



TECNOLOGÍA

en marcha

Contenido

Deposición de Sn en Pt policristalino para su aplicación en la oxidación de metanol Deposition of Sn in polycrystalline Pt for use in the oxidation of Methanol <i>Javier E. Rodríguez-Yáñez</i>	3
Oferta y demanda de estudios de equivalencia terapéutica (<i>in vitro</i> e <i>in vivo</i>) de medicamentos en Costa Rica Offer and demand of therapeutic equivalence studies (<i>in vitro</i> and <i>in vivo</i>) for medicines in Costa Rica <i>Zacarías Pereira-Vega</i>	18
Comparative study on the use of two substrates with microbial inoculants for organic solid waste domestic composting: Economic Analysis Estudio comparativo del uso de dos sustratos con inóculos microbiales para el tratamiento de residuos orgánicos sólidos en compostaje doméstico. Análisis Económico <i>Gina Paola Borrero-González, Dagoberto Arias-Aguilar, Roel Campos-Rodríguez, Fabián Pacheco-Rodríguez</i>	28
Desempeño de turbinas eólicas Magnus de eje horizontal en función de sus variables geométricas y cinemáticas Horizontal axis Magnus wind turbine performance according to their geometric and kinematic variables <i>Gustavo Richmond-Navarro</i>	38

Caracterización de defectos y alteraciones nanoestructurales en la superaleación Nimonic 80A por medio de microscopía electrónica de transmisión	
Characterization of defects and nanostructural alterations in the Nimonic 80A superalloy by using Transmission Electron Microscopy	
<i>Teodolito Guillén-Girón, José Luis León-Salazar.....</i>	<i>51</i>
Modelación del proceso de secado de productos agroindustriales	
Modeling of the drying process of agro industrial products	
<i>Bruno Chinè-Polito</i>	<i>62</i>
Aplicación de Cadenas de Markov en un proceso de producción de plantas <i>in vitro</i>	
Application of Markov Chain in a production process of <i>in vitro</i> plants	
<i>Andrés Sánchez-Brenes, Carlos Alvarado-Ulloa, Ricardo Solís-Blanco, Randall Chacón-Cerdas, Humberto Villalta-Solano</i>	<i>74</i>
Análisis del comportamiento de mercado en las ferias del agricultor de la Gran Área Metropolitana	
Analysis of market behavior in Farmer's Markets located in the Greater Metropolitan Area	
<i>Manuel Enrique García-Barquero.....</i>	<i>83</i>
Enfoques de integración de información para sistemas de monitoreo de salud estructural de puentes	
Approaches to Information Integration in Structural Health Monitoring Systems for Bridges	
<i>César Garita</i>	<i>96</i>
Evolución de los modelos en los procesos de innovación, una revisión de la literatura	
Evolution of innovation process models, a literature review	
<i>Leonel Fonseca-Retana, Raquel Lafuente-Chryssopoulos, Ronald Mora-Esquivel.....</i>	<i>108</i>
Serialización/deserialización de objetos y transmisión de datos con JSON: una revisión de la literatura	
Object serialization/deserialization and data transmission with JSON: paper review	
<i>Juan Antonio Mora-Castillo.....</i>	<i>118</i>

Deposición de Sn en Pt policristalino para su aplicación en la oxidación de metanol

Deposition of Sn in polycrystalline Pt for use in the oxidation of Methanol

Javier E. Rodríguez-Yáñez¹

Fecha de recepción: 19 de junio del 2015
Fecha de aprobación: 26 de setiembre del 2015

Rodríguez-Yáñez, J. Deposición de Sn en Pt policristalino para su aplicación en la oxidación de metanol. *Tecnología en Marcha*. Vol. 29, Nº 1, Enero-Marzo. Pág 3-17.

¹ Laboratorio de Química Marina, Universidad Nacional, CP 046-3000. Heredia, Costa Rica. Teléfono: (506)22773351. Correo electrónico: urutico@gmail.com

Palabras clave

Estaño; platino; metanol; subpotencial; espontáneo; electrocatálisis; voltamperometría.

Resumen

Se evaluaron tres diferentes métodos de deposición de estaño en platino policristalino (Pt *pc*) desde una solución de ácido sulfúrico utilizando técnicas electroquímicas convencionales, con el fin de determinar y comparar su influencia en la oxidación de metanol.

Los métodos probados fueron deposición espontánea, deposición a subpotenciales y deposición cíclica a subpotenciales. El estaño fue depositado desde una solución de SnSO₄ en ácido sulfúrico. Se utilizó la reducción del perfil voltamétrico en el área de adsorción de hidrógeno en el platino por el estaño para calcular el grado de cubrimiento de la superficie por el mismo.

La adsorción de metanol y su oxidación se compararon entre los electrodos de platino y platino/estaño, considerando la eficiencia de oxidación de metanol con respecto al área libre de platino como parámetro comparativo.

Keywords

Tin; platinum; methanol; upd; spontaneous; electrocatalysis; voltammetry.

Abstract

Three different tin deposition methods on a polycrystalline platinum electrode in sulfuric acid were studied by conventional electrochemical techniques, in order to determine and compare their influence on methanol oxidation.

The deposition methods tested were spontaneous deposition, under potential deposition and cyclic under potential deposition. Tin was deposited from a solution of SnSO₄ in sulfuric acid. The inhibition of the hydrogen adatom voltammetric profile on platinum by tin metal ion was used to calculate the degree of surface coverage due to tin deposition.

Methanol adsorption and oxidation were compared on platinum and platinum/tin electrodes, considering the efficiency of methanol oxidation with respect to the platinum free area.

Introducción

La obtención de catalizadores para celdas de combustible o con fines ambientales es uno de los campos más importantes de la electroquímica actual.

El uso de metanol como combustible es amplio, por lo que su oxidación catalítica presenta interés energético (por ejemplo, en celdas de combustible de metanol o *DMFC* por sus siglas en inglés) y ambiental.

La mejora de los ánodos para realizar dicha oxidación en las celdas de combustible se plantea en función de la optimización de la producción energética y la minimización de la formación de residuos o venenos catalíticos sobre la superficie, tales como el CO.

En general, se utilizan ánodos a base de platino o platino aleado, y existe una amplia variedad de aleaciones y tipos de deposición y distribución superficial de los metales (Herrero, Buller &

Abruña, 2001; Gurau et al., 1998; Gerischer, Kolb & Sass, 1978; Cleghorn et al., 1997; Friedrich, Geyzers, Dickinson & Stimm, 2002).

Otra consideración es la relativa selectividad por algunos tipos de planos cristalinos en la deposición, lo que condiciona su capacidad catalítica (Frelink, Visscher & van Veen, 1996; Liu et al., 2000).

Se han propuesto numerosos métodos de deposición con resultados variables según los elementos involucrados, dependiendo de la naturaleza del sustrato y las características de la superficie, así como del potencial de deposición, teniendo en su mayoría al metanol como molécula modelo de oxidación (Frelink, Visscher & van Veen, 1996; Liu et al., 2000; McBreen & Mukerjee, 1995; Stalnionis, Tamašauskaitė-Tamašiūnaitė, Pautienienė, Sudavičius & Jusys, 2004a; Stalnionis, Tamašauskaitė-Tamašiūnaitė, Pautienienė, Sudavičius & Jusys, 2004b; Ishikawa, Liao & Cabrera, 2000).

Una metodología básica muy utilizada para la deposición de metales sobre la superficie de platino es la aplicación de un potencial constante inferior al potencial de deposición masiva (técnica conocida en inglés como *under potential deposition* o *upd*), con lo cual, a partir de una solución con el metal que se va a adicionar, se logra un cubrimiento superficial parcial, con reactividad variable y compleja. De manera similar la deposición espontánea se realiza al sumergir el metal base en una disolución del metal a depositar, sin aplicación de potencial, solo al potencial libre de la disolución, el cual depende de las características de la disolución. (Bonilla et al., 2005; Gurau et al., 1998; Gerischer, Kolb & Sass, 1978).

La existencia de diferentes métodos de deposición hace particularmente atractiva la consideración de la deposición a subpotenciales o espontánea en virtud de su facilidad, rapidez y relativa estabilidad (Janssen & Moolhuysen, 1976; Davies, Hayden, Pegg & Rendall, 2002).

Algunos autores plantean que los mejores resultados para la oxidación de metanol con superficies mixtas se deben a la acción de los átomos superficiales sobre la adsorción del mismo (Bonilla et al., 2005; Iwasita, Hoster, John-Anacker, Lin & Vielstich, 2000; Waszczuk, Barnard, Rice, Masel & Wieckowski, 2002; Spinacé, Neto & Linardi, 2004).

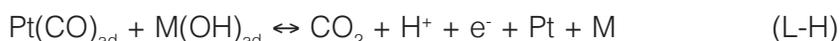
El presente estudio se basó en la generación de nuevas superficies mixtas y la evaluación de la acción de estas superficies modificadas sobre la oxidación del metanol.

La literatura indica que la proporción de estaño más efectiva se encuentra en el rango del 30-50%, dependiendo del tipo de deposición, el medio y el potencial utilizados, así como las características del depósito formado, que se discuten ampliamente, y en general para el estaño se describen como una mezcla de Sn, SnO, SnO₂ y Sn(OH)₂, principalmente (Stalnionis, Tamašauskaitė-Tamašiūnaitė, Pautienienė, Sudavičius, & Jusys, 2004a; Stalnionis, Tamašauskaitė-Tamašiūnaitė, Pautienienė, Sudavičius & Jusys, 2004b; Watanabe & Motoo, 1975).

Usualmente, se expresa que los depósitos de Sn se producen en islas sobre estructuras cristalinas de Pt con orientaciones (110), planteando que su actividad está asociada a su situación de carga parcial o a la posibilidad de bismutar a Sn⁰ o Sn⁺⁴ desde su estado como Sn⁺² (Bittins-Cattaneo & Iwasita, 1987; Sobkowski, Franaszczuk & Piasecki, 1985; Zinola, Rodríguez & Obal, 2001).

El mecanismo de reacción más aceptado es el de Langmuir Hinshelwood (L-H), que plantea la acción de los hidróxidos del metal adicionado, como donador de oxígeno para la oxidación del CO, que se forma como etapa intermedia de la oxidación de compuestos orgánicos sobre platino (Frelink, Visscher & van Veen, 1996; Janssen & Moolhuysen, 1976; Watanabe & Motoo,

1975; Bittins-Cattaneo & Iwasita, 1987; Janssen & Moolhuysen, 1976; Marković & Ross, 2002; Reddington et al., 1998):



De este modo, se facilita la oxidación final del compuesto, siendo en general este el paso determinante de la velocidad de reacción.

Las técnicas de deposición a subpotenciales (*upd*) y espontáneos son muy utilizadas y para el estaño muestran actividad en varios tipos de reacciones (Bonilla et al., 2005; Iwasita, Hoster, John-Anacker, Lin & Vielstich, 2000; Waszczuk, Barnard, Rice, Masel & Wieckowski, 2002; Spinacé, Neto & Linardi, 2004).

El depósito por métodos cíclicos en la región de subpotenciales (*cyclic upd*) se deriva del concepto de estabilización dinámica indicada por otros autores (McBreen & Mukerjee, 1995; Bonilla et al., 2005; Massong, Tillman, Langkau, Abd El Meguid & Baltruschat, 1998; Xia, 1999).

El presente trabajo enmarca su acción en la comparación entre deposiciones, así como su actividad frente a la acción catalítica para oxidar metanol.

Metodología

Electrodos

Los experimentos se llevaron a cabo usando alambres de platino policristalino (pc) de 0,5 mm de diámetro y 99,999% de pureza (Good Fellow Co.) como electrodos de trabajo.

Como contraelectrodo se utilizó un electrodo de platino de gran área, más de 10 cm², y como electrodo de referencia un electrodo normal de hidrógeno (ENH) generado con el electrolito soporte. Todas las medidas se refieren a este electrodo.

El área real del electrodo de trabajo se determinó por integración matemática del área de adsorción de hidrógeno. Los resultados se expresan en función de esta área disponible.

Disoluciones

El electrolito soporte utilizado fue H₂SO₄ 1 mol*L⁻¹, preparado con un ácido *Dorwil* (97,8% ACS), con agua de calidad *Millipore MilliQ plus* (resistividad 18,2 MΩ cm)

La solución de deposición 2 mmol*L⁻¹ en estaño se preparó a partir de SnSO₄ (*Sigma Aldrich* 99,5%) en ácido sulfúrico 1 mol*L⁻¹.

Tratamiento de generación de electrodos columnares

Algunos electrodos fueron sometidos a tratamientos de aumento del área por métodos electrodinámicos para la generación de columnas (Arvia, Salvarezza, & Triaca, 1989; Martins, Salvarezza & Arvia, 1991).

Este tratamiento se realizó en ácido sulfúrico 1 mol*L⁻¹, con la aplicación de ondas cuadradas entre 0 V y 2,6 V a una frecuencia de 5KHz por 5 minutos. Luego se mantuvo el potencial en 0V por 1 minuto, para después realizar un barrido lineal desde 1,6 V a 0 V, a 0,001V*s⁻¹ y una estabilización por voltamperometría cíclica entre 0 V y 1,6V a 0,01 V*s⁻¹.

Se calculó un Factor de Rugosidad (FR) del electrodo, definido como la relación de áreas en la región de adsorción de hidrógeno antes y después de la aplicación del tratamiento.

Métodos de deposición

Para poder evaluar los efectos del Sn en Pt *pc* se realizaron tres deposiciones de éste, según las siguientes metodologías (Bonilla et al., 2005; Stalnionis, Tamašauskaitė-Tamašiūnaitė, Pautienienė, Sudavičius, & Jusys, 2004a; Stalnionis, Tamašauskaitė-Tamašiūnaitė, Pautienienė, Sudavičius & Jusys, 2004b; Massong, Tillman, Langkau, Abd El Meguid & Baltruschat, 1998):

1. Deposición espontánea de estaño por inmersión del platino en una solución de SnSO₄ en ácido sulfúrico a circuito abierto o potencial libre de disolución.
2. Deposición a subpotenciales (*upd*), realizada a potencial constante de 0,2 V en disolución de estaño en ácido sulfúrico, sobre el electrodo de platino.
3. Ciclado dinámico en la región de subpotenciales (*cyclic upd*) de estaño en la región de máxima deposición de estaño, 0,05 a 0,35 V, a baja velocidad de barrido, 0,01 V*s⁻¹.

Todas las deposiciones se hicieron desoxigenando las disoluciones con nitrógeno de alta pureza (Air Lyquide 5.0).

Los depósitos de estaño obtenidos fueron estabilizados por voltamperometría cíclica, entre 0 V y 0,6 V, a una velocidad de barrido de 0,1 V s⁻¹, en ácido sulfúrico 1 mol*L⁻¹.

Cálculos de cubrimiento

El valor de *cubrimiento superficial* (θ) se define como (Zinola, Rodriguez & Obal, 2001):

$$\theta = (Q_H - Q_{H,Ad}) / Q_H$$

Donde Q_H representa la carga de hidrógeno adsorbido por el electrodo de platino antes de la deposición y $Q_{H,Ad}$ representa la carga después de la deposición, ambas en ácido sulfúrico 1 mol*L⁻¹.

Para los cálculos de Q , se considera el área anódica generada entre 0,05 V y 0,4 V vs ENH.

Los tiempos de deposición varían de acuerdo con el grado de cubrimiento requerido para *upd* y *cyclic upd*, mientras que para la deposición espontánea el ajuste del cubrimiento se realiza por deposiciones repetidas con estabilizaciones intermedias.

Por ejemplo, para 10 minutos con deposición espontánea se obtiene alrededor de 15-20%, mientras que para *upd* se obtiene cerca de 40-50% de cubrimiento. El intervalo de cubrimientos de interés es del 25% al 50%.

La solución para la deposición espontánea presenta degradación con el tiempo, decreciendo su efectividad, por lo que su tiempo máximo de uso es una semana (Bittins-Cattaneo & Iwasita, 1987; Solís, Iwasita, Pavese & Vielstich, 1988; Szabo, 1984; Rodríguez-Yañez, 2012).

Oxidación de metanol

La oxidación de metanol se estudió por cronoamperometría entre 0,65 V y 0,8V, en soluciones de 0,1 mol*L⁻¹ de metanol en 1 mol*L⁻¹ de ácido sulfúrico.

También se llevaron a cabo voltamperometrías de barrido lineal entre 0 V y 0,8V a 0,01 V*s⁻¹ con la misma disolución, a fin de evaluar el comportamiento de los electrodos modificados, su estabilidad y la formación de venenos superficiales.

Eliminación de residuos de metanol

La eliminación de los residuos de metanol, normalmente CO, por barrido en la región de su oxidación (*stripping*) permite ver la actividad de los electrodos modificados bajo estas condiciones.

Para ello, se realiza una adsorción de residuos a 0,25 V (E_{ad}) durante 10 minutos. Luego, y manteniendo el potencial, se elimina la disolución de metanol y se deja solo el electrolito soporte. A continuación, se efectúa un barrido lineal entre E_{ad} y 0 V, para hacer a continuación un barrido de potencial entre 0 y 1,5 V, a 0,1 V*s⁻¹, obteniendo así la respuesta a la eliminación del residuo de metanol en el electrodo modificado.

Se utiliza ese potencial de adsorción porque es el indicado como de máxima generación de residuos para el metanol (Solis, Iwasita, Pavese & Vielstich, 1988).

Como respuesta, se calcula la carga obtenida en la región de adsorción de hidrógeno y se compara con la del electrodo original, asociando las diferencias al residuo generado.

Actividad de los electrodos modificados con estaño en la oxidación de metanol en solución

La actividad de los electrodos modificados con Sn fue probada al compararla con el Pt *pc*, en una disolución de metanol 0,1 mol*L⁻¹ en 1 mol*L⁻¹ de ácido sulfúrico. Esta se realizó por voltamperometría cíclica desde E_{ad} , a 0 V y luego a 0,8 V a 0,01 V*s⁻¹

Se utilizó dicha región ya que algunos autores consideran que el Sn depositado no se oxida pasando a disolución hasta potenciales superiores a 0,8V (Sobkowski, Franaszczuk & Piasecki, 1985).

A esta baja velocidad de barrido de potencial (0,01 V*s⁻¹), se ponderó la estabilidad de las corrientes de oxidación para cada sistema, el envenenamiento y la cinética de Tafel para las curvas obtenidas (Bonilla et al., 2005; Davies, Hayden, Pegg & Rendall, 2002).

Resultados y discusión

La deposición de Sn en platino

La superficie de platino fue modificada por las deposiciones de estaño, con niveles de cubrimiento θ del orden del 30% al 50%. Estos valores permiten considerar un orden de relación Pt/Sn de 3:1 a 2:1. Luego de modificada la superficie, se realizó su estabilización.

El perfil voltamperométrico del Pt *pc* a 0,1 V*s⁻¹ antes y después de la deposición de Sn puede observarse en la figura 1. Las voltamperometrías fueron corridas entre 0,05 V y 0,6V para evitar la desorción oxidativa del estaño depositado. La comparación entre los perfiles antes y después de la deposición evidencia la inhibición parcial de la adsorción de hidrógeno por parte del estaño depositado, así como el engrosamiento de la doble capa.

Varios autores ya han indicado esta situación, incluso marcando preferencias por regiones cristalinas de adsorción débil del hidrógeno y la dependencia del efecto con el grado de cubrimiento (Zinola, Rodriguez & Obal, 2001; Xia, 1999; Bakos & Szabo, 2001).

Oxidación de residuos de metanol en electrodos modificados

En la figura 2 se expone el comportamiento de la oxidación de los residuos de metanol ocurrida en electrodos de Pt modificados con Sn, por las diferentes técnicas ya expuestas.

Si se comparan entre sí las curvas obtenidas, no se observan diferencias sustanciales en su trazado general. Sin embargo, se pueden distinguir claramente dos zonas que separaremos para su estudio detallado.

En electrodos de Pt a potenciales menores a 0,4 V, se observa el bloqueo de la superficie por especies de CO formadas durante la oxidación catalítica de metanol (Stalnionis, Tamašauskaitė-Tamašiūnaitė, Pautienienė, Sudavičius & Jusys, 2004b). Sin embargo, aplicando el potencial

de adsorción de máximo CO se encontró que aun el de mayor recubrimiento no presenta un bloqueo total de la superficie, lo cual indica que la superficie no se encuentra saturada de CO.

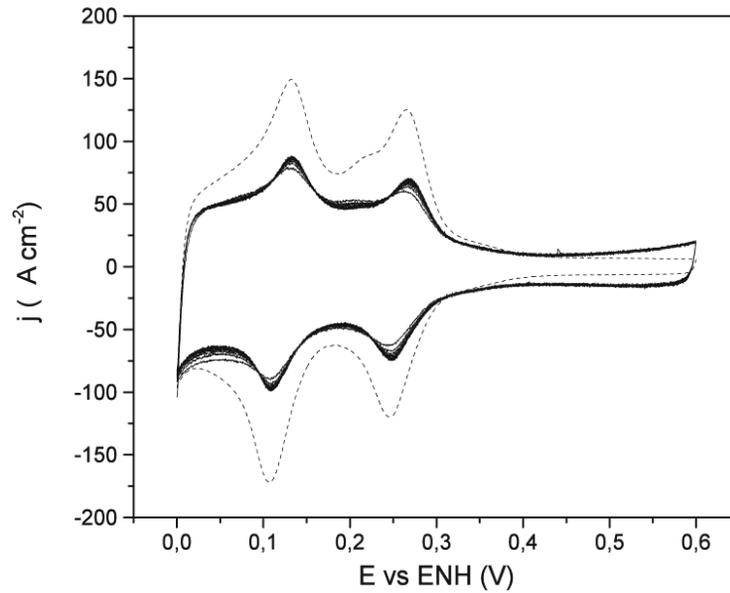


Figura 1. Estabilización de los depósitos de Sn en Pt por ciclado en la región de *upd*. Voltamperometría cíclica entre 0,05 V y 0,6 V a $0,1 \text{ V}\cdot\text{s}^{-1}$, por 10 ciclos. Depósito Sn *upd* 32% (—), Pt limpio (---).

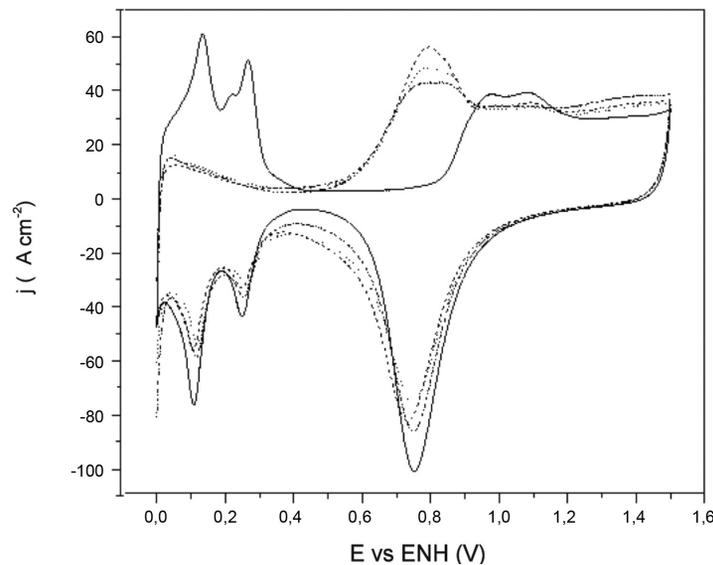


Figura 2. Voltamperometría cíclica de eliminación de residuos de adsorción de metanol (CO) para los distintos tipos de deposición de Sn, espontáneo 49% (---), *upd* 51% (...) y *cupd* 47% (—), blanco de Pt limpio (—), en ácido sulfúrico $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, a $0,01 \text{ V}\cdot\text{s}^{-1}$

Debe recordarse que, para los electrodos modificados, parte del bloqueo de la superficie se debe al Sn depositado sobre el electrodo base de platino. Bajo esta consideración, en los electrodos modificados se determinó que la cantidad de CO adsorbido superficialmente, en función del área libre de Pt, son menores que para Pt limpio. Lo que indicaría que la deposición

de Sn dificulta la formación de residuos de oxidación de metanol, ya sea por acción catalítica o estérica.

En este sentido, los tres tipos de depósitos de Sn presentaron valores diferentes en dicha afectación a iguales cubrimientos. Se observa que la cantidad de Pt disponible para la reacción que no presenta adsorción de CO es de apenas del 5% en el depósito por *ciclic upd*, mientras que para depósitos por *upd* es del 12% y para los depósitos *espontáneos* es de casi el 23%.

Más allá de la región de adsorción de hidrógeno se aprecia una corriente de oxidación a potenciales cercanos a 0,5V, lo que representa un potencial de oxidación de CO menor que los usuales para platino limpio de aproximadamente 0,7V. Estos valores deben ser tomados con cuidado, ya que se determinó que según el método de deposición, las corrientes pueden estar alteradas por una corriente adicional correspondiente a la oxidación del Sn depositado sobre platino.

Para considerar esta corriente adicional por la oxidación del Sn depositado, se realizaron blancos de comparación con depósitos equivalentes sin la presencia de residuos de metanol, a fin de evaluar las corrientes de oxidación para cada tipo de Sn depositado, lo que puede apreciarse en la figura 3. Dicha figura muestra que, para el caso de los depósitos espontáneos, la corriente de oxidación del Sn es muy pequeña y es apenas significativa a potenciales superiores a 0,8V. Esto ratifica lo expresado por otros autores en cuanto a la estabilidad de este tipo de depósitos (Stalnionis, Tamašauskaitė-Tamašiūnaitė, Pautienienė, Sudavičius & Jusys, 2004a; Bonilla, et al., 2005). Se encontró que para los depósitos por *upd* o *cupd*, gran parte de la corriente de oxidación, a potenciales menores a 0,6V, corresponde a la oxidación del Sn superficial, y a potenciales superiores la oxidación del Sn representa también una parte importante de la corriente. En este sentido, en la figura 4 se muestra la proporción de la oxidación del Sn en la corriente de oxidación en un electrodo con deposición de Sn por *upd*.

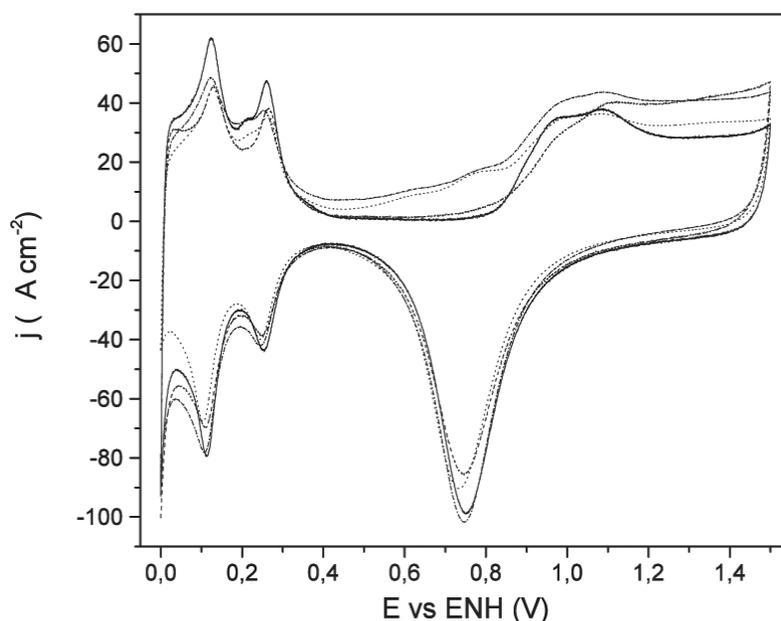


Figura 3. Voltamperometría cíclica para la comparación de la redisolución de Sn en los electrodos modificados de Pt/Sn en el primer ciclo, espontáneo 21%(--), *upd* 27%(...), *cupd* 25%(-.-), Pt limpio (___) en ácido sulfúrico 1 mol*L⁻¹, a 0,1 V*s⁻¹

Teniendo en cuenta este efecto, los picos de oxidación de los residuos de metanol (CO adsorbido) presentan algunas características que se deben resaltar:

- Si se compara con Pt limpio, los picos de oxidación se inician a potenciales menores (aproximadamente 0,1V menores).
- Para valores de potencial situados entre 0,6 V y 0,7 V, las corrientes de oxidación son mayores en electrodos modificados. Posteriormente, y hasta llegar a 0,9V, los valores de corriente son algo menores.
- Se puede asumir que existen dos picos de oxidación traslapados (superpuestos), los cuales se situarían aproximadamente a 0,8 V y 0,85 V, asociados según algunos autores a la oxidación del CO (Sobkowski, Franaszczuk & Piasecki, 1985).
- Las cargas netas de oxidación del residuo de metanol, que surge de restar la carga del pico de la oxidación del CO adsorbido menos la carga de oxidación del Sn depositado, aumenta con el grado de cubrimiento de Sn (θ_{Sn}), siendo la relación dependiente del tipo de depósito. En el caso de *cupd*, la variación no es significativa, mientras que en los depósitos por *upd* es leve (14% para θ de 50%) y resulta significativa para la deposición espontánea (50% o más con un θ de 50%).

Estas correlaciones entre el aumento de actividad y el grado de cubrimiento (θ_{Sn}) llevan a considerar que existe una cantidad mínima de Sn a depositar, para que la superficie de Pt modificada por Sn sea más activa catalíticamente que el Pt solo, siendo del orden del 10% para deposición espontánea. (Bittins-Cattaneo & Iwasita, 1987; Stalnionis, Tamašauskaitė-Tamašiūnaitė, Pautienienė, Sudavičius & Jusys, 2004a; Waszczuk, Barnard, Rice, Masel & Wieckowski, 2002).

Los potenciales de inicio de oxidación de los adsorbatos de metanol son coincidentes con los potenciales reportados para los picos de oxidación del Sn *upd*, lo que estaría relacionado con la formación de los intermediarios necesarios para el mecanismo bifuncional del tipo propuesto por Lagmuir-Hinshelwood (*L-H*). (Watanabe & Motoo, 1975; Zinola, Rodriguez & Obal, 2001; Xia, 1999; Solis, Iwasita, Pavese & Vielstich, 1988; Koch, Rand & Woods, 1976).

Actividad de los electrodos modificados frente a metanol

Los electrodos de Pt modificados con Sn fueron enfrentados a una solución de 0,1 mol*L⁻¹ en metanol en un medio ácido sulfúrico 1mol*L⁻¹, a fin de apreciar su estabilidad para su utilización en las celdas de combustible de metanol directas (*DMFC*) y como catalizador anódico (oxidativo) de moléculas orgánicas simples.

Los ensayos en los electrodos de Pt modificado con Sn se realizaron mediante voltamperometría cíclica a baja velocidad de barrido (0,001V*s⁻¹) y por cronoamperometrías.

Cronoamperometrías

Se realizaron curvas cronoamperometrías en potenciales asociados a la región de oxidación del metanol sobre platino, con el fin de ver las características de dicha oxidación en los electrodos generados, eligiéndose un potencial de 0,65V y 0,8V (Waszczuk, Barnard, Rice, Masel & Wieckowski, 2002; Xia, 1999; Szabo, 1984).

La elección de los valores de potencial para dichas cronoamperometrías de trabajo corresponde al primero y segundo pico de oxidación del Sn depositado por el método *upd*, lo que puede apreciarse en la figura 4. En ellas no se presentaron diferencias significativas en las curvas obtenidas en ambos potenciales.

Las medidas cronoamperométricas normalizadas por unidad de área de electrodo para los ensayos a 0,65V se muestran en la figura 5. Se utilizó como blanco la cronoamperometría del Pt limpio en electrolito soporte (H_2SO_4 1mol*L⁻¹) y en la solución de metanol 0,1 mol*L⁻¹ en H_2SO_4 1mol*L⁻¹.

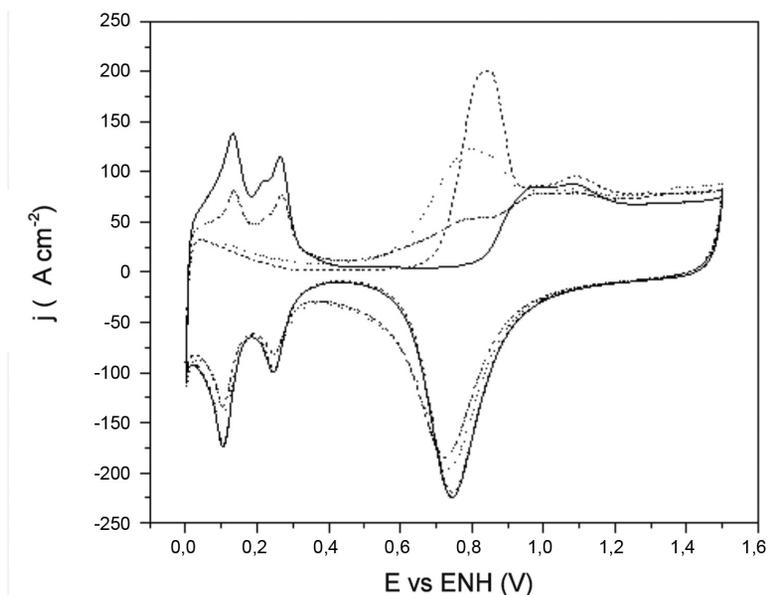


Figura 4. Voltamperometría cíclica en H_2SO_4 1 mol*L⁻¹, a 0,01 V*s⁻¹, blanco de Pt limpio (—), adsorbato de metanol en Pt limpio (---), adsorbato de metanol en Pt con Sn *upd* $\theta = 51\%$ (....), redisolución de Sn en electrodos de Pt con Sn *upd* 45% (-.-.-).

