobar y rechazar supuestos, de sentido común, en los cuales se gestiona el negocio detallista, lo que permite unos procesos de decisión más claros, eficientes y de mayor impacto.
- La aplicación de técnicas apropiadas basadas en el conocimiento científico a la gestión de inventarios es la piedra angular para el mejoramiento del desempeño operativo, financiero y de imagen de una empresa inmersa en el cada vez más competido sector de la venta minorista.
- La asignación de espacios en góndola de una manera sistemática y objetiva permite gestionar en forma más efectiva uno de los recursos más escasos y de mayor impacto.
- La automatización de los procesos de soporte a la toma de decisiones permite que las personas involucradas en los procesos realmente puedan agregar valor a su trabajo y no sufran el desgaste de tareas repetitivas y tediosas, que consumen buena parte del

tiempo, cuando no se aplican este tipo de mejoras.

- Los recursos liberados, que antes se destinaban al mantenimiento de altos niveles de inventario y personal ocupado en tareas que no agregan valor, ahora se pueden dedicar a mejorar el desempeño operativo, proyectos de mejoramiento, o simplemente trasladarse a los clientes en forma de precios más bajos, mejorando el desempeño de la cadena, sea cual sea la destinación de éstos.

LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Respecto a la ampliación del conocimiento en el campo de estudio que se abordó en este proyecto, se consideran de interés los siguientes temas:

- Involucrar en el análisis el efecto de las promociones y ofertas en el comportamiento de la demanda regular de ítems relacionados, tanto complementarios como sustitutos.
- Aplicar modelos de asignación de espacio en góndola que involucren criterios adicionales a los estudiados en este proyecto.
- Identificar de manera más exacta la sensibilidad a la demanda de las subfamilias y productos exhibidos en góndola.
- Desarrollar modelos que optimicen el proceso de entrega de los despachos a puntos de venta, teniendo en cuenta consideraciones como la capacidad y ruteo de los vehículos, ventanas de tiempo y su efecto sobre el desempeño de los puntos de venta.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbott, H. & Palekar, U. (2007). Retail replenishment models with display-space elastic demand. *European Journal of Operational Research*. Article in press.
- Bultez, A. & Naert, P. (1988). Sharp: shelf allocation for retailers' profit. *Marketing Science*, 7, 211-231.
- Buttl, F. (1984). Retail space allocation. *International Journal of Physics Distribution and Material Management*, 14 (4) 3-23.
- Chen, Y., Hess, J.D., Wilcox, R.T. & Zhang, Z.J. (1999). Accounting profits versus marketing profits: a relevant metric for category management. *Marketing Science*, 18, 208-229.
- Chen, Y.L., Chen, J.M. & Tung, C.W. (2006). A data mining approach for retail knowledge discovery with consideration of the effect of shelf-space adjacency on sales. *Decision Support Systems*, 42, 1503-1520.
- Corstjens, M. & Doyle, P. (1981). A model for optimizing retail space allocations. *Management Science*, 27(7), 822-833.
- Curhan, R.C. (1973). Shelf space allocation and profit maximization in mass retailing. *Journal of Marketing*, 37 (3), 54-60.

- Desmet, P. & Renaudin, V. (1998). Estimation of product category sales responsiveness to allocated shelf space. *International Journal of Research in Marketing*, 15, 443-457.
- Doyle, P. & Gidengil, B.Z. (1977). A review of in-store experiments. *Journal of Retailing*, 53 (2), 47-62.
- Hariga, M., Al-Ahmari, A. & Mohamed, A.R. (2007). A joint optimization model for inventory replenishment, product assortment, shelf space and display area allocation decisions. *European Journal of Operational Research*, 181, 239-251.
- Hoch, S.J., Kim, B.D., Montgomery, A.L. & Rossi, P.E. (1995). Determinants of store-level price elasticity. *Journal of Marketing Research*, 32, 17-29.
- Hwang, H., Choi, B. & Lee, M.J. (2005). A model for shelf space allocation and inventory control considering location and inventory level effects on demand. *International Journal of Production Economics*, 97, 185-195.
- Larson, P.D. & Demarais, R.A. (1990). Psychic stock: an independent variable category of inventory. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 20 (7), 28-34.
- Montgomery, A.L. (1997). Creating micro-marketing pricing strategies using supermarket scanner data. *Marketing Science*, 16, 315-337.
- Mulhern, F.J., Williams, J.D. & Leone, R.P. (1998). Variability of brand price elasticities across retail stores: ethnic, income and brand determinants. *Journal of Retailing*, 74, 427-446.
- Muller, R.W., George, K.E. & Trout, J.J. (1953). Customers buy 22% more when shelves are well stocked. *Progressive Grocer*, 40-48.
- Phillips, H. & Bradshaw, R. (1993). How customers actually shop: customer interaction with the point of sale. *Journal of the Market Research Society*, 35 (1), 51-62.
- Reyes, P. & Frazier, G. (2007). Goal programming model for grocery shelf space allocation. *European Journal of Operational Research*, 181, 634-644.
- Silver, E.A., Pyke, D.F. & Peterson, R. (1998). *Inventory Management and Production Planning and Scheduling*, 3rd ed. John Wiley & Sons.
- Van Zelst, S., Van Donselaar, K. & Van Woensel, T. (2006). Logistics drivers for shelf stacking in grocery retail stores: potential for efficiency improvement. *International Journal of Production Economics*. Article in press.
- Yang, M.H. & Chen, W.C. (1999). A study on shelf space allocation and management. *International Journal of Production Economics*, 60-61, 309-317.
- Yang, M.H. (2001). An efficient algorithm to allocate shelfspace. *European Journal of Operational Research*, 131, 107-118.
- Zotteri, G. & Kalchschmidt, M. (2007). A model for selecting the appropriate level of aggregation in forecasting processes. *International Journal of Production Economics*, 108, 74-83.

Inventario sanitario del departamento del Amazonas

A sanitary inventory in the department of Amazon

SHIRLEY ANDREA BAUTISTA CASTELLANOS¹ Y JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS²

1. Ingeniera civil, especialista en Saneamiento Ambiental y magíster en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Ingeniero civil, MEEE, profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

Recibido: 25/04/2010 Aceptado: 15/05/2010

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

En este artículo se incluyen los resultados más relevantes del estudio realizado para la elaboración del inventario sanitario del departamento del Amazonas¹. En el informe se reportan las características principales de los sistemas de abastecimiento, de potabilización, de recolección de agua residual, de tratamiento de aguas residuales y del sistema de recolección y disposición de residuos sólidos, en cada municipio. Se encontró que solamente los municipios de Leticia y de Puerto Nariño cuentan con la prestación de los servicios de acueducto, alcantarillado y aseo, con coberturas de servicio de acueducto de 57 y 99%, respectivamente. La cobertura del servicio de alcantarillado en Leticia es del 47% y en Puerto Nariño del 50%, mientras que la cobertura del servicio de aseo es del 100 y 80%, en ese orden. El municipio de Leticia requiere ampliar y mejorar la cobertura de los servicios de acueducto y alcantarillado, dotar de filtros la planta de purificación de agua, construir su PTAR y un sistema estable de disposición de residuos sólidos. El municipio de Puerto Nariño necesita, también, ampliar y mejorar la cobertura del servicio de alcantarillado, optimizar la operación de la planta de purificación de agua, construir su PTAR, ampliar la cobertura del servicio de aseo y construir un sistema estable de disposición de residuos sólidos. Las demás localidades no cuentan con ningún servicio, por lo que todos los corregimientos del departamento de Amazonas requieren estudios, diseños y construcción de los sistemas de agua potable y de recolección, tratamiento y disposición de aguas residuales, así como de sistemas integrales de recolección y disposición de residuos sólidos.

Palabras claves: saneamiento ambiental, servicios públicos, acueducto, alcantarillado, purificación de agua, tratamiento de aguas residuales, residuos sólidos.

Abstract

This paper shows the most relevant results of the study undertaken for the elaboration of the sanitary inventory in the department of Amazonas. The report brings the main characteristics of the water supply system, water treatment plant, sewerage system, waste water treatment system and collection and disposal of solid wastes in each municipality. Only the municipalities of Leticia and Puerto Nariño have services of aqueduct, sewerage and collection of solid wastes (water supply of 57 and 99%, respectively). In Leticia, the sewer service is 47%; in Puerto Nariño is 50%. The solid waste service is 10 and 80%, respectively. Leticia requires improving its services of aqueduct and sewerage, providing the water treatment plant with filters, building a wastewater treatment plant and a solid-wastes disposal system. Puerto Nariño must increase and improve its sewerage system, optimize the operation of the water treatment plant, build its wastewater treatment plant, improve the service of collection of solid wastes and build a stable solid-wastes disposal system. All the villages in the department of Amazonas require studies, design and construction of their systems of potable water, collection, treatment and disposal of wastewater and integral systems of collection and disposal of solid wastes.

INTRODUCCIÓN

Uno de los requisitos para proveer adecuadamente los servicios de saneamiento básico a la población es conocer el estado actual de sus componentes para proyectar las necesidades que se deben satisfacer. El conocimiento de la cobertura, estado y capacidad de cada servicio público permite prever las soluciones y demandas económicas requeridas por cada municipio para el propósito básico de garantizar la salud y el bienestar de la sociedad.

METODOLOGÍA

Las características y condiciones más relevantes de los servicios de acueducto, alcantarillado y aseo de cada municipio se suministraron mediante encuestas remitidas por correo electrónico a los responsables de la prestación de los servicios, gerentes de operadores o alcaldes municipales, con copia a los secretarios de Infraestructura o de Planeación.

SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO

El departamento del Amazonas cuenta con sólo un operador especializado para la prestación de los servicios de acueducto, alcantarillado y aseo para el municipio de Leticia, en tanto que el municipio de Puerto Nariño realiza la prestación de los servicios públicos directamente a través de la alcaldía. En los corregimientos departamentales nadie presta los servicios de acueducto, alcantarillado y aseo, por lo que hay que establecer en dichos corregimientos las correspondientes entidades responsables de los servicios públicos. En la tabla 1 se presenta la información pertinente al servicio de acueducto.

ADUCCIÓN

En la tabla 2 se incluyen los caudales en la aducción de los sistemas de abastecimiento de agua de Leticia y Puerto Nariño.

Tabla 2
Caudal de bocatoma y de PPA en el departamento del Amazonas

Localidad	Caudal bocatoma (L/s)	Caudal PPA (L/s)	Pérdidas aducción (%)
Leticia	85	70	18
Puerto Nariño	30	30	0

Ninguna localidad cuenta con desarenador ni con presedimentación.

PLANTAS DE PURIFICACIÓN

Solamente los municipios de Leticia y Puerto Nariño cuentan con plantas de purificación de agua potable (PPA). Los corregimientos departamentales de Tarapacá, La Pedrera y Puerto Arica tienen un convenio de apoyo financiero con el Banco Mundial para hacer inversiones relacionadas con la potabilización del agua. Es necesario dotar de filtración a la PPA de Leticia y efectuar los estudios para los sistemas de potabilización de los corregimientos departamentales de Tarapacá, La Pedrera, Puerto Arica, La Chorrera, Puerto Santander, El Encanto, Mirití-Paraná y La Victoria.

La información pertinente se incluye en la tabla 3.

Tabla 1
Cobertura del servicio de acueducto en el departamento del Amazonas

Localidad	Población (hab)	Población servida (hab)	Cobertura (%)	N.º de suscriptores acueducto	hab/suscriptor
Leticia	35.000	19.838	57	4014	5
Puerto Nariño	7338	7265	99	297	24

Tabla 3
Componentes de las PPA en el Amazonas

Localidad	Tipo de planta	Coagulante utilizado	Tipo de mezcla rápida	Tipo de floculación	Tipo de sedimentadores	Tipo de filtros	Tipo de cloro utilizado
Leticia	Convencional	Sulfato de aluminio	Hidráulica	Mecánica	Convencional	NA	Gaseoso
Puerto Nariño	Convencional	Sulfato de aluminio	Hidráulica	Hidráulica	Convencional	Rápida	Gaseoso
Tarapacá	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
La Chorrera	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Puerto Santander	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Puerto Alegría	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
El Encanto	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
La Pedrera	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Mirití-Paraná	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
La Victoria	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Puerto Arica	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

NA: no aplica.

Tabla 4
Caudales afluente y efluente en las PPA

Localidad	Caudal afluente (L/s)	Caudal efluente (L/s)	Laboratorio	Agua consumida en la PPA (%)
Leticia	70	69	SÍ	1
Puerto Nariño	30	16	NO	47

En la tabla 4 se presentan los caudales afluente y efluente en las PPA.

La PPA de Puerto Nariño presenta consumos de agua del 47%. Dicha planta debe bajar su consumo a valores que no superen el 10% del agua tratada.

ALMACENAMIENTO

La capacidad de almacenamiento en Leticia (23%) es aceptable; la de Puerto Nariño (8%) es baja (tabla 5).