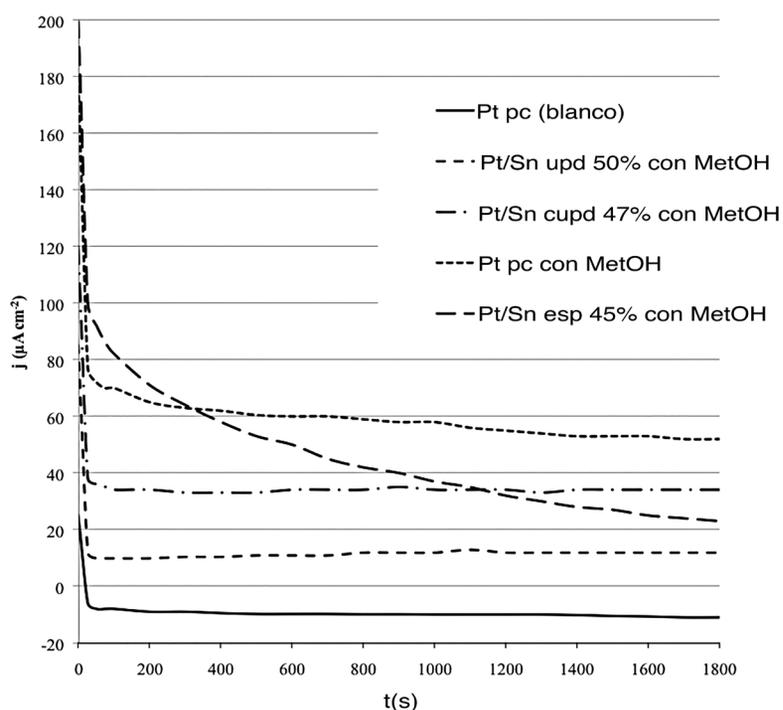


Figura 5. Cronoamperometrías a 0,65V por 30 min, (—) Pt *pc* en H_2SO_4 1M (blanco), (---) Pt *pc*, (-.-.-)Pt/Sn *cupd* 47%, (- - -) Pt/Sn *upd* 50% y (- - -) Pt/Sn *esp* 45% con metanol 0,1 mol*L⁻¹ en H_2SO_4 1 mol*L⁻¹

Los electrodos modificados presentaban curvas de decaimiento exponencial similares, en las que se puede apreciar que las diferencias radicaron en la velocidad de decaimiento inicial y en los valores constantes finales de corriente obtenidos.

Mientras que para *upd* y *cupd* se obtienen corrientes constantes de oxidación de metanol, con valores menores que para Pt limpio, en cambio para la deposición espontánea, la curva tiene un decaimiento continuo tendiente a cero.

Teniendo en cuenta que, además, para *upd* y *cupd* existen --a estos potenciales-- valores de corrientes de oxidación del Sn, se recalculó la cobertura final y se obtuvo una disminución de ésta para ambos del orden del 5% y el 20%, respectivamente. Por ende, las curvas cronoamperométricas marcan que los sistemas *upd* y *cupd* están dando corrientes de oxidación a expensas de su propia degradación; mientras que el depósito espontáneo presenta un decaimiento rápido asociado a una mejor velocidad de reacción y obtención del equilibrio *sin* que se observara pérdida de cubrimiento.

En la literatura se indica que a dichos potenciales (y en particular a 0,65 V) la oxidación de metanol es incompleta, obteniéndose CO₂, ácido fórmico y formaldehído, por lo cual los residuos de metanol o la formación de estos podrían estar afectando la estabilidad de los depósitos de Sn utilizados (Stalnionis, Tamašauskaitė-Tamašiūnaitė, Pautienienė, Sudavičius & Jusys, 2004b).

Voltamperometrías cíclicas a baja velocidad

Se desarrollaron curvas de voltamperometría cíclica a baja velocidad (0,001V*s⁻¹), con el fin de desprejar los efectos difusivos en la medida. Dichas curvas se realizaron dentro del límite de trabajo máximo definido para evitar la oxidación de Sn depositado a altos potenciales (superiores a 0,8 V) (Sobkowski, Franaszczuk & Piasecki, 1985).

Las figuras 6 y 7 muestran las curvas típicas de comportamiento obtenidas para los electrodos con depósitos de Sn, frente a una solución de metanol 0,1mol*L⁻¹ en H₂SO₄ 1 mol*L⁻¹ a baja velocidad de barrido.

Se pueden apreciar en dichas figuras las siguientes características:

- Los valores máximos de corriente se dan a 0,8 V, decayendo en cada ciclo. El valor de la corriente de pico es proporcional a la cantidad de Sn depositado, aumentando con este.
- El decaimiento del máximo de corriente es menor cuanto mayor es la cantidad de Sn y en relación con los depósitos decae más con *cupd*, luego con *upd* y por último con *espontáneo*.
- Las curvas presentan histéresis, siendo las corrientes del barrido de oxidación menores que en el barrido de reducción (ver Fig. 6), aparentemente debido a la liberación de sitios de platino realizada en la primera parte del barrido al aumentar el potencial (Massong, Tillman, Langkau, Abd El Meguid & Baltruschat, 1998). La histéresis se acentúa con la cantidad de Sn depositado y disminuye con el decaimiento de los picos en cada ciclo, producto del envenenamiento de la superficie.

Las curvas comparativas normalizadas para electrodos de Pt/Sn con distintos tipos de cubrimiento, mostraron que el Sn espontáneo y el *cupd* presentan mayores valores de corriente máxima y menor histéresis del pico de oxidación de metanol, pero este último con un aporte a la corriente por la oxidación del propio Sn depositado, con pérdida de cubrimiento.

Una vez evaluada la cantidad de Sn residual luego de los ensayos, se aprecia que los depósitos de Sn *upd* y *cupd* son lábiles para cubrimientos superiores al 10%, por lo tanto, hay que considerar que parte de la corriente de oxidación en los picos con estos depósitos corresponde

a la oxidación del propio Sn. Aparentemente, esto depende de los ciclos de estabilización del depósito y de la estructura del Pt, siendo más acentuada la pérdida en electrodos columnares. Para el caso de Sn espontáneo, no se producen pérdidas apreciables a potenciales inferiores a 0.8 V.

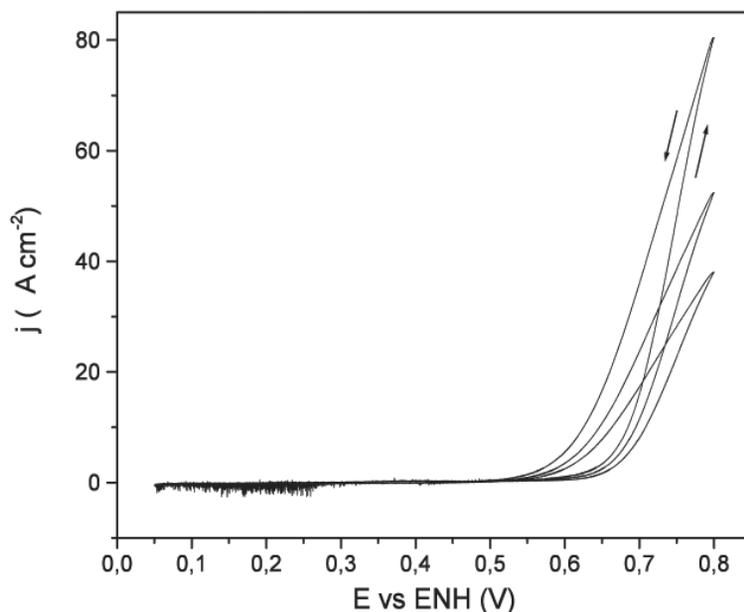


Figura 6. Decaimiento de la corriente de oxidación de metanol en cada ciclo para las voltamperometrías cíclicas de baja velocidad ($0,001 \text{ V}\cdot\text{s}^{-1}$) en Pt/Sn *upd* 33%, en solución de metanol $0,1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ en H_2SO_4 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$

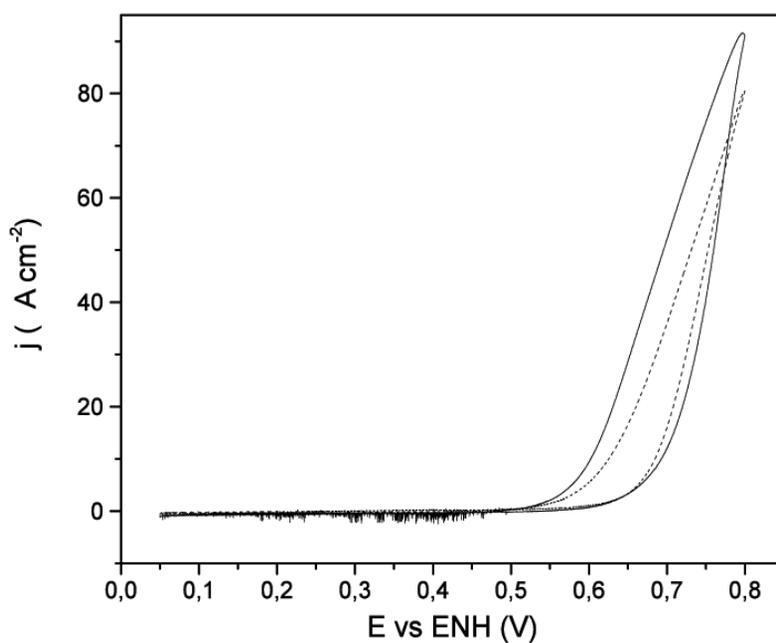
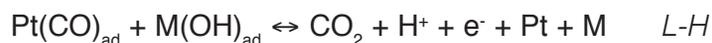


Figura 7. Comparación del primer ciclo de las voltamperometrías cíclicas de oxidación de metanol para electrodos de Pt/Sn *upd* con cubrimientos de 47% (—) y con 33% (---), en solución de metanol $0,1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ en H_2SO_4 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$

En el cuadro 1 se presenta los valores de las pendientes de Tafel observadas en las curvas voltamperométricas, discriminadas según el tipo de Sn depositado, su cubrimiento (30% y 50% aproximadamente) y el barrido de potencial considerado. Se indican entre paréntesis los valores teóricos considerados asociados a dichas pendientes.

En términos generales, los barridos anódicos muestran un aumento de la pendiente con el aumento del cubrimiento por Sn, mientras que los catódicos son estables. Esto último se debe a la liberación de sitios activos de Pt en el barrido anódico, lo que modificaría el paso limitante de la reacción.

La tendencia a altos cubrimientos en los barridos anódicos es de una pendiente cercana a los 90 mV*dec⁻¹. Esta pendiente estaría asociada a una segunda transferencia unielectrónica, como paso limitante de la velocidad de reacción, condicionada a la variación del recubrimiento de CO_{ad} y Sn depositado activo existente, asociado a un mecanismo bifuncional o del tipo Lagmuir-Hinshelwood.



Mientras que en Pt limpio la pendiente anódica de 120 mV dec⁻¹ la cual se corresponde más con un mecanismo cuyo paso limitante es la transferencia de un segundo electrón en la oxidación de CO_{ad}, luego de una etapa reversible rápida inicial.

Los valores de pendientes de Tafel de 60 mV dec⁻¹, para bajos cubrimientos en *upd* y *cupd*, responderían a una reacción controlada por una segunda transferencia electrónica, posterior a una primera transferencia rápida.

Los valores de la pendiente en los barridos catódicos están más asociados al tipo de depósito, siendo similares para *upd* y *cupd*, con valores cercanos a los 90 mV*dec⁻¹, manteniendo la tendencia observada para el barrido anódico. En cambio, para los depósitos espontáneos de Sn, las pendientes presentan valores más elevados, cercanos a los 120 mV dec⁻¹, similares a los del Pt limpio.

Cuadro 1. Cálculo de las pendientes de Tafel para los distintos electrodos de Pt modificados con Sn con las metodologías utilizadas y en los dos rangos principales de cubrimiento.

Ensayo	θSn (%)	Pend And (mV*dec-1)	Pend Cat (mV*dec-1)	Observaciones	Ejo and (mV)	Ejo cat (mV)
Pt limpio	0%	112 (120)	88 (90)	Blanco	636	601
Pt/Sn esp	45%	99 (90)	119 (120)	Sin pérdida aparente de cobertura	298	400
Pt/Sn esp	29%	93 (90)	108 (120)	Sin pérdida aparente de cobertura	288	437
Pt/Sn <i>upd</i>	47%	82 (90)	87 (90)	Con pérdida de cobertura (10%)	600	481
Pt/Sn <i>upd</i>	33%	63 (60)	93 (90)	Sin pérdida aparente de cobertura	569	433
Pt/Sn <i>cupd</i>	51%	84 (90)	92 (90)	Con pérdida de cobertura (20%)	518	380
Pt/Sn <i>cupd</i>	28%	58 (60)	94 (90)	Con pérdida de cobertura (10%)	600	410

Los potenciales de corriente cero (E_{j0}) presentan una marcada diferencia para el depósito de Sn espontáneo, que tiene potenciales de iniciación del orden de los 0,3V. Esto implicaría que éste ya estaría reaccionando con el metanol y sus residuos al inicio de la doble capa del Pt, mientras que los otros depósitos iniciarían la oxidación entre los 0,5 y los 0,6V, siendo esto una situación ligeramente menor que con Pt limpio, que inicia la oxidación a 0,6V.

Conclusiones

Los electrodos de Pt con deposiciones de distintos metales han sido considerados como ánodos de celdas de combustibles, en particular, variaciones de los mismos con distintos tipos de depósitos superficiales para mejorar su funcionamiento.

En este trabajo, los electrodos de Pt modificados con depósitos de Sn que se estudiaron presentaron una dependencia de su actividad, según el tipo y la cantidad de cubrimiento superficial utilizados, así como el tipo de estructura cristalina del electrodo (policristalino, columnar).

Las nuevas metodologías empleadas no solo son de simple aplicación, sino que, en general, los electrodos obtenidos presentaron buenas propiedades oxidativas para el metanol como ánodos para una celda de combustible directa de metanol (DMFC).

Entre los electrodos evaluados se destacó el electrodo de Pt con Sn depositado en forma espontánea, el cual presentó no solo buena estabilidad frente a la autooxidación, dentro del ámbito de estabilidad de este tipo de electrodos mixtos, sino también mejores características de oxidación del metanol en solución.

Agradecimientos

Se agradece al Ministerio de Ciencia y Tecnología de Costa Rica por el apoyo brindado al autor de este trabajo como becario de esa dependencia.

Bibliografía

- Arvia, A., Salvarezza, R. & Triaca, W. (1989). The development of metal overlayers with smooth and rough topographies. *Electrochimica Acta*, (34), 1057-1071.
- Bakos, I. & Szabo, S. (2001). Electrochemical adsorption of tin on palladium. *Electrochimica Acta*, (46), 2507-2513.
- Bittins-Cattaneo, B. & Iwasita, T. (1987). Electrocatalysis of methanol oxidation by adsorbed tin on platinum. *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, (238), 151-161.
- Bonilla, S., Zinola, F., Rodriguez, J., Diaz, V., Ohanian, M., Martinez, S. & Gianetti, B. (2005). Catalytic effects of ruthenium and osmium spontaneous deposition on platinum surfaces toward methanol oxidation. *Journal of Colloid and Interface Science*, (288), 377-386.
- Cleghorn, S., Ren, X., Springer, T., Wilson, M., Zawodzinski, C., Zawodzinski, T. & Gottesfeld, S. (1997). Pem fuel cells for transportation and stationary power generation applications. *Int. J. Hydrogen Energy*, 22, 1137-1144.
- Davies, J., Hayden, B., Pegg, D. & Rendall, M. (2002). The electro-oxidation of carbon monoxide on ruthenium modified Pt(111). *Surface Science*, (496), 110-120.
- Frelink, T., Visscher, W. & van Veen, J. (1996). Measurement of the Ru Surface Content of Electrodeposited PtRu Electrodes with the Electrochemical Quartz Crystal Microbalance: Implications for Methanol and CO Electrooxidation. *Langmuir*, (12), 3702-3708.
- Friedrich, K., Geysers, K., Dickinson, A. & Stimm, U. (2002). Fundamental aspects in electrocatalysis: from the reactivity of single-crystals to fuel cell electrocatalysts. *J. Electroanal. Chem.* 524, 261.
- Gerischer, H., Kolb, D. & Sass, J. (1978). The study of solid surfaces by electrochemical methods. *Adv. Phys.*, 27, 437-498.
- Gurau, B., Viswanathan, R., Liu, R., Lafrenz, T., Ley, K., Smotkin, E. & Sarangapani, S. (1998). Structural and Electrochemical Characterization of Binary, Ternary, and Quaternary Platinum Alloy Catalysts for Methanol Electro-oxidation. *J. Phys. Chem. B.*, 102(49), 9997-10003.

- Herrero, E., Buller, L. & Abruña, H. (2001). Underpotential deposition at single crystal surfaces of Au, Pt, Ag and other materials. *Chem Rev.*, 1897-1930.
- Ishikawa, Y., Liao, M. & Cabrera, C. (2000). Oxidation of methanol on platinum, ruthenium and mixed Pt-M metals (M=Ru, Sn): a theoretical study. *Surface Science*, (463), 66-80.
- Iwasita, T., Hoster, H., John-Anacker, A., Lin, W. & Vielstich, W. (2000). Methanol Oxidation on PtRu Electrodes. Influence of Surface Structure and Pt-Ru Atom Distribution. *Langmuir*, (16), 522-529.
- Janssen, M. & Moolhuysen, J. (1976). Binary system of platinum and a second metal as oxidation catalysis for methanol fuel cell. *Electrochimica Acta*, (21), 869-878.
- Koch, D., Rand, D. & Woods, R. (1976). Binary electrocatalysts for organic oxidations. *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, (70), 73-86.
- Liu, R., Iddir, H., Fan, Q., Hou, G., Bo, A., Ley, K. & Wieckowski, A. (2000). Potential-Dependent Infrared Absorption Spectroscopy of Adsorbed CO and X-ray Photoelectron Spectroscopy of Arc-Melted Single-Phase Pt, PtRu, PtOs, PtRuOs, and Ru Electrodes. *The Journal of Physical Chemistry B.*, (104), 3518-3531.
- Marković, N. & Ross, P. (2002). Surface science studies of model fuel cell electrocatalysts. *Surface Science Reports*, (45), 117-229.
- Martins, M., Salvarezza, R. & Arvia, A. (1991). A study on the voltammetric behaviour of silver on electrodispersed platinum electrodes in acid solution. *Electrochimica Acta*, (36), 1617-1622.
- Massong, H., Tillman, S., Langkau, T., Abd El Meguid, E. & Baltruschat, H. (1998). On the influence of tin and bismuth UPD on Pt(111) and Pt(332) on the oxidation of CO. *Electrochimica Acta*, (44), 1379-1388.
- Mc Breen, J. & Mukerjee, S. (1995). In Situ X-Ray Absorption Studies of a Pt-Ru Electrocatalyst. *Journal of the Electrochemical Society*, (142), 3399 -3404.
- Reddington, E., Sapienza, A., Gurau, B., Viswanathan, R., Sarangapani, S., Smotkin, E. & Mallouk, T. (1998). Combinatorial Electrochemistry: A Highly Parallel, Optical Screening Method for Discovery of Better Electrocatalysts. *Science*, (280), 1735 -1737.
- Rodríguez-Yáñez, J. (2012) Características de los Deposición Espontanea de Sn en Pt policristalino, Portugalieae *Electrochimica Acta*, 30 (2): 111-120.
- Sobkowski, J., Franaszczuk, K. & Piasecki, A. (1985). Influence of tin on the oxidation of methanol on a platinum electrode. *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, (196), 145-156.
- Solis, V., Iwasita, T., Pavese, A. & Vielstich, W. (1988). Investigation of formic acid oxidation on palladium in acidic solutions by on-line mass spectroscopy. *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, (255), 155-162.
- Spinacé, E., Neto, A. & Linardi, M. (2004). Electro-oxidation of methanol and ethanol using PtRu/C electrocatalysts prepared by spontaneous deposition of platinum on carbon-supported ruthenium nanoparticles. *Journal of Power Sources*, (129), 121-126.
- Stalnionis, G., Tamašauskaitė-Tamašiūnaitė, Pautienienė, Sudavičius, A. & Jusys, Z. (2004a). Modification of a Pt surface by spontaneous Sn deposition for electrocatalytic applications. *Journal of Solid State Electrochemistry*, (8), 892-899.
- Stalnionis, G., Tamašauskaitė-Tamašiūnaitė, Pautienienė, Sudavičius, A. & Jusys, Z. (2004b). Modification of a Pt surface by spontaneous Sn deposition for electrocatalytic applications. 2. Oxidation of CO, formaldehyde, formic acid, and methanol. *Journal of Solid State Electrochemistry*, (8), 900-907.
- Szabo, S. (1984). Investigation of tin adsorption on a platinized platinum electrode in hydrochloric acid media. *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, (172), 359-366.
- Waszczuk, P., Barnard, T., Rice, C., Masel, R. & Wieckowski, A. (2002). A nanoparticle catalyst with superior activity for electrooxidation of formic acid. *Electrochemistry Communications*, (4), 599-603.
- Watanabe, M. & Motoo, S. (1975). Electrocatalysis by ad-atoms: Part II. Enhancement of the oxidation of methanol on platinum by ruthenium ad-atoms. *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, (60), 267-273.
- Xia, X. (1999). New insights into the influence of upd Sn on the oxidation of formic acid on platinum in acidic solution. *Electrochimica Acta*, (45), 1057-1066.
- Zinola, F., Rodriguez, J., & Obal, G. (2001). Kinetics of molecular oxygen electroreduction on platinum modified by tin underpotential deposition. *Journal of Applied Electrochemistry*, (31), 1293-1300.

Oferta y demanda de estudios de equivalencia terapéutica (*in vitro* e *in vivo*) de medicamentos en Costa Rica

Offer and demand of therapeutic equivalence studies (*in vitro* and *in vivo*) for medicines in Costa Rica

Zacarías Pereira-Vega¹

Fecha de recepción: 27 de mayo del 2015

Fecha de aprobación: 18 de setiembre del 2015

Pereira-Vega, Z. Oferta y demanda de estudios de equivalencia terapéutica (*in vitro* e *in vivo*) de medicamentos en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 29, Nº 1, Enero-Marzo. Pág 18-27.

¹ Docente, Facultad de Farmacia Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: zacarias.pereira@gmail.com

Palabras clave

Laboratorio fabricante de medicamentos; estudios de equivalencia terapéutica de medicamentos; intercambiabilidad; medicamento genérico; medicamento innovador; bioexención; medicamento de riesgo sanitario.

Resumen

El continuo incremento del gasto en medicamentos a nivel mundial, íntimamente asociado al crecimiento poblacional y al aumento de la esperanza de vida de las personas, ha llevado en las últimas décadas a los gobiernos a buscar alternativas que contribuyan a reducir el impacto de este rubro en los presupuestos. Una alternativa es el uso de medicamentos genéricos, que son más baratos que los innovadores. Sin embargo, antes de ser registrado, el producto genérico debe demostrar su equivalencia terapéutica mediante ensayos *in vitro* y/o *in vivo* contra un medicamento de referencia, con el propósito de garantizar su calidad, seguridad y eficacia y, como consecuencia de ello, su intercambiabilidad.

Mediante una encuesta *online* realizada en Costa Rica durante los meses de marzo y abril de 2013, se determinó que existía una demanda de 85 medicamentos fabricados en el país, que para ser registrados a nivel nacional requerían de la misma cantidad de estudios de equivalencia terapéutica, de los cuales 47 correspondían a ensayos *in vitro* y 38 a ensayos *in vivo*. Esta demanda provenía principalmente de cuatro laboratorios que fabrican medicamentos en Costa Rica, y aumenta si se consideran los medicamentos exportados. En cuanto a la oferta nacional de estos servicios (ensayos *in vitro* e *in vivo*) por parte de laboratorios ajenos a la casa fabricante, se sabe que es muy limitada, ya que solo había dos que los ofertaban y su labor se circunscribe, por ahora, a los ensayos *in vitro*.

Keywords

Medicine manufacturing laboratory; therapeutic equivalence study for medicines; interchangeability; generic; originator; biowaiver; sanitary risk medicine.

Abstract

In the last decades the constant increase of medicine expenses worldwide, as well as the population growth and the increase of life expectancy, has led governments to look for alternatives to help reduce the impact of this matter in their budgets. Generic medicines are one option because they are cheaper than originator medicines. Nevertheless, the generic medicine must prove its therapeutic equivalence, before its registration, by undergoing *in vitro* and/or *in vivo* essays compared to a reference medicine to guarantee its quality, safety and efficacy; and, thus, its interchangeability.

An on line survey executed in March and April, 2013, helped determine there was a demand for 85 medicines produced in Costa Rica that, to be registered in the country, required the same amount of therapeutic equivalence studies; 47 required *in vitro* essays and 38 required *in vivo* essays. This demand came mainly from four laboratories that produce medicines in the country; it increases if exported medicines are included. Regarding the national offer of these services (*in vitro* and *in vivo* essays) from laboratories that do not belong to the producer, it is well known that this is very limited, since there were only two laboratories offering the service, and their work is limited, for now, to *in vitro* essays.

Introducción

El consumo de medicamentos a escala mundial aumenta año con año y va de la mano con el aumento de la población y la esperanza de vida de las personas. Este asunto en alguna medida representa una verdadera preocupación para los sistemas de seguridad social y las autoridades sanitarias, ya que el gasto en medicamentos es significativo y crece aceleradamente (IMS Institute, 2011). Al menos en Costa Rica, el gasto en medicamentos realizado por la Caja Costarricense del Seguro Social (CCSS) –el mayor importador y consumidor de estos bienes en el país– en el año 2011 superó los 101,000 millones de colones (CCSS, 2012), lo que representaba, según el tipo de cambio oficial de entonces, un monto cercano a US\$198 millones. Los medicamentos son el recurso sanitario más empleado y uno de los productos más regulados por la administración pública de cada uno de los países del orbe. Todo esto lleva a una discusión de interés público sobre la elección entre los medicamentos innovadores y los genéricos. Estos últimos también se conocen en el mercado farmacéutico como medicamentos multiorigen o multifuente. Dado que el término *medicamento genérico* es el más conocido por quienes no son profesionales en Farmacia, este artículo se referirá a ellos de esta manera.

Los medicamentos innovadores son aquellos en los que un laboratorio farmacéutico ha invertido importantes recursos en investigación y desarrollo durante cierto período de tiempo, realizando estudios de síntesis química, estudios preclínicos, clínicos, galénicos y de biodisponibilidad, para efectos de documentar y, consecuentemente, garantizar su calidad, seguridad y eficacia (EFPIA, 2007). Para que un medicamento innovador pueda ser comercializado, debe pasar al menos, en promedio, un período de entre diez y veinte años desde su descubrimiento inicial. Se puede decir entonces que este tipo de medicamento es el primero que se comercializa y, además, cuenta con una patente a nivel mundial que le garantiza al laboratorio farmacéutico innovador su fabricación y comercialización monopolística durante cierto período de tiempo, que suele ser de 10 años, lo que le permite recuperar su inversión inicial. Es importante mencionar que el laboratorio farmacéutico innovador comercializa su producto con un nombre comercial propio, también conocido como nombre de marca.

En la legislación costarricense, la definición de medicamento genérico es similar a la dada por la Organización Mundial de la Salud (OMS), que lo define como “aquellas alternativas farmacéuticas que pueden o no ser equivalentes terapéuticos. Los equivalentes terapéuticos son intercambiables” (OPS, 2011a). Asimismo, se puede agregar que es todo aquel medicamento que se desarrolla a partir de un medicamento innovador y que contiene la misma composición cualitativa y cuantitativa en cuanto al principio o principios activos, en la misma cantidad o concentración, la misma forma farmacéutica, la misma dosis y las mismas características cinéticas, dinámicas y técnicas que las del producto innovador. Además, en algunos países, como España, Brasil y México, la legislación incorpora en esta definición la obligatoriedad de que el medicamento genérico demuestre su bioequivalencia con el medicamento de referencia mediante estudios adecuados de biodisponibilidad (Vacca et al., 2006), también conocidos como estudios de bioequivalencia. El medicamento de referencia que se señala en esta última definición se refiere, por lo general, al medicamento o producto innovador. Es importante destacar que el medicamento genérico empezará su comercialización hasta el vencimiento de la patente del medicamento innovador, no antes.

Una de las principales ventajas de los medicamentos genéricos sobre los innovadores es que son más baratos, tanto para el paciente como para los sistemas sanitarios (Dunne et al., 2013), ya que la inversión económica que hace el laboratorio farmacéutico que lo propone, para efectos de su desarrollo y comercialización, es significativamente menor que la realizada para los medicamentos innovadores. A este nivel, ya no es necesario demostrar la eficacia y la favorable relación beneficio-riesgo del producto, ni descubrir las indicaciones terapéuticas,

sus efectos secundarios, contraindicaciones, ni la pauta de administración (dosificación) más apropiada, ya que son aspectos que han sido demostrados previamente por el fabricante del producto innovador. Asimismo, desde el punto de vista de la información y promoción comercial del producto, el esfuerzo que se debe realizar es menor, ya que su principio activo es de sobra conocido. Otra ventaja que presentan los productos genéricos es que su nombre coincide con el del principio activo del medicamento innovador, lo que facilita su identificación por parte de los profesionales sanitarios. Además, como última ventaja se puede agregar que la aparición de los genéricos en el mercado afecta de manera positiva la oferta, y como consecuencia, se genera una reducción en los precios del medicamento innovador (Abad et al., 2008) y de los demás que contengan el mismo principio activo.

Por otro lado, la principal desventaja de los medicamentos genéricos con respecto a los innovadores es el riesgo de la mala adherencia al tratamiento, ya que con frecuencia el genérico presenta una forma y un color diferentes de los del medicamento innovador, lo que en alguna medida confunde al paciente, especialmente en el caso de ancianos y/o polimedicados que reciben tratamientos para enfermedades crónicas. Para solucionar este problema, algunos especialistas coinciden en que sería conveniente que el medicamento genérico conserve la forma y el color que posee el innovador, lo que se conoce como bioapariciencia del producto. Sin embargo, la mayoría de las veces esto no es posible, dado que muchas formas y colores de los medicamentos ya han sido patentadas.

Dada esta situación entre medicamentos genéricos e innovadores, desde hace algunos años en la gran mayoría de los países se ha abierto la discusión en torno a la conveniencia de la intercambiabilidad de los medicamentos, dado el menor costo que presentan los genéricos y, en consecuencia, el impacto positivo que producen en los presupuestos de salud pública de las naciones. Por otro lado, no se pueden pasar por alto los errores de falla terapéutica de medicamentos, provocados por medicamentos mal formulados o por el uso inadecuado de principios activos y excipientes. Es por tal razón que los genéricos deben ser medicamentos de calidad, seguridad y eficacia demostradas.

Para que un medicamento genérico sea intercambiable, tiene que demostrar su equivalencia terapéutica con un producto de referencia. Dependiendo de la ubicación del principio activo en el Sistema de Clasificación Biofarmacéutica (SCB), que está íntimamente relacionada con sus propiedades fisicoquímicas (solubilidad y permeabilidad a través de las membranas del tracto gastrointestinal), la equivalencia terapéutica se puede demostrar mediante estudios *in vitro* y/o *in vivo* (Moreno, 2011). Los estudios *in vitro* también se conocen como *perfiles de disolución comparativos*, mientras que los estudios *in vivo* se denominan *estudios de bioequivalencia*. Los estudios *in vitro* corresponden a curvas de disolución del principio activo en función del tiempo, que se realizan bajo condiciones de temperatura controlada (37 °C) y pH controlado (1,2, 4,5 y 6,8), así como otros requerimientos (FDA, 2010). Es importante aclarar que, por lo general, los estudios *in vitro* son complementarios, que por sí solos no garantizan que un medicamento sea equivalente terapéutico con un producto de referencia. Por otro lado, los estudios de bioequivalencia (estudios *in vivo*) se realizan mediante la implementación de ensayos clínicos comparativos en voluntarios sanos, que corresponden a estudios farmacocinéticos y/o farmacodinámicos (Niazi, 2007). Bajo esta perspectiva, cuando un medicamento genérico demuestra su equivalencia terapéutica con respecto al medicamento de referencia, el primero no exhibe diferencias significativas en la cantidad y velocidad de absorción del principio activo con respecto al segundo. Esto es lo que garantiza, a final de cuentas, la intercambiabilidad entre ambos productos.