Sin embargo, si se analiza el almacenamiento disponible por habitante (tabla 6), se concluye que éste es deficiente en ambos casos.

Tabla 6
Capacidad de almacenamiento por habitante

Localidad	Capacidad tanques (m ³)	Población servida (hab)	Almacenamiento (m ³ /hab)
Leticia	1400	19.838	0,07
Puerto Nariño	116	7265	0,02

RED DE DISTRIBUCIÓN

Las localidades de Puerto Alegría, El Encanto, La Pedrera, Mirití-Paraná, La Victoria y Puerto Arica no cuentan con red de distribución, los municipios de

Tabla 5
Características del almacenamiento

Localidad	Número de tanques	Caudal macromedido (L/s)	Caudal macromedido (m ³ /d)	Capacidad tanques (m ³)	Almacenamiento (%)
Leticia	1	69	5.968	1.400	23
Puerto Nariño	1	16	1.383	116	8

Leticia y Puerto Nariño poseen red matriz y solamente Puerto Nariño tiene sectorización.

CONSUMO

En Leticia, se observa un consumo histórico mensual de 9,2 m³/mes, 5 habitantes por suscriptor y consumo individual de 64 L/hab/d; en Puerto Nariño, 61 L/hab/d. Tanto en Leticia como en Puerto Nariño existen diferencias grandes entre los caudales de toma y de consumo, que indican la necesidad de llevar a cabo un programa de verificación o control de dichas pérdidas.

SISTEMA DE AGUAS RESIDUALES

Alcantarillado

El único municipio del Amazonas con Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV), aprobado por Corpoamazonia, es Puerto Nariño. Los diez municipios restantes del Amazonas, es decir, el 91% de ellos, no poseen PSMV aprobado. Además, todos los municipios requieren plan maestro de alcantarillado, pues la cobertura en tres de ellos es de apenas 47 a 50% y en los ocho restantes es nula (tabla 7).

Tabla 7
Características del sistema de alcantarillado

Localidad	PSMV	Cobertura alcantarillado (%)	Suscriptores alcantarillado
Leticia	NO	47	3387
Puerto Nariño	SÍ	50	135
Tarapacá	NO	50	0
La Chorrera	NO	0	0
Puerto Santander	NO	0	0
Puerto Alegría	NO	0	0
El Encanto	NO	0	0
La Pedrera	NO	0	0
Mirití-Paraná	NO	0	0
La Victoria	NO	0	0
Puerto Arica	NO	0	0

RED DE ALCANTARILLADO

Las características de las redes de alcantarillado se presentan en la tabla 8.

Tabla 8
Características de la red de alcantarillado de las localidades del Amazonas

Localidad	Longitud red de alcantarillado (m)	Diámetro red de alcantarillado (pulg)	Estado	Población servida (hab)	Longitud de redes/hab
Leticia	28.000	6 a 24"	Malo	16.296	1,7
Puerto Nariño	3030	8 a 10"	Regular	3669	0,8
Tarapaca	3060	8 a 4"	Malo	620	4,9

Como se observa en la tabla 8, ninguna localidad del departamento del Amazonas cuenta con redes de alcantarillado en buen estado.

SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

En el departamento del Amazonas ninguna localidad cuenta con planta de tratamiento de aguas residuales. Es necesario efectuar los estudios correspondientes para la construcción de sistemas completos de recolección, tratamiento y disposición de aguas residuales en todos los municipios, como parte esencial del programa de saneamiento básico departamental.

SISTEMA DE ASEO URBANO

En la tabla 9 y en el gráfico 1 se presentan las características del sistema de aseo urbano en el departamento del Amazonas.

Como se observa en la tabla 9, ninguna localidad del departamento del Amazonas cuenta con Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS), con excepción de Puerto Nariño y Leticia. La cobertura del sistema de aseo en el municipio de Leticia es de 100% y en Puerto Nariño de 80%; las demás localidades no cuentan con este servicio.

Tabla 9
Características del sistema de aseo urbano

Municipio	PGIRS	Cobertura (%)	N.º de suscriptores
Leticia	SÍ	100	5528
Puerto Nariño	SÍ	80	155
Tarapacá	NO	0	0
La Chorrera	NO	0	0
Puerto Santander	NO	0	0
Puerto Alegría	NO	0	0
El Encanto	NO	0	0
La Pedrera	NO	0	0
Mirití-Paraná	NO	0	0
La Victoria	NO	0	0
Puerto Arica	NO	0	0

En la tabla 10 se presenta la información correspondiente al número de usuarios y de suscriptores del sistema de aseo urbano en Leticia y Puerto Nariño.

Tabla 10
Usuarios del sistema de aseo

Localidad	Población servida	Número de suscriptores	Hab/suscriptor
Leticia	35.000	5528	6,3
Puerto Nariño	5870	155	47,3

Como se observa en la tabla 10, la relación hab/suscriptor del sistema de aseo en Puerto Nariño no es confiable y hace necesario evaluar nuevamente esta relación.

En la tabla 11 y la figura 1 se ilustra la metodología de recolección y disposición de residuos sólidos.

Tabla 11
Tipo de recolección y disposición

Localidad	Tipo	Disposición
Leticia	Volqueta	Celda transitoria
Puerto Nariño	Tractor	Celda transitoria
Tarapacá	NA	Botadero
La Chorrera	NA	Botadero
Puerto Santander	NA	Zanja comunal
Puerto Alegría	NA	Entierros
El Encanto	NA	Entierros
La Pedrera	NA	Entierros
Mirití-Paraná	NA	Entierros
La Victoria	NA	Entierros
Puerto Arica	NA	Quemas

NA: no aplica.

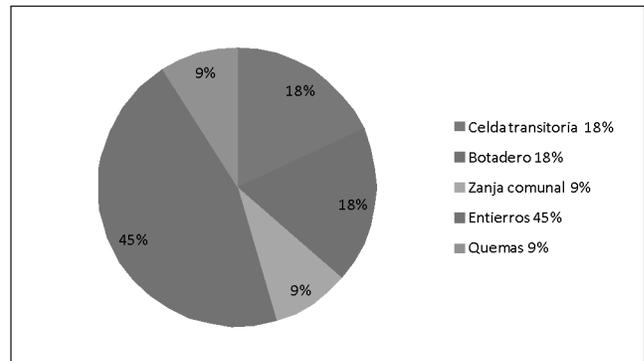


Figura 1. Sitio de disposición de los residuos sólidos en el Amazonas (2009).

Se puede observar que ningún municipio cuenta con sistema apropiado de recolección de basuras ni con relleno sanitario para su disposición adecuada.

En la tabla 12 se presenta la producción de residuos sólidos. Como ninguno de los municipios cuenta con relleno sanitario, no se dispone de información sobre densidades de residuos crudos o dispuestos.

Tabla 12
Producción de residuos sólidos

Municipio	Población servida (hab)	Cantidad recogida (m³/d)	Producción (L/hab/d)
Leticia	35.000	30	0,86
Puerto Nariño	5870	0,55	0,09

En la tabla 13 y en el gráfico 2 se presentan los costos del servicio de aseo.

El costo del servicio de recolección, transporte y disposición de residuos sólidos en el municipio de Puerto Nariño es de \$164/L y en el municipio de Leticia es de \$67/L.

RESIDUOS PELIGROSOS

El municipio de Leticia hace tratamiento de los residuos peligrosos a través de un tercero, mientras que el resto de las localidades del departamento no realizan tratamiento.

Tabla 13
Costo del servicio de aseo

Localidad	Producción (m³/d)	Número de suscriptores	Costo de servicio de aseo por suscriptor (\$/suscriptor/mes)	Costo de servicio de aseo por suscriptor (\$/suscriptor/día)	Producción L/d/suscriptor	Costo recolección, transporte y disposición (\$/L)
Leticia	30	5528	10.846	362	5,4	67
Puerto Nariño	0,55	155	17.500	583	3,5	164

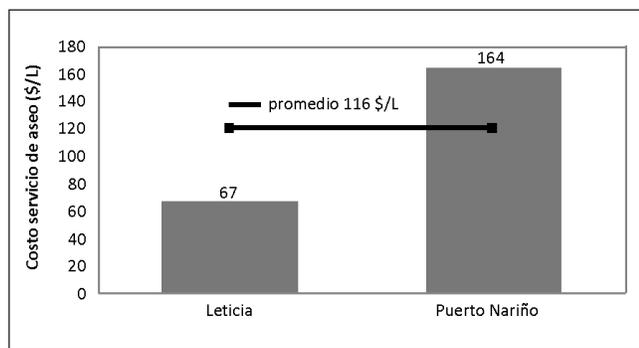


Figura 2. Costo de servicio de aseo por litro.

COBERTURA DE SERVICIOS BÁSICOS

En la tabla 14 y en el gráfico 3 se resumen las coberturas observadas de los servicios de acueducto, alcantarillado y aseo.

Tabla 14

Cobertura de servicios de acueducto, alcantarillado y aseo

Localidad	Cobertura de acueducto (%)	Cobertura de alcantarillado (%)	Cobertura de aseo (%)
Leticia	57	47	100
Puerto Nariño	99	50	80

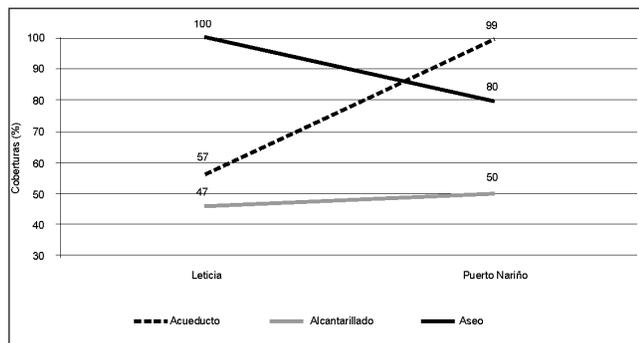


Figura 3. Coberturas de acueducto, alcantarillado y aseo en Amazonas (2009).

Leticia cuenta con buena cobertura del servicio de aseo mientras que las coberturas de alcantarillado y acueducto son bajas, por lo que se requiere ampliar los servicios de acueducto y alcantarillado. El municipio de Puerto Nariño tiene muy buena cobertura en materia de acueducto, aceptable en aseo y deficiente en alcantarillado; se necesita mejorar la cobertura del servicio de aseo y alcantarillado. Los corregimientos departamentales requieren inversiones urgentes en todos los servicios: acueducto, alcantarillado y aseo, pues no cuentan con ningún servicio.

CONCLUSIONES

- El departamento del Amazonas tiene solamente un operador especializado para la prestación de los servicios de acueducto, alcantarillado y aseo, en Leticia.
- La PPA de Puerto Nariño presenta consumos de agua del 47%. Dicha planta debe bajar su consumo de agua a valores que no superen el 10% del agua tratada.
- Las capacidades de almacenamiento en Leticia (23%) y en Puerto Nariño (8%) son bajas, es recomendable mejorarlas.
- Las localidades de Puerto Alegría, El Encanto, La Pedrera, Mirití - Paraná, La Victoria y Puerto Arica no cuentan con red de distribución; Leticia y Puerto Nariño poseen red matriz; Puerto Nariño tiene sectorización.
- Solamente los municipios de Leticia y Puerto Nariño cuentan con PPA. Es necesario dotar de filtración a la PPA de Leticia y efectuar los estudios para los sistemas de potabilización de los corregimientos departamentales de Tarapacá, La Pedrera, Puerto Arica, La Chorrera, Puerto Santander, El Encanto, Mirití - Paraná, La Victoria y Puerto Arica, así como

para optimizar los respectivos sistemas de abastecimiento y conducción a las PPA.

- El consumo histórico mensual por suscriptor en Leticia es de 9,2 m³/mes, con un número promedio de 5 habitantes por suscriptor y consumo individual de 64 L/hab/d; en Puerto Nariño, de 61 L/hab/d.
- El 91% de los municipios del Amazonas no posee PSMV aprobado. La cobertura de alcantarillado en tres de las localidades del Amazonas es de sólo 47 a 50% y en los ocho restantes es nula.
- Ninguna localidad del departamento del Amazonas cuenta con redes de alcantarillado en buen estado. La pésima cobertura y el mal estado de las redes de alcantarillado en el Amazonas indican la necesidad de realizar los estudios del plan maestro de alcantarillado para todos los municipios.
- Ningún municipio cuenta con planta de tratamiento de aguas residuales. Es necesario efectuar los estudios correspondientes para la construcción de sistemas completos de recolección, tratamiento y disposición de aguas residuales, en todos los municipios del Amazonas, como parte esencial del programa de saneamiento básico departamental.
- Los únicos municipios con Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos son Puerto Nariño y Leticia.
- La cobertura del sistema de aseo en el municipio de Leticia es de 100% y en Puerto Nariño de 80%; las demás localidades no cuentan con este servicio.
- La relación hab/suscriptor del servicio de aseo en Puerto Nariño es de 47,3 hab/suscriptor, valor evidentemente no confiable; por esto se recomienda revisar la información suministrada.
- Se puede observar que ningún municipio cuenta con sistema apropiado de recolección de basuras ni con relleno sanitario para su disposición adecuada.
- Los municipios de Leticia y Puerto Nariño disponen sus basuras en una celda transitoria, el corregimiento de Puerto Santander lo hace en zanjas comunales, el corregimiento de Puerto Arica realiza quemas, los corregimientos de Tarapacá y La Chorrera disponen sus basuras en botaderos, y el resto de los corregimientos departamentales las entierran.
- La producción de residuos sólidos en el departamento de Amazonas es muy baja: 0,86 L/hab/d en Leticia y 0,09 L/hab/d en Puerto Nariño.
- Se obtienen mayores costos en el servicio de aseo en el municipio de Puerto Nariño (\$164/L), que en el municipio de Leticia (\$67/L).
- El municipio de Leticia realiza tratamiento de los residuos peligrosos a través de un tercero, en tanto que el resto de las localidades del departamento de Amazonas no hacen tratamiento.
- Leticia cuenta con buena cobertura del servicio de aseo, mientras que las coberturas de alcantarillado y acueducto son bajas; se requiere ampliar los servicios de acueducto y alcantarillado.
- El municipio de Puerto Nariño tiene muy buena cobertura en materia de acueducto, aceptable en aseo y deficiente en alcantarillado; debe mejorar la cobertura del servicio de aseo y alcantarillado.
- Los corregimientos departamentales requieren inversiones urgentes en todos los servicios: acueducto, alcantarillado y aseo, pues no cuentan con ningún servicio.

REFERENCIAS

1. Bautista C., Shirley A. (2010, junio). Inventario sanitario de los departamentos del Quindío y Amazonas. Proyecto de grado Maestría en Ingeniería Civil. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Identificación de imágenes por medio de flujo óptico y características de la imagen

Identifying images by optical flow and image features

JAIME ALBERTO PARRA PLAZAS¹, ARNOLDO EMILIO DELGADO^{2,3}
Y WILLIAN APERADOR CHAPARRO³

1. Ingeniería Mecánica, Universidad Libre. Bogotá, Colombia.
2. Ingeniería Mecatrónica, Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia.
3. Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá, Colombia.

Recibido: 26/04/2010 Aceptado: 12/05/2010
Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

El presente trabajo está orientado a determinar el estado del arte en la robótica autónoma de los algoritmos basados en flujo óptico y algoritmos de características en la imagen, donde se busca establecer estudios paralelos que comparan estos algoritmos con el fin de identificar espacios de investigación basados en los efectos de la iluminación del día sobre el desempeño de la visión en robots AUV.

Palabras claves: flujo óptico, características de la imagen, identificación de objetos, gradiente, iluminación.

Abstrac

This work this oriented to determine the state of art in the use in the autonomous robotics of the algorithms based on optical flow and of typical algorithms in the image. We look for comparative studies about these algorithms to identify research based on the effects of sunlight on vision in robots AUV.

Keywords: optical flow, image features, objects, gradient, illumination.

INTRODUCCIÓN

La robótica tiende a dar más autonomía a las máquinas. Una de estas aplicaciones está relacionada con la capacidad de ver y así lograr desarrollar procesos de decisión en el control de movimientos o desplazamientos, según sea el caso [1-3].

Los factores que afectan la visión del ser humano también se reflejan en las cámaras de fotografía o video. Por tal razón, el desarrollo de modelos que permitan mejorar el desempeño de estos dispositivos, con el fin de encontrar elementos o patrones que permitan dar información al robot sin que sea afectada por los cambios bruscos de la iluminación, es primordial en el estudio de la robótica controlada por visión [4-6].

El flujo óptico es el patrón del movimiento evidente de objetos, de superficies y de bordes en una escena visual causada por el movimiento relativo entre un observador (un ojo o una cámara) y la escena [7-8]. Técnicas ópticas del flujo, tales como detección del movimiento, segmentación del objeto, tiempo de colisión y cálculos de la extensión del foco, codificación y compensación del movimiento, y medida estéreo de la disparidad del movimiento de las superficies de los objetos y de los bordes, son algunos de los problemas abordados [9-10].

El uso del flujo óptico incluye el problema de deducir no sólo el movimiento del observador y de los objetos en la escena, sino también la estructura de los objetos y el ambiente, debido a que el conocimiento del movimiento y la generación de mapas mentales de la estructura del ambiente son componentes críticos de la visión en humanos y animal; la conversión de esta capacidad natural a una capacidad del computador es importante en el campo de la visión por computador [11-16].

En la visión de computador y el tratamiento de la imagen se utiliza el concepto de característica para denotar un fragmento de información que sea relevante para solucionar la tarea de cómputo relacionada con determinada aplicación. Más específicamente, las características pueden referirse al resultado de una operación general de la vecindad (extractor de la característica o detector de la característica) aplicada a la imagen, estructuras específicas de la imagen en sí misma, extendiéndose de las estructuras simples –tales como puntos o bordes– a estructuras más complejas, tales como objetos. Otros ejemplos de características se relacionan con el movimiento en secuencias de la

imagen, con las formas definidas en lo relacionado con curvas o límites entre diversas regiones de la imagen, o con las características de tal región. El concepto de la característica en sí mismo es muy general y muestra que la características de un sistema de visión por computador puede ser altamente particular y depende del problema específico que se trabaje.

MODELOS

Flujo óptico

El movimiento de dos dimensiones de la imagen es la proyección del movimiento tridimensional de objetos, concerniente al observador, sobre su plano de imagen. La secuencia de imágenes permite la valoración del movimiento de dos dimensiones proyectado en la imagen como velocidades instantáneas de la imagen o dislocaciones discretas de ésta. Éstos generalmente se llaman el campo de flujo óptico o el campo de la velocidad de la imagen [17-19]. Fleet y Weiss proporcionan una introducción al flujo óptico basado en el gradiente [20-22]. John L. Barron, David J. Fleet y Steven Beauchemin proporcionan un análisis de funcionamiento de un variado número de técnicas ópticas del flujo, acentuando la exactitud y la densidad de medidas [23-25]. Los investigadores de la robótica han usado el flujo óptico en muchas áreas, por ejemplo: detección y seguimiento, extracción plana dominante de la imagen, detección del movimiento, navegación de la robustez y odometría visual [26-32].

Algunos métodos desarrollados son:

- *Correlación de la fase.* Lo contrario del espectro normalizado de la *cross-power spectrum*.
- Métodos basados en la suma de reducción al mínimo de diferencias ajustadas o suma de diferencias absolutas, o de maximizar la correlación cruzada normalizada.
- Métodos diferenciales de estimación del flujo óptico, basados en las derivadas parciales de la señal de la imagen o las derivadas parciales basadas en el campo de flujo y derivadas parciales de alto orden, por ejemplo:
 - *Método de Lucas-Kanade.* En relación con las partes de la imagen y un modelo de afinación para el campo de flujo.

- *Método del Horn-Schunck*. Función de optimización basada en residuos para el brillo constante y restringido, y una regularización particular de términos expresados para suavizar el campo del flujo óptico.
- *Método de Buxton-Buxton*. Basado en un modelo del movimiento de bordes en las secuencias de la imagen.
- *Método de Black-Jepson*. Flujo óptico grueso por medio de la correlación.
- *Métodos variacionales generales*. Son modificaciones/extensiones del método de Horn-Schunck, usando otros términos de los datos y otros términos de suavización.
- *Métodos de la optimización discreta*. Se cuantifica el espacio o región de búsqueda, y se agrupa en la imagen, con la asignación de cada píxel con etiquetas y la deformación correspondiente, reduciendo al mínimo la distancia entre la fuente y la imagen del objetivo; la solución óptima se obtiene haciendo el cálculo por medio del *min-cut max-flow*, programación lineal o métodos de propagación de crecimiento sobre la imagen.

El flujo óptico se ha investigado no solamente en 2D sino también en 3D, donde se estudia el movimiento del objeto con respecto a la escena.

De los anteriores métodos se tienen el de Lukas-Kanade y el de Horn-Schunck, donde el brillo de la luz en la imagen es parte importante del estudio; en ambos casos se busca suavizar la señal de la imagen.

Modelo Lucas-Kanade

Está fundamentado en la estimación de una función de peso por medio del método de mínimos cuadrados en un punto local, con restricciones de primer orden; además, restringe el modelo para V en cada pequeño espacio de la vecindad de Ω para minimizar la función.

$$\sum_{x \in \Omega} W^2(x) [\nabla I(x, t), V + I_t(x, t)]^2 \quad (1)$$

Donde $W(x)$ es la función ventana que da más peso a las restricciones en el centro de la vecindad que en la periferia. La solución de la ecuación 1 está dada por:

$$A^T W^2 A v = A^T W^2 b \quad (2)$$

Donde para n puntos $x_i \in \Omega$ en un tiempo t .

$$\begin{aligned} A &= [\nabla I(X_1), \dots, \nabla I(X_n)]^T \\ W &= \text{diag}[W(X_1), \dots, W(X_n)] \\ b &= -(I_t(X_1), \dots, I_t(X_n))^T \end{aligned}$$

La solución de la ecuación 2 es $V = [A^T W^2 A]^{-1} A^T W^2 b$, resuelta en forma cerrada; donde $A^T W^2 A$ es no singular, es una matriz 2×2 .

$$A^T W^2 A = \begin{bmatrix} \sum W^2(x) I_x^2(x) & \sum W^2(x) I_x(x) I_y(x) \\ \sum W^2(x) I_y(x) I_x(x) & \sum W^2(x) I_y^2(x) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Donde todas las sumas se toman sobre los puntos de la vecindad de Ω .

Las ecuaciones 1 y 2 se pueden ver como el peso de los estimadores de mínimos cuadrados de v , desde los estimadores de la norma de velocidad $v_n = S_n$ o su equivalente.

$$\sum_{x \in \Omega} W^2(x) \omega^2(x) [v \cdot n(x) - S(x)]^2 \quad (4)$$

Donde los coeficientes $\omega^2(x)$ reflejan la muestra de confianza en los estimadores de la velocidad normal, donde $\omega(x) = \|\nabla I(x, t)\|$.

El suavizado en una secuencia de imágenes con un espacio temporal por medio de un filtro gaussiano, con una desviación de 1,5 píxeles, ayuda a atenuar el ruido y los efectos de cuantificación de la entrada de la imagen.

Modelo Horn-Schunck

Este modelo se fundamenta en hacer uso del gradiente restringido con restricciones en los términos de suavizado global, estimando el campo de la velocidad $V(x, t) = (u(x, t), v(x, t))$ y minimizando la siguiente función.

$$\int_D (\nabla I \cdot V + I_t)^2 + \lambda^2 \left(\|\nabla u\|_2^2 + \|\nabla v\|_2^2 \right) dx \quad (5)$$

Definida sobre un dominio D , donde la magnitud de λ refleja la influencia de los términos de suavización.

$= 0,5$ produce unos buenos resultados en las pruebas. Las ecuaciones iterativas para minimizar y obtener la imagen de velocidad son:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}^{k+1} &= \mathbf{u}^{-k} - \frac{I_x[I_x \mathbf{u}^{-k} + I_y \mathbf{v}^{-k} + I_t]}{\alpha^2 + I_x^2 + I_y^2} \\ \mathbf{v}^{k+1} &= \mathbf{v}^{-k} - \frac{I_y[I_x \mathbf{u}^{-k} + I_y \mathbf{v}^{-k} + I_t]}{\alpha^2 + I_x^2 + I_y^2} \end{aligned} \quad (6)$$

Donde k denota el número de la iteración, u^0 y v^0 denotan la velocidad inicial estimada cuando es cero, y u^k y v^k denotan el promedio de la vecindad de u^k y v^k .

El método original usa diferencias de primer orden para estimar la derivada de la intensidad, pero esta forma relativa para la diferenciación numérica puede ser una fuente de error considerable; para evitar esto, se debe hacer una presuavización y con cuatro puntos centrados por medio de la diferenciación, con un prefiltro gaussiano que tenga una desviación estándar de 1,5 por píxel.

Modelos por caracterización de la imagen

En la visión por computador y el tratamiento de la imagen, el concepto de característica se utiliza para denotar un fragmento de información que sea relevante para solucionar la tarea de cómputo relacionada con cierto uso. Más específicamente, las características pueden referirse como:

- El resultado de una operación general de la vecindad (extractor de la característica o detector de la característica) aplicada a la imagen.
- Estructuras específicas de la imagen en sí misma, extendiéndose de las estructuras simples, tales como puntos o bordes, a estructuras más complejas, como objetos.
- Otros ejemplos de características se relacionan con el movimiento en secuencias de la imagen, con las formas definidas en términos de curvas o límites entre diversas regiones de la imagen, o con las características de tal región.
- El concepto de la característica es muy general y la opción de características en un sistema de visión por computador en particular puede ser altamente dependiente en el problema específico en que se esté trabajando.