La OMS recomienda a todos sus países miembros tender hacia la demostración de la equivalencia terapéutica de los medicamentos y la consecuente declaración de intercambiabilidad de los productos genéricos (OPS, 2011b). De la misma manera, la OMS también recomienda

establecer los criterios básicos para los estudios de equivalencia terapéutica de medicamentos (*in vitro* e *in vivo*), que son necesarios para asegurar la intercambiabilidad de los genéricos. Por otro lado, también se tienen que tener presente los criterios para las exenciones de los estudios *in vivo*, conocidos como bioexenciones o bioexcepciones. Estas bioexenciones se establecen considerando el SCB (OPS, 2011b), el cual divide o clasifica a los medicamentos en cuatro clases, según su grado de solubilidad y permeabilidad. De acuerdo con este sistema, que fue introducido en 1995, los medicamentos de la clase I presentan alta solubilidad y alta permeabilidad, los de la clase II son de baja solubilidad y alta permeabilidad, los de la clase III son de alta solubilidad y baja permeabilidad y los de la clase IV presentan baja solubilidad y baja permeabilidad (Saavedra et al., 2011; FIP, 2012). Las bioexenciones se dan principalmente con los medicamentos de la clase I (alta solubilidad y alta permeabilidad) que se liberen rápidamente (más del 85% en 30 minutos), aunque también se puede extender los criterios de bioexención a algunos de los medicamentos de la clase II (baja solubilidad y alta permeabilidad) y de la clase III (alta solubilidad y baja permeabilidad) que cumplan ciertas características en cuanto a la rapidez de disolución y la similitud de los perfiles de disolución comparativos (WHO, 2006). En los casos en que se cumplan los criterios de bioexención, el producto probará su equivalencia mediante estudios *in vitro*, siempre que no pesen sobre él las consideraciones de medicamento de riesgo sanitario alto (alta probabilidad de provocar eventos adversos en el paciente o incluso ocasionar la muerte) o que presente un margen terapéutico estrecho (dosis terapéutica muy cercana a la dosis tóxica, lo que puede provocar daño en el paciente e incluso la muerte).

Dado que los estudios de equivalencia terapéutica de medicamentos no son baratos, en especial los de bioequivalencia (*in vivo*), y, por lo tanto, podrían influir en su costo o precio final, en Costa Rica estos estudios se exigen solo a aquellos que presentan un riesgo sanitario alto o intermedio o bien un rango o margen terapéutico estrecho.

Es importante destacar que puede ser que dos presentaciones farmacéuticas que contengan el mismo principio activo, en la misma dosis y en la misma formulación, no sean bioequivalentes, y la causa puede deberse a diferencias en las materias primas (tanto de los principios activos como de los excipientes), o a diferencias en las distintas etapas de los procesos de formulación, transposición de escala y/o de fabricación a escala industrial. Estos aspectos, actuando solos o en conjunto, pueden alterar de manera significativa la velocidad de disolución y/o la absorción del principio activo a través de las membranas del tracto gastrointestinal.

Un principio básico fundamental que rige los estudios de bioequivalencia de medicamentos es el siguiente: “a igual biodisponibilidad (velocidad y cantidad de principio activo absorbido y que llega al tejido o área donde se produce su efecto), se obtienen efectos farmacológicos iguales” (Abad et al., 2008). De la misma manera, se entiende que existe bioequivalencia entre dos medicamentos (genérico y referencia) cuando presentan una biodisponibilidad similar en condiciones experimentales apropiadas. Por otro lado, existe un acuerdo internacional que dice que dos formulaciones (medicamento genérico y referencia) son bioequivalentes cuando la diferencia en lo concerniente a la velocidad de absorción y a la cantidad de principio activo absorbido, entre las respectivas a ambas formulaciones, son inferiores al 20% (Moreno et al., 2010).

En el presente artículo se discute sobre la realidad costarricense en torno a la oferta y demanda de estudios de equivalencia terapéutica de medicamentos, que son servicios esenciales para garantizar la calidad, seguridad y eficacia de los medicamentos genéricos producidos en el país.

Metodología

La información para este estudio se obtuvo a partir de una encuesta que se realizó a representantes de los laboratorios fabricantes radicados en Costa Rica, y que requieren de la realización de estudios de equivalencia terapéutica de medicamentos como un requisito para su registro sanitario. La encuesta se realizó vía *online* en el período comprendido entre los meses de marzo y abril de 2013, y se usó para estos propósitos el programa de *software* libre denominado LimeSurvey® versión 2.00.

Resultados y discusión

Demanda

La demanda de estudios de equivalencia terapéutica (*in vitro* e *in vivo*) de medicamentos en Costa Rica está relacionada con todo aquel laboratorio nacional (o radicado en el país) fabricante de medicamentos que requiere de este tipo de ensayos para efectos del registro sanitario de sus productos ante el Ministerio de Salud.

Con el fin de determinar la demanda real de estudios de equivalencia terapéutica de medicamentos por parte de los fabricantes en el país, se consultaron diez laboratorios mediante la encuesta, de los que solo contestaron cinco. De la información obtenida, cuatro laboratorios indicaron que sí requerían de estudios de equivalencia terapéutica y uno manifestó que no. A continuación, se dan a conocer los resultados de la encuesta, encaminada a determinar, primeramente, la demanda nacional de estos ensayos durante el período en que se realizó este estudio.

En el cuadro 1 se presentan los resultados al preguntar a los laboratorios sobre la cantidad de los medicamentos que ellos fabrican y que a su vez requieren de estudios *in vitro* e *in vivo*, según el país o región a la que son destinados o exportados.

Cuadro 1. Cantidad de medicamentos de los laboratorios fabricantes que requieren estudios *in vitro* e *in vivo* según la región a la que son exportados o destinados.

Región	Número total de productos (<i>in vitro</i>)	Número total de productos (<i>in vivo</i>)
Costa Rica	47	38
Resto de América Central	72	65
Suramérica	80	36
El Caribe	20	13
México	0	0
Estados Unidos y Canadá	0	0
Europa	0	0
Otros continentes	0	0
SUBTOTALES	219	152
TOTAL	371	
PORCENTAJE	59,0	41,0

Fuente: Datos obtenidos a partir de la encuesta.

En el cuadro 2 se señalan diez principios activos –que se nombran según su Denominación Común Internacional (DCI)– como ejemplos de medicamentos correspondientes a formas farmacéuticas orales sólidas, que pertenecen a una lista de más de cuarenta principios activos para los que Costa Rica exige estos estudios como requisito para su registro sanitario ante el Ministerio de Salud.

Cuadro 2. Lista de diez medicamentos para los que Costa Rica exige estudios de equivalencia terapéutica para su registro sanitario.

Principio activo (DCI) y fuerza	Categoría terapéutica	Forma farmacéutica	Tipo de ensayo
Carbamazepina 200 mg	Antiepiléptico	Tabletas	<i>In vivo</i>
Digoxina 0,25 mg	Cardiotónico, antiarrítmico	Tabletas	<i>In vivo</i>
Lamivudina 150 mg	Antiviral	Tabletas	<i>In vitro</i>
Efavirenz 200 mg	Antiviral	Cápsulas	<i>In vivo</i>
Warfarina sódica 1 mg y 5 mg	Anticoagulante	Tabletas	<i>In vivo</i>
Amiodarona 200 mg	Antiarrítmico	Tabletas	<i>In vivo</i>
Carvedilol 6,25 mg	Antihipertensivo	Tabletas	<i>In vivo</i>
Fluoxetina 20 mg	Antidepresivo	Tabletas	<i>In vivo</i>
Atenolol 50 mg y 100 mg	Antihipertensivo	Tabletas	<i>In vitro</i>
Clozapina 100 mg	Antipsicótico	Tabletas	<i>In vivo</i>

Fuente: Datos obtenidos a partir de FIP, 2012 y WHO, 2006.

En el cuadro 3 se presentan los resultados de la pregunta sobre la capacidad del laboratorio fabricante –en cuanto a personal técnico e instrumental– para realizar estudios *in vitro* e *in vivo* de los medicamentos que producen.

Cuadro 3. Capacidad del laboratorio fabricante para realizar estudios *in vitro* e *in vivo*.

Tipo de estudio	Sí	No
<i>In vitro</i>	4	0
<i>In vivo</i>	2	2

Fuente: Datos obtenidos a partir de la encuesta.

En el Cuadro 4 se presentan los resultados de la pregunta sobre quién realiza los estudios *in vitro* e *in vivo* de los medicamentos que sus laboratorios fabrican.

Cuadro 4. ¿Quién realiza los estudios *in vitro* e *in vivo*?

Tipo de estudio	El propio laboratorio	Se contrata una empresa	Ambas (el propio laboratorio y empresa contratada)
<i>In vitro</i>	2	0	2
<i>In vivo</i>	0	3	1

Fuente: Datos obtenidos a partir de la encuesta.

De la información contenida en el cuadro 1 se puede afirmar que los cuatro laboratorios fabricantes de medicamentos que contestaron completamente la encuesta requieren de los estudios de equivalencia terapéutica, no solo para efectos de su registro sanitario en Costa Rica sino para aquellos que exportan a otros países, dado que también se les exige este tipo de ensayos. Asimismo, los principales mercados a los que están dirigidos estos medicamentos son América Central, El Caribe y Suramérica. Por otro lado, los laboratorios consultados manifestaron en ese momento que había un universo de 371 productos que requerían de estudios de equivalencia terapéutica, de los cuales 219 corresponden a estudios *in vitro* y 152 a estudios *in vivo*. En este aspecto, es importante aclarar que estas cifras pueden ser nominales, ya que uno o varios medicamentos de un mismo fabricante coinciden en su necesidad de estos estudios en varios países. Sin embargo, del mismo cuadro se puede extraer la demanda real de estudios de equivalencia terapéutica de medicamentos en Costa Rica durante el período mencionado, que asciende a un total de 85, de los cuales 47 corresponden a estudios *in vitro* y los 38 restantes a estudios *in vivo*.

En el cuadro 3 se evidencia que los cuatro fabricantes dicen tener la capacidad para realizar perfiles de disolución comparativos (estudios *in vitro*) y la mitad de ellos, o sea dos, afirman lo mismo en cuanto a los estudios de bioequivalencia (estudios *in vivo*).

Con respecto a la información del cuadro 4, para los estudios *in vitro*, dos laboratorios manifiestan realizar sus propios estudios, mientras que los otros dos indican hacerlos ellos mismos o contratar una empresa (laboratorio de ensayo) externa. Para los estudios *in vivo*, tres laboratorios indican que contratan una empresa (laboratorio de ensayo) y el otro manifiesta esta opción o poder realizarlos ellos mismos. Se entiende que esto se refiere a que se hace fuera del país, dado que la legislación no permitía entonces la realización de estos estudios en Costa Rica. Dada esta situación con los estudios *in vivo*, los fabricantes de medicamentos nacionales han recurrido a otros países para subsanar esta deficiencia en la legislación y que afecta o afectaba hasta hace muy poco tiempo la oferta de los laboratorios de ensayo costarricenses que brindan estos servicios. Algunos de estos países son México, Argentina, Colombia, España e India.

Oferta

A partir de la misma encuesta con los laboratorios en el país, también se pudo determinar que la oferta nacional para dar servicios de equivalencia terapéutica de medicamentos es muy limitada. Sin considerar a los fabricantes radicados en Costa Rica que hacen estudios de equivalencia terapéutica de sus propios medicamentos, solo existen dos empresas o laboratorios de ensayos que los brindan, que son LABIOFAR, perteneciente al INIFAR de la Facultad de Farmacia de

la Universidad de Costa Rica, y CETRATEC- α , un laboratorio de capital privado ubicado en el parque industrial de la provincia de Cartago. Asimismo, y debido principalmente al vacío legal ocasionado por la ausencia de una legislación que regule los estudios clínicos en Costa Rica, situación que empezó a subsanarse en abril de 2014 con la aprobación en segunda instancia de la Ley Reguladora de Investigación Biomédica, estos dos laboratorios solo han estado brindando los servicios para realizar perfiles de disolución comparativos (estudios *in vitro*).

Conclusiones

En Costa Rica existe una demanda de estudios de equivalencia terapéutica de medicamentos (estudios *in vitro* e *in vivo*) que requiere ser satisfecha con prontitud, con el fin de garantizar la calidad, seguridad y eficacia de aquellos que se producen en el país, y, como consecuencia de ello, garantizar su intercambiabilidad, manteniendo el bajo precio y la mayor accesibilidad que caracteriza a los medicamentos genéricos. Asimismo, también se pudo comprobar que la oferta nacional de laboratorios de ensayos que brindan estos servicios, independientes de los fabricantes de medicamentos, es muy limitada.

Por otro lado, en cuanto a la situación particular de los estudios de bioequivalencia (estudios *in vivo*), los laboratorios fabricantes de medicamentos han tenido que buscar alternativas fuera de Costa Rica para poder satisfacer las exigencias nacionales y del extranjero en cuanto al cumplimiento de requisitos para el registro sanitario de los medicamentos que producen.

Por último, como se pudo apreciar a partir de los datos de la encuesta, se observa una tendencia de los laboratorios fabricantes a realizar ellos mismos los estudios de equivalencia de los medicamentos que fabrican, principalmente en el caso de los estudios *in vitro*. Con respecto a los estudios *in vivo*, por el momento no se puede afirmar lo mismo, dado que hasta hace muy poco tiempo la legislación costarricense no permitía realizarlos en el país, si bien dos de estos laboratorios fabricantes dicen tener la capacidad para hacerlos. Este comportamiento, tendencia o aspiración de los laboratorios a realizar sus propios estudios de equivalencia podría explicarse inicialmente por los vacíos que persisten en la legislación nacional, o incluso por el hecho de que en Costa Rica la oferta de estos servicios es muy limitada, ausente y/o eventualmente costosa. Sin embargo, no deja de ser un asunto de particular interés para las autoridades sanitarias y los pacientes usuarios de medicamentos el hecho de que el propio laboratorio fabricante sea juez y parte en la decisión de la intercambiabilidad de los medicamentos que producen.

Agradecimientos

A la Dra. Rosaura Romero Chacón, Directora del Ciprona de la UCR; a la Dra. Lidiette Fonseca González, Decana de la Facultad de Farmacia de la UCR; a la MBA. Aída Rojas Rojas, profesora UCR; y al Dr. Jorge Pacheco Molina, profesor de la Facultad de Farmacia de la UCR.

Este artículo forma parte del tema de mi tesis –defendida en el 2014– para la obtención del grado de Máster en Química Industrial del Programa de Posgrado en Química de la Universidad de Costa Rica.

Bibliografía

Abad, F., Novalbos, J. & Ochoa, M. (2008). *Medicamentos genéricos y precios de referencia*. En P. Lorenzo, A. Moreno, I. Lizasoain, J. Leza, M. Moro y A. Portolés (Eds.), *Farmacología Básica y Clínica de Velázquez* (pp. 1305-1313). Madrid: Editorial Médica Panamericana.

- CCSS. (2012). *Programa Salud para Todos: Medicamentos*. Costa Rica. Obtenido de <http://www.youtube.com/watch?v=dBy34X0s-pE>
- Dunne, S., Shannon, B., Dunne, C. & Cullen, W. (2013). A review of the differences and similarities between generic drugs and their originator counterparts, including economics benefits associated with usage of generic medicines, using Ireland as a case study. *BMC Pharmacology & Toxicology*, 14(1), 1-19.
- EFPIA. (2007). *La iniciativa sobre medicamentos innovadores*. Bruselas. Obtenido de http://www.medicinesformankind.eu/upload/pdf/IMI_SP.pdf
- FDA. (2010). *Estudios de biodisponibilidad y equivalencia para productos farmacéuticos administrados oralmente. Consideraciones generales*. Obtenido de <http://www.fda.gov/Drugs/GuidanceComplianceRegulatoryInformation/Guidances/ucm201469.htm>
- FIP. (2012). *Biowaiver Monographs 2004-2012: Bringing essential medicines to those who need them most*. Obtenido de https://www.fip.org/centennial/files/static/press/FIP_centennialbook_biowaiver_webversion.pdf
- IMS Institute. (2011). *The Global Use of Medicine: Outlook Through 2015*. New Jersey. Obtenido de https://www.imshealth.com/ims/Global/Content/Insights/IMS%20Institute%20for%20Healthcare%20Informatics/Documents/The_Global_Use_of_Medicines_Report.pdf
- Moreno, G., Martín, M., López, A., López, E., Montes, E., González, C., Plasencia, M., Olmo, V. & Fernández, B. (2010). Genéricos y Bioequivalencia ¿Seguimos dudando? *Infarma Servicio Canario de la Salud*, 2(2), 1-2.
- Moreno, M. (2011). *Medicamentos genéricos. Requisitos para su comercialización*. En G. Hernández, A. Moreno, F. Zaragoza y A. Porras (Eds.), *Tratado de Medicina Farmacéutica* (pp. 539-542). Madrid: Editorial Médica Panamericana.
- Niazi, S. (2007). *Handbook of Bioequivalence Testing*. New York: Informa Healthcare.
- OPS. (2011a). *Guía para la implementación de estrategias de medicamentos genéricos en los países de América Latina y El Caribe como mecanismo para mejorar el acceso a medicamentos*. Washington D.C.: OPS. (Serie Técnica de Medicamentos Esenciales, Políticas Farmacéuticas, Documento N° 3). Obtenido de <http://apps.who.int/medicinedocs/documents/s19196es/s19196es.pdf>
- OPS. (2011b). *Marco para la ejecución de los requisitos de equivalencia para los productos farmacéuticos*. Washington D.C.: OPS (Serie RED PARF GT BE Documento Técnico N° 8). Obtenido de http://www.paho.org/hq/index.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=18848&Itemid=
- Saavedra, I., Iturriaga, V., Ávila, L. & Quiñones, L. (2011). Estudios de bioexención (*in vitro*) para establecer equivalencia de medicamentos. *Cuadernos Médicos Sociales*, 51(2), 66-79.
- Vacca, C., Fitzgerald, J. & Bermúdez, J. (2006). Definición de medicamento genérico ¿un fin o un medio? Análisis de la regulación en 14 países de la región de las Américas. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 20(5), 314-323.
- WHO. (2006). *Annex 8: Proposal to waive in vivo bioequivalence requirements for WHO Model List of Essential Medicines immediate-release, solid oral dosage forms*. OPS (Technical Report Series N° 8). Obtenido de http://apps.who.int/prequal/info_general/documents/TRS937/WHO_TRS_937__annex8_eng.pdf

Comparative study on the use of two substrates with microbial inoculants for organic solid waste domestic composting: Economic Analysis

Estudio comparativo del uso de dos sustratos con inóculos microbiales para el tratamiento de residuos orgánicos sólidos en compostaje doméstico.

Análisis Económico

Gina Paola Borrero-González¹, Dagoberto Arias-Aguilar²,
Rooel Campos-Rodríguez³, Fabián Pacheco-Rodríguez⁴

Fecha de recepción: 15 de junio del 2015
Fecha de aprobación: 3 de octubre del 2015

Borrero-González, G; Arias-Aguilar, D; Campos-Rodríguez, R; Pacheco-Rodríguez, F. Comparative study on the use of two substrates with microbial inoculants for organic solid waste domestic composting: Economic Analysis. *Tecnología en Marcha*. Vol. 29, N° 1, Enero-Marzo. Pág 28-37.

¹ M.Sc. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: gina.borrero@gmail.com.

² Ph.D. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: darias@tec.ac.cr.

³ Ph.D. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: rocampos@tec.ac.cr.

⁴ M.Sc. Centro Nacional Especializado en Agricultura Orgánica, Instituto Nacional de Aprendizaje (INA). Costa Rica. Correo electrónico: fpachecorodriguez@ina.ac.cr.

Palabras clave

Compost; compostaje doméstico; residuos sólidos orgánicos; sustratos microbiales; microorganismos de montaña; método Takakura.

Resumen

Se realizó un estudio para evaluar técnica y económicamente los efectos de dos sustratos microbiales en la degradación de residuos orgánicos domiciliarios (ROD) en un sistema de compostaje doméstico. Para tal fin se comparó el método del preparado microbial de microorganismos de montaña (MM), usado en el Centro Nacional Especializado en Agricultura Orgánica (CNEAO-INA) de Costa Rica y el método Takakura (TAKA), inoculación con microorganismos fermentativos, de la técnica Japonesa, desarrollada por el Instituto para las Estrategias Globales Ambientales (IGES) de Japón.

Se estableció un experimento completamente aleatorio con 20 unidades experimentales, distribuidas en dos tratamientos (MM y TAKA), sus respectivos testigos (MMT y TAKAT), un testigo absoluto (ABST) y 4 repeticiones para cada una. Se utilizaron los ROD de 20 hogares, distribuidos en 7 aportes durante 18 días.

Los resultados destacan la calidad del proceso de compostaje y la calidad del compost obtenido por medio del sustrato TAKA en comparación con el compost del sustrato MM.

Con respecto al análisis de costos, el sustrato MM es 7% menos costoso que el TAKA, estos costos no sobrepasan los USD17. Ambos tratamientos son bajo costo, comparados con el del actual manejo de residuos en rellenos sanitarios.

Keywords

Compost; home composting; organic solid waste; microbial substrates; mountain microorganisms; Takakura method.

Abstract

A study was conducted to technically and economically evaluate the effects of two substrates in the microbial decomposition of organic household waste (OHW) in a home composting system. With this aim, two different composting inoculates were compared amongst themselves: a microbial preparation of Mountain microorganism (MM), used in the National Centre Specialized on Organic Agriculture in Costa Rica and the Takakura method (TAKA), an inoculate with fermenting microorganisms which is a Japanese technique, developed by the Institute for Global Environmental Strategies (IGES) in Japan. A completely randomized experiment with 20 experimental units was established, divided into five treatments (MM, TAKA), witnesses (TAKAT and MMT) and an absolute control (ABST); each treatment had 4 replications. Organic Household waste (OHW) from 20 households were used, distributed in 7 inputs during 18 days. Results highlight the quality of compost obtained through TAKA substrate in comparison to compost obtained with MM substrate. Regarding the cost analysis, the MM substrate is 7% less expensive than TAKA, these costs do not exceed USD17. Both treatments are inexpensive compared to the current waste management landfills.

Introduction

Decentralized composting has become a strategy to optimize the management of household waste worldwide. In this context, the developed composting process has shown efficacy and a positive impact on the management of this waste organic fraction (Arrigoni 2011). Home composting is the application of the composting techniques for domestic organic waste, mainly from food preparation and maintenance of an orchard and / or garden. This composting uses simple techniques, mainly based on compost bins and using the action of living organisms on different residues (COGERSA 2009).

Any type of organic waste generated in the home kitchen can be composted even meat and bone waste (IGES 2010), however some authors suggest caution or avoid cooked waste such as fat, meat, bones, dairy and citrus (Good 2010 COGERSA 2009). The experiences found on organic waste management at the household level (Ali 2004, Arrigoni 2011, Huerta and Lopez 2010, IGES 2010, Lundie and Peters 2005, Pacheco 2009, Papadopoulos et al. 2009, Silbert et al. 2012, Zurbrügg et al 2004) indicate increased concern and involvement of citizens in environmental issues such as awareness of waste generated and its management, having the responsibility to compost it.

The implementation of home composting has positive impacts for the environment, particularly with regard to waste treatment, landfill management and emission of greenhouse gases related to transport. In a comparative study by Lundie and Peters (2005), the house composting opposite to industrial composting and disposal in landfill sites were discussed, concluding that home composting has certain environmental benefits associated with the consumption of energy and water, to reduce potential toxicity, eutrophication and emission of greenhouse gases.

There are also studies that indicate the level of positive response from neighbors in the implementation of home composting as a daily routine. Likewise, there is evidence to suggest that the quality of compost obtained at home, once the public overcome operational difficulties can reach an acceptable agronomic quality (Papadopoulos et al. 2009).

Small-scale compost from the waste itself, is responsible a behavior for the treatment of waste and towards the environment. Home composting can be a good alternative, also at the municipal level and generate significant cost savings, energy and emissions of greenhouse gases (Huerta and Lopez 2010). There are experiences of home composting in countries like Spain, the Netherlands, Canada, Sweden, Austria, Belgium, Indonesia, United States and England (Silbert et al. 2012). In the EU countries implementing composting techniques with better results are Belgium, Denmark, Germany, Spain, France, Italy and the Netherlands; in which the percentage of urban waste treated by this technique ranges from 13 to 28%. While the average for Europe is 13%, for China is 20%, 5% for India and the United States reached 8.4% (Morano and Moral 2008). These figures reflect the outcome of environmental policies that prioritize the allocation of financial resources to the management of solid waste, allowing developing environmental technologies and services for the management of waste (Medina Ross et al. 2001, cited by Arrigoni 2011).

In some specific cases in localities of Argentina, land use plans have been implemented, considering the practice of home composting as an alternative for cost reduction in waste collection tasks and how to preserve the environment (Silbert et al. 2012). As a successful experience the city of Surabaya, Indonesia, has reduced more than 23% of waste by means of a Community program for decentralized composting with the Takakura consequently this experience has been adopted in many cities in Indonesia, Thailand, Philippines, Malaysia and Nepal (IGES 2010). The objective of this study is to assess the technical and economic feasibility of using microbial substrates MM and Takakura, and its effects on the degradation of organic

solid waste in home composting systems, by comparing the costs of composting organic waste at the household level with such substrates.

Methodological framework

Site and Laboratories

The field phase where the experimental units were established was held in the grounds of CNEAO-INA, located in Chinchilla of Cartago, Costa Rica in collaboration with teachers and students of organic agriculture and organic fertilizers from that institution. Laboratory tests related to microbiological aspects of compost samples from these experimental units were performed in the Laboratory of Agricultural Microbiology, of the Agricultural Research Center, University of Costa Rica (LMA-CIA-UCR), with the guidance and support by Dr. Lidieth Uribe and laboratory personnel. Analyzes related to chemical aspects was conducted by the Laboratory of Soil and Foliar, Agricultural Research Center, University of Costa Rica (LSF-CIA-UCR).

Experimental design

The experimental design established for the study was completely randomized with five treatments (MM, MMT, TAKA, Takat, ABST) and four replicates for each treatment. For a total of 20 experimental units, described below. The experimental unit consisted of one plastic container with holes, which allows air to easily pass from all directions (to ensure aerobic process); with a capacity of 0,035 m³, where the composting of organic waste from household origin was performed, with corresponding treatments

Methods compared for organic waste composting are the inoculated substrate Mountain Microorganism (MM), Takakura inoculated substrate (TAKA) MM treatments substrates without inoculation of microorganisms (MMT) and Takakura substrates without inoculation microorganisms (Takat) in addition to an absolute witness, whose residues were not using any type of substrate or microbial inoculation (table 1).

Table 1. Treatments under study.

Treatment	Description
MM	Organic waste with MM substrate inoculated with mountain microorganisms
MMT (Testigo)	Uninoculated MM waste substrate microorganisms, nor fermentation
TAKA	Residues with Takakura inoculation substrate with inoculated fermentative microorganisms substances.
TAKAT (Testigo)	Takakura Waste substrate with uninoculated microorganisms, nor fermentation.
ABST (absolute control)	Waste without substrates MM or Takakura, nor inoculation of microorganisms.

The production of MM inoculum is based on the collection of substrates that are being degraded by microorganisms in wild ecosystems (forest litter or mulch) to later place them in a particular environment that provides a high and diverse nutritional quality for multiplication and subsequent use as inoculum. These substrates are prepared to accommodate microorganisms having

different ecological niches where they can settle and multiply in an accelerated manner the colony forming units (CFU) of the multiple species of saprophytic collected microorganisms (Pacheco 2009). The Takakura method is a technique for converting organic household waste into organic fertilizer, developed by Mr. Koji Takakura, Researcher, IGES in Indonesia; where waste is subjected to the composting microorganisms culture media adapted to the soil, available in the natural environment. This technique involves using fermenting microorganisms that can be obtained locally, such as fruit peels, fermented food, rice bran, rice hulls, manure, among other ordinary composting organic waste (IGES 2010).

Cost Analysis of compost family units (UCF) substrate MM and TAKA

For costs comparison of treatments used, the items related to the production of MM and TAKA substrates and their application to domestic scale were defined, considering items of development and operation, such as:

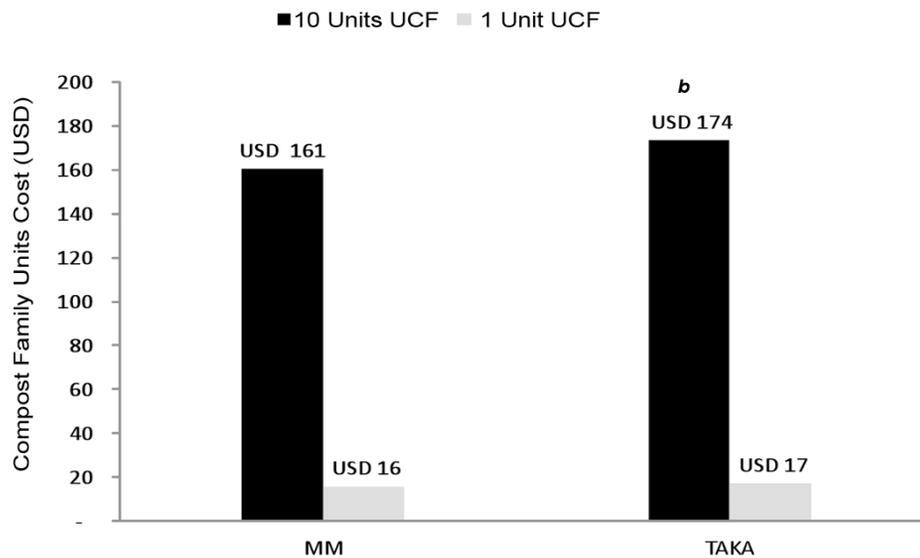
- Ingredients to produce 50 kg of each native microorganisms substrates, based on the established procedure for the production of the respective substrates. With 50 kg of either substrate a total of 10 family composting units (UCF).
- Tools used in producing containers substrates. This item qualifies as investment, since is only acquired once; however these recipients may already exist in homes.
- Labor to produce 50 kg of each substrate.
- Plastic container (compost bins) for the substrates and disposal of waste for composting. plastic boxes were budgeted for the agricultural study. However this may vary, since any container can be used that allows air flow therein.

All costs were recorded in a excel spreadsheet, where the total cost for the production of 10 UCF, in colones and US dollars was recorded (CRC exchange rate of 561.58, published by the Central Bank of Costa determined Rica 07-05-2014), as well as the percentage of the cost of each item in the total cost calculation. Likewise, the cost per capita for a UCF and the cost of the unit, with reference to three people per household were calculated. On the other hand the cost for treating a ton of organic waste with treatment MM and TAKA was calculated in order to compare these costs with the average cost of disposal of municipal solid waste in landfills which is \$ 40/ton according Soto (2013).

Results and discussion

Breakdown of costs per treatment

The breakdown of costs presented in table 2 and table 3 lists the items to produce 50 kg of substrate MM and TAKA respectively, which are necessary to establish 10 units of family composting (UCF). The main items are divided into substrates' ingredients, transport, tools, labor and containers for composting organic household waste. These major categories apply to both treatments, however detail varies according to the ingredients and the reproduction process according to the respective native microorganisms treatment, as explained below. The production of 10 UCF with MM substrate, has a total cost of CRC 90,210 (USD 161), whereby a UCF MM would cost a family the amount of CRC 9,021 (USD 16), on average CRC 3,007 (USD 5.35) per capita. On the other hand, the production of 10 UCF with TAKA substrate, has a total cost of CRC 97,470 (USD 174), whereby a UCF TAKA would cost a family the amount of CRC 9,747 (USD 17), on average CRC 3,294 (USD 5.79) per capita (Figure 1). Therefore, comparing the costs of both treatments, the UCF with MM has a cost of 7% lower than the UCF with TAKA.



* Values with common letters are not significantly different at a confidence level of 0.05.

Figure 1. Summary of costs for production and one 10 UCF UCF with each treatment.

As shown in tables 2 and 3, some similarities are present in the use of ingredients for the production of the MM and TAKA substrates, such as rice husks and semolina. However the amount of semolina used in the treatment TAKA is 4 times more than that used in treating MM, and corresponds to 9% of the cost of treatment TAKA while that ingredient in treating MM represents less than 2%.

As regards the tools used for producing substrates, such as shovel, water pot, shower and bucket, are used in both treatments; the differences in the large category regard the MM treatment in which for its production a sealed barrel is required increasing the tool cost; and in the case of TAKA is the use of plastic containers (for the preparation of the fermentative solutions) which decreases such cost. Another difference is in the workforce, since to produce 50 kg of MM substrate 4 hours less are required to produce the same amount of TAKA.

The cost of plastic boxes used as compost bins and transportation of materials is the same in both cases. All items required for the substrate production in both treatments, are the tools and plastic boxes; which represent a one-time investment, therefore, for future production of the substrate MM or TAKA, the cost is reduced to ingredients, transportation and labor force which is a 39% and 58% respectively of the initial costs. The production of both treatments collectively, can be an option that can reduce some costs, in a community, neighborhood or group of neighbors, where the cost of tools and labor, by the contribution of the participants themselves, or share those of those costs can be avoided, being a unique investment, as the more families the less costs.

As for the relative costs for production of UCF with MM treatment, 36% corresponds to tools especially due to the use of the airtight barrel of 200 l (CRC 20,000) representing 22% of the total cost. Use of this barrel is recommended for production of 50 kg of substrate, as this is its maximum capacity; if production is less than 50 kg is recommended to seek cheaper options, considering that the aspect to be taken into this container is to have a tight lid to ensure anaerobic conditions required for the production of MM.

Table 2. Breakdown of costs for the production of 10 units of family composting (UCF) with MM substrate.

Item	Amount	Unit	Unit cost (CRC)	Total cost (CRC)	Total cost (USD) ⁵
Ingredients of MM substrate					
Rice semolina	10	kg	220	2.200	3,92
Ground coal	10	kg	300	3.000	5,34
Rice husks	10	kg	100	1.000	1,78
Sawdust	10	kg	100	1.000	1,78
Molasses	2	kg	500	1.000	1,78
Forest mulch	10	kg	200	2.000	3,56
Water	22	l	5	110	0,20
Tools					
Plastic barrel 200 l	1	unit	20.000	20.000	35,61
Plastic bucket	1	unit	2.000	2.000	3,56
Sprinkler	1	unit	5.000	5.000	8,90
Shovel	1	unit	5.500	5.500	8,90
Agricultural plastic box	10	unit	2.240	22.400	39,89
Transport of materials	1	unit	10.000	10.000	17,81
Labor	6	ud	2.500	15.000	26,71
			Total cost	90.210	178,44
			Cost/UCF	9.021	16
			Per capita cost	3.007	5,35

Table 3. Breakdown of costs for the production of 10 units of family composting (UCF) using TAKA substrate

Item	Amount	Unit	Unit cost (CRC)	Total cost (CRC)	Total cost (USD) ⁶
Ingredients of TAKA substrate					
Soluciones fermentativas	20	l	569	11.380	20,25
Rice semolina	40	kg	220	8.800	15,67
Rice husks	10	kg	100	1.000	1,78
Forest mulch	2	kg	200	400	0,71
Tools					
Plastic bucket	1	unit	2.000	2.000	3,56
Sprinkler	1	unit	5.000	5.000	8,90
Shovel	1	unit	5.500	5.500	9,79
Plastic boxes	2	unit	3.000	6.000	10,68
Agricultural plastic box	10	unit	2.240	22.400	39,89
Transport of materials	1	unit	10.000	10.000	17,81
Labor	10	horas	2.500	25.000	44,52
			Total cost	97.470	173,56
			Cost/UCF	9.747	17,36
			Per capita cost	3.249	5,79

5 Exchange rate by the Banco Central de Costa Rica, 07-May-2014, CRC 561,58.

6 Exchange rate by the Banco Central de Costa Rica, 07-May-2014, CRC 561,58.

Plastic boxes are the second highest cost which corresponds to 25% of total investment, however this item is not really exclusive to the production process of the substrate MM, but for UCF establishment. Labor is the following cost category corresponding to 17% of total production costs for MM substrate. The ingredients to produce and transport MM correspond to the lowest percentages of all items, 11% each item.

Potential economic impact using UCF MM and TAKA

Despite differences between MM and TAKA treatments' costs, these are low when you consider that either of these two treatments with a UCF can take care about management of an organic fraction of generated that would end up as municipal solid waste from each of the households in the country, averaging 401.5 kg correspond to organic waste per year per household, according to estimates by the PEN (2013) figures. A UCF of MM or TAKA, is capable of efficient and harmless compost 548 kg of organic waste per year, a little more than is generated in a house on average. With a single initial investment of US \$ 16 (MM) to US \$ 17 (TAKA) per household in the first year and \$ 6 (MM) to \$ 10 (TAKA) the following years, a corresponding production of 5 kg of substrate to inoculate again one UCF every 6 months.

According to Soto (2013), the cost for disposal of municipal solid waste in a landfill is an average of \$ 40 / ton. If disposal costs are considered to represent 30% of the total cost of waste management (Soto 2006), the total cost for the management of municipal solid waste is US \$133/ ton. Extrapolating the cost of MM and TAKA treatments for the management of one ton of organic waste, the first year to handle a ton with UCF MM would amount to US \$ 29 and with UCF TAKA a cost of US \$ 31; for subsequent years this cost would be US \$ 11 and US \$ 18 with MM and TAKA treatments respectively, as shown in Figure 2; reducing significantly costs for managing organic waste from 77 to 89% on average for both treatments, when compared to the current cost of handling a ton of municipal solid waste in landfills, without considering the environmental and social costs, which are generated with current waste management.

Another aspect to be highlighted as a potential economic impact, is the recovery of organic waste by converting them into high quality compost, in this regard the cost of producing 1 kg of organic fertilizer for the first year is 59 CRC/kg with MM and 89 CRC / kg with TAKA. For the second and subsequent years the cost of production of organic fertilizer at the household level would be reduced to 23 CRC / kg with MM and 52 CRC / kg with TAKA (Figure 49). Comparing these costs with those of organic fertilizer production from residues of a coffee mill and a sugar mill which belongs to CoopeAgri Cooperative (which is approximately CRC 22/kg of fertilizer), it can be seen that the production of organic fertilizer with MM the second year has a cost 6% more than it has CoopeAgri with TAKA treatment.

However, when comparing the costs of production of fertilizer treatments with the selling price of this product by the company "Abonos del Occidente" whose selling price is 160 CRC/kg of fertilizer (Figure 3), it can be said that families engaged in home composting with MM or TAKA, could earn an income from the sale of compost generated annually between CRC 17,520 to CRC 24,528 respectively, with profits in the first year of 63% with MM and 45% with TAKA and from the second year the profits from the sale of compost would be 86% with MM and 68% with TAKA. With the above economic viability if families do not use it, the sale of compost becomes an income option. However, this requires an organization at community level or family to provide quantities of compost with a feasible management as marketing and registration is required to sell such products.

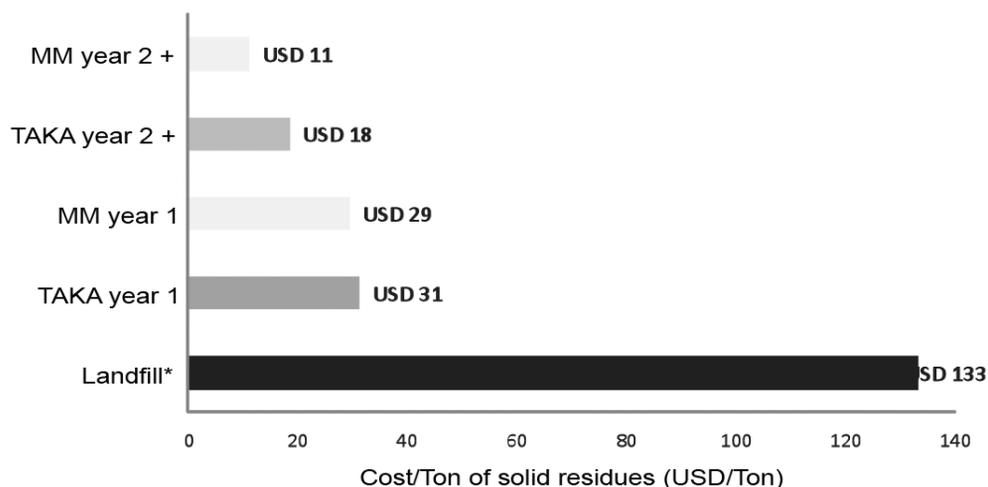


Figure 2. Cost (USD/ ton) estimated for the management of organic solid waste with every UCF MM, TAKA and landfill. (source: Soto 2013)

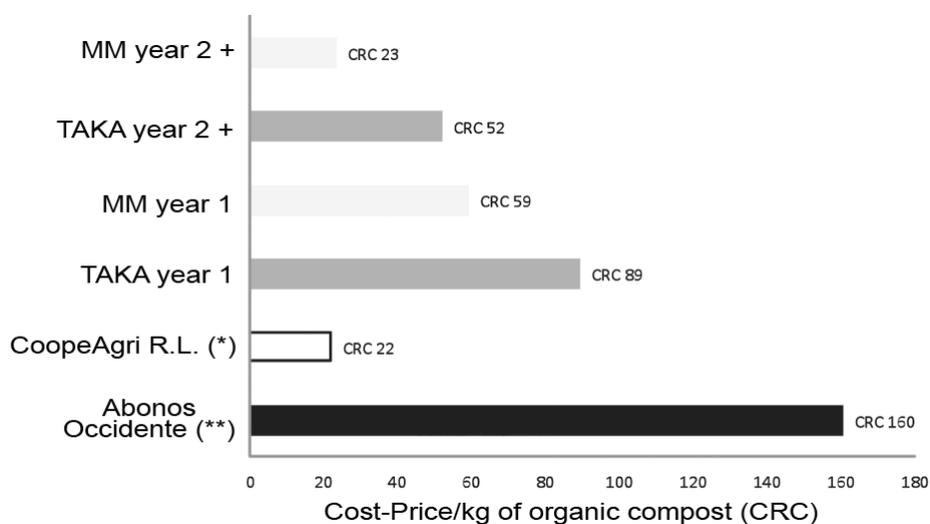


Figure 3. Cost-price comparison for organic fertilizer production between treatments and commercial fertilizers.

References

- Ali, M. 2004. Sustainable composting. Case studies and guidelines for developing countries. Water, Engineering and Development Centre. Suiza. (en línea). Consultado 15 feb. 2014. Disponible en http://www.eawag.ch/forschung/sandec/publikationen/swm/index_EN.
- Arrigoni, JP. 2011. Evaluación del desempeño de diferentes prototipos de compostadores en el tratamiento de residuos orgánicos. Tesis M.Sc. en intervención ambiental. Facultad de ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue. Neuquén, AR. 126 p.
- Bueno, M. 2010. Cómo hacer un buen compost. Manual para horticultores ecológicos. 5 ed. Navarra. ES. La fertilidad de la tierra ediciones. 170 p.
- COGERSA (Consortio para la Gestión de los Residuos Sólidos de Asturias, ES). 2009. Guía de compostaje doméstico. España. 20 p.

- Huerta, H; López, M. 2010. Guía del usuario: el compostaje casero. Escuela superior de agricultura de Barcelona. SP. Diputación de Barcelona, área de medio ambiente. España. 27 p.
- IGES (Instituto de Estrategias Ambientales Globales, JP). 2010. Compostaje para la reducción de residuos. Japón. 27 p.
- Lundie, S., Peters, G.M. 2005. Life cycle assessment of food waste management options. *Journal of Cleaner Production* 13: 275-286. (en línea). Consultado 17 ene. 2014. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652604000952>.
- Pacheco, F. 2009. Evaluación de la eficacia de la aplicación de inóculos microbiales y de *eissenia fetida* en el proceso de compostaje doméstico de desechos urbanos. Tesis M.Sc. Navarra, ES. Universidad Pública de Navarra. 89 p.
- Papadopoulos, A; Stylianou, M; Michalopoulos, C; Moustakas, K; Hapeshis, K; Vogiatzidaki, E; Loizidou, M. 2009. Performance of a new household composter during in-home testing. *Journal of Waste Management* 29: 204-213. (en línea). Consultado 17 ene. 2014. Disponible en <http://www.uest.gr/paper1.pdf>.
- PEN (Programa Estado de la Nación, CR). 2013. Decimonoveno Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. San José, Programa Estado de la Nación. (en línea). Consultado 23 feb. 2014. Disponible en <http://www.estadonacion.or.cr/estado-nacion/informe-actual>.
- Silbert, V; Suarez, M; Garrido, G; Benitez, A; Pettigiani, E. 2012. Evaluación del compostaje domiciliario como modelo de gestión de los residuos orgánicos. Caso Piloto en comuna de la provincia de Córdoba. Universidad Tecnológica Nacional de Argentina. Jornadas GIRSU. (en línea). consultado el 10 sep 2013. Disponible en <http://www.inti.gob.ar/jornadasgirsu2012/pdf/libro.pdf>.
- Soto, S. 2013. Informe a dos años de la Ley GIR. Decimonoveno informe estado de la nación en desarrollo humano sostenible (en línea). Consultado 23 feb. 2014. Disponible en http://www.estadonacion.or.cr/files/biblioteca_virtual/019/soto_2013.pdf.
- Zurbrügg, C; Drescher, S; Patel, A; Sharatchandra, H. 2004. Decentralised composting of urban waste an overview of community and private initiatives in Indian cities. *Waste Management* 24: 655-662. (en línea). Consultado 4 ag. 2013. Disponible en http://www.eawag.ch/forschung/sandec/publikationen/swm/dl/Zurbruegg_2004_Overview.pdf.

Desempeño de turbinas eólicas Magnus de eje horizontal en función de sus variables geométricas y cinemáticas

Horizontal axis Magnus wind turbine performance according to their geometric and kinematic variables

Gustavo Richmond-Navarro¹

Fecha de recepción: 29 de mayo del 2015
Fecha de aprobación: 7 de setiembre del 2015

Richmond-Navarro, G. Desempeño de turbinas eólicas Magnus de eje horizontal en función de sus variables geométricas y cinemáticas. *Tecnología en Marcha*. Vol. 29, N° 1, Enero-Marzo. Pág 38-50.

¹ Máster en Ciencias de la Ingeniería Mecánica, profesor del ITCR, Escuela de Ingeniería Electromecánica. Correo electrónico: grichmond@itcr.ac.cr. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Electromecánica. Costa Rica.

Palabras clave

Turbina eólica Magnus; efecto Magnus; desempeño; método numérico.

Resumen

Este estudio presenta el análisis de una turbina eólica de eje horizontal que utiliza cilindros en rotación, en lugar de aspas con perfiles alares. El principio de funcionamiento de este generador eólico es el efecto Magnus, que sucede cuando las aspas cilíndricas empiezan a rotar y se da una interacción entre la corriente de viento incidente y el aire que es arrastrado por las paredes de los cilindros en movimiento. De esta forma, se obtiene la sustentación que pone en movimiento la turbina.

El objetivo de la investigación es caracterizar este tipo de turbina mediante modelos numéricos y matemáticos, que permitan determinar el comportamiento de la curva de potencia en función del viento ante variaciones de los parámetros de funcionamiento de la turbina tipo Magnus de eje horizontal, a saber, la geometría del cilindro y las velocidades de rotación tanto de la turbina como del cilindro.

Para estudiar el desempeño de la turbina, se propone un método numérico no iterativo, que es implementado en un código que permite predecir el rendimiento de turbinas de eje horizontal, el cual es validado con mediciones experimentales de turbinas convencionales.

Posteriormente, se adecúa el código para aplicarlo a turbinas Magnus y con ello se obtiene el comportamiento de la curva de potencia ante variaciones en la geometría y cantidad de cilindros, así como las velocidades angulares de la turbina y del aspa cilíndrica.

Keywords

Magnus wind turbine; Magnus effect; performance; numerical method.

Abstract

This study covers the analysis of a horizontal axis wind turbine that uses rotating cylinders instead of blades. The working principle of this wind generator is the Magnus effect, which happens when the cylinders start rotating, giving rise to an interaction between the incident wind and the air dragged by the walls of the moving cylinders. This generates lift which puts the turbine in motion.

The goal of this investigation was to characterize this type of turbine by means of numerical and mathematics methods that permit determination of the power vs wind speed curve's behaviour as a function of working parameters of Magnus horizontal axis wind turbines.

In order to study turbines performance, a non-iterative method is proposed and implemented in code. This approach allows the prediction of the output power, which is validated by experimental measurements of conventional turbines.

The method was adapted to Magnus turbines. It was used to obtain the power curve behavior given geometry variations including changes in the number of rods, as well as turbine and cylindrical blade's angular velocities.

Introducción

En la actualidad, la creciente demanda de energía ha impulsado diversas e innovadoras maneras de aprovechar el recurso eólico para la producción de electricidad. Fei, Mai y Li (2012) describen un sistema de recolección de energía eólica basado en las vibraciones mecánicas que se inducen en una cinta flexible debido a la interacción del fluido con la estructura. Perkovic, Silva, Ban, Kranjčević y Duić (2013) presentan un mecanismo que consiste en un volante diseñado para transformar la energía cinética del viento, a gran altitud, en energía mecánica.

Por otra parte, las turbinas eólicas convencionales (artefactos que extraen energía cinética del viento) están en constante rediseño e investigación para obtener cada vez mejores productos en cuanto a eficiencia, confiabilidad y armonía con el entorno (Burton, Sharpe, Jenkins & Bossanyi, 2011).

Las turbinas eólicas de eje horizontal son las más comúnmente diseñadas hoy en día (Manwel, McGowan & Rogers, 2009). Poseen una torre que soporta el eje de rotación a una determinada altura sobre el suelo y paralelo a este, de modo que se aprovecha la energía del viento que viaja a una velocidad mayor en tanto más alta sea la torre que soporta a la turbina.

Existe una amplia gama de formas de turbinas de eje vertical; entre ellas destaca la Darrieus, que ampliamente fue estudiada en Estados Unidos y Canadá en las décadas de 1970 y 1980 (Manwel et al., 2009). Aún hoy en día se presentan modelos matemáticos y computacionales para el análisis de este tipo de turbinas (Islam, Ting & Fartaj, 2008).

En el campo de las turbinas eólicas de eje horizontal, recientemente se ha explorado la alternativa de utilizar, en lugar de aspas, cilindros girando que aprovechan el efecto Magnus para generar la fuerza de sustentación (Bychkov, Dovgal & Kozlov, 2007). La figura 1 muestra el aerogenerador conocido como turbinas Magnus, mostrando sus parámetros geométricos y cinemáticos (diámetro D y longitud L del cilindro, velocidad angular de la turbina Ω y del cilindro ω) así como el viento incidente U_∞ .

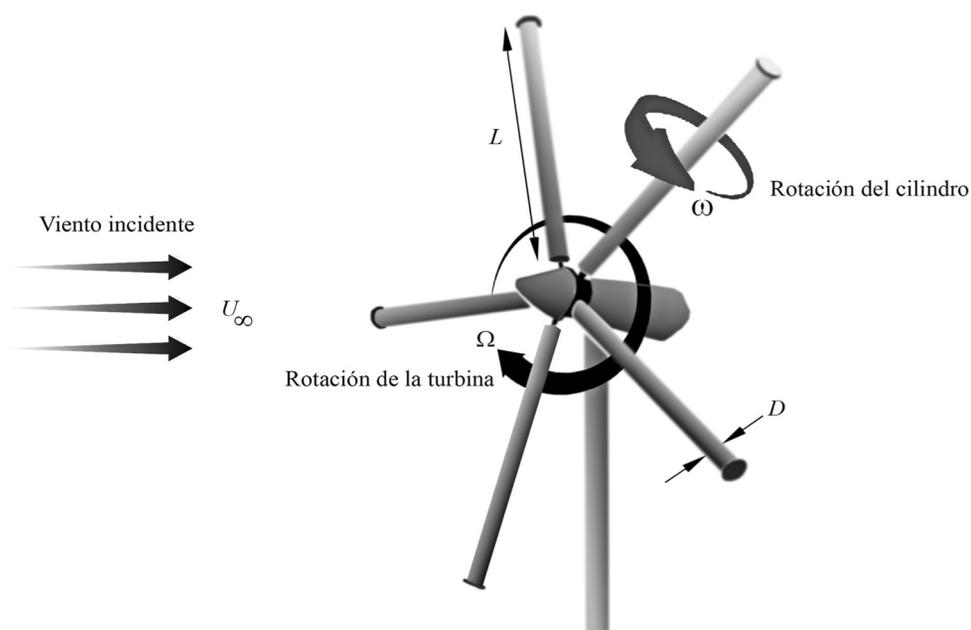


Figura 1. Turbina eólica Magnus de eje horizontal.

El efecto Magnus es una fuerza que actúa sobre un cuerpo en rotación sumergido en un fluido en movimiento; la dirección de esta fuerza es perpendicular a la dirección del flujo, según se muestra en la Figura 2. Esto se debe a una diferencia de presión causada por la diferencia de velocidad que existe en el fluido entre la cara superior e inferior; la modificación en el campo de velocidades sucede al girar el cilindro arrastrando consigo el fluido a su alrededor por la condición de no deslizamiento.

Bychkov et al. (2007) presentan una investigación teórica y experimental que propone la operación óptima de una turbina eólica que utiliza cilindros girando en lugar de aspas. Sus resultados para un cilindro en rotación muestran un crecimiento lineal para el coeficiente de sustentación C_L , que es muy superior al correspondiente de un perfil alar.

Ito, Kawashima, Nishizawa, Ushiyama & Komatinovic (2007) fabrican un prototipo de una turbina Magnus-Savonius, en la que los cilindros de la turbina Magnus son reemplazados por rotores Savonius. De este modo, se evita la necesidad de hacer girar los cilindros con energía externa, pues los rotores Savonius generarían su propia rotación por arrastre. Una de sus conclusiones es que este aparato tendrá un coeficiente de potencia mucho menor al de turbinas similares con aspas, pero a cambio el costo de fabricación es muy bajo.

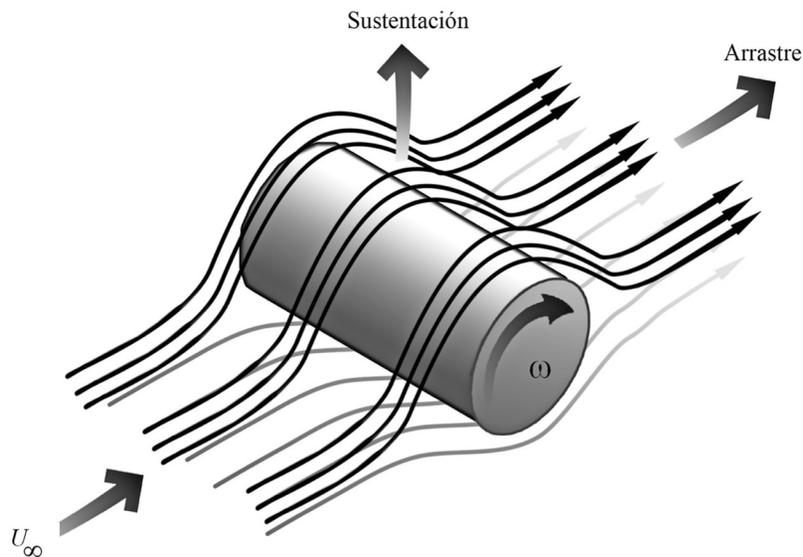


Figura 2. Efecto Magnus.

Bychkov (2008) presenta una alternativa para la turbina Magnus, en la cual la base del cilindro no gira. En este caso, emplea tapas laterales en los cilindros, para suprimir la vorticidad en las puntas de estos.

Gono, Rusek & Hrabčik (2009) describen la turbina Magnus manufacturada por la empresa Mecaro Co. Destacan que en ese modelo se emplean cilindros con aletas espirales, para potenciar el efecto Magnus generado con la rotación de los cilindros.

Luo, Huang & Wu (2011) presentan una solución analítica para el desempeño de una turbina Magnus. Desprecian el efecto del arrastre para el cálculo del torque desarrollado por los cilindros, por lo que su modelo corresponde a una turbina en un flujo no viscoso.

Sun, Zhuang, Cao, Huang & Wu (2012) llevan a cabo una simulación numérica para estudiar el efecto de modificar la forma de los cilindros en una turbina Magnus, empleando ANSYS CFX. La simulación se lleva a cabo con solo un cilindro, aprovechando la periodicidad rotacional del problema e imponiendo adecuadamente las condiciones de borde. Utilizan el modelo de turbulencia SST $k - \omega$ por su precisión en el tratamiento de la capa límite ante gradientes de presión adversos. Obtienen que un cono truncado, con radio creciente alejándose del eje de rotación de la turbina, produce un coeficiente de potencia mayor que un cilindro circular. Pero para esto requiere mayores valores de ω .

Sedaghat (2014) reporta que para el caso de la turbina Magnus resulta clave lograr la reducción de la relación entre arrastre y sustentación, si se busca mejorar la eficiencia.

Massaguer, Massaguer, Pujol, Comamala y Velayos (2014) proponen generar la rotación de los cilindros de la turbina Magnus por efectos centrífugos y autorotación, evitando la necesidad de invertir energía externa para generar el efecto Magnus. Entre otros aspectos, sus pruebas concluyen que este tipo de turbina genera menos ruido que las convencionales.

La revisión bibliográfica evidencia que la turbina Magnus ha sido objeto de estudio durante los últimos años. Uno de los resultados es que la turbina tiene eventuales ventajas respecto de las tradicionales que usan aspas. No obstante, ningún autor presenta una curva de potencia, teórica o experimental, para una turbina Magnus, ni su comportamiento ante modificaciones geométricas o cinemáticas; estos aspectos forman parte del presente estudio y en eso radica su originalidad e innovación.

Metodología

Modelamiento y método propuesto

La teoría del Disco Actuador, descrito en detalle por Burton et al. (2011), explica que el viento disminuye su velocidad al atravesar un generador eólico. Para modelar el intercambio de energía cinética entre el aire y una turbina eólica se define el factor de inducción axial a , el cual es una medida de qué tanto disminuyó su velocidad el viento al salir de la turbina y, por ende, cuantifica cuánta energía entregó el aire al generador.

Mediante argumentos de conservación de momentum lineal y la ecuación de Bernoulli, Burton et al. (2011) demuestran que la fuerza horizontal (denotada como T , del inglés *Thrust*) ejercida por la turbina al aire y viceversa es:

$$T = 2\rho U_{\infty}^2 (a(1-a))A_d \quad (1)$$

Donde U_{∞} representa la velocidad del viento libre, lejos de la turbina, ρ es la densidad del fluido y A_d es el área del disco que barren las aspas.

Este disco puede ser analizado en pequeños anillos, tal como lo propone la teoría BEM (*Blade Element Momentum*) descrita en detalle por Burton et al. (2011). Al realizar este tipo de análisis, la ecuación 1 puede ser escrita para un anillo diferencial a una distancia r como:

$$dT = 2\rho U_{\infty}^2 (a(1-a))\delta A_d = 4\rho U_{\infty}^2 (a(1-a))\pi r \delta r \quad (2)$$

La ecuación 2 es válida para $a < 0.4$ y dentro de ella se tiene el coeficiente de empuje (C_T).

$$C_T = 4a(1-a) \quad \text{con} \quad a < 0.4 \quad (3)$$

Por consideraciones de conservación de momentum angular, Burton et al. (2011) obtienen que el diferencial de torque Q generado por el viento en cada disco es:

$$\delta Q = \rho U_{\infty} (1-a) 2\Omega a' r^2 \delta A_d = 4\rho U_{\infty} a' (1-a) \Omega \pi r^3 dr \quad (4)$$

Donde a' es el factor de inducción tangencial, que modela el cambio en la velocidad tangencial del viento al atravesar la turbina eólica. Aguas arriba el viento viaja horizontalmente, pero dado que interacciona con la turbina y la hace girar, se genera una fuerza de reacción que dota al viento de velocidad tangencial aguas abajo de la turbina.

La Ecuación 2 pierde validez cuando la turbina opera en un estado de estela turbulenta, que ocurre cuando $a > 0.4$. Para compensar este efecto, se emplean dos correcciones anidadas (Moriarty y Hansen, 2005). La de Glauert reemplaza el $C_T = 4a(1-a)$ por:

$$C_T = \frac{8}{9} + \left(4F - \frac{40}{9}\right)a + \left(\frac{50}{9} - 4F\right)a^2 \quad \text{con } a > 0.4 \quad (5)$$

Donde F está definido según el modelo de corrección de puntas de la siguiente manera:

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1}(e^{-f}) \quad \text{con } f = \frac{B}{2} \frac{L-r}{r \sin(\alpha)} \quad (6)$$

Aquí B representa la cantidad de aspas que componen la turbina y, de acuerdo con la Figura 3, α se escribe como:

$$\alpha = \text{atan}(U_{\infty} (1-a) / \Omega r (1+a')) \quad (7)$$

Esta corrección de puntas también se debe aplicar de forma directa en las ecuaciones 2 y 4, lo que resulta de la siguiente forma:

$$\delta T = C_T \rho U_{\infty}^2 \pi F r \delta r \quad (8)$$

$$\delta Q = 4\rho U_{\infty} a' (1-a) \Omega \pi F r^3 \delta r \quad (9)$$

Por otra parte, las velocidades y fuerzas aerodinámicas que actúan sobre un elemento de aspa tal como se muestra en la Figura 3, permiten escribir expresiones para T y Q en función de las magnitudes de las fuerzas de sustentación F_L y arrastre F_D . No obstante, estas dos fuerzas pueden ser escritas en función de los coeficientes adimensionales C_L y C_D de forma diferencial (Burton et al., 2011) como:

$$\delta F_L = \frac{1}{2} \rho U_n^2 c C_L \delta r \quad ; \quad \delta F_D = \frac{1}{2} \rho U_n^2 c C_D \delta r \quad (10)$$

Donde c es la cuerda del aspa y U_n se obtiene de la figura 3.

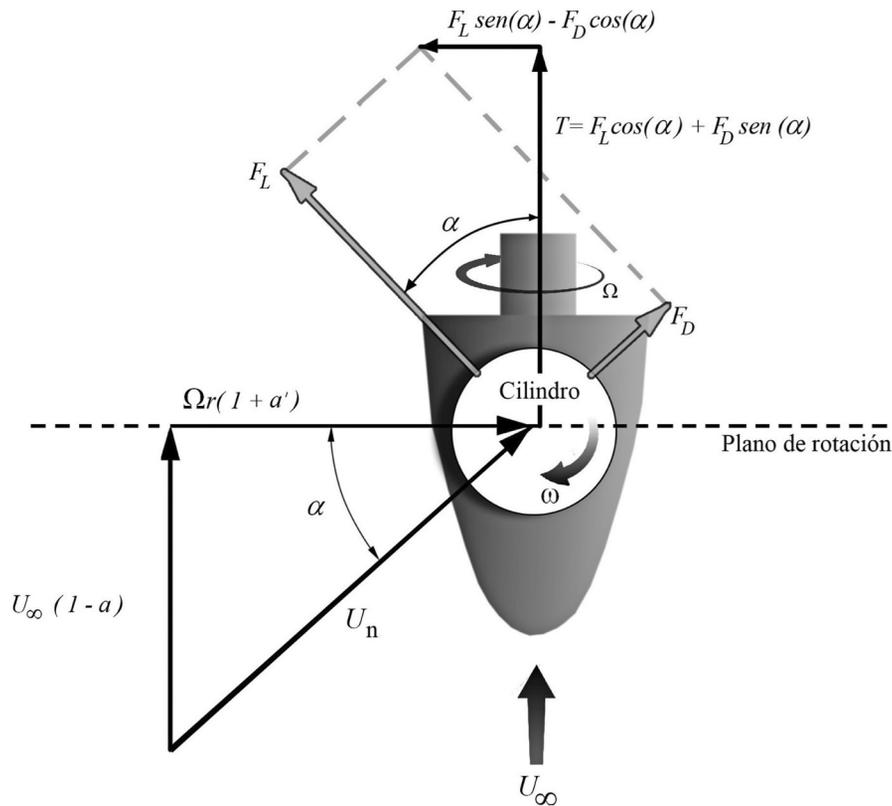


Figura 3. Acción del viento y fuerzas aerodinámicas sobre un aspa cilíndrica.