Cuando las características se definen en términos de operaciones locales en la vecindad aplicadas a una imagen, un procedimiento designado comúnmente como la extracción de la característica, se puede distinguir entre los acercamientos de la detección de la característica que producen decisiones locales si hay una característica de un tipo dado en un punto de imagen dado o no, y las que presenten datos no binarios como resultado. Aunque se tomen las decisiones locales, la salida de un paso de detección de la característica no necesita ser una imagen binaria; el resultado se representa a menudo en sistemas en términos de las coordenadas (conectados o no relacionados) de los puntos de imagen donde se han detectado las características, a veces con exactitud del nivel de un subpíxel.

Cuando la extracción de la característica se hace sin la toma de una decisión local, el resultado se refiere a menudo como imagen de la característica. Por tanto, una imagen de la característica se puede considerar imagen en el sentido de que es una función de las mismas variables espaciales (o temporales) que la imagen original, pero donde los valores del píxel llevan la información sobre características de la imagen en vez de intensidad o de color. Esto significa que una imagen de la característica se puede procesar de manera similar como imagen ordinaria generada por un sensor de la imagen. Las imágenes de la característica también se calculan a menudo como paso integrado en los algoritmos para la detección de la característica.

Representación de la característica

Una característica específica de la imagen, definida en relación con la estructura específica en los datos de imagen, se puede representar a menudo de formas diferentes. Por ejemplo, un borde se puede representar como una variable booleana en cada punto de la imagen que describa si un borde está presente en ese punto. Alternativamente, en lugar de otro podemos utilizar una representación que proporcione una medida de la certeza en vez de una declaración booleana de la existencia del borde y combina esto con la información sobre la orientación del borde. De la misma manera, el color de una región específica se puede representar en términos de color medio (tres escalares) o histograma del color (tres funciones).

Cuando se diseña un sistema de visión o un algoritmo de visión por computador, la opción de la representación de la característica puede ser un asunto crítico. En algunos casos de alto nivel del detalle en la descripción de una característica puede ser necesaria para solucionar el problema, pero esto representa tener que ocuparse de más datos y de más proceso. Algunos de los factores relevantes para elegir una representación conveniente se pueden discutir. En esta discusión, un caso de una representación de la característica se denomina descriptor de la característica.

Además de tener las medidas de la certeza incluidas en la representación, la escritura de los valores correspondientes de la característica puede en sí misma ser para una operación que hace un promedio o no conveniente. De la mayoría de las representaciones de la característica se puede hacer un promedio en la práctica, pero solamente en ciertos casos es posible que el descriptor resultante se dé, una interpretación correcta en cuanto al valor de la característica. Tales representaciones se refieren como promedios.

Por ejemplo, si la orientación de un borde se representa en términos de ángulo, esta representación debe tener una discontinuidad donde los vértices del ángulo vayan de su valor máximo a su valor mínimo. Por consiguiente, puede suceder que dos orientaciones similares estén representadas por los ángulos que tienen un medio que no mienta acerca de los ángulos originales y, por tanto, esta representación no es promediable. Hay otras representaciones de la orientación del borde, tales como el tensor de la estructura, que sí son promediables.

Otro ejemplo se relaciona con el movimiento, donde en algunos casos solamente la velocidad normal concerniente a una parte del borde puede ser extraída. Si se han extraído dos características y pueden ser asumidas para referirse a la misma velocidad verdadera, esta velocidad no se da como el promedio de los vectores normales de la rapidez. Por tanto, los vectores normales de la velocidad no son promediables. En su lugar, hay otras representaciones de movimientos, usando las matrices o los tensores, que dan la velocidad verdadera en términos de la operación media de los descriptores normales de la rapidez.

Características de los vectores y de los espacios

En algunos usos no es suficiente extraer solamente un tipo de característica para obtener la información relevante de los datos de la imagen. Características en dos o más diversos lugares o regiones se extraen, dando por resultado dos o más descriptores de la característica en cada punto de la imagen. Una práctica común consiste en organizar la información proporcionada por todos estos descriptores como los elementos de un solo vector, designados comúnmente un vector de dicha característica. El sistema de todos los vectores posibles de tal característica constituye un espacio de ésta.

Un ejemplo común de los vectores de la característica aparece cuando cada punto de la imagen debe clasificarse como perteneciente a una clase específica. Si se asume que cada punto de la imagen tiene un vector correspondiente de la característica y se basa en un sistema de características conveniente, lo que significa que cada clase está separada bien en el espacio de la característica correspondiente, la clasificación de cada punto de la imagen se puede hacer usando el método estándar.

Otro ejemplo relacionado ocurre cuando el proceso basado en la red de aprendizaje se aplica a las imágenes. Los datos de entrada alimentaron a la red de aprendizaje y se dan a menudo en términos del vector de la característica de cada punto de la imagen, donde el vector se construye de varias y diversas características extraídas de los datos de la imagen. Durante una fase de aprendizaje, en las redes se pueden hallar diversas combinaciones de las características que son útiles para solucionar el problema actual.

Tipos de características en la imagen

A. Bordes

Los bordes son puntos donde hay un límite (o un borde) entre dos regiones de la imagen. Generalmente un borde puede estar de forma casi arbitraria, y puede incluir ensambladuras. En la práctica, los bordes se definen como sistemas de los puntos en la imagen que tienen una magnitud fuerte del gradiente. Además, algunos algoritmos comunes encadenarán altos puntos del gradiente juntos para formar una descripción más completa de un borde. Estos algoritmos pueden poner algunas restricciones en la forma de un borde. Localmente, los bordes tienen una estructura unidimensional.

B. Esquinas y puntos de interés

Las esquinas y los puntos de interés se utilizan alternativamente y se refieren como punto de las características en una imagen, que tienen una estructura de dos dimensiones localmente. La esquina conocida se presenta desde la detección del primer borde realizada en forma temprana por los algoritmos, y después analiza los bordes para encontrar cambios rápidos en la dirección (esquinas). Estas notaciones, entonces, se desarrollaron de modo que la detección del borde explícita fuera no más requerida, por ejemplo buscando niveles de la curvatura en el gradiente de la imagen. Así, se notó que las esquinas supuestas también eran detectadas en las partes de la imagen que no eran esquinas en el sentido tradicional (por ejemplo, un pequeño punto brillante en un fondo oscuro se puede detectar). Estos puntos se conocen con frecuencia como los puntos de interés, pero el “del término; esquina” es utilizado por la tradición.

C. Gotas/regiones de interés o de puntos de interés

Las gotas proporcionan una descripción complementaria de las estructuras de la imagen en términos de regiones, en comparación con las esquinas como puntos, las cuales son más. Sin embargo, los descriptores de la gota contienen a menudo un punto preferido (un máximo local de una respuesta de un operador o un centro de gravedad) que significa que muchos detectores de la gota se pueden también mirar como operadores del punto de interés. Estos detectores pueden localizar en una imagen las áreas que son demasiado lisas para que las ubique un detector de la esquina.

Considere encoger una imagen y después realizar la detección de la esquina. El detector responderá a los puntos que son agudos en la imagen encogida, pero puede ser liso en la imagen original. Es en este punto donde la diferencia entre un detector de una esquina y un detector de la gota llega a ser algo vaga. En gran parte, esta distinción puede remediarse incluyendo una noción apropiada de la escala. Sin embargo, a causa de las características de su respuesta a diversos tipos de estructuras de la imagen en diversas escalas, los detectores de la gota del registro y del debido a estas propiedades de la respuesta a diferentes tipos de estructuras de la imagen en diferentes escalas, el método LoG y DoH, son mencionados en los artículos de detectores de bordes [32-38].

C. Cantos

Para los objetos alargados, la noción de cantos es una herramienta natural. Un descriptor del canto calculado en una imagen del nivel gris se puede considerar la generalización de un eje intermedio. Desde un punto de vista práctico, un canto se puede pensar como curva unidimensional que represente un eje de la simetría, y además tiene una cualidad del ancho local del canto asociada a cada punto del canto. Infortunadamente, este algoritmo es más complejo para extraer características del canto de clases generales de imágenes del nivel gris, que representa características del borde, de la esquina o de la gota. Sin embargo, los descriptores del canto se utilizan con frecuencia para la extracción del camino en imágenes aéreas y para extraer los vasos sanguíneos en imágenes médicas.

D. Extracción de características

Una vez que se han detectado las características, éstas se pueden extraer en una región local de la imagen alrededor de la característica. Esta extracción puede implicar cantidades absolutamente considerables de tratamiento de la imagen. El resultado se conoce como un descriptor de la característica o vector de la característica. Entre los acercamientos que se utilizan para ofrecer la descripción, se pueden mencionar los *N-jets* y los histogramas locales (*scale-invariant feature transform*, para un ejemplo de un descriptor local del histograma). Además de información de cualidad, el paso de la detección de la característica por sí mismo puede también proporcionar cualidades complementarias, tales como la magnitud de la orientación, el gradiente del borde en la detección de borde, la polaridad y la fuerza de la gota en la detección.

Modelos basados en características

A. SIFT (Scale Invariant Feature Transform)

Este algoritmo, presentado por David Lowe en 1999, se fundamenta en realizar la caracterización local de las imágenes [39].

Se basa en el aspecto del objeto y en puntos de interés particular, los cuales son invariantes a la escala y a la rotación de imagen. Son también robustos a los cambios en la iluminación, el ruido, y cambios de me-

nor importancia en punto de vista. Además de estas características, son muy distintivas, relativamente fáciles de extraer, para tener en cuenta en la identificación correcta del objeto con la probabilidad hecha, y son fáciles de emparejar contra la base de datos (grande) de características locales.

Este algoritmo se basa en detectar los puntos de interés. Para esto, a la imagen se le hace el proceso de convolución por medio de filtros gaussianos en diversas escalas, y entonces aparece la diferencia de imágenes gaussiano-borrosas sucesivas. Los puntos de interés se toman como los máximos/mínimos de la diferencia gaussiana (DoG) que ocurren en las escalas múltiples, específicamente; en una imagen, el filtro DoG está dado por $D(x,y,\sigma)$.

$$D(x,y,\sigma) = L(x,y,K_i\sigma) - L(x,y,K_j\sigma) \quad (7)$$

Donde $L(x,y,K\sigma)$ es la imagen original $I(x,y)$ con la convolución del desenfoque gaussiano $(x,y,K\sigma)$ en una escala $k\sigma$.

El filtro DoG entre las escalas $K_i\sigma$ y $K_j\sigma$ es la diferencia gaussiana borrosa, donde el algoritmo SIFT en la imagen es la primera convolución del desenfoque gaussiano en diferentes escalas; las imágenes en convulsión se agrupan por medio de octavas (una octava corresponde al doble del valor de σ), el valor de K_i es seleccionado de modo que se obtiene un número de imágenes en convolución en octavas; entonces la diferencia gaussiana es tomada como desenfoque gaussiano adyacente de imágenes por octavas [40].

Algunos filtros DoG en la imagen permiten obtener puntos claves, los cuales se identifican como el mínimo local/máximo de DoG a través de la escala; esto se realiza haciendo la comparación de cada píxel en el filtro DoG para cada vecindad: si el valor del píxel es máximo o mínimo comparado con todos los píxeles, entonces el punto seleccionado es candidato.

Estos puntos de detección son una variación de algunas gotas (regiones) para detectar la escala en el espacio extremo de la escala normalizada laplaciana, que es la detección de puntos que están en un local extremo con respecto a ambos espacios de escala; la diferencia gaussiana como operador puede verse como una aproximación del laplaciano.

La detección de los extremos del escalar-espacio produce demasiados puntos candidatos, algunos de los

cuales son inestables. El paso siguiente en el algoritmo es realizar un ajuste detallado a los datos próximos para la localización exacta, la escala y el cociente de curvaturas principales. Esta información permite que los puntos sean rechazados basados en el contraste bajo (y por tanto sensible al ruido) o se localicen mal a lo largo de un borde.

Para eliminar puntos que no son buenos por tener un contraste bajo, hay que efectuar el cálculo de la serie de Taylor, que se hace fuera de línea; todos los que tengan un valor menor de 0,03 son descartados.

Asignación de la orientación

En este paso, a cada punto se le asignan una o más orientaciones, basadas en direcciones locales del gradiente de la imagen. Éste es el paso dominante en la realización de la invariación a la rotación, pues el descriptor del punto se puede representar con esta orientación y, por tanto, sirve para alcanzar la invariación a la rotación de la imagen [41-43].