Para determinar los factores de inducción axial y tangencial se combinan las expresiones para la fuerza horizontal según la conservación de momentum lineal (Ecuación 8), el torque según la conservación de momentum angular (Ecuación 9) y las fuerzas aerodinámicas (figura 3 y Ecuación 10) para obtener:

$$C_T \rho U_\infty^2 \pi F r \delta r = \frac{1}{2} \rho U_n^2 (C_L \cos(\alpha) + C_D \sin(\alpha)) B c \delta r \quad (11)$$

$$4a'(1-a) \rho U_\infty \Omega r^3 \pi F \delta r = \frac{1}{2} \rho U_n^2 (C_L \sin(\alpha) - C_D \cos(\alpha)) B r c \delta r \quad (12)$$

Las ecuaciones 11 y 12 se reescriben de manera que todos los términos estén a un lado del igual, del otro lado se colocan los residuos $R1$ y $R2$, que idealmente deben ser igual a cero. Pero al igualar dos modelos que toman en cuenta simplificaciones y desprecian efectos tridimensionales y turbulencia entre otros, se debe buscar el punto en el que ambos residuos alcancen un mínimo. De modo que se discretiza el disco actuador en anillos, y para cada posición r se buscan los valores de a y a' , que se determinan cuando se cumple que:

$$\min_{a, a'} (|R1| + |R2|) \quad (13)$$

El método que se propone e implementa en un código para resolver la Ecuación 13 es no iterativo, por tanto se le ha llamado *método directo* y consiste en evaluar todas las posibles combinaciones de a y a' en la Ecuación 13, considerando que ambas pueden tomar valores entre 0 y 1. El producto de esta evaluación es una superficie que representa el valor de la suma

de los residuos, que están asociados a fuerza y momento que predice de forma no compensada alguno de los dos modelos empleados.

La solución válida para el sistema es el punto donde la superficie de residuo total alcanza el valor mínimo posible. Por lo que una vez evaluadas todas las combinaciones, un algoritmo extrae de forma directa los factores de inducción axial y tangencial que finalmente gobiernan el rendimiento de la turbina.

Luego de resolver la Ecuación 13 para cada valor de r , se determina la potencia P :

$$\int_0^L dP = \int_0^L \Omega dQ = \int_0^L 4a'(1-a)\rho U_\infty \Omega^2 r^3 \pi dr \quad (14)$$

Una vez discretizado el disco en fracciones de radio, se calcula la potencia como:

$$P = \sum_{\Delta r}^L 4a'(1-a)\rho U_\infty \Omega^2 r^3 \pi \Delta r \quad (15)$$

El proceso descrito se debe repetir para todo el rango de velocidad de viento en estudio.

Validación del método propuesto

Para validar el *método directo* propuesto se han utilizado como datos de entrada las características de la turbina Fase II (Ceyhan, 2010) del NREL (Laboratorio Nacional de Energía Renovable de EE.UU.), que se compone de tres aspas de 0.4572 m de cuerda, girando a 71.3 revoluciones por minuto (RPM), con un diámetro de 10.06 m y una potencia de 19.8 kW. Los resultados comparativos de los valores predichos por el *método directo* y los valores reales de la turbina se muestran en la figura 4.

Se encuentra una adecuada concordancia entre los resultados obtenidos por el *método directo* propuesto y las mediciones experimentales para la turbina Fase II. Se aprecia una ligera sobreestimación de la potencia para velocidades de viento bajas y altas, menores a 9 m/s y mayores a 19 m/s. En el rango restante, el *método directo* presenta una subestimación en la predicción de potencia. No obstante, se captura adecuadamente la tendencia de la curva de potencia y sus valores puntuales, considerando que el modelo utilizado no toma en cuenta efectos como rugosidad, pandeo y vibración de las aspas o turbulencia y variación del ángulo de incidencia lateral del viento, entre otros.

Adecuación del método directo para turbinas Magnus

El análisis de la turbina Magnus se lleva a cabo con el *método directo* validado anteriormente. Las dos diferencias fundamentales que implican una modificación en el planteamiento del modelo son la geometría, al reemplazar el perfil alar por un cilindro, y la rotación del cilindro.

Es por esto que en las ecuaciones 11 y 12, el concepto de cuerda debe ser sustituido por el diámetro del cilindro. Por otra parte, los coeficientes C_L y C_D son independientes del ángulo de ataque, dada la simetría cilíndrica de sus *aspas*; estos coeficientes, en el caso de la turbina Magnus, son función de la velocidad relativa de rotación del cilindro $\bar{\omega} = \omega r / U_\infty$.

Para estudiar el desempeño de la turbina Magnus se emplea el *método directo* propuesto, prestando especial atención a la selección de las curvas de C_L y C_D , pues son radicalmente distintas para un cilindro en comparación con cualquier perfil aerodinámico y, por ende, contienen la clave para lograr posibles mejoras respecto de las turbinas tradicionales en algún campo de aplicación particular.

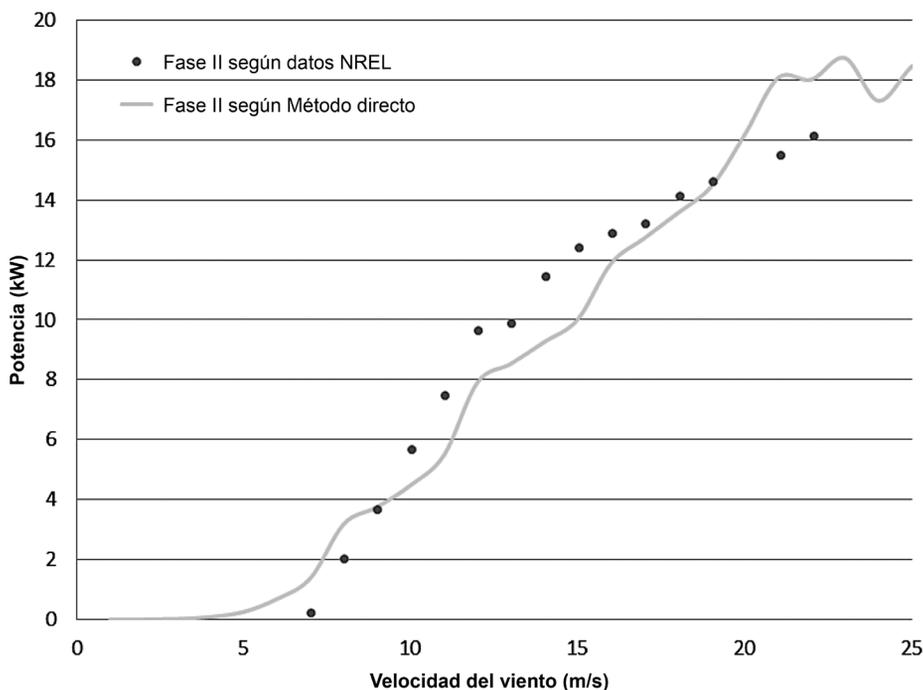


Figura 4. Potencia de la turbina NREL Fase II en función de la velocidad del viento.

Resultados y discusión

Se programa el método propuesto en el *software* comercial Matlab y se toma como dato de entrada las curvas de C_L y C_D según las mediciones experimentales de Bychkov et al. (2007).

Los resultados de las simulaciones realizadas mediante el *método directo*, para una turbina de 2 cilindros, se muestran en la Figura 5, donde se han combinado cilindros de 15 y 25 cm de diámetro con velocidades de rotación en el rango de 10 a 4000 RPM y con turbinas de 1 a 3 m de radio con velocidades angulares de entre 10 y 30 RPM.

El principal hallazgo de esta combinación de variables es que, en general, se requiere alta velocidad de rotación del cilindro, del orden de 103 RPM, para lograr extraer potencia del viento, dado que las líneas celeste y rosado ($\omega = 10$ y 100 RPM, respectivamente) están sobre el eje de cero potencia en todos los arreglos de variables para turbinas pequeñas.

Por esta razón, en la figura 6 se presenta el resultado de una nueva combinación de parámetros donde $\omega = 1, 4, 8$ y 12×103 RPM, con el fin de determinar el comportamiento de la curva de potencia en relación con el cambio en todas las otras variables.

Con este nuevo escenario es posible definir la tendencia de la curva de potencia de la turbina Magnus. Se destaca que al aumentar la velocidad angular de los cilindros, el parámetro al que es más sensible el sistema, aumenta la potencia promedio y su punto máximo en relación con la velocidad del viento incidente.

La necesidad de una alta velocidad de rotación del cilindro se debe a que la curva del coeficiente de sustentación del cilindro en rotación no se inicia en el origen de coordenadas, sino que para valores menores a $\bar{\omega} = 0.5$ se obtiene $C_L = 0$ (Bychkov et al., 2007).

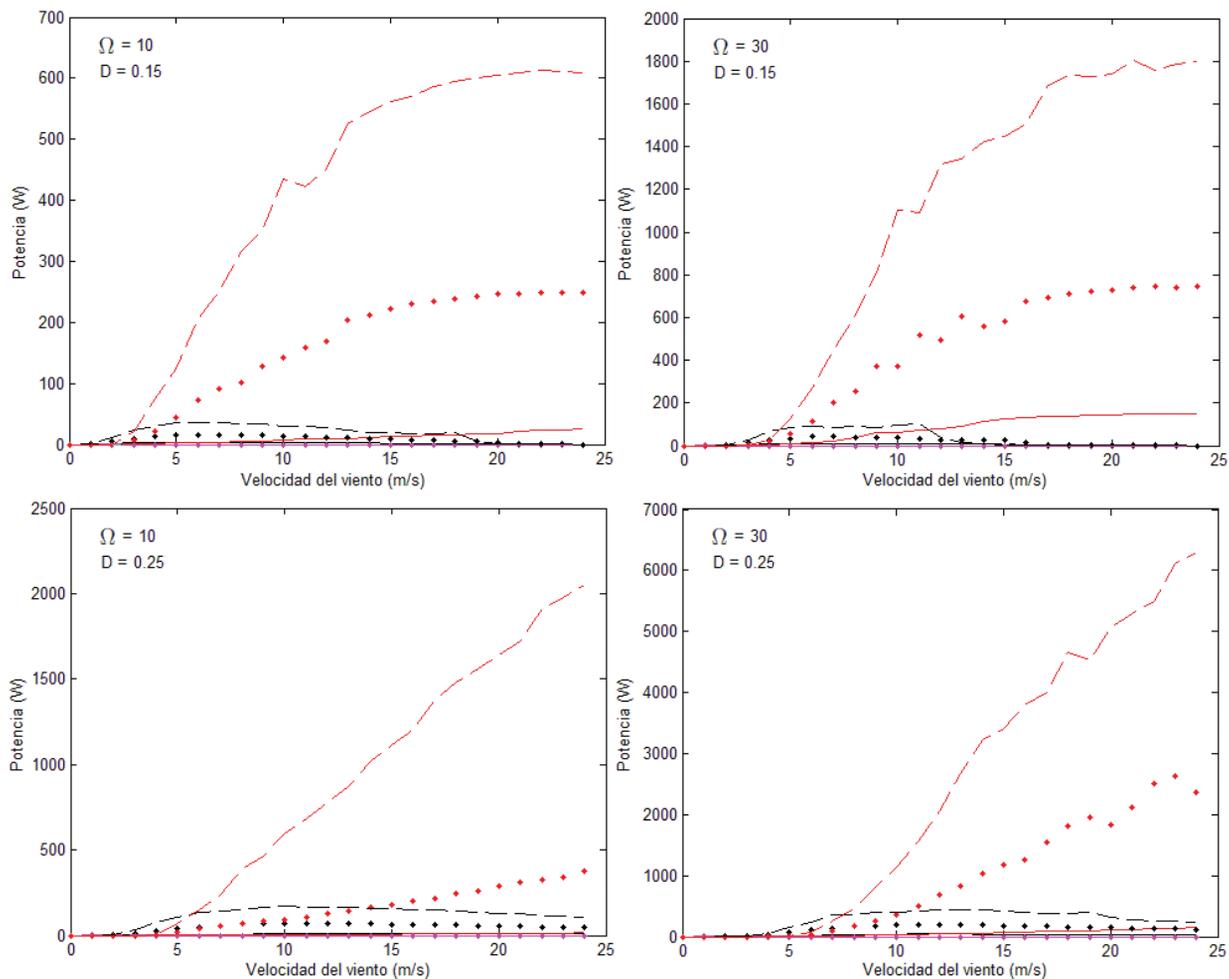


Figura 5. Curvas de potencia de la turbina Magnus de dos cilindros. En cada gráfico $L = 1$ m (sólida), 2 m (puntos) y 3 m (discontinua); $\omega = 10$ RPM (celeste), 100 RPM (rosado), 1000 RPM (negro) y 4000 RPM (rojo).

Además, para que exista el efecto Magnus se requiere un adecuado balance entre la velocidad del viento incidente y la rotación del cilindro. Por una parte, una corriente de viento muy tenue no genera ninguna sustentación, por otro lado, tampoco habrá sustentación si la velocidad del viento es excesiva, en ese caso resulta despreciable la diferencia de velocidad del viento en las caras del cilindro y el sistema se puede aproximar como si el cuerpo cilíndrico no estuviese girando.

Por otra parte, si el cilindro gira a muy baja velocidad angular, no modifica las líneas de corriente del viento y, por ende, no se genera sustentación, pero también se obtiene cero sustentación si el cilindro gira con una velocidad angular excesiva. En este caso, el fenómeno se debe a que en la vecindad del cilindro las líneas de corriente corresponden prácticamente a las de un cilindro girando dentro de un fluido en reposo y no es posible percibir el efecto del flujo de viento externo.

Considerando que $\bar{\omega}$ combina la velocidad del viento con la velocidad angular del cilindro y que según estudios previos con $\bar{\omega} = 2$ se obtiene la potencia máxima de la turbina, es razonable que al aumentar la velocidad angular de los cilindros se incremente la potencia capturada, pues se genera más sustentación y a la vez que el punto de máxima potencia ocurre para una velocidad mayor del viento incidente, ya que se debe mantener el balance para mantener constante el adimensional $\bar{\omega} = 2$.

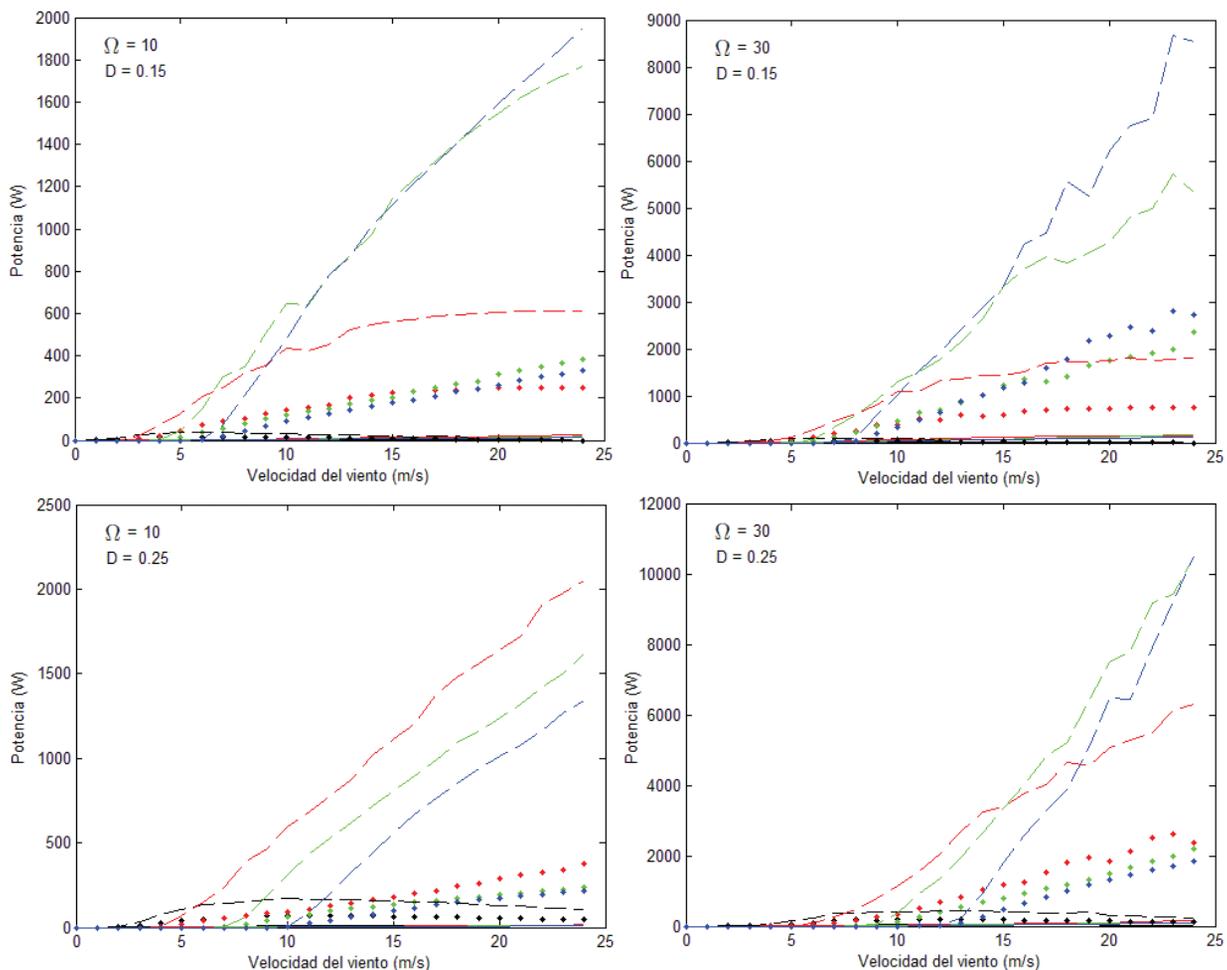


Figura 6. Curvas de potencia de la turbina Magnus de dos cilindros. En cada gráfico $L = 1$ m (sólida), 2 m (puntos) y 3 m (discontinua); $\omega = 1000$ RPM (negro), 4000 RPM (rojo), 8000 RPM (verde) y 12 000 RPM (azul).

Se observa también en las figuras 5 y 6 que al aumentar la longitud de los cilindros se obtiene una mayor potencia de la turbina, del mismo modo que en las turbinas eólicas convencionales. Esto es fácilmente pronosticable, tomando en cuenta que la potencia disponible en el viento es proporcional al área barrida por los cilindros.

Cabe destacar que, a diferencia del aumento en la velocidad de rotación de los cilindros, en este caso no ocurre una modificación significativa en el valor de velocidad del viento donde da inicio la extracción de energía para cada combinación particular de las otras variables, por lo que hacer la turbina más grande no la hace ineficiente para bajas velocidades del viento, como sí ocurre cuando se aumenta ω .

En cuanto al diámetro de los cilindros, se encuentra que al aumentar su valor también crece la potencia máxima entregada por la turbina, pero la extracción de energía se inicia a velocidades del viento mayores y el punto de máxima potencia también se corre a la derecha en el gráfico de potencia en función de la velocidad del viento.

Este es un comportamiento similar al obtenido cuando se modifica ω . La mejora en la captura de potencia se debe, por una parte, a que las fuerzas aerodinámicas sobre las aspas de turbinas eólicas son directamente proporcionales a la cuerda (ver ecuaciones 10 y 11) y en el

caso de las turbinas Magnus, el diámetro corresponde con el concepto de cuerda de un aspa convencional.

Por otra parte, considerando la definición de $\bar{\omega}$, que en su numerador contiene tanto a ω como al radio del cilindro, resulta razonable que un aumento en el radio cause un efecto similar al de aumentar la velocidad angular del cilindro, pues en ambos casos se requiere un aumento en el denominador (que es la velocidad del viento) para mantener $\bar{\omega} = 2$ constante y operar en el punto óptimo.

La variación en la velocidad angular de la turbina modifica la curva de potencia de modo que, conforme se aumenta Ω se requiere una mayor velocidad del viento para que la turbina extraiga energía, pero a la vez se obtiene como beneficio que la cota máxima de potencia se incrementa.

Sin embargo, para valores de Ω similares a los que se emplean en turbinas eólicas convencionales, la potencia máxima se alcanza a valores de U_∞ muy altos (20-25 m/s), lo cual no es práctico para la mayoría de las aplicaciones. Por tanto, de manera preliminar se puede indicar que la turbina Magnus ofrece ventajas para Ω moderados o bajos, tal como proponen autores como Bychkov et. al (2007), quienes señalan que la turbina Magnus opera de forma adecuada a un tercio de la velocidad angular de las eólicas convencionales, resultado que se obtuvo también en este trabajo.

En cuanto a la cantidad de cilindros de la turbina y su efecto en el comportamiento, el análisis demuestra que la tendencia es la misma que al aumentar el diámetro del cilindro o la velocidad angular de la turbina. No obstante, cada cilindro representa más material, mayor complejidad de construcción y un nuevo consumo de energía para generar la rotación, por lo que en este parámetro se debe incluir una nueva variable, que es el gasto energético necesario para la operación de la turbina en función de la cantidad de cilindros.

Conclusiones

Se requiere una velocidad de rotación del orden de 10^3 RPM de las aspas cilíndricas de una turbina tipo Magnus para lograr extraer potencia del viento, lo que coincide con lo obtenido en investigaciones anteriores.

La variable que gobierna el comportamiento de esta turbina es la velocidad relativa de rotación del cilindro $\bar{\omega} = \omega r_c / U_\infty$. En concordancia con otros autores, se encuentra que para un rendimiento óptimo, la turbina debe operar en valores cercanos a $\bar{\omega} = 2$.

La turbina Magnus resulta eficiente con un bajo número de cilindros, dado que al aumentar la cantidad de aspas cilíndricas, disminuye el máximo coeficiente de potencia alcanzable.

La eficiencia de este tipo de turbinas es directamente proporcional al diámetro del cilindro para un radio de turbina fijo, lo que no había sido reportado anteriormente en la bibliografía.

Acorde con lo señalado por otros autores, la turbina Magnus opera de forma adecuada a velocidades angulares menores que las eólicas convencionales de eje horizontal.

Recomendaciones para trabajo futuro

- Valorar si la turbina Magnus ofrece ventajas de emplazamiento respecto de las eólicas convencionales, enfocándose en las características de la estela que genera la turbina.
- Realizar simulaciones del desempeño de este tipo de generador inmerso en otro fluido, como el agua, para conocer su potencial de aplicación hidrocínético.
- Construir prototipos y realizar mediciones experimentales, tanto en aire como en agua.

Agradecimientos

Se agradece al Instituto Tecnológico de Costa Rica y al Ministerio de Ciencia, Tecnología y Telecomunicaciones de Costa Rica, por el financiamiento parcial para esta investigación. Al Arq. Diego Murillo Calderón, por su colaboración con los diagramas.

Bibliografía

- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. & Bossanyi, E. (2001). *Wind energy handbook*. John Wiley & Sons.
- Bychkov, N.M. (2008). Magnus wind turbine. 3. Calculated characteristics of the windwheel. *Thermophysics and Aeromechanics*, 15(2), 321-331.
- Bychkov, N.M., Dovgal, A.V. & Kozlov, V.V. (2007). Magnus wind turbines as an alternative to the blade ones. En *Journal of Physics: Conference Series*, 75, No. 1, p. 012004. IOP Publishing.
- Ceyhan, O.Z.L.E.M. (2008). *Aerodynamic design and optimization of horizontal axis wind turbines by using BEM theory and genetic algorithm*. Doctoral dissertation, Master Thesis, Aerospace Engineering Department, METU, Ankara.
- Fei, F., Mai, J.D. & Li, W.J. (2012). A wind-flutter energy converter for powering wireless sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 173(1), 163-171.
- Goño, R., Rusek, S. & Hrabčík, M. (2009, May). Wind turbine cylinders with spiral fins. En *8th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Karpacz, Poland (pp. 10-13).
- Islam, M., Ting, D.S.K. & Fartaj, A. (2008). Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(4), 1087-1109.
- Ito, A., Kawashima, S., Nishizawa, Y., Ushiyama, I. & Komatinovic., N. (2007). *A study on savonius type magnus wind turbine. Europe premier wind energy event*. Obtenido de http://www.ewea.org/ewec2007/allfiles2/202_Ewec2007fullpaper.pdf
- Luo, D., Huang, D. & Wu, G. (2011). Analytical solution on Magnus wind turbine power performance based on the blade element momentum theory. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 3(3), 033104.
- Manwell, J.F., McGowan, J.G. & Rogers, A.L. (2010). *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons.
- Massaguer, A., Massaguer, E., Pujol, T., Comamala, M. & Velayos, J. (2014). Blade shape influence on aerodynamic efficiency of a Magnus wind turbine using particle image velocimetry. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 12, 1-6.
- Moriarty, P.J. & Hansen, A.C. (2005). *AeroDyn theory manual*. Golden, Colorado, USA: National Renewable Energy Laboratory.
- Perković, L., Silva, P., Ban, M., Kranjčević, N. & Duić, N. (2013). Harvesting high altitude wind energy for power production: The concept based on Magnus' effect. *Applied Energy*, 101, 151-160.
- Sedaghat, A. (2014). Magnus type wind turbines: Prospectus and challenges in design and modelling. *Renewable Energy*, 62, 619-628.
- Sun, X., Zhuang, Y., Cao, Y., Huang, D. & Wu, G. (2012). A three-dimensional numerical study of the Magnus wind turbine with different blade shapes. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 4(6), 063139.

Caracterización de defectos y alteraciones nanoestructurales en la superaleación Nimonic 80A por medio de microscopía electrónica de transmisión

Characterization of defects and nanostructural alterations in the Nimonic 80A superalloy by using Transmission Electron Microscopy

Teodolito Guillén-Girón¹, José Luis León-Salazar²

*Fecha de recepción: 22 de mayo del 2015
Fecha de aprobación: 29 de agosto del 2015*

Guillén-Girón, T; León-Salazar, J. Caracterización de defectos y alteraciones nanoestructurales en la superaleación Nimonic 80A por medio de microscopía electrónica de transmisión. *Tecnología en Marcha*. Vol. 29, N° 1, Enero-Marzo. Pág 51-61.

1 Profesor Investigador. Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico tguillen@itcr.ac.cr
2 Profesor Investigador. Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico jlleon@itcr.ac.cr

Palabras clave

TEM; dislocaciones; precipitaciones; superaleación; fatiga.

Resumen

En este trabajo se analizaron probetas TEM (Microscopía Electrónica de Transmisión, por sus siglas en inglés) de materiales usados en aplicaciones aeronáuticas. El principal objetivo de este proyecto fue estudiar los defectos intercrystalinos presentes en la superaleación Nimonic 80A luego de ser tratada térmicamente y posteriormente someter las probetas a esfuerzos cíclicos. Las probetas TEM fueron probadas previamente bajo fatiga de alta frecuencia (1 000 Hz y 20 000 Hz) en la Universidad de Siegen en Alemania, simulando las condiciones de trabajo de esta aleación en turbinas de avión o en otros tipo de aplicaciones aeronáuticas. Este tipo de esfuerzo mecánico genera muchas deformaciones y defectos nanométricos en este material, que se evidencian por medio de dislocaciones. Estos defectos solo se pueden observar empleando técnicas de microscopía muy potentes, como la TEM. Los resultados obtenidos del análisis TEM revelan precipitados característicos en la muestra de Nimonic 80A al ser sometida a tratamientos térmicos. Además, esta aleación evidencia la formación de dislocaciones producto de los esfuerzos mecánicos que sufrieron estas probetas. Finalmente, se logró evidenciar la influencia de las precipitaciones en el mecanismo de formación, agrupamiento y movimiento de las dislocaciones en la microestructura de las muestras utilizadas.

Keywords

TEM; dislocations; precipitations; superalloy, fatigue.

Abstract

In this work, TEM (Transmission Electron Microscope) samples of materials used in aeronautic applications were analyze. The main objective of this project was to study intercrystalline defects in Nimonic 80A superalloy after the heat treatment and fatigue testing of the samples. The samples were prepared for the TEM analysis in University of Siegen, Germany after they were test in very high cyclic loading conditions (1000 Hz y 20 000 Hz). These tests were performed because they simulate very closely the work conditions that these alloys must support in turbine and others aeronautic applications. The mechanical stresses generated in these kind of applications will develop many deformations and nanometric defects in this material. They are evidenced by the dislocations formation. The dislocations are possible to observe only by using very powerful microscopy technics such as Transmission Electron Microscope. The results obtained by the TEM analysis show that after the heat treatment, the samples developed very distinctive precipitations in the Nimonic 80A samples. Additionally, after the mechanical testing these samples shows the formation of representative kind of dislocations. Finally, this work shows the influence of the precipitations under the formations, stacking and movement of the dislocations in the microstructure of the tested samples.

Introducción

La superaleación Nimonic 80A posee complejos sistemas de fases que dificultan su deformabilidad plástica. Se encuentran fases con composiciones diversas, tales como: $Ni_3(Al,Ti)$, monocarburos y carburos precipitados en el borde de granos ricos en cromo (Cr) de la composición M23C6, todo esto presente en una matriz NiCr. Las mejores propiedades

mecánicas en estas aleaciones se obtienen con granos finos homogéneos (Bombac et al., 2008). Las aplicaciones incluyen ambientes altamente corrosivos a elevadas temperaturas, como turbinas de avión y reactores industriales. Algunas microestructuras encontradas en este tipo de aleación incluyen la dendrítica, la laminar y de fibras dispersas en una matriz continua que corresponden a las fases precipitadas (Murr et al., 2011). La deformación plástica y la posterior falla de materiales policristalinos se deben principalmente a la formación, acumulación y movimiento de las dislocaciones, que son defectos lineales cristalográficos, en sectores como los bordes de granos (Kolluri & Demkowicz, 2010). La caracterización de las dislocaciones y otros defectos microestructurales permiten entender las deformaciones plásticas de este tipo que ocurren en las aleaciones en condiciones variadas. Para poder observar las dislocaciones se necesitan microscopios muy potentes, como los microscopios electrónicos, entre ellos el TEM, ya que puede alcanzar una alta magnificación manteniendo una alta resolución de la imagen.

El entendimiento profundo de los defectos cristalinos ha sido fundamental en el avance de la metalurgia, sin embargo, las limitaciones tecnológicas han detenido su progreso por algún tiempo. Actualmente, se cuenta con tecnologías como el TEM para la obtención de imágenes a escala atómica, que les permiten a los científicos comprobar las teorías respectivas. Este conocimiento transferido a la industria es, y continuará siendo, un pilar del siglo XXI para la mejora de las propiedades de los materiales desde sus estructuras básicas, permitiendo superar obstáculos en la calidad de los productos y en las aplicaciones de los materiales.

En la técnica de TEM, un haz de electrones acelerados debido a un campo eléctrico aplicado incide sobre la muestra e interactúa con los átomos presentes en el material. En esta técnica se utilizan voltajes de 100 a 400 kV para acelerar los electrones. El diámetro y la forma transversal del haz se manipulan por medio de campos magnéticos, los lentes y aperturas del microscopio. Los electrones se comportan como partículas y como ondas en su interacción con la materia. La interacción de los electrones con la muestra es interpretada por medio de la recepción de las señales en pantallas y sistemas electrónicos. Estas señales permiten conocer la morfología, estructura y la composición del material estudiado. La resolución del microscopio es controlada por medio de la manipulación de la longitud de onda de los electrones, que gracias a la constante de Planck se relaciona con el momentum de la partícula, lo que es inversamente proporcional a la diferencia de potencial aplicado en el equipo (Williams & Carter, 2009).

En el TEM, las señales que se utilizan son las que atraviesan la muestra y experimentan dispersión por la interacción del electrón con las nubes electrónicas y los núcleos de los átomos. El ángulo y la energía del electrón dispersado se analizan para generar las imágenes y los patrones de difracción; también se examinan los rayos-X emitidos para proveer el análisis y mapeo elemental que se obtienen del TEM. Si la muestra es muy gruesa, los electrones no pueden atravesarla y únicamente se obtendrán señales de electrones retrodispersados (backscattered), que no son de utilidad en TEM. Para poder asumir que el electrón está transmitiendo información de un átomo específico, es preciso asegurar que ocurra un único evento de dispersión, lo que se logra colocando una muestra lo suficientemente delgada para evitar múltiple eventos de dispersión. La ocurrencia de múltiples eventos de dispersión hace que sea más difícil interpretar la señal. La probabilidad de que ocurra un único evento de dispersión es directamente proporcional al voltaje aplicado e inversamente proporcional al peso atómico del material estudiado. Por ejemplo, si se analiza un aluminio con una energía de los electrones de 100 kV, se pueden estudiar espesores de hasta 1 μm , mientras que si fuera un acero se puede llegar hasta 200 nm. Sin embargo, para obtener mejores resultados en el TEM se recomienda usar espesores menores a 50 nm, aunque pueden ser de hasta 100 nm. Al analizar espesores más gruesos, será necesario aumentar el voltaje de trabajo, pero se corre el riesgo de dañar el material por efecto del haz de electrones (Williams & Carter, 2009).