Primero, la suavización gaussiana de la imagen $L(x,y,\sigma)$ en los puntos en la escala de la imagen σ es caracterizada por los cálculos en una escala invariante. Para una imagen simple $L(x,y)$ en una escala σ , la magnitud del gradiente $m(x,y)$ y la orientación $\theta(x,y)$ son precalculados usando la diferencia de píxeles.

$$\theta(x,y) = \tan^{-1} \left(\frac{L(x,y+1) - L(x,y-1)}{L(x+1,y) - L(x-1,y)} \right) \quad (8)$$

$$m(x,y) = \sqrt{(L(x+1,y) - L(x-1,y))^2 + (L(x,y+1) - L(x,y-1))^2}$$

Los cálculos de la magnitud y de la dirección para el gradiente se hacen para cada píxel en una región vecina alrededor del punto en la imagen del desenfoque gaussiano de la imagen L . Un histograma de la orientación con 36 compartimientos se forma con cada compartimiento cubriendo 10 grados. Cada muestra en la ventana vecina, agregada a un compartimiento del histograma, es cargada por su magnitud del gradiente y por una ventana circular gaussiana-peso con un σ que es 1,5 veces la escala del punto. Los picos en este histograma corresponden a las orientaciones dominantes. Una vez que se llena el histograma, las orientaciones que

corresponden al pico más alto y a los picos locales, que están dentro del 80% de los picos más altos, se asignan al punto. En el caso de las orientaciones múltiples que son asignadas, se crea un punto adicional con la misma localización y escala que el punto original para cada orientación adicional [34].

B. SURF (Speeded Up Robust Features)

Es un descriptor robusto de la imagen que se puede utilizar en tareas de la visión de computador. Es inspirado en parte por el descriptor de SIFT. La versión estándar del descriptor SURF es varias veces más rápida que SIFT y muestra ser más robusta contra diversas transformaciones de la imagen que SIFT. SURF es basado en la suma 2D *Harr wavelet* y hace un uso eficiente de imágenes integrales. Como características básicas de la imagen, utiliza una aproximación del detector hessiano por medio matriz hessina para detectar regiones en imágenes [44-46].

C. GLOH (Gradient Location and Orientation Histogram)

Descriptor robusto de la imagen que se puede usar en tareas de la visión de computador. Es un descriptor tipo SIFT que considera regiones más espaciales de los histogramas. La dimensionalidad más alta del descriptor se reduce a 64 con el análisis de componentes principales (PCA) [47-51].

E. LESH (Local Energy based Shape Histogram)

Es un descriptor recientemente propuesto para la detección en la imagen. Puede emplearse para conseguir una descripción de la forma subyacente. Se caracteriza por utilizar el modelo local de la energía; se considera un ejemplo la congruencia de la fase para más detalles. Codifica la forma subyacente acumulando la energía local de la señal subyacente a lo largo de varias orientaciones del filtro, varios histogramas locales de diversas partes de la imagen se generan y se concatenan en un histograma espacial compacto dimensional de 128. Se diseña para tener una escala invariante. Las características de LESH se pueden utilizar en la recuperación de formas basadas en la imagen, detección de objetos y estimación de posición [52-55].

F. MSER (Maximally Stable Extremal Regions)

Es un método basado en la detección de regiones en imágenes. Esta técnica, propuesta por Matas [56], ayuda a encontrar correspondencias entre los elementos de la imagen a partir de dos imágenes con diversos puntos de vista. Además, permite extraer un número comprensivo de elementos de la imagen correspondiente, contribuye al ancho de la línea de fondo que empareja, y ha ayudado a mejorar algoritmos de reconocimiento de estéreos de visión y algoritmos de reconocimiento de objetos.

DISCUSIÓN

El estudio del reconocimiento de objetos en imágenes o videos es un problema complejo de trabajar debido a diferentes factores que tienen que ver con la luz usada en el proceso de la toma de la imagen, como el desarrollo de algoritmos que experimenten una inmunidad a las variaciones de la luz, sobre todo en el caso de la luz día, que para la robótica móvil es una de las grandes dificultades debido a los grandes cambios de iluminación durante la operación del robot en ambientes externos.

Se han desarrollado y estudiado varios algoritmos orientados a manejar este problema de iluminación, que se basan en el flujo óptico y de extracción de características de la imagen.

El flujo óptico se fundamenta en la aplicación del gradiente de la imagen donde se busca encontrar patrones de desplazamiento en varias imágenes, siguiendo un grupo de píxeles.

El resultado está en que el algoritmo presenta diversas estrategias, las cuales tienen un comportamiento de identificación bueno; se ha analizado profundamente el método y se ha realizado un estudio comparativo, cuyos resultados muestran que los algoritmos son muy buenos en las condiciones de identificación. Se encontró que se tienen estudios profundos sobre el tema y que la comparación es lo suficientemente amplia y muestra que el flujo óptico es un tema muy estudiado, y no amerita un estudio comparativo entre los métodos.

El procedimiento de identificación de características en la imagen es un conjunto de métodos fundamentados en hacer el uso del gradiente, del histograma y de algunos filtros basados en el filtro gaussiano; de acuerdo con la consulta, se encuentra que es una tendencia al estudio de este tipo de algoritmos, los cuales presen-

tan estrategias que se basan en estudiar la imagen en espacios o regiones amplias y que permiten manejar la iluminación por medio de prefiltros que ayudan a suavizar la imagen.

No se han hecho estudios comparativos de desempeño de estos algoritmos, similares a los realizados en el flujo óptico, lo cual permite presentar un espacio de trabajo para estudiar el comportamiento de éstos en condiciones externas de iluminación y de ambientes controlados para visión en robots de aplicaciones externas.

Algunas aplicaciones de estos algoritmos se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 1

Comparación entre diferentes métodos de identificación de característica

Feature detector	Edge	Corner	Blob
Canny	X		
Sobel	X		
Harris & Stephens / Plessey	X	X	
Susan	X	X	
Shi & Tomasi		X	
Level curve curvature		X	
FAST		X	
Laplacian of Gaussian		X	X
Difference of Gaussians		X	X
Determinant of Hessian		X	X
MSER			X
Grey-level blobs			X

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Thompson, B. William (1998). Exploiting discontinuities in optical flow, *Int. J. Comput. Vis.* 30 (3), pp. 163-173.
- [2] Black, M. & Anandan, P. (1990). A model for the detection of motion over time. *Proc. Int. Conf. Comput. Vis.*, pp. 33-37.
- [3] Odobez, J.M. & Bouthemy, P. (1995). MRF-based motion segmentation exploiting a 2d motion model robust estimation. *Proc. Int. Conf. Image Proc.*, pp. 628-631.
- [4] Aubert, G., Deriche, R. & Kornprobst, P. (1999). Computing optical flow via variational techniques. *SIAM J. Appl. Math.*, 60 (1).
- [5] Weickert, J. (1998). On discontinuity-preserving optic flow. *Proc. Comput. Vis. Mob. Rob. Work. Santorini*, pp. 115-122.
- [6] Weickert, J. & Schnörr, C. (2001). A theoretical framework for convex regularizers in PDE-based computation of image motion. *Int. J. Comput. Vis.* 45 (3), pp. 245-264.
- [7] Burton, A. & Radford, J. (1978). *Thinking in perspective: critical essays in the study of thought processes*. Routledge.
- [8] Warren, D.H. & Strelow, E.R. (1985). *Electronic spatial sensing for the blind: contributions from perception*. Springer. ISBN 9024726891.
- [9] Kelson, R., Aires, T., Santana, A.M. Adelardo & Medeiros, A.D. (2008). *Optical flow using color information*. ACM New York, NY, USA. ISBN 978-1-59593-753-7.
- [10] Bouquet, J.Y. (1999). Pyramidal implementation of the Lucas Kanade feature tracker: description of the algorithm. *Technical Report*, Intel Corporation.
- [11] Beauchemin, S.S. & Barron, J.L. (1995). *The computation of optical flow*. ACM New York, USA.
- [12] Brown, C.M. (1987). *Advances in computer vision*. Lawrence Erlbaum Associates.
- [13] Brox, T., Bruhn, A., Papenberg, N. & Weickert, J. (2004). High accuracy optical flow estimation based on a theory for warping. *Proc. Eur. Conf. Comput. Vis.*, pp. 25-36.
- [14] Bab-Hadiashar, A. & Suter, D. (1998). Robust optic flow computation. *Int. J. Comput. Vis.*, 29 (1), pp. 59-77.
- [15] Ong, E. & Spann, M. (1999). Robust optical flow computation based on least-median-of-squares regression. *Int. J. Comput. Vis.*, 30 (1), pp. 51-82.
- [16] Comaniciu, D. (2003). Nonparametric information fusion for motion estimation. *Proc. Conf. Vis. Pattern Recog.*, pp. 59-68.
- [17] Barron, J.L., Fleet, D.J. & Beauchimen, S. (1994). Performance of optical flow techniques. *International Journal of Computer Vision*. Springer.
- [18] Farneback, G. (2001). Very high accuracy velocity estimation using orientation tensors, parametric motion and simultaneous segmentation of motion field. *Proc. Int. Conf. Comput. Vis.*, pp. 171-177.
- [19] Geman, S. & Geman, D. (1984). Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the bayesian restoration of images. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 6 (6), pp. 721-741.
- [20] Fleet, D.J. & Wiess, Y. (2006). Optical flow estimation, in Paragios et al. *Handbook of mathematical models in computer vision*.
- [21] Black, M. (1992). Combining intensity and motion for incremental segmentation and tracking over long image sequences. *Proc. Sec. Eur. Conf. Comput. Vis.*, pp. 485-493.
- [22] Fuh, C. & Maragos, P. (1989). Region-based optical flow estimation. *Proc. Conf. Vis. Pattern Recog.*, pp. 130-135.
- [23] Barron, J.L., Fleet, D.J. & Beauchimen, S. (1994). Performance of optical flow techniques. *International Journal of Computer Vision*. Springer. Disparity measurement. *CVGIP Image Understanding*, 53 (1) (January 1991), 14-30.
- [24] Meyer, F. & Bouthemy, P. (1994). Region-based tracking using affine motion models in long image sequences, *CVGIP Image Understand*, 60 (2), pp. 119-140.
- [25] Dang, V., Mansouri, A.R. & Konrad, J. (1995). Motion estimation for region-based video coding. *Proc. Int. Conf. Image Proc.*, pp. 2189-2192.
- [26] Haralick, R.M. & Shapiro, L.G. (1992). *Computer and Robot Vision*, Reading, MA: Addison-Wesley.
- [27] Treiack, O. & Pastor, L. (1984). Velocity estimation from image sequences with second order differential operators. *Proc. Int. Conference on Pattern Recognition*, pp. 16-19.
- [28] Nagel, H.H. (1987). On the estimation of optical flow: relations between different approaches and some new results. *Artificial Intelligence*, 33, 299-324.
- [29] Sobey, P. & Srinivasan, M.V. (1991, September). Measurement of optical flow by a generalized gradient scheme. *J. Optical Society of America*, 8(9), 1488-1498.
- [30] Lucas, B.D. & Kanade, T. (1981). An iterative image registration technique with an application to stereo vision. *Proc. DARPA Image Understanding Workshop*, pp. 121-130.
- [31] Verri, A. & Poggio, T. (1989, May). Motion field and optical flow: qualitative properties, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1 (5), 490-498.

- [32] Verri, A., Giroi, F. & Torre, V. (1989, May). Mathematical properties of the two-dimensional motion field: from singular points to motion parameters. *J. Optical Society of America*, 6(5), 698-712.
- [33] Büche, G., Kummer, A., Ottenbacher, A. & Fischer, H. (1991). Displacement vectors from Meteosat-WV-images using a new extraction technique. *Workshop on Wind Extraction from Operational Meteorological Satellite Data*, pp. 91-96.
- [34] Fennema, C. & Thompson, W. (1979). Velocity determination in scenes containing several moving objects. *Computer Graphics and Image Processing*, 9, 301-315.
- [35] Golland, P. & Bruckstein, A.M. (1997). *Motion from color*, Tech. report. Haifa, Israel: Computer Science Dept, Technion, I.I.T.
- [36] Horn, B. & Shunck, B. (1981). *Determining optical flow*. *Artificial Intelligence*, 17, 185-203.
- [37] Lucas, B. & Kanade, T. (1981). An iterative image restoration technique with an application to stereo vision. *Proceedings of the Darpa IU Workshop*, 121-130.
- [38] Nagel, H.H. (1983). *Displacement vectors derived from second-order intensity variations in image sequences*. *CVGIP*, 21, 85-117.
- [39] Lowe, David G. (1999). Object recognition from local scale-invariant features. *Proceedings of the International Conference on Computer Vision*, 2, 1150-1157. doi:10.1109/ICCV.1999.790410
- [40] Lindeberg, T. (1998). Feature detection with automatic scale selection. *International Journal of Computer Vision*, 30 (2): 79-116.
- [41] Lowe, D.G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60 (2): 91-110.
- [42] Beis, J. & Lowe, D.G. (1997). Shape indexing using approximate nearest-neighbour search in high-dimensional spaces. *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Puerto Rico, sn, 1000-1006.
- [43] Mikolajczyk, K. & Schmid, C. (2005). A performance evaluation of local descriptors. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 27: 1615-1630.
- [44] Bay, H., Tuytelaars, T. & Van Gool, L. (2006). SURF: Speeded Up Robust Features. *Proceedings of the 9th European Conference on Computer Vision*, vol. 3951, part 1. Springer LNCS, 404-417.
- [45] Mikolajczyk, K. & Schmid, C. (2005). A performance evaluation of local descriptors. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 10, 1615-1630.
- [46] Thayananthan, A., Stenger, B., Torr, P. & Cipolla, R. (2003). Shape context and chamfer matching in cluttered scenes. *Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition*, CVPR'03, vol. 1, 127-133.
- [47] Freeman, W. & Adelson, E. (1991). The design and use of steerable filters, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 13 (9), 891-906.
- [48] Moreels, P. & Perona, P. (2005). Evaluation of features detectors and descriptors based on 3D objects. *Proceedings of International Conference on Computer Vision*, ICCV'05, vol. 1, 800-807.
- [49] Ke, Y. & Sukthankar, R. (2004). PCA-SIFT: a more distinctive representation for local image descriptors. *Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition*, CVPR'04, vol. 1, 506-513.
- [50] Duda, R., Hart, P. & Stork, D. (2001). *Pattern Classification*. New York: Wiley.
- [51] Comaniciu, D., Ramesh, V. & Meer, P. (2000). Real-time tracking of non-rigid objects using mean shift. *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* CVPR'00, vol. 2, 142-149.
- [52] Zabih, R. & Woodfill, J. (1994). Non-parametric local transforms for computing visual correspondence. *Proceedings of the Third European Conference on Computer Vision*, ECCV'94, vol. 2, 151-158.
- [53] Scharstein, D. & Szeliski, R. (2002). A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. *Int. J. Comput. Vision*, 47 (1/2/3), 7-42.
- [54] Ojala, T., Pietikainen, M. & Maenpaa, T. (2002). Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 24 (7), 971-987.
- [55] Sarfraz, S. & Hellwich, O. (2008, January). Head pose estimation in face recognition across pose scenarios. *Proceedings of VISAPP 2008*. Int. Conference on Computer Vision Theory and Applications. Madeira, Portugal, 235-242 (Best Student Paper Award).
- [56] Matas, J., Chum, O., Urba, M. & Pajdla, T. (2002). Robust wide baseline stereo from maximally stable extremal regions. *Proc. of British Machine Vision Conference*, 384-396.

Reconversión tecnológica limpia y rentable

Una aproximación al caso nortesantandereano

A profitable clean technological restructuring.
An approximation to the case in Norte de Santander

CARLOS ENRIQUE VECINO ARENAS¹, ORLANDO ENRIQUE CONTRERAS PACHECO²
Y GUSTAVO ANDRÉS GÓMEZ MONTERO³

1. MSc. in Finance, University of Illinois. Ph.D. in Business Administration, HEC Montreal.
2. Ingeniero industrial, Universidad Industrial de Santander. MBA Universidad de Chile. Master of Business Administration, Tulane University.
3. Ingeniero industrial, Universidad Industrial de Santander.

Recibido: 02/05/2010 Aceptado: 23/05/2010
Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

La preocupación por el calentamiento global y la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) llevó a los países industrializados a reglamentar en sus empresas la cantidad de emisión de elementos contaminantes. Para quienes no pudieron cumplir con el mínimo de esta reglamentación, el Protocolo de Kioto estableció la posibilidad de invertir en la reconversión tecnológica enfocada a reducir el grado de contaminación en empresas en vías de desarrollo. Con ello, estas últimas adquieren una ventaja que puede incrementar su competitividad en el mercado.

En el presente documento se esquematiza de manera general un proyecto tipo que se aplica en una empresa artesanal perteneciente al sector cerámico, específicamente en Norte de Santander (donde se concentra cerca del 70% de la producción de cerámica roja en el país), mediante el análisis de la viabilidad para utilizar mecanismos de desarrollo limpio como fuente de financiación en la adquisición de eficientes sistemas de cocción¹, los cuales solucionan problemas de calidad, disminuyen responsablemente la cantidad de personal involucrado en el proceso productivo y reducen la emisión de CO₂ de acuerdo con las macropolíticas de responsabilidad social empresarial impulsadas por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), tales como la política de

prevención y control de la contaminación del aire y la política nacional de producción y consumo sostenible.

Palabras claves: Protocolo de Kioto (PK), gases de efecto invernadero (GEI), certificados de reducción de emisiones (CER), Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT).

Abstract

Concerns about global warming and the emission of Greenhouse Gases (GHG) led industrialized countries to regulate the emission of pollutants in their businesses. For those unable to comply with the minimum of this regulation, the Kyoto Protocol established the possibility of investing in technological restructuring focused on reducing contamination produced by growing companies. With the restructuring, these companies acquire an advantage that could increase their competitiveness.

This document outlines a type of project that was implemented in an artisan company from the ceramics industry, specifically in Norte de Santander in Colombia (which concentrates nearly 70% of red ceramic tiles and roofs production of the country), by the feasibility

analysis to use Clean Development Mechanisms as a financing source for the acquisition of efficient production systems, which solve quality problems. These mechanisms reduce personnel costs in a responsible way but, most importantly, they reduce CO₂ emissions in accordance with policies of Corporate Social Responsibility, such as the policy for air pollution prevention and control and the national policy for production and sustainable consumption.

Keywords: Kyoto Protocol, greenhouse gases, Certified Emission Reduction (CERs).

Estructura general de un estudio de factibilidad financiera para la utilización de fuentes económicas de desarrollo limpio en la implementación de tecnologías radicales en las empresas del sector cerámico colombiano

INTRODUCCIÓN

Desde hace unos años, los científicos descubrieron que la contaminación y el uso excesivo de las fuentes de energía no renovables estaban calentando el planeta y contaminándolo. UNODC Colombia (2007) expone que la principal causa del aumento de la temperatura es el proceso de industrialización debido al empleo excesivo de combustibles. Con el pasar del tiempo, dichos efectos se fueron agudizando, e inundaciones, incendios y desordenes climáticos hicieron que los países comenzaran a preocuparse por su mitigación.

En Colombia, la contaminación atmosférica se ha constituido en uno de los principales problemas ambientales. El deterioro de la calidad del aire ha propiciado que se incrementen los efectos negativos sobre el medio ambiente y la salud humana. Según un informe elaborado por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) (2004), se estimó que la contaminación atmosférica le cuesta al país \$1,5 billones y causa 6000 muertes al año.

Prato (2007, p. 41) afirma que la mayor parte de las empresas que conforman el sector cerámico y ladrillero en Colombia utilizan en sus procesos productivos hornos artesanales tipo colmena, alimentados con carbón mineral, que generan la emisión de gran cantidad de material particulado al ambiente. Dados los altos costos que implica la adquisición de nuevas tecnologías en cocción, cualquier tipo de iniciativa de reconversión tecnológica debe ir acompañada de una fuente de financiación no reembolsable que soporte

esta inversión y que genere a la empresa un VPN positivo² a mediano y largo plazos.

El 11 de diciembre de 1997 en Japón, los gobiernos del mundo suscribieron el Protocolo de Kioto (PK) del Convenio Marco sobre Cambio Climático de la ONU (UNFCCC), que regula y fija obligaciones para 39 países, en su mayoría desarrollados, para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a un mínimo de 5,2%, comparado con los niveles de 1990 para el periodo 2008-2012.

El PK sólo entró en vigencia hasta el 16 de febrero de 2005, creando consigo alternativas para la reducción de emisiones de GEI, tales como los mecanismos de desarrollo limpio (MDL), que ofrecen la posibilidad a los países desarrollados de reducir emisiones de GEI fuera de sus fronteras, financiando la producción de energía limpia en países en vías de desarrollo.

Es importante mencionar que en varias cumbres climáticas, como la de Copenhague 2009 y Cancún 2010, se han establecido mecanismos para reducir el impacto de las industrias en el ambiente. Según la BBC, en Cancún se acordó la creación de un Comité de Adaptación para apoyar a los países que diseñen planes de protección frente al cambio climático y se establecieron parámetros para financiar esfuerzos orientados a reducir la deforestación (“Cambio climático: la cumbre de Cancún concluye con acuerdo”, 2010).

Dicha financiación trae consigo diversas figuras que posibilitan a los sectores público y privado materializar sus proyectos de producción limpia, brindando alternativas que básicamente se pueden agrupar en tres categorías:

- Compensación directa convencional, alineando los flujos con el ritmo de reducción de las emisiones.
- Compensación anticipada a partir de colaterales que permitan generar fondos presentes con base en las reducciones de emisiones futuras (usando figuras como los *Emission Reduction Purchase Agreements* [Erpas]).
- Financiación directa o tercerizada con diferentes organismos que poseen disponibilidad presupuestal para soportar tales proyectos, como el Banco Alemán KfW, el Reino de Holanda y el Reino de España.

Estas figuras sólo se logran a partir de la actuación decidida de organismos de desarrollo, como la Corpo-

ración Andina de Fomento (CAF) y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), y de iniciativas locales que en el caso colombiano es el Centro Nacional de Producción Más Limpia y Tecnologías Ambientales.

Así mismo, desde una perspectiva más directa con bancos de primer piso, se presenta el apoyo del gobierno suizo, que a partir de una operación de crédito convencional otorga un incentivo posterior al desembolso de dicho préstamo, en contraprestación a mejoras en indicadores ambientales como disminución en material particulado emitido al medio ambiente y de gases generadores de lluvia ácida, tales como los óxidos de nitrógeno.

Estos mecanismos han hecho presencia en Colombia de una manera tímida, por lo cual se requiere que empresarios y académicos conozcan este tipo de iniciativas, con el fin de generar proyectos conjuntos de eficiencia energética (figura 1).

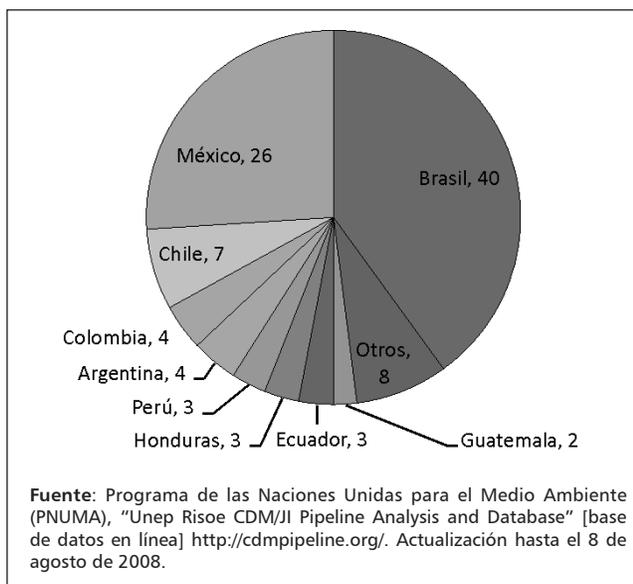


Figura 1. Número de proyectos MDL en América Latina.

Es así como mediante este estudio se pretende demostrar, a partir del caso específico de una "empresa modelo", la viabilidad financiera del proyecto en cuestión.

GENERALIDADES DE LA EMPRESA MODELO

Para efectos del presente análisis, se ha tenido en cuenta el comportamiento real de una empresa estándar del sector cerámico en el departamento de Norte de Santander. Está catalogada³ como una mediana empresa y representa una de las mayores productoras de pisos rústicos y vitrificados en cerámica roja (popularmente llamados gres) del departamento; además, está consolidada como una de las mayores empleadoras del sector.

En aras de dimensionar su operación más detalladamente, se puede afirmar que sus ventas anuales equivalen a US\$5,80 MM⁴, tiene un nivel de activos totales de US\$7,38 MM, 49 empleados administrativos, más 209 empleados operativos, una producción anual de 1,1 MM m² de material terminado, equivalente a 62.000 toneladas, que a su vez consumen cerca de 8500 toneladas de carbón mineral en sus procesos de secado y cocción, y una participación importante (60%, aproximadamente) de su producción está destinada a la exportación directa de sus productos.

Su proceso empresarial se encuentra completamente integrado desde las labores de exploración y explotación en sus minas de arcilla, el transporte a planta, mezcla, molienda, extrusión, secado, cocción, clasificación de material, hasta las operaciones de empaque, embalaje y comercialización, las cuales se llevan a cabo organizada y sistemáticamente, lo que les ha valido el reconocimiento de obtener la certificación ISO 9001 2010⁵.

Sin embargo, a pesar de ser considerada una empresa altamente representativa para el desarrollo productivo de la región, no se puede desconocer una elevada dosis artesanal en su cadena de valor, que se evidencia en sus operaciones de logística interna, en el cargue y descargue manual de sus hornos, y en el mecanismo primitivo de cocción en hornos circulares⁶.

Análisis del control de calidad

El proceso productivo en una empresa perteneciente al sector cerámico está constituido por una serie de etapas que van desde la caracterización de materias primas hasta la clasificación y empaque.