Materiales y Metodología

Análisis por medio de Microscopía Electrónica de Transmisión

Muestras ensayadas a fatiga de alta frecuencia

La probetas de Nimonic 80A se prepararon siguiendo las especificaciones técnicas desarrolladas en el trabajo de Stöcker (2013) para poder analizarlas bajo cargas de fatiga de alta frecuencia que se realizaron por medio de la máquina MTS 810 (Figura 1).



Figura 1. Máquina de ensayos de fatiga MTS 810 (Stöcker, 2013).

Esta máquina se utilizó con la finalidad de crear dislocaciones a partir de la deformación plástica en las probetas, por medio del ensayo de fatiga. Las dimensiones de las probetas usadas para los ensayos de fatiga se pueden observar en la Figura 2.

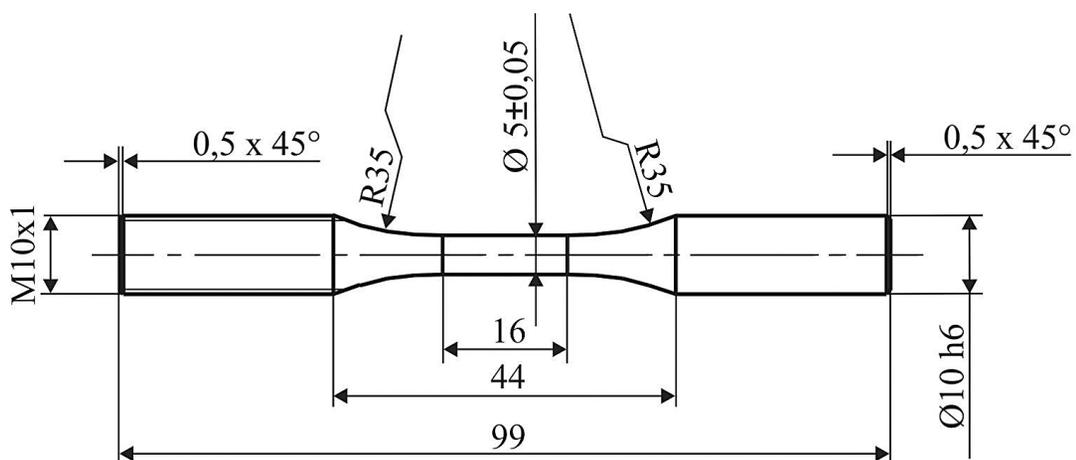


Figura 2. Dimensiones de las probetas probadas bajo fatiga de alta frecuencia (Stöcker, 2013).

Una vez que se probaron las probetas bajo cargas de fatiga de alta frecuencia hasta la falla, se cortaron en láminas delgadas cerca de la zona de falla. La zona de falla se presentó generalmente en el centro de la probeta. Las láminas de 0.25 mm se prepararon con una cortadora de diamante. Luego se troquelaron para obtener discos de 3 mm de diámetro y ser preparadas por medio de pulido electrolítico (A/S, Struers, 2010). Estas muestras se enviaron a Costa Rica para su estudio en el TEM.

Tratamiento térmico

Las probetas de Nimonic 80A se trataron térmicamente para mejorar sus propiedades mecánicas ante la fatiga. El tratamiento térmico aplicado fue de envejecimiento térmico tipo “peak-aged”. Este tratamiento consistió en calentar las muestras en un horno hasta 800°C y mantenerlas en estas condiciones por periodos de 7 horas, 50 horas, 100 horas y 299 horas. Posteriormente, las muestras se enfriaron lentamente con el horno.

Luego de estos tratamientos de envejecimiento, se probaron algunas probetas por medio de fatiga de alta frecuencia, tal y como se describió anteriormente. Luego, se cortaron en láminas delgadas cerca de la zona de falla. En general, esta falla se presentó en la parte central de la probeta. Las láminas se prepararon con cortadas de diamante en espesores de aproximadamente 1 mm. Estas láminas fueron troqueladas, obteniéndose discos de 3 mm de diámetro que posteriormente se prepararon por medio de pulido electrolítico (A/S, Struers, 2010). Las muestras preparadas por este medio se enviaron a Costa Rica para su estudio en el TEM. La Figura 3 muestra una de las probetas analizadas en el TEM al final del proceso de elaboración.

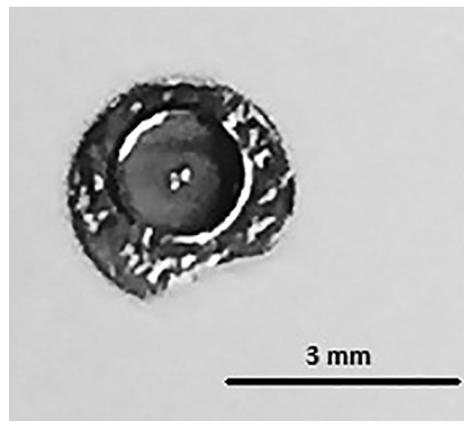


Figura 3. Probeta TEM de Nimonic 80A al final del proceso de preparación.

Previamente a la observación de las probetas preparadas en el TEM, se debió realizar un baño ultrasónico para limpiar la muestra y remover los restos del proceso de elaboración de las probetas.

Análisis TEM en el TEC

El análisis TEM se realizó en un equipo JEOL, modelo JEM-2100, ubicado en el Laboratorio Institucional de Microscopía del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) (Figura 4).

La potencia de trabajo del TEM durante el análisis fue de 200 kV bajo condiciones de alto vacío. El cátodo de trabajo fue de LaB6 y se empleó un posicionamiento simple de las probetas durante todo el análisis realizado.



Figura 4. Microscopio de Transmisión Electrónica JEOL JEM-2100.

Resultados y Discusión

Análisis nanométrico de las probetas TEM

La Figura 5 muestra el área estudiada dentro de las probetas TEM. En esta imagen se puede apreciar que el diámetro que se puede analizar por medio de TEM es inferior a los 50 μm . Esto se debe al tipo de preparación de las muestras. Como se explicó anteriormente, las probetas conllevan un desbaste por pulido electrolítico que comienza en el centro de la probeta y produce un hueco. Esto quiere decir que el desbaste se da del centro hacia las paredes de la probeta circular, siendo las secciones más delgadas aquellas más cercanas al hueco central. Esto es importante, porque para que se dé la transmisión de electrones a través de una muestra metálica, los espesores deben ser muy delgados, generalmente menores de 100 nm (Zimmermann, 2013). Esto debe tomarse en cuenta, ya que los defectos o alteraciones nanométricas que se presenten en el material deben estar en este rango de distancia.

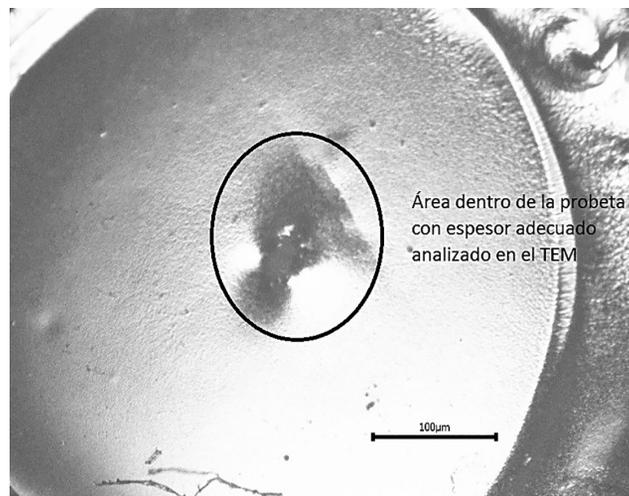


Figura 5. Micrografía de probeta TEM preparada en Siegen, Alemania.

En este trabajo se observó que la preparación de las probetas TEM requiere mucha pericia y equipos avanzados, debido a lo que se discutió anteriormente. Por eso, una gran parte del éxito en el análisis y la calidad de imagen TEM se debe a la preparación de las probetas.

Los resultados de las probetas estudiadas en el TEM se presentan en este trabajo de la siguiente manera: primero, las muestras sin ningún tratamiento térmico ni deformación por fatiga; después, los resultados de las muestras con tratamientos térmicos; seguidamente, se describen los resultados de las probetas con deformación mecánica por medio de fatiga de alta frecuencia y, por último, se dan a conocer los resultados de las probetas con tratamientos térmicos y luego deformadas mecánicamente por medio de fatiga de alta frecuencia.

Nimonic 80A sin tratamiento ni deformación mecánica

La Figura 6 muestra la nanoestructura de la muestra de Nimonic 80A. En ella se logra identificar una estructura libre de cualquier deformación de la microestructura. Las líneas que se logran identificar corresponden a los bordes de granos.

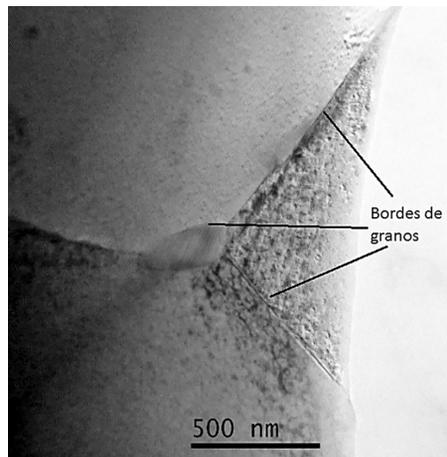


Figura 6. Nanoestructura de Nimonic 80A sin tratamiento térmico ni deformación mecánica.

Un aspecto interesante en la Figura 6 es el hecho de que se logren identificar diferentes granos en distintas posiciones volumétricas. Hay que recordar que los granos en un metal no son geometrías planas sino volumétricas (González, 2009). Esto significa que el corte realizado en esta probeta se hizo de manera que pudiera conservar la evidencia de los granos sin deformarlos durante el proceso.

Las estructuras de los materiales analizados en estado “de recepción” (sin ningún tratamiento térmico o deformación mecánica) son un gran apoyo en la identificación de los resultados obtenidos en las otras probetas. Esto se debe a que brindan una base de comparación y así se pueden observar más claramente los cambios sufridos por este material luego de los tratamientos térmicos y la deformación mecánica aplicada.

Nimonic 80A después de varios procesos de envejecimiento

La Figura 7 muestra la aleación Nimonic 80A después de un envejecimiento peak-aged a 800°C aplicado por 7 horas (a), 50 horas (b), 100 horas (c) y 299 horas (d). En las nanografías se puede apreciar que, luego del envejecimiento, aparecen precipitaciones de diferentes formas, que aumentan, variando la cantidad de estas en las muestras en función del tiempo de permanencia.

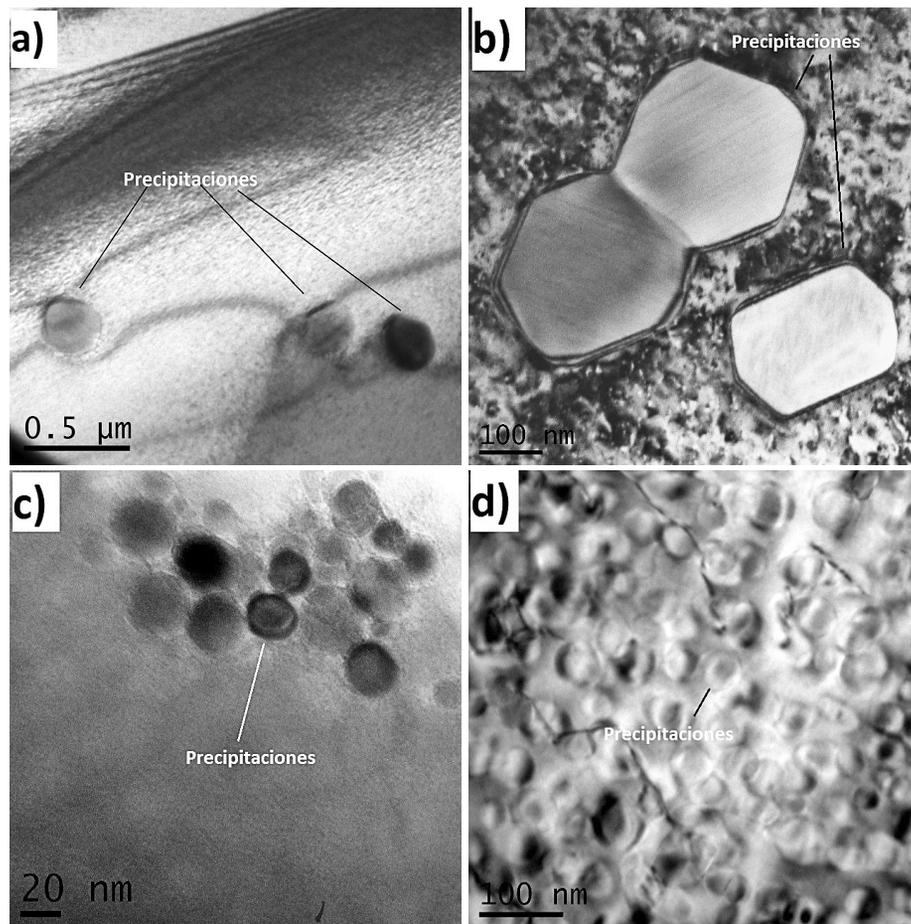


Figura 7. Nimonic 80A envejecido por peak-aged a 800°C por: a) 7 horas, b) 50 horas, c) 100 horas, d) 299 horas.

La morfología más común de las precipitaciones encontradas son las correspondientes a los llamados anillos de Orowan, formados por los mecanismos de Orowan (Reppich et al., 1982). Estos anillos se encontraron en las probetas envejecidas a 7, 100 y 299 horas. La probeta envejecida a 50 horas presenta una excepción, al evidenciarse la formación de precipitaciones con una morfología más equidistante y regular.

Otro aspecto importante de destacar es que la densidad de precipitaciones por unidad de área aumenta conforme se incrementa el tiempo de envejecimiento, así como también el tamaño unitario de cada precipitación.

Las precipitaciones y su densidad en una microestructura influirán en la dureza y resistencia de la aleación envejecida (Reppich et al., 1982). Por lo tanto, en este proyecto se buscó poder influir en la resistencia a la fatiga de la aleación Nimonic 80A por medio de la creación de precipitaciones en su microestructura. Esto tuvo que ser revisado y analizado tomando en cuenta el mecanismo de deformación mecánica que se obtuvo durante los ensayos de fatiga. Con esta información, y analizando el mecanismo de formación de precipitaciones obtenidas durante el envejecimiento, se busca conocer la influencia de las precipitaciones sobre la deformación mecánica sufrida en la aleación.

Nimonic 80A después de la deformación mecánica por medio de fatiga

Las probetas de Nimonic 80A sometidas a cargas de fatiga de alta frecuencia (dinámicas) evidencian la formación de dislocaciones (ver Fig. 8). Por medio del ensayo de fatiga se produce

una deformación plástica en la probeta, que es lo que genera las dislocaciones. Las probetas analizadas muestran básicamente dos tipos de dislocaciones: las que se presentan en la Figura 8a y que evidencian una mezcla de dislocaciones de deslizamiento aleatorias y distribuidas por todo un plano cristalográfico; y las de la Figura 8b, que corresponden a dislocaciones de bandas (*slip-band*). Estas últimas son más ordenadas y siguen un patrón definido por los planos cristalográficos en los cuales se forman.

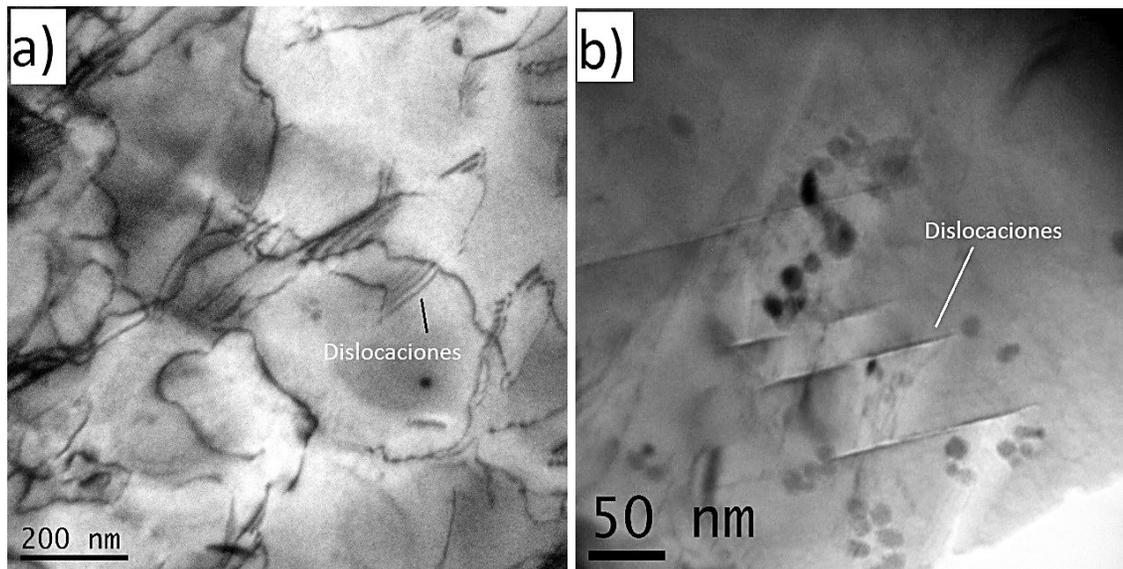


Figura 8. Nimonic 80A luego de aplicar deformación mecánica por medio de fatiga de alta frecuencia: a) dislocaciones de deslizamiento aleatorias, b) *slip-bands*.

Nimonic 80A con envejecimientos y deformación mecánica por medio de fatiga

La Figura 9 muestra los resultados de las probetas de Nimonic 80A tratadas térmicamente por medio de envejecimiento peak-aged y luego de probarlas por medio de fatiga de alta frecuencia. El mecanismo predominante de formación de dislocaciones es el *slip-bands* y esto se puede apreciar en todas las probetas analizadas. En la Figura 9a se observa como estas bandas de dislocaciones se mueven hasta llegar al borde de grano y se acumulan “apilándose”, siguiendo la dirección en la que se aplicó la carga y la dirección del plano cristalográfico que define el grano en donde se encuentran estas dislocaciones. En la Figura 9b se observa que la densidad de dislocaciones no es tan alta como en la probeta con envejecimiento de solo 7 horas. Esto puede deberse a que la carga y el tiempo de deformación fueron probablemente menores que en la Figura 9a. Las figuras 9c y 9d muestran que las precipitaciones que se encontraron dentro de las nanoestructuras interfieren dentro de la “ruta” de movimiento de las dislocaciones.

En forma general, en este estudio se encontró que las precipitaciones afectan la trayectoria del movimiento de las dislocaciones en los diferentes planos cristalinos, provocando una distorsión en el movimiento de la microestructura. La Figura 9 muestra el efecto de las precipitaciones en el movimiento de las dislocaciones en un plano cristalográfico determinado, que está presente en un grano de la aleación Nimonic 80A.

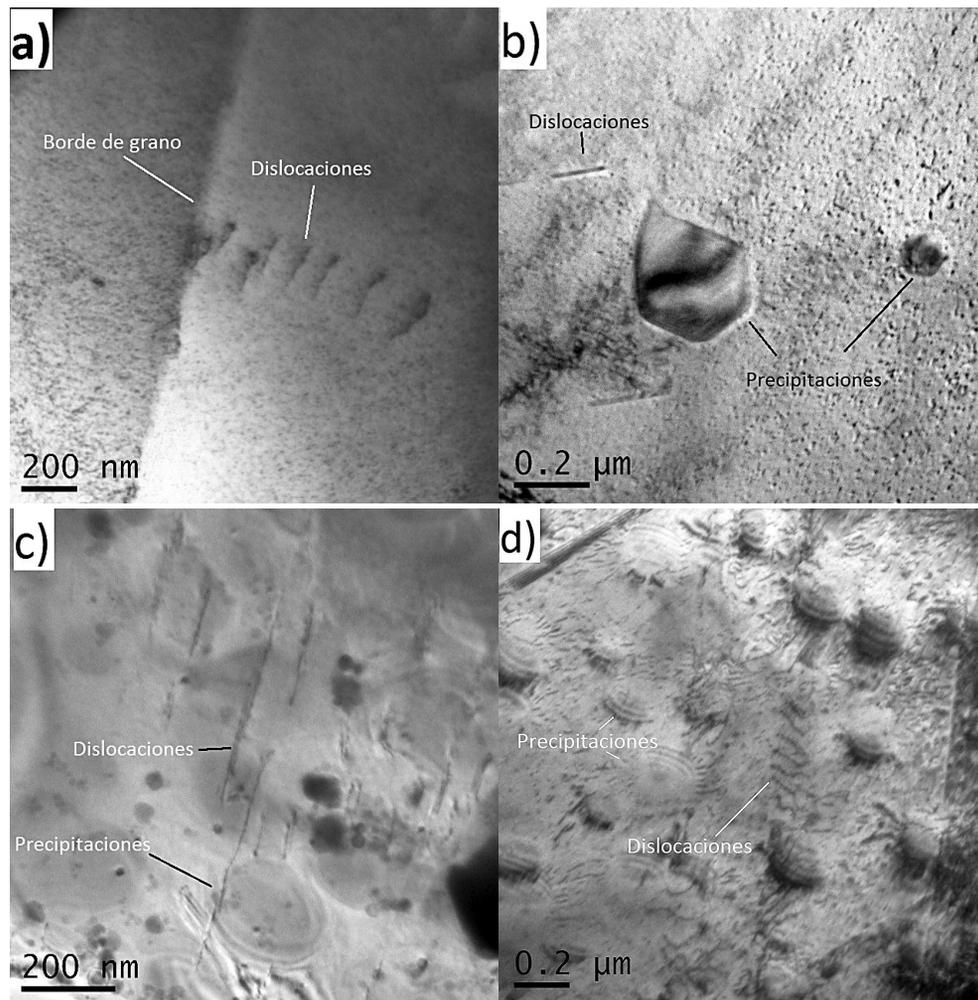


Figura 9. Nimonic 80A envejecido por peak-aged a 800°C por medio de fatiga de alta frecuencia por: a) 7 horas, b) 50 horas, c) 100 horas, d) 299 horas y luego de aplicar deformación mecánica.

Conclusiones

El Microscopio de Transmisión Electrónica JEOL JEM-2100 del TEC permite la identificación de defectos y alteraciones nanoestructurales en materiales probados por medio de deformaciones mecánicas. La calidad de la imagen y la versatilidad de este equipo son muy altas y el proyecto que se llevó a cabo y cuyos resultados se presentan aquí constituye un paso importante para efectuar investigaciones aplicadas de alto nivel en Costa Rica. Las muestras probadas mecánicamente y preparadas en Alemania para su observación en el TEM del TEC mostraron resultados técnicos muy interesantes. Se logró determinar un patrón de crecimiento y aumento en la cantidad de precipitaciones con respecto al incremento del tiempo de envejecimiento de las probetas de Nimonic 80A. Después de los ensayos mecánicos, las probetas mostraron como las dislocaciones afectan las nanoestructuras, lo que conlleva alteraciones de las propiedades de estos materiales. Las probetas tratadas en un inicio térmicamente y luego deformadas mecánicamente presentan una evidencia de la influencia positiva de las precipitaciones en el mecanismo de formación, crecimiento y movimiento de las dislocaciones en la microestructura de los materiales estudiados en este proyecto.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo económico de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del TEC, a través del proyecto 5401-1490-2101. Asimismo, al Dr. Stoecker y la Universidad de Siegen, por la cooperación y el envío de las probetas TEM.

Se agradece en especial al Ing. Luis Fernando Alvarado Marchena, por su tiempo y dedicación para la operación del TEM.

Bibliografía

- A/S, Struers. Tenupol-5. (2010). *Automatic electrolytic thinning of specimens for transmission electron microscopy*. Obtenido de www.struers.com
- Bombac, D., Fazarinc, M., Kugler, G. & Spajic, S. (2008). Microstructure development of Nimonic 80A superalloy during hot deformation. *RMZ-Materials and Gioenvironment*, 55(3), 319-328.
- González, V.Á.G. (2009). *Geometría de Cristales en la Cinética de Cristalización o Solidificación*. México: Academia de Ingeniería.
- Kolluri, K. & Demkowicz, M.J. (2010). Dislocation mechanism of interface point defect migration. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 82(19).
- Murr, L.E., Martinez, E., Gaytan, S.M., Ramirez, D.a., MacHado, B.I., Shindo, P.W. & Wicker, R.B. (2011). Microstructural architecture, microstructures, and mechanical properties for a nickel-base superalloy fabricated by electron beam melting. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 42(11), 3491-3508.
- Reppich, B., Schepp, P., & Wehner, G. (1982). Some new aspects concerning particle hardening mechanisms in γ' precipitating nickel-base alloys-II. Experiments. *Acta Metallurgica*.
- Stoecker, C. (2013). *Einfluss des Versetzungsgleitverhaltens und der Vorgeschichteabhängigkeit auf das Ermüdungsverhalten von Nickelbasis-Superlegierungen im VHCF-Bereich*. (L. für M. und Werkstoffprüfung, Ed.). Siegen, Germany: Siegener werkstoffkundliche Berichte.
- Williams, D.B. & Carter, C.B. (2009). *Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science*. *Materials Science*. Vols. V1-V4.
- Zimmermann, M., Stoecker, C. & Christ, H.J. (2013). High temperature fatigue of nickel-based superalloys during high frequency testing. *Procedia Engineering*, 55, 645-649.

Modelación del proceso de secado de productos agroindustriales

Modeling of the drying process of agro industrial products

Bruno Chinè-Polito¹

Fecha de recepción: 25 de mayo del 2015

Fecha de aprobación: 18 de setiembre del 2015

Chinè-Polito, B. Modelación del proceso de secado de productos agroindustriales. *Tecnología en Marcha*. Vol. 29, Nº 1, Enero-Marzo. Pág 62-73.

¹ PhD, MSc. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ciencia e Ingeniería de Materiales. Teléfono: (506)2550-2373. Correo electrónico: bchine@itcr.ac.cr

Palabras clave

Modelación; secado; transferencia de calor y masa; métodos computacionales.

Resumen

El secado es uno de los métodos más importantes para la preservación de los bienes agrícolas, tales como granos de cereales, café, productos comestibles y la madera. El comportamiento del material durante el secado depende de la transferencia de calor y masa en el producto sometido al proceso. En este trabajo se presenta un modelo físico y computacional del proceso de secado basado en los fenómenos de transporte de calor y humedad en medios porosos, a partir de las ecuaciones de Fourier para la conducción del calor y de Fick para la transferencia de masa. El modelo considera los trabajos de Luikov (1975) y Sokhansanj y Bruce (1987), este último con acoplamiento del transporte difusivo de masa y calor a través de una condición de borde en la superficie del grano. Las ecuaciones del modelo se desarrollan en computadora usando el método de volúmenes finitos, y las soluciones numéricas se comparan con datos experimentales y numéricos disponibles en la literatura para el caso del secado de los granos de soya. Los valores de los campos de humedad y temperatura en el interior del grano, calculados con un esquema implícito de volúmenes finitos, concuerdan con los de otros autores. En el caso del cálculo de los valores de temperatura usando las ecuaciones de Sokhansanj y Bruce, los resultados numéricos en los tiempos iniciales del proceso de secado difieren de los valores calculados con el modelo de Luikov, debido a la modelación de la evaporación de la humedad en el borde del grano.

Keywords

Modeling; drying; heat and mass transfer; computational methods.

Abstract

Drying is one of the most fundamental methods to preserve agricultural products, such as cereal beans, coffee, food and wood. The behavior of the material during drying operations depends on heat and mass transfer mechanisms interesting the product under drying processes. In this work we give a physical and computational model of the drying process, based on heat and moisture transport phenomena in porous media. The model is obtained from the Fourier's law of heat conduction and Fick's law of mass transfer and it is based on Luikov's (1975) and Sokhansanj and Bruce's (1987) works, the latter coupling heat and mass transport by means of a boundary condition on the grain surface. The equations are computationally developed using the finite volume method and the numerical solutions are compared with experimental and numerical literature data for soybean grains drying. The values of the moisture and temperature fields inside the grain, calculated by using an implicit finite volume scheme, agree with the literature data. However, the numerical results of temperature obtained by solving the Sokhansanj and Bruce's equations differ from the values computed with the Luikov's model, due to the modeling of moisture evaporation mechanisms on the grain boundaries.

Introducción

El secado es uno de los métodos más importantes para la preservación de los productos agrícolas, como, por ejemplo, los granos de cereales, café, los productos comestibles y la madera. El comportamiento del material durante el secado depende de la transferencia de

calor y masa en el producto sometido a este proceso. Por lo tanto, es fundamental conocer la distribución de temperatura y humedad en el sistema cuando se requiere diseñar procesos y equipos, así como también para controlar la calidad y la selección de las operaciones de manejo y almacenamiento de estos productos. Para el proceso físico del secado industrial de granos, o en general de elementos granulares, se consideran dos fenómenos fundamentales: i) la humedad del grano se evapora y sucesivamente se difunde fuera del *kernel* o del conjunto de granos; ii) la energía necesaria para la evaporación de la humedad fluye en dirección opuesta a la difusión y causa que la masa húmeda cambie del estado líquido al gaseoso. La resultante de estos dos procesos brinda así las características cinéticas del proceso de secado; los dos fenómenos de transporte que ocurren son la transferencia de calor y el transporte de masa. Las fuerzas motoras que causan el transporte y aquellas que provocan la resistencia a este movimiento determinan la velocidad del secado. Normalmente, en el proceso de secado se puede asumir que los granos forman un medio poroso con los poros con comportamiento capilar, es decir, el potencial capilar es más grande que el potencial gravitacional, pudiéndose despreciar así las fuerzas gravitacionales.

Para el fenómeno de transporte de calor y masa en un medio poroso capilar, Luikov (1975) propone un modelo fenomenológico basado en un sistema de ecuaciones de difusión de calor y masa acopladas, que considera los efectos del gradiente de temperatura sobre el transporte de la masa húmeda. Sanderson (1986), en cambio, considera un modelo de un lecho de material granular poroso e higroscópico con un flujo de aire uniforme y en el lecho tres zonas distintas con temperatura y humedad relativa constantes. Un modelo más simple es el de secado de granos en capas delgadas, con espesores de capa del orden del tamaño del grano, de tal manera que todos los granos son sujetos a las mismas condiciones de secado por aire. En este caso, un trabajo muy relevante se debe a Sokhansanj y Bruce (1987), que usan las ecuaciones de transporte difusivo y una condición de borde que acopla el contenido de humedad y la temperatura.

Para la modelación computacional del proceso de secado existen varios trabajos científicos publicados (véase, por ejemplo, la revisión de Parry, 1985). Aplicando el modelo de Luikov, Liu y Cheng (1991) describen el secado de un bloque de madera usando la función *potencial de humedad* U y ecuaciones diferenciales en una sola variable. Irudayaraj et al. (1992) usan dos modelos diferentes, el de Luikov y el de Sokhansanj y Bruce e incorporan algunas correlaciones para representar el cambio de algunos parámetros físicos en función de la temperatura T y del contenido de humedad M . Comparando los resultados numéricos de T y M con valores experimentales y computacionales de literatura para el proceso de secado de soya, maíz y cebada, los autores concluyen que las predicciones del modelo de Sokhansanj y Bruce son más eficaces que las del modelo de Luikov. Yang et al. (2002) aplican el método de los elementos finitos para predecir los valores de M en el interior de granos de arroz. El modelo de Yang et al. analiza el calor perdido por la evaporación del agua en la superficie de los granos y usa una ecuación similar a la de Sokhansanj y Bruce, incluyendo otras dos ecuaciones diferenciales de transporte.

Otra solución analítica del modelo de Luikov la obtienen los investigadores Kulasiri y Woodhead (2005), que estudian el proceso de secado de la madera de la especie *Pinus radiata*, usando una técnica de resolución para el caso unidimensional, basada en el método de los valores propios y funciones propias. Para el secado de granos de café pergamino, Ciro-Velásquez et al. (2010) utilizan el modelo de Sokhansanj y Bruce y aplican el método de volúmenes finitos para el transporte de masa y calor, en régimen transitorio, en un grano esférico de radio equivalente. Los autores encuentran que las predicciones de humedad del modelo son muy sensibles al coeficiente de masa convectivo, que es del orden de 10^{-7} m/s. Khatchatourian (2012) aplica el modelo de Luikov al secado de granos de soya en capas delgadas y considera

la variación radial del coeficiente de transporte, usando dos coeficientes de difusión distintos para dos regiones esféricas del grano. Silva et al. (2013) extienden las ecuaciones de Luikov mediante una generalización de las ecuaciones de transporte difusivo y consideran un proceso no Markoviano con difusión anómala, obteniendo soluciones analíticas de M y T para un caso unidimensional. Más recientemente, para estudiar la eficiencia energética del proceso de secado, Golmohammadi et al. (2015) desarrollan un modelo basado en la ley de difusión de Fick para calcular la distribución de humedad en granos esféricos de arroz con cáscara.