Durante dicho proceso se pueden presentar múltiples errores generadores de defectos. Este análisis contempla particularmente las fallas por roturas o por irregularidades en el proceso de cocción, que no serán consideradas para efectos financieros, aunque su

importancia en la intención de fidelizar a los clientes las convierte en un factor clave en un proceso de reconversión tecnológica. No obstante, cada usuario del presente modelo decidirá la inclusión o no de variables específicas para afinar aún más el análisis en cuestión.

Defectos por roturas

Las roturas son desprendimientos del material que comúnmente se originan después de la extrusión (roturas en crudo) o después del secado (roturas en seco). Cuando alguna unidad es afectada por cualquier tipo de rotura es separada inmediatamente de las demás y se considera pérdida de producción, lo que conduce a un aumento significativo de los costos de fabricación.

Para el caso de la empresa modelo, las pérdidas por este tipo de defectos ascienden a un 19,5%. Es decir, que si por cada tonelada de materia prima se pueden obtener después de la etapa de extrusión alrededor de 23 m² de material, en realidad llegan al proceso de cocción apenas 18,52 m². En estas condiciones, y con una necesidad mensual de 4000 toneladas para ingresar a la etapa de cocción, se puede asegurar que la empresa requiere alrededor de 4969 toneladas/mes, y pierde anualmente, sólo por este fenómeno, cerca de 267.430 m², que equivalen a 11.627 toneladas.

Cabe destacar que aunque este tipo de roturas suceden antes del proceso de cocción, la implementación de un horno túnel, que es la propuesta técnica, evitará el traslado de los elementos, disminuyendo considerablemente los defectos por este motivo.

Defectos originados en el proceso de cocción

Fernández (2000, p. 276) afirma que la cocción constituye la fase más importante y delicada del proceso de fabricación. Confiere a la pieza las propiedades deseadas, al mismo tiempo que pone en manifiesto si las fases precedentes, preparación, moldeo y secado, se han llevado a cabo correctamente o no.

Aunque los hornos tipo colmena presentan ventajas para procesos de cocción en la industria de ladrillo y cerámica, también tienen inconvenientes. Este tipo de hornos son en su mayoría circulares, cerrados y alimentados manualmente (durante la quema, el carbón se introduce en las hornillas mediante una operación

convencional de palado). Uno de los inconvenientes más significativos de estos hornos es que en su interior existen espacios con diferentes temperaturas, por lo que el proceso de cocción no se realiza de manera homogénea; esto hace comunes los defectos de esfumado (exceso de cocción) y la producción de unidades crudas o semicrudas. Las unidades que presentan algún tipo de defecto por cocción son separadas de la producción y vendidas a menor precio. Vale la pena aclarar que aunque se observó una producción del 73,4% de unidades de primera calidad en la empresa analizada, en este sector podemos encontrar compañías con sólo un 60% de unidades que cumplen los estándares de primera calidad.

Con la implementación de un horno túnel no se asegura completamente la obtención de primeras calidades. No obstante, basados en tres propuestas de reconocidos fabricantes, es posible alcanzar un 90% de producto de primera calidad, si se siguen las especificaciones técnicas.

Análisis del talento humano

La utilización de hornos artesanales implica inconvenientes y sobrecostos en relación con el número de trabajadores con que debe contar la empresa para el proceso de cocción. En el caso estudiado, se dispone de un total de 258 trabajadores, de los cuales un 81% es asignado al proceso productivo y el restante al departamento de administración y ventas. De ese 81% en producción, un 45% se dedica al control y mantenimiento del proceso de cocción, además del cargue y descargue de las unidades.

Con la implementación de una tecnología más eficiente, como el horno túnel, se podría prescindir de 46 empleados en este proceso, tomando como base un salario mínimo mensual (COP \$535.600 para el año 2011) para cada uno de ellos, que equivale a un costo con prestaciones de \$943.376; esto representaría para la empresa una reducción inicial aproximada de \$520,74 MM en el primer año, con un incremento del 4,5% anual⁷.

Sin embargo, se es consciente de que este tipo de decisiones no se puede reducir simplemente a una situación de despido de 46 personas; hay implicaciones de tipo legal, ético y humano que se deben tener en cuenta.

Camacho (1997) registra un problema muy similar, en el que, mediante negociaciones uno a uno y con reglas claras, orientadas al respeto por el individuo y la generosidad bien entendida, se puede llegar a feliz término a corto plazo.

La moraleja de este episodio es que si en Colombia se le ofrece a la gente una descarga honorable con una suma que nunca han visto, el 90% o más de la gente la acepta más que complacida, pues busca nuevas oportunidades laborales (Camacho, 1997, p. 128). El caso de la empresa en cuestión debe enmarcarse en estos principios y ello, necesariamente, se debe tener en cuenta en su análisis financiero.

Chiavenato (2002) presenta igualmente una salida a la crisis de reducción de personal llamada “retiro de personal”. En esta forma, la empresa debe considerar la posible contratación de una firma especializada en esta herramienta, que oriente los esfuerzos de las personas hacia la búsqueda de una exitosa reinserción en el mercado laboral.

Diagnóstico ambiental

La Resolución 0909 de 2008, expedida por el MAVDT, en la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas, contempla:

“CAPÍTULO X

Estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para las industrias de fabricación de productos de cerámica refractaria, no refractaria y de arcilla.

Tabla 1
Estándares de emisión admisibles

Combustible	Estándares de emisión admisibles (mg/m ³)		
	MP	SO ₂	NOX
Sólido	250	550	550
Líquido	250	550	550
Gaseoso	No aplica	No aplica	550

Nota: Medición de contaminantes al aire para las industrias de cerámica y arcilla, a condiciones de referencia (25 °C, 760 mm Hg), con oxígeno de referencia del 18%.

Artículo 30. Estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para las industrias existentes de fabricación de productos de cerámica refractaria, no refractaria y de arcilla. En la tabla 1 se establecen los estándares de emisión admisibles para las industrias existentes de fabricación de productos de cerámica refractaria, no refractaria y de arcilla a condiciones de referencia y con oxígeno de referencia del 18%. Dichos estándares deben cumplirse en cada uno de los puntos de descarga de las industrias para la fabricación de productos de cerámica refractaria, no refractaria y de arcilla”⁸.

El consumo actual promedio mensual de los últimos dos años de carbón mineral en los hornos colmena ha sido de 706 toneladas, lo que representa una relación de 3,69 toneladas producidas por tonelada de carbón consumido. En un horno túnel, el consumo de carbón es teóricamente (datos conservadores de los fabricantes convocados) de 50 kg/tonelada producida.

Luego, considerando el nivel actual de consumo de carbón por tonelada de producto, el cual es equivalente a 271 kg/ton/mes, y un precio por tonelada en la zona de COP \$117.000, se obtendría un ahorro cercano a los COP \$808,56 MM anuales por este concepto.

Por otro lado, un horno túnel tipo, en condiciones normales de producción, disminuiría la emisión en cerca de 1.100 toneladas de CO₂ mensuales⁹, lo que le permitiría recibir por medio del mecanismo de desarrollo limpio (MDL) descrito cerca de COP \$514,32 MM anuales, a razón de US\$20,53 por cada tonelada de CO₂ dejada de emitir.

MARCO TEÓRICO

Centro Nacional de Producción Más Limpia

El Centro Nacional de Producción Más Limpia y Tecnologías Ambientales (CNPMLTA) es una entidad que funciona como puente entre la inversión de compañías de países industrializados y las empresas que quieran acceder a una fuente de financiación para realizar la adquisición de tecnologías limpias.

El CNPMLTA se fundó el 18 de marzo de 1998, como resultado de un trabajo de cooperación conjunta de un grupo promotor conformado por instituciones públicas de orden local, regional y nacional, empresas privadas, gremios, asociaciones, universidades, autoridades ambientales, y el gobierno suizo¹⁰.

Este instituto posee dos líneas de crédito que pueden usarse paralelamente y que se tienen en cuenta en la evaluación del proyecto financiero posterior.

Línea de crédito ambiental

Existe una línea de crédito convencional, otorgada ya sea por Bancolombia o por el Banco de Bogotá, que da un incentivo de hasta el 25% del capital del crédito tomado en el momento de comprobación de disminución de emisiones. Fue especialmente diseñada para inversiones que pretendan lograr un impacto positivo sobre el medio ambiente e incrementar el desarrollo sostenible del país. Los recursos del crédito provienen de los fondos propios de los intermediarios financieros, quienes son los encargados del crédito y del establecimiento de los contratos y demás documentos requeridos. Son responsables, además, de analizar la elegibilidad financiera de la empresa que solicita el crédito.

La Secretaría del Estado Suizo para Asuntos Económicos (Seco) estableció un fondo asociado a la línea de crédito ambiental, que otorga el incentivo (reembolso), teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Si la reducción en impacto ambiental es inferior al 30%, no se otorga ningún reembolso.
- Si la reducción está entre el 30 y 50%, se concede un reembolso del 15% del valor del crédito.
- Para reducciones superiores al 50%, se otorga un reembolso del 25%.
- US\$200.000 es la máxima cantidad reembolsada por cada proyecto/crédito.

Mecanismo de desarrollo limpio

El mecanismo de desarrollo limpio es una iniciativa instituida en el marco del PK como una herramienta encaminada a reducir la emisión de los GEI en el mundo. Cuenta con la utilización de certificados de reducción de emisiones (CER), los cuales brindan la oportunidad, a las empresas de países desarrollados que tienen un alto grado de emisión de GEI, de compensar su exceso de emisiones invirtiendo en empresas de países en vías de desarrollo que deseen hacer una reconversión tecnológica enfocada a reducir el grado de contaminación.

Por medio de este mecanismo se hace posible que, mediante un sistema de compensación convencional,

una empresa de un país en desarrollo pueda llegar a obtener, durante un máximo de diez años, un ingreso aproximado con una tasa de cambio de US\$1,33/EUR de US\$20,53¹¹ por cada tonelada de CO₂ dejada de emitir al medio ambiente, como producto de una disminución drástica en sus niveles de contaminación o reconversión tecnológica como la tratada en el presente estudio.

Horno túnel

El horno túnel es un canal rectilíneo, construido por paredes verticales, una cubierta y un suelo móvil sobre ruedas. En su interior se dispone de una vía, a través de la cual se hacen pasar los transportadores de ladrillos.

El proceso de cocción se hace gracias a los dosificadores de carbón estratégicamente ubicados, que generan en el interior del horno tres zonas, denominadas “zona de precalentamiento”, “zona de quema” y “zona de enfriamiento”.

La cocción de la arcilla provoca la fusión de algunos componentes, los cuales se gasifican, permitiendo la creación de nuevos enlaces que le dan la rigidez característica del ladrillo. Sin embargo, este proceso debe hacerse de una manera gradual para evitar que la porosidad normal que se produce no se convierta en grietas que afecten su presentación o robustez.

Debido a la estructura cerrada de los hornos túnel, la organización tendrá que orientar todos sus esfuerzos hacia el material de tipo colonial, ya que el proceso de *salinización* no se podrá realizar con esta tecnología. Será necesario, entonces, una redefinición estratégica de la empresa, con nuevos productos (tejas españolas, tejas en “S”, ladrillos catalanes, bloque de grandes formatos, tabletas y tablonos de menores y mayores dimensiones, y estudiar la implementación de esmaltados, entre otros).

ANÁLISIS FINANCIERO

El análisis financiero se hizo generando flujos de caja a un horizonte de siete años, teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- Se hace la proyección en pesos colombianos (COP) y con valores corrientes, tomando como base una

inflación anual de 3%, de acuerdo con la meta a largo plazo en Colombia (Banco de la República, 2010).