Un aspecto de la modelación del proceso de secado se relaciona con los valores de los parámetros físicos de las ecuaciones de transporte. En el caso de la transferencia difusiva de calor en arroz, Yang et al. (2002) usan una correlación cuadrática de la conductividad térmica k como función de M . Irudayaraj et al. (1992) emplean valores iguales respectivamente a 0.10 W/(m K) para la soya, 0.15÷0.24 W/(m K) para el maíz y una función lineal creciente con M en el caso de la cebada, siendo k siempre inferior a 1 W/(m K). Para el coeficiente de transferencia de calor convectivo h , Irudayaraj et al. usan valores iguales respectivamente a 60 W/(m² K) para la soya, 56.7 W/(m² K) para el maíz y en el caso de la cebada un valor de 110 W/(m² K). Por otro lado, Yang et al. (2002) usan una correlación donde h se relaciona a la velocidad de la corriente de aire mediante una función de potencias.

Una propiedad que depende de k y del calor específico c es el coeficiente de difusión térmica o difusividad térmica a , el cual es pequeño en estos tipos de productos. Por ejemplo, usando densidades ρ para soya y maíz de 1180 kg/m³ y 1275 kg/m³, respectivamente, se obtendrán valores de a del orden de 10⁻⁸ m²/s. En cambio, los fenómenos asociados a la transferencia de masa son controlados por el coeficiente de difusión de masa del material a_m que depende fuertemente de T . Existen diversas ecuaciones que representan esta dependencia, entre otras la de Arrhenius y la de Stokes- Einstein. En el caso del secado de trigo, Sokhansanj y Cenkowsky (1987) brindan valores de a_m mediante una función de T y M donde a_m aumenta con T y presenta un valor máximo con un valor determinado de M , variando entre 5x10⁻¹² m²/s y 50x10⁻¹² m²/s. En el caso del secado de arroz, Yang et al. (2002) usan una expresión tipo Arrhenius, con coeficientes diferentes para las regiones del casco, salvado y endospermo; lo mismo que Golmohammadi et al. (2015) para el secado de arroz con cáscara. Para la transferencia de masa convectiva, Yang et al. emplean un coeficiente de transferencia de masa convectivo h_m como función tipo potencia de la velocidad de la corriente de aire, y Ciro-Velásquez et al. (2010) consideran un valor constante. Finalmente, otro parámetro de los modelos del proceso de secado es el coeficiente de gradiente térmico δ , que se define como la relación entre el gradiente ∇M y el gradiente ∇T en estado estacionario y en ausencia de transferencia de masa. Como ejemplo para el secado de granos de cereal, Irudayaraj et al. (1992) usan valores de δ en el rango 0.01 ÷ 0.03 [1/K].

Modelación físico-matemática del proceso de secado de granos

Las ecuaciones del modelo físico matemático del presente trabajo se basan en la teoría del proceso de secado desarrollada por el ruso Luikov (1975) y en el trabajo de Sokhansanj y Bruce (1987). En el trabajo pionero de Luikov las hipótesis consideradas son:

- el agua (en su fase líquida y vapor) y el aire llenan completamente los poros del cuerpo capilar poroso;
- el flujo de masa en el cuerpo es extremadamente lento, así que la temperatura de los fluidos intersticiales y de la matriz porosa son localmente iguales, es decir, existe un equilibrio termodinámico;
- en la transición de fase participan solamente el líquido y el vapor;

- no hay reacciones químicas en el medio;
- la masa de aire y la masa de vapor de agua son despreciables con respecto a la masa de agua líquida dentro de los poros;
- las variaciones de volumen y porosidad del cuerpo provocadas por cambios en la humedad son despreciables;
- el medio se considera isotrópico.

De manera sucesiva se considera un proceso difusivo puro y difusión de humedad, debido simultáneamente a los gradientes de humedad y temperatura, con flujo de calor q [W/m²] y flujo de masa de la fase i J_i [kg/(m² s)], donde $i = 0$ se refiere al cuerpo seco, $i = 1$ al vapor de agua e $i = 2$ al agua líquida. Luego las ecuaciones del transporte de energía y masa son:

$$\rho_0 c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \varepsilon \lambda \rho_0 \frac{\partial M}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (a_m \nabla M + a_m \delta \nabla T) \quad (2)$$

donde ρ_0 es la densidad del cuerpo seco, T [°C] la temperatura y M [kg/kg cuerpo seco] es el contenido de masa (humedad), definido como la concentración de agua relativa:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^2 m_i}{m_0} = \sum_{i=1}^2 M_i \quad (3)$$

Aquí m_i [kg] y M_i [kg/kg cuerpo seco] son, respectivamente, la masa y el contenido de masa de la fase i . Con λ [J/kg] se expresa el calor latente de evaporación y con c [J/kg °C] el calor específico reducido:

$$c = c_0 + \sum_{i=1}^2 c_i M_i \quad (4)$$

donde c_i es el calor específico de la fase i . Finalmente, ε representa la cantidad de cambio de fase ($0 \leq \varepsilon \leq 1$), siendo que: $\varepsilon = 0$ implica que no ocurre cambio de fase en el medio poroso, la humedad se transporta como líquido y el cambio de fase se realiza en la superficie del medio poroso; $\varepsilon = 1$ significa que todo el líquido cambia de fase y la humedad se transporta como vapor en el medio. Las ecuaciones 1 y 2, con apropiadas condiciones iniciales y de borde, constituyen el modelo matemático de Luikov para el análisis de la transferencia simultánea no estacionaria de masa y calor en un medio poroso de volumen Ω y frontera $\partial\Omega$. Si se usa el potencial de humedad U [°M], siendo $M = c_m U$, se tiene:

$$\rho_0 c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \left[\left(k + \frac{\delta \varepsilon \lambda D}{c_m} \right) \nabla T + \left(\frac{\varepsilon \lambda D}{c_m} \right) \nabla U \right] \quad (5)$$

$$\rho_0 \frac{\partial U}{\partial t} = \nabla \cdot \left[\left(\frac{D \delta}{c_m} \right) \nabla T + \left(\frac{D}{c_m} \right) \nabla U \right] \quad (6)$$

en términos de T y de U , donde c_m [kg/kg cuerpo seco] es la capacidad de humedad específica y D [kg/(m s)] es la conductividad de la humedad en el medio. Los modelos anteriores se completan con las siguientes condiciones iniciales y de borde:

$$T = T_0, U = U_0 \text{ para } t = 0 \text{ en } \Omega \quad (7)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} + h (T_\infty - T) + (1 - \varepsilon) \frac{\lambda h_m}{c_m} (U_\infty - U) = 0 \text{ en } \partial\Omega, \text{ todo } t \quad (8)$$

$$-D \frac{\partial U}{\partial r} - D\delta \frac{\partial T}{\partial r} + h_m (U_\infty - U) = 0 \text{ en } \partial\Omega, \text{ todo } t \quad (9)$$

Aquí T_∞ y U_∞ representan la temperatura constante y el potencial constante del ambiente externo, respectivamente. Si las difusiones de calor y masa son desacopladas, las ecuaciones 1 y 2 se simplifican en la ley de Fourier y la segunda ley de Fick, es decir:

$$\rho_0 c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (10)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (a_m \nabla M) \quad (11)$$

Las condiciones iniciales para T y M y las condiciones de borde para los flujos de masa y calor en la frontera $\partial\Omega$ de dirección normal n son ahora:

$$T = T_0, M = M_0 \text{ para } t = 0 \text{ en } \Omega \quad (12)$$

$$-a_m \frac{\partial M}{\partial n} = h_m (M - M_\infty) \text{ en } \partial\Omega, \text{ todo } t \quad (13)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h (T - T_\infty) \text{ en } \partial\Omega, \text{ todo } t \quad (14)$$

El modelo del secado propuesto en este trabajo incorpora además las ecuaciones de Sokhansanj y Bruce, representadas por las ecuaciones 10 y 11, con mecanismos de transporte acoplados mediante una condición de borde en la ecuación de Fourier. Con este propósito, se introduce el flujo de calor necesario para la evaporación del agua en la superficie de grano o conjunto de granos de volumen V y área exterior A . Luego, si c_v es el calor específico a volumen constante, la condición de balance de energía térmica en la frontera es:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h (T - T_\infty) + \rho_0 \frac{V}{A} [\lambda + c_v (T_\infty - T)] \frac{\partial M}{\partial t} \text{ en } \partial\Omega, \text{ todo } t \quad (15)$$

Modelo computacional

En el trabajo de modelación computacional se consideran las ecuaciones diferenciales de Luikov (ecuaciones 5-9) definidas como *modelo 1* y las de Sokhansanj y Bruce (ecuaciones 10-13 y 15) que representan el *modelo 2*. Para la solución numérica se usa el método de volúmenes finitos, técnica computacional muy robusta y de alto nivel. Como las ecuaciones de

ambos modelos describen el fenómeno de difusión en ausencia de transporte convectivo, la ecuación diferencial general de transporte en coordenadas cartesianas x, y, z es:

$$\frac{\partial(\alpha\phi)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial(\phi)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial(\phi)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial(\phi)}{\partial z} \right) + S \quad (16)$$

donde ϕ es la variable dependiente, α y Γ magnitudes que pueden variar en el tiempo y en el espacio y S un término fuente o sumidero. Dividiendo la región de cálculo Ω en elementos discretos de volúmenes V (figura 1), la ecuación 16 se integra en el tiempo y en el espacio, obteniéndose:

$$\int_{V,t} \frac{\partial(\alpha\phi)}{\partial t} dVdt = \int_{V,t} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial(\phi)}{\partial x} \right) dVdt + \int_{V,t} \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial(\phi)}{\partial y} \right) dVdt + \int_{V,t} \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial(\phi)}{\partial z} \right) dVdt + \int_{V,t} S dVdt \quad (17)$$

Definiendo P el punto central del volumen finito y e, w, f, b, n y s las intersecciones del volumen, respectivamente con los ejes x, y y z como se indica en figura 1, la integración de la ecuación 17 en el volumen finito V y en el intervalo de tiempo Δt brinda:

$$\begin{aligned} (\alpha\phi|_{t+\Delta t} - \alpha\phi|_t) \Delta x \Delta y \Delta z &= \int_t^{t+\Delta t} \Delta y \Delta z \left(\left(\Gamma \frac{\partial(\phi)}{\partial x} \right) \Big|_e - \left(\Gamma \frac{\partial(\phi)}{\partial x} \right) \Big|_w \right) dt + \\ \int_t^{t+\Delta t} \Delta x \Delta z \left(\left(\Gamma \frac{\partial(\phi)}{\partial y} \right) \Big|_b - \left(\Gamma \frac{\partial(\phi)}{\partial y} \right) \Big|_f \right) dt &+ \int_t^{t+\Delta t} \Delta x \Delta y \left(\left(\Gamma \frac{\partial(\phi)}{\partial z} \right) \Big|_n - \left(\Gamma \frac{\partial(\phi)}{\partial z} \right) \Big|_s \right) dt + \int_t^{t+\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z S dt \end{aligned} \quad (18)$$

con $\Delta x, \Delta y$ y Δz las longitudes del volumen finito respectivamente en las direcciones x, y y z . A partir de la ecuación 18, usando funciones de interpolación lineal, propiedades físicas constantes en el grano y formulación totalmente implícita para la integración en el tiempo, se obtiene una ecuación algebraica lineal para cada volumen finito de la región de cálculo Ω . Los volúmenes finitos de frontera, es decir, los que forman $\partial\Omega$, introducen las condiciones de borde, a través de un valor puntual ϕ_p o la derivada $(\partial\phi/\partial n)_e$. Considerando un grano genérico con geometría esférica (figura 2) de radio R , las derivadas de las ecuaciones diferenciales de tipo difusivo son nulas en las direcciones ξ y φ y las ecuaciones diferenciales presentan términos que son función solo de la coordenada r . Luego, existiendo simetría radial, el problema se estudia para $0 \leq r \leq R$. Adicionalmente a las condiciones de borde en la frontera del grano, se introducen las condiciones en $r = 0$, iguales en ambos modelos, siendo que por simetría se tiene:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial M}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial r} = 0, \quad \text{en } r = 0, \quad \text{todo } t \quad (19)$$

Dividiendo R en n intervalos de longitud Δr se obtienen n volúmenes finitos de centro P_p , como se indica en figura 3. De manera similar, para integrar las ecuaciones en el dominio de tiempo t , se consideran K subintervalos de magnitud Δt . Finalmente, los algoritmos del modelo computacional anterior se desarrollan en lenguaje de programación Fortran 95 (Lahey, 2002) y se obtienen las soluciones numéricas de las ecuaciones diferenciales del proceso de secado.

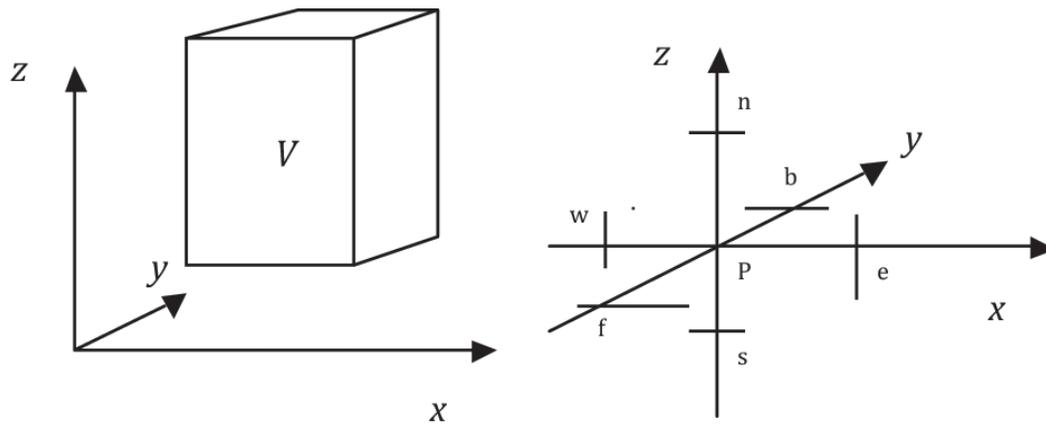


Figura 1. Volumen finito centrado en P e intersecciones con los ejes x, y, z.

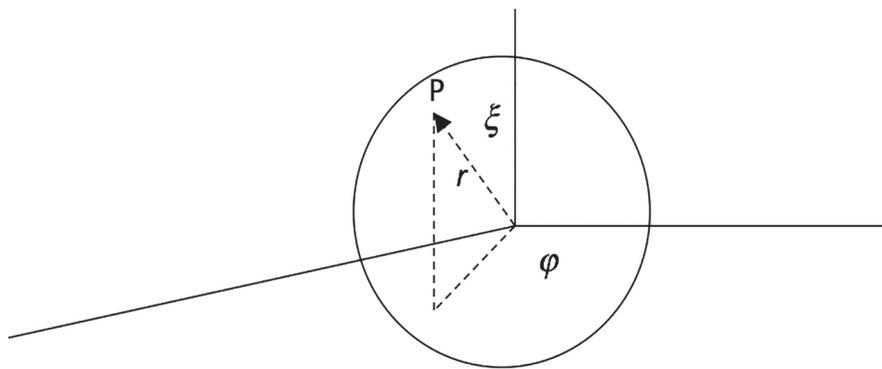


Figura 2. Sistema de coordenadas esféricas usado en la modelación.

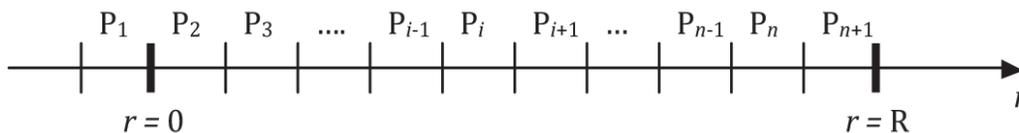


Figura 3. Volúmenes finitos en el grano.

Resultados numéricos y análisis

A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones numéricas efectuadas en el caso de secado industrial de granos de soya, para los cuales se disponía de datos de literatura (cuadro 1, Irudayaraj et al., 1992). Los granos se consideran esféricos de radio $R = 3.5$ mm, la malla de cálculo espacial consta de 10 volúmenes finitos iguales de longitud $\Delta r = 0.35$ mm y la integración en el tiempo se realiza usando un intervalo $\Delta t = 10$ s. En la figura. 4 se muestran los resultados numéricos de humedad M para $r = R/2$, obtenidos con el *modelo 2*. En este caso, el *modelo 1* brinda resultados similares, siendo posible identificar un *periodo de secado con tasa constante* para los tiempos iniciales y un *periodo de secado con tasa cayente* para los tiempos finales. Se observa que después de unos 900 minutos (15 horas), M es muy cercano al

Cuadro 1. Datos de Irudayaraj et al. (1992) usados para la simulación del secado de soya.

ρ [kg/m ³]	1180
c [J/kg K]	1884
k [W/m K]	0.10
δ [1/K]	0.015
ϵ	0.7
λ [J/kg]	2.257×10^6
D [kg/m s]	2.478×10^{-10}
a_m [m ² /s]	7.0×10^{-11}
c_m [kg/kg cuerpo seco]	0.003
h [W/m ² K]	60
h_m [m/s]	0.282×10^{-6}
T_∞ [°C]	35
U_∞ [°M]	36.7
M_∞ [kg/kg cuerpo seco]	0.11
T_0 [°C]	20
U_0 [°M]	110
M_0 [kg/kg cuerpo seco]	0.33
R [m]	3.5×10^{-3}
n	10
Δr [m]	3.5×10^{-4}
Δt [s]	10

valor ambiental de equilibrio $M_\infty = 0.11$. En la misma figura 4 se trazan los valores experimentales del contenido medio de humedad de Overhults et al. (1973) y numéricos de Irudayaraj et al. (1992), en las mismas condiciones simuladas. Se evidencia como estos datos se comparan satisfactoriamente con los valores calculados en este trabajo, con excepción de la región con tasa constante. En la figura 5 se reportan solamente los valores de temperatura T para $r = R/2$ obtenidos con el *modelo 1*, conjuntamente con los valores de temperatura media obtenidos por Irudayaraj et al. mediante los mismos modelos. Se observa que T aumenta rápidamente del valor inicial de 20 °C hasta el valor de equilibrio T_∞ de 35 °C, siguiendo un patrón similar al modelo 1 de Irudayaraj et al. En el caso de las simulaciones del *modelo 2*, que no se trazan, aunque la temperatura del grano converge velozmente a T_∞ , los resultados brindan valores de temperaturas muy bajos en los tiempos iniciales del proceso de secado. Esto se debe al acoplamiento de la difusión de masa y energía dado por la ecuación 15, donde en caso de fuerte evaporación se requiere que el calor necesario sea suplido por el mismo grano, disminuyendo el valor de T . En la figura 6 se proporciona el valor de M después de 960 minutos (16 horas) en el interior del grano para el caso del modelo 1, siendo que el modelo 2 arroja resultados muy

similares. El valor de M en el centro del grano ($r=0$) es el mayor, aproximadamente igual a 0.140 kg/kg cuerpo seco, mientras que para radios mayores M disminuye hasta alcanzar un valor en la periferia ($r=R$) próximo al valor ambiental M_∞ de 0.11 kg/kg cuerpo seco. Finalmente, en la figura 7 se presentan los valores de temperatura en el interior del grano para el caso del *modelo 2*, para un tiempo de 960 minutos, donde se evidencia que todo el grano está prácticamente en equilibrio con el aire a 35 °C.

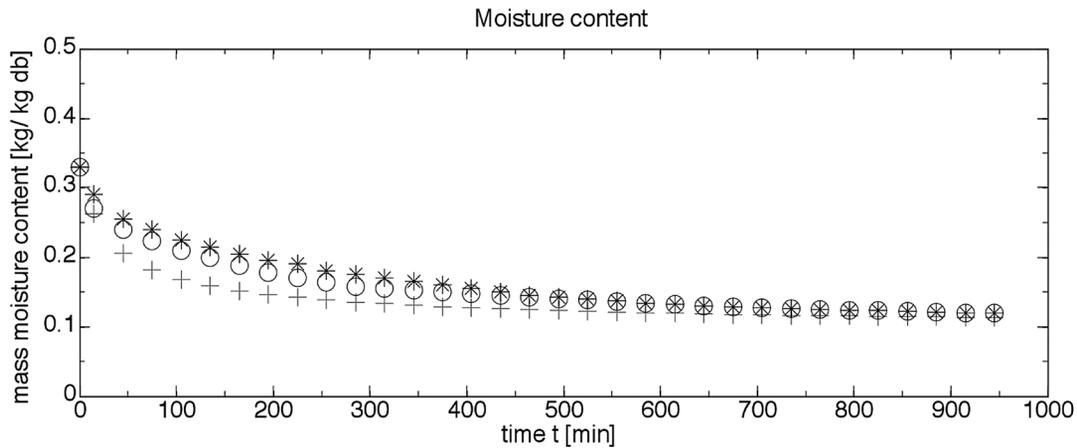


Figura 4. Resultados numéricos de M para $r = R/2$ usando el *modelo 2*, comparados con datos experimentales y otros resultados numéricos del contenido medio de humedad (+ *modelo 2*, o datos experimentales de Overhults et al. (1973), * datos numéricos de Irudayaraj et al. (1992).

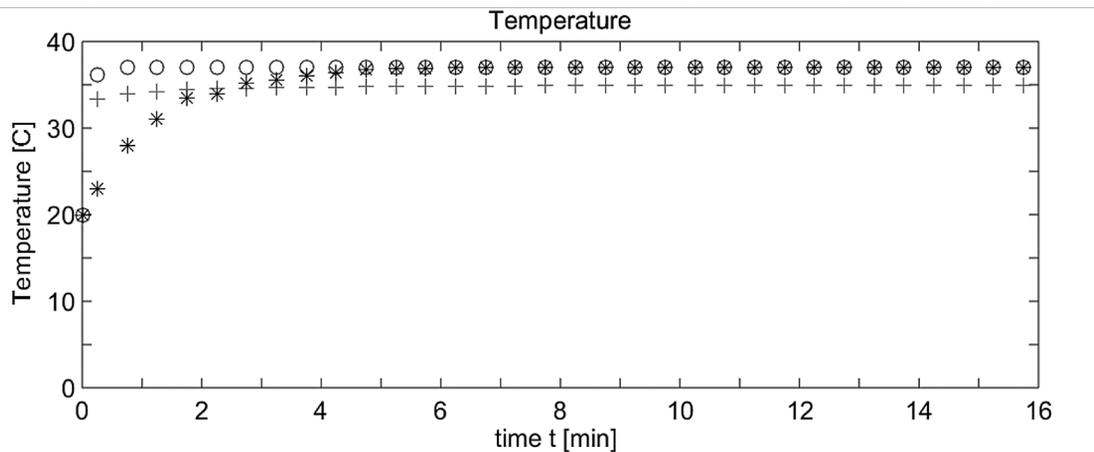


Figura 5. Resultados numéricos de T para $r = R/2$ usando el *modelo 1*, comparados con otros resultados numéricos de la temperatura media (+ *modelo 1*, o *modelo 1* de Irudayaraj et al. (1992), * *modelo 2* de Irudayaraj et al. (1992).

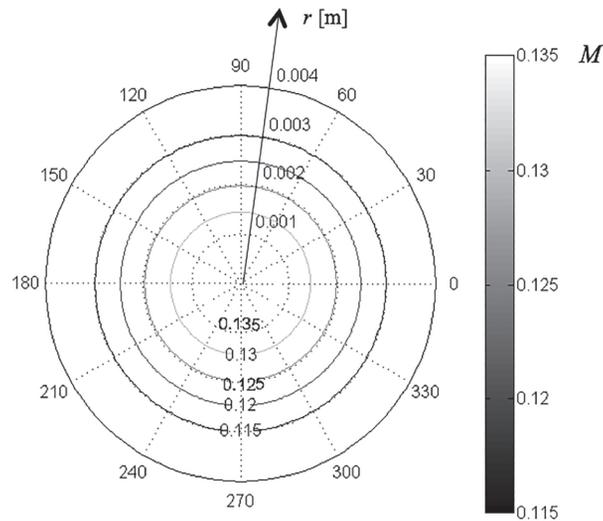


Figura 6. Resultados numéricos de M en el grano después de 16 horas usando el *modelo 1*; los valores se brindan en [kg/kg cuerpo seco] en función del radio r [m] y del ángulo azimutal [grados].

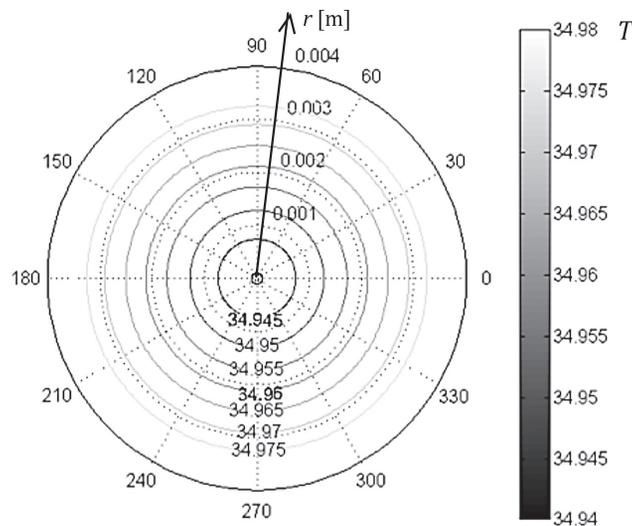


Figura 7. Resultados numéricos de T en el grano después de 16 horas usando el *modelo 2*; los valores se brindan en $^{\circ}\text{C}$ en función del radio r [m] y del ángulo azimutal [grados].

Conclusiones

Se desarrolló un trabajo de modelación del proceso de secado industrial y una solución computacional en el caso del secado de granos de soya, mediante el método de volúmenes finitos. El modelo se basa en los trabajos del investigador ruso Luikov (1975) en el área de los fenómenos de transporte en medios porosos y de Sokhansanj y Bruce (1987), este último con acoplamiento del transporte difusivo de masa y calor a través de una condición de borde en la superficie del grano. Las soluciones numéricas del modelo computacional se compararon con datos experimentales y numéricos disponibles en la literatura científica, demostrándose que los resultados de los valores de masa y temperatura obtenidos con el método de volúmenes

finitos son satisfactorios, para ambos modelos desarrollados. En el caso de las ecuaciones de Sokhansanj y Bruce, los resultados numéricos de temperatura, en los tiempos iniciales del proceso de secado, se ven influenciados por la modelación de la evaporación de la humedad en el borde del grano.

Agradecimientos

Se agradece a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión y la Escuela de Ciencia e Ingeniería de Materiales del Instituto Tecnológico de Costa Rica, por la colaboración brindada en el marco del proyecto *Estudio de transferencia de masa y calor en procesos de secado de productos agroindustriales*, código 5402-1341-0801.

Bibliografía

- Ciro-Velásquez, H.J., Abud Cano, L.C. & Pérez Alegría, L.R. (2010). Numerical simulation of thin layer coffee drying by control volumes. *Dyna*, 77(163), 270-278.
- Golmohammadi, M., Assar, M., Rajabi-Hamaneh, M. & Hashemi, S.J. (2015). Energy efficiency investigation of intermittent paddy rice dryer: Modeling and experimental study. *Food and Bioprocess Processing*, 94, 275-283.
- Irudayaraj, J., Haghghi, K. & Stroshine, R.L. (1992). Finite elements analysis of drying with application to cereal grains. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 53, 209-229.
- Khatchatourian, O.A. (2012). Experimental study and mathematical model for soya bean drying in thin layer. *Biosystems Engineering*, 113, 54-64.
- Kulasiri, D. & Woodhead, I. (2005). On modelling the drying of porous materials: analytical solution to coupled partial differential equations governing heat and moisture transfer. *Mathematical Problems in Engineering*, 3, 275-291.
- Lahey Computer Systems, Inc. (2002). *Fortran 95 PRO v.5.7*. Incline Village, NV, USA: Lahey Inc.
- Liu, J.Y. & Cheng, S. (1991). Solutions of Luikov equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 34(7), 1747-1754.
- Luikov, A.V. (1975). Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies (review). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 18(1), 1-14.
- Overhults, D.G., White, G.M., Hamilton, H.E. & Ross I.J. (1973). Drying of soybeans with heated air. *Transactions of Am. Soc. for Agricultural Eng.*, 16(1), 112-113.
- Parry, J.L. (1985). Mathematical modelling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying. A review. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 32, 1-29.
- Sanderson, D.B. (1986). *Evaluation of stored grain ecosystems ventilated with near-ambient air*. MSc. Thesis, Dept. Agric. Eng., University of Manitoba, Winnipeg, MB.
- Silva, F.R.G.B., Gonçalves, G., Lenzi, M.K. & Lenzi, E.K. (2013). An extension of the linear Luikov systems equations of heat and mass transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 63, 233-238.
- Sokhansanj, S., Cenkowski, S. & Jayas, D.S. (1987). *Equipment and methods of thin-layer drying*. Winter Meeting of the Am. Soc. for Agricultural Eng., December 15-18, 1987, Chicago, IL, USA.
- Sokhansanj, S. & Bruce, D.M. (1987). *A conduction model to predict grain temperatures in grain drying simulation*. *Transactions of Am. Soc. for Agricultural Eng.*, 30(4), 1181-1184.
- Yang, W., Jia, C.C., Siebenmorgen, T.J., Howell, T.A. & Crossen, A.G. (2002). Intra-kernel moisture response of rice to drying and tempering treatments by finite element simulation. *Transactions of Am. Soc. for Agricultural Eng.*, 45(4), 1037-1044.

Aplicación de Cadenas de Markov en un proceso de producción de plantas *in vitro*

Application of Markov Chain in a production process of *in vitro* plants

Andrés Sánchez-Brenes¹, Carlos Alvarado-Ulloa², Ricardo Solís-Blanco³, Randall Chacón-Cerdas⁴, Humberto Villalta-Solano⁵

Fecha de recepción: 15 de junio del 2015

Fecha de aprobación: 6 de octubre del 2015

Sánchez-Brenes, A; Alvarado-Ulloa, C; Solís-Blanco, R; Chacón-Cerdas, R; Villalta-Solano, H. Aplicación de Cadenas de Markov en un proceso de producción de plantas *in vitro*. *Tecnología en Marcha*. Vol. 29, N° 1, Enero-Marzo. Pág 74-82.

- 1 Ingeniero en Biotecnología. Máster en Sistemas Modernos de Manufactura. Instituto Clodomiro Picado. Universidad de Costa Rica. Teléfono: (506) 2511-7878. Correo electrónico: andres.sanchez_b@ucr.ac.cr
- 2 Ingeniero en Biotecnología. Máster en Sistemas Modernos de Manufactura. Centro de Investigación en Biotecnología. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Teléfono: (506) 2550-2262. Correo electrónico: calvarado@itcr.ac.cr
- 3 Ingeniero en Producción Industrial. Máster en Sistemas Modernos de Manufactura. Departamento de Producción. Zollner Elektronik AG. Costa Rica. Teléfono: (506) 2550-5720. Correo electrónico: ricardo_solis@zollner-electronics.com
- 4 Ingeniero en Biotecnología. Máster en Sistemas Modernos de Manufactura. Centro de Investigación en Biotecnología. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Teléfono: (506)2550-9410. Correo electrónico: rchacon@itcr.ac.cr
- 5 Máster en Administración de Empresas. Escuela de Ingeniería en Producción Industrial, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Teléfono: (506) 2550-9214. Correo electrónico: hvillalta@tec.ac.cr

Palabras clave

Cadenas Markov; plantas in vitro; métodos estocásticos.

Resumen

La aplicación de la biotecnología incluye una serie de procesos industriales que involucran organismos vivos o partes de ellos. La interacción del genotipo con los demás factores de manipulación industrial, aunque controlables, provoca que el sistema sea estocástico o no determinista, caracterizado por acciones predecibles y con elementos aleatorios. La producción masiva de plantas in vitro es un ejemplo de este tipo de industrias biotecnológicas, en el que se cultivan plantas seleccionadas bajo condiciones controladas de incubación y en medios nutritivos. Durante el proceso se producen pérdidas por contaminación o muerte del material y reprocesos, cuando las plantas se oxidan o deforman, pero una parte de ellas se puede rescatar y reintegrar a la etapa anterior. Tomando como modelo el proceso de producción de vitroplantas de papa (*Solanum tuberosum*) en la empresa VitroPlant S.A., se aplicó el método de Cadenas de Markov para determinar los requerimientos de material vegetal para cumplir con una demanda determinada de acuerdo con la etapa del proceso de la que se inicia, incluyendo en ese cálculo las pérdidas y reprocesos. Así, el método de Markov es una opción viable en los procesos biológicos productivos que podría aplicarse a otras especies vegetales e incluso a otros sistemas que utilicen diferentes organismos vivos, tales como hongos, bacterias, insectos y microalgas, todos comunes en la industria.