- La tasa de cambio del dólar se mantendrá alrededor de COP\$1897,89, dado que este valor es el promedio de la TRM del año 2010; así mismo, tomando como base la teoría de paridad en el poder adquisitivo Gustav Cassel (1921, 1922), no existe un diferencial considerable entre los niveles de inflación interna y externa que justifique una tendencia creciente o decreciente en la tasa de cambio a mediano o largo plazo. Sólo restaría el error debido a los niveles de volatilidad a corto plazo, pero con una estabilidad contradictoria a largo plazo.
- El proyecto contemplaría una inversión total de US\$2371,05 M, que se determina de acuerdo con el promedio de los presupuestos llave en mano inicialmente presentados para esta empresa por compañías líderes en construcción y montaje de este tipo de hornos a nivel mundial, tales como EquipCeramic de España, Italforni de Italia y Saracco y Cía. de Venezuela.
- El concepto de *habilitación* incluye los valores incurridos para la activación del proyecto en el Sistema de la European Union Emission Trading Scheme (EU ETS), de tal manera que puedan materializarse las disminuciones en la emisión de CO₂, y permitir sus transacciones en forma de CER. Se presupuesta un solo valor, equivalente a US\$47,42 M, en el inicio del proyecto, dato recogido en las propuestas de intermediación y trámite consultadas.
- La *Comisión Integral* corresponde a las transacciones comerciales y financieras canalizadas a través de los intermediarios para lograr la efectiva monetización de las divisas obtenidas por el MDL. En la realidad, tales comisiones no son constantes a lo largo del tiempo, pero en la práctica se calculan ácidamente como el 80% del ingreso bruto generado por la venta de CER.
- Se asume la aprobación y posterior financiación en un 80%, con un crédito de la línea ambiental por parte de Bancolombia o Banco de Bogotá, y se proyecta la aplicación del *incentivo (LCA)* tope de US\$200.000, como abono a capital para hacerlo efectivo en el año dos de la proyección.
- Las condiciones del crédito contemplan un plazo de cinco años, cuotas iguales de periodicidad mensual y una tasa de interés igual al promedio ponderado de las tasas promedio de captación diarias de los CDT a 90 días, pagadero por el sistema financiero colombiano (DTF) más ocho puntos básicos, nominal trimestre vencido. Para ello se usará la DTF al cierre del año 2010, que es de 3,47% efectiva anual.
- Se consideran los *ahorros de reducción de personal*, producto de la implementación del horno túnel.
- Se consideran los *ahorros en consumo de carbón mineral* con una proyección en crecimiento de precio de 6% por tonelada, calculada de acuerdo con predicción basada en comportamiento histórico de precios ajustada.
- La *negociación del personal* incluye los costos de asesoría en planes de retiro, desvinculación e indemnizaciones legales y extraordinarias, que se asumirían a razón de US\$5,27 M por cada uno de los 46 trabajadores que se proyecta desvincular.
- En aras de ser más conservadores con el presente análisis se decide contemplar un castigo del 50% al escenario ideal de venta total de CER a los valores indicados, de tal manera que se proyectaría un ingreso anual de apenas US\$135,49 M/año (en lugar de los \$514,32 MM/año calculados previamente).
- Se tienen en cuenta los ahorros generados vía impuesto a la renta por depreciación del nuevo activo, el alivio tributario de los gastos financieros (intereses) sobre la deuda adquirida y la reducción o aumento de ingresos y egresos operativos, pero no se incluye la posibilidad de alivio por inversión en activo fijo productivo.

CONDICIONES DEL CRÉDITO

Valor : US\$1.896,84 M

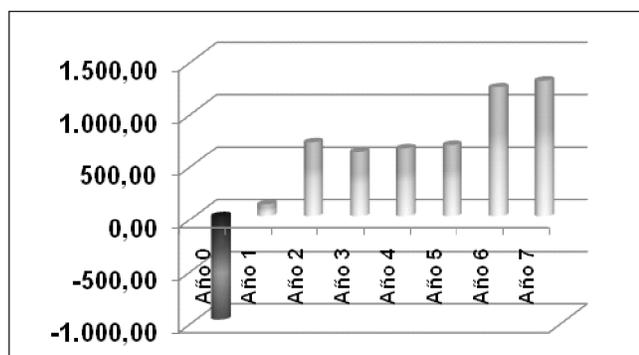
Plazo : 5 años

Tasa : DTF+8% TV = 11,43% TV = 11,92% EA = 0,94% MV

Cuota : US\$498,09M/año hasta el abono generado por el incentivo. Posteriormente, la cuota mensual disminuirá a US\$419,20 M/año

Tabla 2
Flujo de caja en detalle (valores en millones de pesos COP)

Inversión inicial	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7
7								
Inversión en horno	-4500,00							
Habilitación	-90,00							
Total inversión inicial	-4590,00							
Financiamiento	3600,00							
Interés causado		-377,31	-309,82	-197,20	-126,10	-46,55		
Abono a capital		-568,01	-1015,07	-598,39	-669,49	-749,04		
Cuota		-945,32	-945,32	-795,59	-795,59	-795,59		
Ingresos incrementales								
Ahorro carbón		808,56	857,08	908,50	963,01	1020,79	1082,04	1146,96
Venta CER		257,15	257,15	257,15	257,15	257,15	257,15	257,15
Incentivo (LCA)			379,58					
Ahorro en personal		520,74	544,17	568,66	594,25	620,99	648,94	678,14
Egresos incrementales								
Negociación personal		-460,00						
Comisión integral		-205,72	-205,72	-205,72	-205,72	-205,72	-205,72	-205,72
Efecto tributario								
Incremento en costos e intereses		-1043,03	-515,54	-402,92	-331,82	-252,27	-205,72	-205,72
Ahorros en costos y gastos		1329,30	1401,25	1477,16	1557,26	1641,79	1730,98	1825,10
Incremento en ingresos		257,15	636,73	257,15	257,15	257,15	257,15	257,15
Depreciación equipos		-900,00	-900,00	-900,00	-900,00	-900,00	0,00	0,00
Efecto neto en utilidades		-356,57	622,44	431,40	582,59	746,66	1.782,41	1876,53
Efecto neto en imponderata		-124,80	217,85	150,99	203,91	261,33	623,84	656,79
Flujo de caja incremental neto	-990,00	100,22	669,09	582,02	609,20	636,29	1158,57	1219,75



Fuente: Elaboración de los autores.

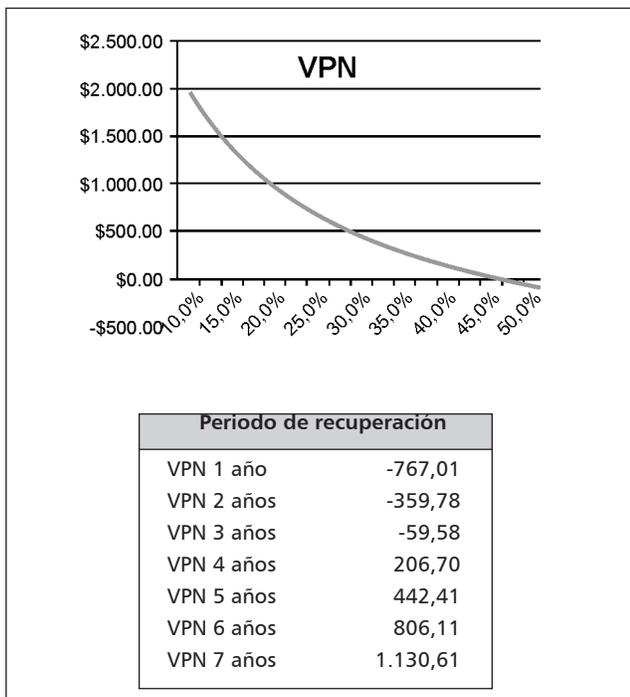
Figura 2. Flujo de caja incremental neto.

CRITERIOS DE EVALUACIÓN FINANCIERA

El objetivo financiero de un proyecto es la creación de valor para la empresa y sus propietarios. Esta creación de valor, en un sentido muy convencional (y sin desconocer la existencia de otras metodologías de evaluación

de proyectos), se da en la medida en que los beneficios esperados superen al valor de la inversión y los costos de llevar a cabo el proyecto. En términos técnicos, esto se presenta cuando el valor presente neto (VPN) es positivo, o de manera equivalente, cuando la tasa interna de retorno (TIR) supera el costo de capital. Para este proyecto, tal situación de creación de valor se produce si el costo de capital es inferior al 46,63% que se observa como TIR o rentabilidad esperada para el proyecto. Mientras más bajo sea el costo de capital, mayor será el VPN del proyecto.

Al hacer los cálculos del VPN con una tasa de descuento del 18%, de acuerdo con lo expresado por la junta directiva como costo de capital o rentabilidad mínima esperada para este proyecto, el valor agregado superaría los \$1100 millones en siete años y el periodo de recuperación se ubica entre tres y cuatro años.



Fuente: Elaboración de los autores.

Figura 3. Valor presente neto (cifras en millones de pesos COP\$MM).

CONCLUSIONES

- La implementación de hornos túnel en la compañía reduce el grado de emisión de GEI en 1100 ton de CO₂, de acuerdo con políticas de responsabilidad social empresarial, y puede llegar a brindarle a la firma US\$20,53 por cada tonelada de CO₂ dejada de emitir al medio ambiente en un periodo de tiempo no menor de diez años.
- Con los criterios de evaluación financiera y empleando parámetros conservadores se demuestran la viabilidad de utilizar el MDL y la línea de crédito ambiental para la adquisición de tecnología con un uso más eficiente de la energía.
- La adquisición de nueva tecnología implica un mejoramiento significativo de la calidad, eliminando en gran parte los defectos por roturas y haciendo posible alcanzar un 90% de primera calidad.
- Las alternativas de apalancamiento para este tipo de proyectos con un fuerte componente ambiental son diversas y están floreciendo en países como Colombia, a partir de la acción decidida de entidades multilaterales y organizaciones no gubernamentales; tal como se puede observar en el análisis, representan

una herramienta financiera viable, un incremento no despreciable en la productividad futura y, por supuesto, un impacto ambiental que cumple los estándares permitidos desde el punto de vista legal.

- Es importante que tanto empresarios como académicos conozcan este tipo de mecanismos de reconversión tecnológica, para que en equipo puedan impulsar numerosos proyectos que permitan a las empresas disminuir el grado de contaminación emitido y ser más competitivas en el mercado.

NOTAS

1. Para el caso particular, se aplica sobre hornos accionados con carbón mineral y se trabajará la transición específica hacia un horno tipo túnel.
2. Se le llama "VPN positivo" al valor presente neto positivo, el cual indica viabilidad financiera al flujo de caja derivado de su implementación.
3. Ley 905 de 2004, por medio de la cual se modifica la Ley 590 de 2000.
4. Tomando como referencia una tasa de cambio de \$1897,89 COP/US\$, equivalente al promedio de la tasa representativa del mercado colombiano en el año 2010.
5. Respetando el deseo de anonimato de la empresa, se otorgan cifras aproximadas que no alteran la esencia de este estudio, ya que se pretende otorgar una visión general que sea extrapolable a un grupo representativo de empresas del sector.
6. La alimentación de los hornos circulares, en su mayoría, se realiza asignando a una o dos personas por quema, que palean el carbón y lo distribuyen a lo largo del ciclo completo de cocción.
7. Proyección lineal consistente con análisis oficiales del Dane, DNP y Banco de la República
8. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Resolución 0909 de 2008.
9. Datos de fabricantes consultados.
10. Centro Nacional de Producción Más Limpia y Tecnología Ambiental, www.cnpml.org.
11. Valor presupuestado del precio de los CER (*Certified Emission Reductions*) para el año 2011 por la Unión Europea, para su uso y aplicación en el ETS (EU's Emission Trading Scheme). Noticia Reuters (25/01/2011). <http://www.reuters.com/article/2011/01/25/carbon-price-idUSLDE7000LW20110125>.

REFERENCIAS

- Banco de la República (2010, diciembre). Informe sobre inflación. Bogotá, D. C., ISSN - 1657 - 7973.
- BBC Mundo (2011). Consultado el martes 15 de febrero, en http://www.bbc.co.uk/mundo/noticias/2010/12/101211_cumbre_cancun_llega_acuerdo_av.shtml.
- Camacho Caro, Guillermo (1997). *Lo importante es el hombre. Cartas íntimas de un gerente*. Cali: Universidad del Valle.
- Cassel, Gustav (1921). *The world's money problems*. New York: E.P. Dutton and Co.
- Centro Nacional de la Producción Más Limpia (CNPMLTA) (2009).

Consultado el viernes 19 de octubre, en <http://www.cnpml.org/html/principal.asp>.

Chiavenato, Idalberto (2002). *Administración de recursos humanos*, 8ª ed. Madrid: McGraw Hill.

Corporación Andina de Fomento (CAF) (2010, junio). Mercados de carbono: una oportunidad. Revista *Sinergia*, N.º 22, año 9, pp. 14-19.

Fernández Abajo, Marcelino (2000, mayo). *Manual sobre fabricación de baldosas, tejas y ladrillos*. Madrid: Editorial Laboratorio Técnico Cerámico S.L., p. 276.

Línea de Crédito Ambiental (LCA) (2008). Consultado el viernes 16 de octubre en <http://www.lineadecreditoambiental.org/html/espanol.html>.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2008). Resolución 909.

Money and foreign exchange after 1914 (1922). New York: Macmillan.

Italforni (2009). Consultado el sábado 20 de octubre en http://www.italforni.com/es_forni%20a%20tunnel.asp.

Prato, J. (2007). Grupo Gitec. Modelos productivos de la industria cerámica de Norte de Santander. Propuesta joven investigadora. Protocolo de Kioto (2009). Consultado el lunes 12 de octubre en <http://www.cambio-climatico.com/protocolo-de-kyoto>.

Sitio web de la Red Interinstitucional de Tecnologías Limpias (RITL) en línea. Disponible en http://www.tecnologiaslimpias.org/html/central/369103/369103_fca.htm. (2009, 18 de noviembre). United Nations Office on Drugs and Crime (Unodc Colombia) (2007). Controlando el cambio climático y protegiendo el medio ambiente. Bogotá.