Keywords

Markov Chain Method; in vitro plants; stochastic methods.

Abstract

The application of Biotechnology includes a number of industrial processes involving living organisms or parts of them. The interaction of genotype with other industrial manipulation factors, characterized by predictable actions and random elements, makes the system to be stochastic. Commercial production of in vitro plants is one example of the biotechnology industry, where the production process consists of the propagation of plants in sterile growth media under controlled physical conditions. During this process, contamination or death of in vitro plants is considered as scrap (waste); however, if plants present oxidation or deformation they have to be reworked, in order to recover or reincorporate to the previous stage. Plant material requirement to accomplish a client demand was studied using the in vitro production process of *Solanum tuberosum* from the company VitroPlant S.A., to establish a model using Markov Chain Method, in which scrap and rework are included. Thus, the Markov method is a viable option in biological production processes that could be applied to other plant species and even other systems using different living organisms, such as fungi, bacteria, insects and algae, common in the industry.

Introducción

La biotecnología, definida como la aplicación de tecnologías en sistemas biológicos y organismos vivos o sus derivados, es aquella en la que convergen diferentes disciplinas con el fin de generar procesos biológicos con aplicaciones industriales o productos de alto valor agregado comercializables (Bolívar, 2005). Estos procesos biotecnológicos dependen en gran medida de los organismos vivos utilizados, ya que, a diferencia de los procesos de manufactura

industrial, cada uno cuenta con una biofábrica en su interior (Liese, 2005), aspecto que aumenta la dificultad de generar procesos estandarizados y controlados, ya que diferentes factores internos pueden afectar la respuesta del organismo, influyendo en las mermas o reprocesos (Kandelbauer et al., 2012).

Un ejemplo de este tipo de procesos es la producción comercial de plantas in vitro, que es una de las industrias biotecnológicas más difundidas en el área de la biotecnología vegetal. Este proceso incluye una serie de técnicas para la propagación masiva de plantas seleccionadas de acuerdo con sus características sobresalientes (rendimiento, fenotipo, genotipo, etc.), en el que se parte de explantes como meristemos, yemas, ápices, semillas y embriones, que son colocadas en un medio de cultivo estéril adecuado con nutrientes y hormonas. Estos explantes son inducidos a regenerar plantas completas que conservan las características del material madre del cual se originaron. Las plantas in vitro resultantes son clones o copias genéticamente idénticas entre sí e idénticas a la planta madre, excepto cuando el explante inicial es una semilla o embrión cigótico (George, 2008).

El proceso de transformación productiva se inicia con la selección del material parental, continúa con una serie de ciclos de multiplicación hasta dar con el número final de plantas requerido y termina cuando las plantas son inducidas al enraizamiento. Este proceso de producción, precisamente por manejar material vivo, está expuesto a una serie de factores que provocan variabilidad (genotipo, condiciones físicas y químicas), aunado a la posibilidad de pérdidas de material por contaminación y defectos en el crecimiento y desarrollo (George & Davies, 2008; Bolívar, 2005). Resulta entonces un reto estimar la capacidad del proceso, debido a que las pérdidas por desecho y reproceso, tienen un comportamiento probabilístico y es necesario tener en cuenta muchas variables aleatorias al mismo tiempo.

Los métodos estocásticos constituyen una herramienta para el estudio de procesos donde se toman en consideración las variables aleatorias. Un proceso estocástico es aquel cuyo comportamiento no es determinista y se caracteriza por acciones predecibles y con un elemento aleatorio de probabilidades tomando en cuenta la variabilidad (Allen, 2010; Lawler, 2006), donde las variables evolucionan a lo largo del tiempo de forma total o parcialmente aleatoria.

Uno de los modelos más utilizados es el de las Cadenas de Markov, propuesto por el matemático ruso Andrey Markov en 1906 con base en métodos probabilísticos dependientes del último evento precedente (Markov, 1906); poseen la peculiaridad de tener memoria, recordando el último evento y, por ende, este condiciona las posibilidades de los eventos futuros. Así, un proceso de Markov es aquel en el que, para predecir el comportamiento futuro de la variable aleatoria, únicamente es relevante su valor actual. Su aplicación en procesos productivos se realiza luego de tener información y análisis de tiempos de producción, producto desechado y reprocesos (Kirkwood, 2015).

Con este trabajo se pretende brindar una herramienta para que las empresas dedicadas a esta industria puedan determinar con mayor certeza su capacidad productiva, partiendo de parámetros simples, como el número de plantas iniciales requeridas para lotes específicos y probabilidades por etapa para la transformación en producto final.

Metodología

Descripción del proceso de producción

El estudio se realizó tomando como modelo un sistema productivo de plantas in vitro de papa (*Solanum tuberosum*) en la empresa VitroPlant S.A., en Cartago, Costa Rica.

Se estudió y describió el proceso para la obtención de vitroplantas y, con datos históricos, se establecieron los tiempos de producción para las etapas.

Aplicación del modelo de Cadenas de Markov

Se aplicó el modelo de Cadenas de Markov para determinar el número de explantes iniciales que se requiere establecer para obtener un número definido de lote de producción (3,000 plantas finales mediante tres ciclos de multiplicación in vitro), según la estandarización de la empresa.

Se estableció un registro histórico del número de plantas que fueron desechadas, reprocesadas y aquellas que continuaron su ciclo de reproducción. Se calculó la matriz de transición de Markov tomando en cuenta un 95% de éxito en la etapa de enraizamiento y la transición al empaque final, según registros de la empresa.

A partir de la matriz obtenida, se estimaron las probabilidades de los estados adsorbentes (empaque y desecho) de cada etapa, mediante las operaciones matriciales:

- *Resta de Matriz Identidad con Matriz Transitoria: (I-N)*
- *Matriz Inversa de 1-N: Minversa(I-N)*
- *Multiplicación de la Matriz Inversa por la Matriz Absorbente: Minversa(I-N)*M(A).*

Con el cálculo de las probabilidades anteriores, se planteó una fórmula para obtener el número de plantas requeridas para cumplir con el lote de producción final, de acuerdo con la etapa en la que se encuentre el material vegetal.

En esta fórmula, se presentó una relación entre el número de plantas deseadas, el coeficiente de multiplicación, el número de ciclos de multiplicación y la probabilidad correspondiente según la matriz de Markov.

$$plantas\ iniciales = \frac{N_d}{CM^{N_{ciclos}} P_{ij}}$$

donde:

N_d = Número de plantas deseadas

CM = Coeficiente de Multiplicación

N_{ciclos} = Número de ciclos de multiplicación

P_{ij} = Probabilidad de acuerdo a Markov (Factor Markov) dependiendo de donde se inicie el proceso.

El coeficiente de multiplicación utilizado fue de 3,74 y representa la relación de plantas finales entre plantas iniciales. Se obtuvo mediante el promedio de tres ciclos de multiplicación históricos de la empresa. Los cálculos se realizaron con el *software* Microsoft Excel 2010.

Resultados y discusión

Descripción del proceso de producción

El proceso productivo consiste en utilizar brotes axilares con capacidad regenerativa, obtenidos de campo o invernadero, que son desinfectados superficialmente e introducidos en medios nutritivos estériles bajo condiciones físicas controladas (temperatura, luz, humedad

y fotoperiodo). Esta etapa es el establecimiento in vitro, durante el cual los brotes se activan en las condiciones artificiales de laboratorio y se seleccionan para la siguiente etapa aquellos que no presenten contaminación ni anomalías. Estos brotes activados regeneran plantas completas durante un tiempo variable de incubación controlada y se utilizan para la etapa de multiplicación del material cuando alcanzan la altura y el desarrollo adecuados; estas plantas también pueden colocarse bajo condiciones de conservación (temperatura, nutrientes y luz reducidos) para tomarlas en el momento que se requieran para multiplicarlas.

Luego del establecimiento se inicia la etapa de multiplicación in vitro, en la que los operarios toman las plantas que los brotes generaron y las seccionan en explantes tipo microestacas y nuevamente se cultivan en medios nutritivos frescos a razón de cuatro microestacas por frasco, lo que se conoce como subcultivo.

Entre cada ciclo de subcultivo se define un período de incubación (aproximadamente 30 días) en cuartos controlados, durante los cuales el producto se transforma debido a procesos biológicos inducidos.

Durante la labor de subcultivo, los operarios, además de seccionar el material y cultivarlo, lo inspeccionan y reprocesan aquellas plantas del lote de producción que no lograron el desarrollo adecuado, regresándolas a una etapa anterior.

El período de incubación, aunque no implica manipulación de las plantas, se considera una operación debido a que ocurre transformación (biológica) del producto; también hay desecho (básicamente por contaminación) y reproceso (caída de plantas, presencia de oxidación, por ejemplo), lo que obliga a un recultivo en esta etapa. De esta forma, la etapa de multiplicación implica ciclos de crecimiento exponencial del material, los cuales finalizan de forma inducida, cuando se llega al número final de explantes que potencialmente generaran las plantas requeridas para un lote. En este momento se transfieren a un medio de cultivo diferente que les permite desarrollarse en plantas y generar raíces, de manera que están listas para ser empacadas y transferidas a condiciones de invernadero.

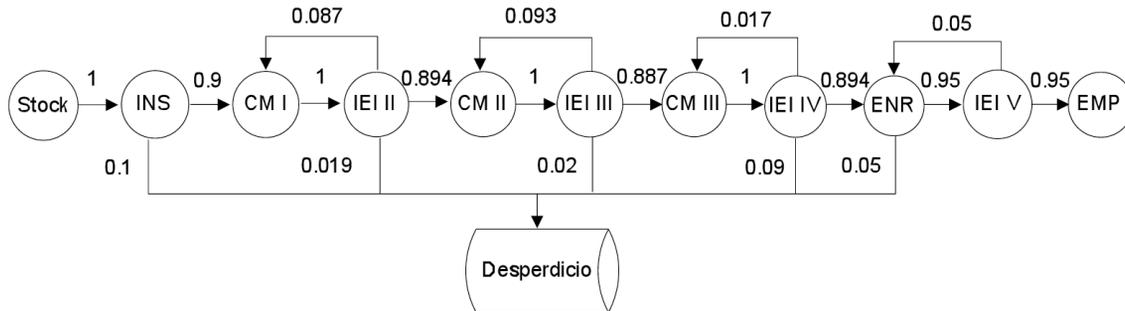
En todo el proceso de producción se tienen dos estados absorbentes, correspondientes al descarte y al producto terminado empacado al final.

El cuadro 1 muestra información de cada una de las etapas involucradas en el proceso de producción.

Cuadro 1. Etapas del proceso de producción de plantas in vitro de papa (*Solanum tuberosum*).

Código	Nombre	Tiempo (días)
DE	Desinfección	1
INT	Introducción	1
Stock	Almacenamiento en banco de germoplasma	<1 año
INS	Inspección I	1
CM I	Ciclo multiplicación I	1
IEI II	Incubación e inspección II	30
CM II	Ciclo multiplicación II	1
IEI III	Incubación e inspección III	30
CM III	Ciclo multiplicación III	1
IEI IV	Incubación e inspección IV	30
ENR	Enraizamiento	1
IEI V	Incubación e inspección V	30
EMP	Empaque	1

La Figura 1 muestra la secuencia de las etapas, así como las probabilidades de que en cada caso el material se descarte o sea reprocesado.



Stock= Banco de germoplasma
INS= Inspección

CM= Ciclo de Multiplicación
IEI= Incubación e Inspección

ENR= Enraizamiento
EMP= Empaque

Figura 1. Secuencia del proceso para la producción de plantas in vitro.

Aplicación del modelo de Cadenas de Markov

En la Figura 2 se presenta la matriz de transición de Markov, tomando en cuenta un 95% de éxito en la etapa de enraizamiento y la transición al empaque final.

MATRIZ			ESTADOS	STK	INS	CM I	IEI II	CM II	IEI III	CM III	IEI IV	ENR	IEI V	EMP	DES	
			STK	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
INS	0,000	0,000	0,900	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,100	
I	Identidad	I	CM I	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
N	Transitoria	N	IEI II	0,000	0,000	0,087	0,000	0,894	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,019
O	Cero	O	CM II	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
A	Absorbente	A	IEI III	0,000	0,000	0,000	0,000	0,093	0,000	0,887	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,020
			CM III	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
			IEI IV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,017	0,000	0,894	0,000	0,000	0,000	0,090
			ENR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,950	0,000	0,050	0,000
			IEI V	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,950	0,050	0,000
			EMP	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000
			DES	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000

STK= Banco de germoplasma
INS= Inspección

CM= Ciclo de Multiplicación
IEI= Incubación e Inspección

ENR= Enraizamiento
EMP= Empaque

DES= Desecho

Figura 2. Matriz de transición de Markov.

Como resultado de las operaciones matriciales, se calcularon las probabilidades para los estados absorbentes, que se presentan en el cuadro 2.

Cuadro 2. Probabilidades de los estados adsorbentes del proceso de producción de plantas in vitro.

	Etapa	Empaque	Desecho
STK	Stock	0,707	0,294
INS	Inspección	0,707	0,294
CM I	Ciclo multiplicación I	0,786	0,215
IEI II	Inspección e incubación II	0,786	0,215
CM II	Ciclo multiplicación II	0,803	0,198
IEI III	Inspección e incubación III	0,803	0,198
CM III	Ciclo multiplicación III	0,821	0,180
IEI IV	Inspección e incubación IV	0,821	0,180
ENR	Enraizamiento	0,902	0,097
IEI V	Incubación e inspección V	0,950	0,050

De acuerdo con el cuadro anterior, para la columna de empaque se observa que las probabilidades de que una planta llegue hasta producto terminado aumentan conforme se avanza en las etapas del proceso de producción. Así, por ejemplo, la probabilidad de que una planta que se tome del *stock* y se convierta en producto terminado es menor (0,707) en comparación con una planta que se tome del ciclo de multiplicación III (0,821). Esta probabilidad involucra el reproceso que sufren las plantas en las respectivas etapas de inspección y ciclos de multiplicación.

Desde el punto de vista biológico, el comportamiento ascendente de los valores de probabilidad a lo largo del proceso para que las plantas se conviertan en producto terminado, es un reflejo de la adaptación de los individuos a las condiciones de producción, conforme se avanza en el procedimiento. Con respecto a las probabilidades de desecho, se evidencia un comportamiento descendente, en que se pierden menos plantas conforme se avanza en el proceso. Aunque la contaminación es un factor muy variable, otras fuentes de pérdida, como la muerte de las plantas, puede estar incidiendo en esta tendencia; es decir, es probable que la cantidad de plantas que se pierden por mortalidad disminuya conforme se avanza en el sistema, debido a una mejor adaptación a las condiciones de crecimiento (Berthouly & Etienne, 2005).

Con la ecuación;
$$plantas\ iniciales = \frac{N_d}{CM^{N_{ciclos}} * P_{ij}}$$
, se estimó el número de plantas iniciales requeridas para la producción de un lote final de 3,000 vitroplantas para aclimatación. Para el coeficiente de multiplicación de la etapa de enraizamiento se utilizó un valor de 1, porque en esta fase únicamente se hace un cambio de medio de las plantas generadas por el ciclo de multiplicación III sin segmentarlas (cuadro 3).

Cuadro 3. Estimación de plantas iniciales requeridas para la obtención de un lote de 3,000 plantas in vitro.

Componentes de fórmula	STOCK	CM I	CM II	CM III	ENR
Plantas deseadas	3000	3000	3000	3000	3000
Coficiente multiplicación	3,74	3,74	3,74	3,74	1,00
Ciclos multiplicación	3	2	1	0	0
Probabilidad	0,707	0,786	0,803	0,821	0,902
Plantas iniciales	81	272	998	3655	3324
Desecho	24	59	198	659	324
Plantas disponibles	57	214	800	2996	3000

STK= Banco de germoplasma CM= Ciclo de Multiplicación ENR= Enraizamiento

De esta forma, se requieren 81 plantas para obtener 3,000 finales, si se parte del *stock* inicial, el cual se encuentra a una distancia de tres ciclos de multiplicación para luego enraizar y posteriormente empacar las plantas. De manera análoga, si se parte del ciclo de multiplicación I, se requieren 272 plantas para obtener 3,000 finales; en comparación con el dato obtenido para el *stock*, este valor es mayor debido a que atravesará menos ciclos de multiplicación (dos ciclos). Si se parte de los ciclos de multiplicación II y III, se requieren 998 y 3,655 plantas, respectivamente. Con respecto al número de ciclos requeridos si se parte del ciclo III, el valor es cero, debido a que este es el último que se contempló en el proceso, quedando solo la etapa de enraizamiento, la cual no es considerada un ciclo de multiplicación (Cuadro 3).

Conclusiones

Las Cadenas de Markov se perfilan como una herramienta válida para implementarse en procesos de manufactura estocásticos, en los que intervienen organismos vivos y procesos biológicos. En este caso se logró demostrar, con un correcto registro de datos históricos, cuales son los requerimientos iniciales de material vegetal según la etapa en la que se encuentre el proceso para lograr una demanda específica, aplicando las probabilidades obtenidas a través de las Cadenas de Markov. El modelo aplicado puede ajustarse a otras especies y variedades diferentes a *Solanum tuberosum*, que presenten coeficientes de multiplicación y patrones particulares de crecimiento y desarrollo.

Con un adecuado cálculo de material vegetal de entrada al proceso, se pueden estimar de forma más confiable y realista los costos y tiempos de producción, pues se conocen las probabilidades de que el producto se convierta en desecho o reingrese al sistema por reproceso, aunque al sistema solo reingrese material vegetal y no los demás materiales de soporte. Estas herramientas de estimación permiten maximizar recursos y planear de mejor forma el manejo de las mermas y reprocesos.

Para el caso en estudio, se determinó que para una demanda de 3,000 plantas, se debe iniciar con 81, 272, 998, 3,655 y 3,324 plantas si se parte de la etapa de *stock*, CM I, CM II, CM III y enraizamiento, respectivamente.

El valor que agrega el análisis estadístico en estos procesos con variabilidad inherente al tipo de producto biológico, radica en la precisión con que se estiman los tiempos de entrega de acuerdo con su capacidad y el comportamiento particular de cada especie.

Bibliografía

- Allen, L. (2010). *An Introduction to Stochastic Processes with Applications to Biology*. 2 ed. Florida, USA: Chapman & Hall/CRC.
- Berthouly, M. & Etienne, H. (2005). Temporary immersion system: A new concept for use liquid medium in mass propagation. Chapter 11. En A.K. Hvoslef-Eide y W. Preil (Eds.), *Liquid culture systems for in vitro plant propagation* (pp. 165-195). Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Bolívar, F.G. (2005). *Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna*. 2 ed. México D.F.: El Colegio Nacional.
- George, E.F. (2008). Plant Tissue Culture Procedure - Background. En E.F. George, M.A. Hall y G. Jan de Klerk (Eds.), *Plant Propagation by Tissue Culture* (pp. 1-28). 3 ed. Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- George, E.F. & Davies, W. (2008). Effects of the Physical Environment. En E.F. George, M.A. Hall y G. Jan de Klerk (Eds.), *Plant Propagation by Tissue Culture* (pp. 423-464). 3 ed. Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Kandelbauer, A., Rahe, M. & Kessler, R. (2012). Process Control and Quality Assurance: Industrial Perspectives. En J. Popp, V.V. Tuchin y S. Heinemann (Eds.), *Handbook of Biophotonics*. Vol. 3: Photonics in Pharmaceuticals, Bioanalysis and Environmental Research (pp. 3-69). New York: Wiley-VCH.
- Kirkwood, J. (2015). *Markov Processes*. London: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Lawler, G.F. (2006). *Introduction to Stochastic Processes*. 2 ed. Florida, USA: Chapman & Hall/CRC.
- Liese, A. (2005). Technical Application of Biological Principles in Asymmetric Catalysis. En T. Scheper y U. Kragl (Eds.), *Technology Transfer in Biotechnology*. Series: Advances in Biochemistry Engineering and Biotechnology. Vol. 92 (pp. 197-224). Heidelberg: Springer-Verlag.
- Markov, A.A. (1906). *Rasprostranenie zakona bol'shih chisel na velichiny, zavisyaschie drug ot druga*. *Izvestiya Fiziko-matematicheskogo obschestva pri Kazanskom universitete*, 2-ya seriya, tom 15(94): 135-156.

Análisis del comportamiento de mercado en las ferias del agricultor de la Gran Área Metropolitana

Analysis of market behavior in Farmer's Markets located in the Greater Metropolitan Area

Manuel Enrique García-Barquero¹

Fecha de recepción: 11 de junio del 2015
Fecha de aprobación: 17 de setiembre del 2015

García-Barquero, M. Análisis del comportamiento de mercado en las ferias del agricultor de la Gran Área Metropolitana. *Tecnología en Marcha*. Vol. 29, Nº 1, Enero-Marzo. Pág 83-95.

¹ Director Centro de Investigación en Economía Agrícola y Desarrollo Agroempresarial (CIEDA), Universidad de Costa Rica. Correo electrónico: manuel.garcia@ucr.ac.cr

Palabras clave

Oferta; demanda; mercado; precios; productos; consumo.

Resumen

En este artículo se presentan los resultados de un estudio que analizó el comportamiento del mercado de las ferias del agricultor en la Gran Área Metropolitana. Se toman en cuenta las regulaciones de ley para estas actividades y la teoría de la mercadotecnia, con el fin de determinar la forma en que se desarrollan estos mercados a través de las variables de participación de oferentes, clientela habitual por oferente y clientela habitual por producto. Considerando estas variables, se pudo determinar la forma en que los agricultores planifican la oferta de productos agrícolas, el 80% de los participantes analizados venden entre 84% y 100% de la oferta semanal. Es importante mencionar que para el análisis de los productos agrícolas se utilizaron los 20 principales productos hortifrutícolas de mayor comercialización en el mercado mayorista del Centro Nacional de Abastecimiento y Distribución de Alimentos (CENADA); de estos, 18 mantienen una participación constante que varía entre el 50% y el 83% durante el año, mientras que el mango y la sandía mantienen un porcentaje menor debido a la estacionalidad de la producción.

Keywords

Offer; demand; market; prices; products; consume.

Abstract

A study was conducted in order to analyze the market behavior of farmer's markets in the Greater Metropolitan Area, taking into account the legal regulations of these markets and marketing theory to determine the way in which these markets develop, through the variables of supplier participation, regular clients per supplier and regular clients per product. Considering these variables, the way in which farmers plan the supply of agricultural products was determined: 80% of participants sell between 84 and 100% of weekly supply. It is important to mention that for the analysis of this study, the 20 main horticultural and fruit products with higher volume of commercialization in the National Center for Food Supply and Distribution (CENADA) were used. Of these, 18 products held a constant participation, which varies between 50 and 83% in a year, however, mangoes and watermelons held a lower percentage due to production seasonality.

Introducción

En Costa Rica existen diferentes componentes relacionados con las tendencias de producción, la comercialización y los precios de los bienes agroalimentarios. Estos se ven influenciados por las negociaciones realizadas en el principal mercado mayorista de bienes agroalimentarios, el Centro Nacional de Abastecimiento y Distribución de Alimentos (CENADA), y en las principales ferias del agricultor del Valle Central. Según el artículo "¿Qué es una feria?", del Consejo Nacional de Producción (CNP), una feria del agricultor es un mercado minorista para uso exclusivo de pequeños y medianos productores, en forma individual u organizada, de los sectores de la producción agropecuaria, pesquera, avícola y pequeña industria y artesanía, en donde venden directamente sus productos al consumidor (CNP, 2014b).

Cada uno de estos mercados, tanto el mayorista como el minorista, presentan una serie de comportamientos que responden muchas veces a la disponibilidad de productos a lo largo del año, al comportamiento de los consumidores, donde algunas veces los aspectos socioculturales impactan las tendencias de consumo, los precios de los bienes, las condiciones agroclimáticas cambiantes y, finalmente, el comportamiento que tengan las exportaciones e importaciones de productos agroalimentarios.

Las ferias del agricultor son mercados minoristas que impactan directamente al consumidor costarricense, porque han buscado un enfrentamiento cara a cara del productor con los consumidores, proceso en el que la intermediación se reduce a la menor cantidad posible o incluso a su ausencia total (CNP, 2008).

En el análisis del comportamiento de mercado de las ferias del agricultor de la GAM durante 2013 y 2014, el objetivo es poner a disposición de los costarricenses un diagnóstico sobre aspectos o cuestionamientos relacionados con su funcionamiento, poniendo énfasis en las interrogantes sobre la política para poder participar en ellas, dado que la dinámica de comercialización ha sido criticada debido a la participación de intermediarios como oferentes de productos.

Materiales y métodos

Desde el año 2010, el Centro de Investigación en Economía Agrícola y Desarrollo Agroempresarial (CIEDA) viene desarrollando el proyecto de investigación número 822-B0-119, denominado “Análisis del comportamiento de productos agroalimentarios en el mercado mayorista del CENADA y en las principales ferias del agricultor del Valle Central de Costa Rica”. Este proyecto involucra diferentes unidades de investigación como el mercado de mayoristas y las diferentes ferias del agricultor de la GAM, distribuidas, según datos del CNP, en las siguientes subdivisiones: Central-Central, Central-Occidental, Occidental del Este y Occidental del Oeste.

Inicialmente se identificaron las ferias del agricultor ubicadas dentro de la GAM, que fue delimitada por el Plan GAM del Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo (INVU) en 1982, mediante el Decreto Ejecutivo 13583. La GAM está conformada por tres municipios de Alajuela, seis de Cartago, nueve de Heredia y 13 de San José; un total de 31 cantones, que incluyen parcial o totalmente 152 distritos (MIVAH, 2011).

Muestreo

Para seleccionar las ferias, se consideró el artículo “Entes administradores y emisores de carné de ferias del agricultor” del CNP y se partió de un muestreo estratificado según la subdivisión por región geográfica de la GAM, tal y como se muestra en el cuadro 1. Como se observa, la mayor concentración de ferias se encuentra en las subdivisiones Central-Oriental y Central-Central (CNP, 2014a).

Considerando lo anterior, se selecciona una muestra de 14 ferias, con base en la precisión que se desea en el estudio y ajustado a las posibilidades de tiempo y financieras. En el cuadro 2 se muestra la distribución por fijación proporcional en cada uno de los estratos previamente definidos, siendo el de mayor participación el Central-Oriental, con seis ferias del agricultor.

Cuadro 1. Distribución y peso relativo de las ferias del agricultor según la subdivisión por región geográfica de la GAM.

Subdivisión	Número ferias	Porcentaje
Central-Oriental	17	38
Central-Central	13	29
Occidental del oeste	7	16
Occidental del este	8	18
Total	45	100

Fuente: Elaboración propia con datos de campo.

Cuadro 2. Número de ferias del agricultor que se analizan en cada una de las subdivisiones geográficas de la GAM.

Subdivisión	Número de ferias
Central-Oriental	6
Central-Central	4
Occidental del oeste	2
Occidental del este	2
Total	14

Fuente: Elaboración propia con datos de campo.

Elección de las ferias agricultor

Las ferias del agricultor seleccionadas se eligieron con base en la cantidad de oferentes presentes en ellas, tomando de cada subdivisión las ferias que presentaron la mayor cantidad de puestos ocupados, y que se muestran en el cuadro 3.

Cuadro 3. Ferias del agricultor seleccionadas para el estudio, de acuerdo con la región en que se ubican.

Ferias del agricultor, Región Central-Oriental	
1. Zapote	2. Plaza Viquez
3. Desamparados	4. Vásquez de Coronado
5. Oreamuno	6. Tres Ríos
Ferias del agricultor, Región Central-Central	
1. Hatillo	2. Pavas
3. Escazú	4. Alajuelita
Ferias del agricultor, Región Occidental del Oeste	
1. San Ramón	2. Grecia
Ferias del agricultor, Región Occidental del Este	
1. Heredia	2. Tibás

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de los datos

Mediante un análisis de varianza (ANOVA) y la aplicación de pruebas de diferencia mínima significativa (LSD, por sus siglas en inglés), se identificaron las diferencias que pueden existir entre variables de interés. Todas las pruebas se trabajaron al 5% de significancia.

Periodo en el que se realizó el trabajo de campo

Como instrumento para recolectar la información, se utilizó una encuesta personal a los propietarios de tramos que participan en las ferias del agricultor seleccionadas. La respectiva validación del instrumento se realizó mediante la visita a una feria donde se aplicó la encuesta. En este sentido, el instrumento se utilizó con diez productores, se recopiló la información, se codificaron los datos y, dado que el proceso no arrojó ningún aspecto controversial, se procedió a realizar el levantamiento de la información.

El objetivo de la encuesta fue cuantificar la cantidad de producto ofrecido, identificar variables de mercado y origen de los productores, la estacionalidad y las fluctuaciones en la oferta, la demanda y los precios que los comercializadores de las ferias del agricultor utilizan para estimar la oferta y demanda de los 20 productos agrícolas más comercializados en el mercado mayorista del CENADA.

Se realizaron en promedio 30 encuestas en cada feria del agricultor, para un total de 427, distribuidas como se muestra en el cuadro 4. Se observa que en ferias como las de Heredia, Desamparados y San Ramón se realizó la mayor cantidad de encuestas, debido a su tamaño. También se detalla como Zapote, Hatillo y Pavas tienen la menor cantidad de encuestas realizadas, lo cual es congruente con la cantidad de productores participantes en las ferias en estos lugares.

Cuadro 4. Distribución absoluta y relativa de las encuestas realizadas en cada feria del agricultor.

Feria	Encuestas realizadas	
	Cantidad	%
Alajuelita	29	6,8
Coronado	37	8,7
Desamparados	38	8,9
Escazú	28	6,6
Grecia	24	5,6
Hatillo	21	4,9
Heredia	46	10,8
Oreamuno	36	8,4
Pavas	22	5,1
Plaza Viquez	30	7,0
San Ramón	38	8,9
Tibás	30	7,0
Tres Ríos	28	6,6
Zapote	20	4,7
Total	427	100,0

Fuente: Elaboración propia con datos de campo.

Las encuestas se realizaron en dos periodos distintos; en 2013 se visitaron entre mayo y noviembre un total de ocho ferias del agricultor. En el año 2014, también entre mayo y noviembre, se visitaron las restantes seis ferias del agricultor que se estimaron en el cálculo de la muestra. El equipo de trabajo lo conformaron dos investigadores, dos asistentes y cinco encuestadores.

Resultados y discusión

Los entrevistados son comercializadores de productos agrícolas que tienen un puesto en alguna de las ferias del agricultor ubicadas dentro de la GAM, en adelante identificados como “ferieros”. Existe una tendencia a incorporar a diferentes miembros de la familia en esta actividad, por lo que es habitual encontrar dueños o dueñas de fincas, esposas, esposos, hijos o hijas y otros parientes cercanos como encargados de la comercialización. Se entrevistaron 355 hombres, que corresponden al 85% de la muestra, y 63 mujeres, que representan el 15%.

Como se observa en la figura 1, del total de entrevistados, el 95% asiste semanalmente a una feria, el 4% asiste a dos ferias y solamente el 1% va a más de dos. El 71% de los ferieros encuestados mencionaron que tienen su plantación en el mismo lugar de residencia.

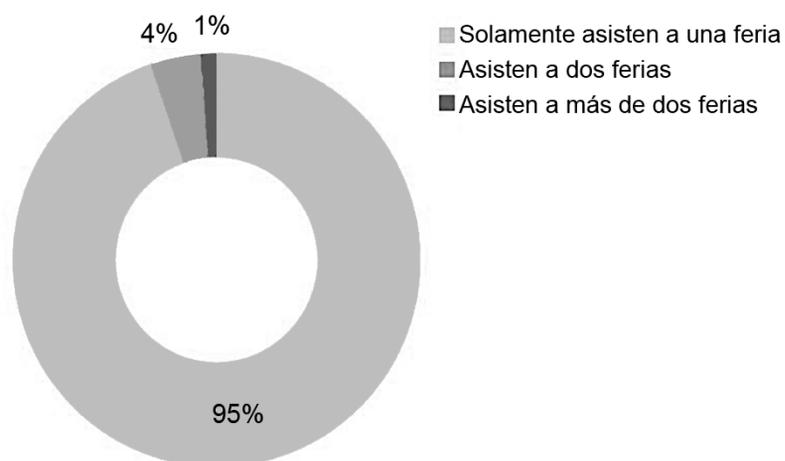


Figura 1. Entrevistados según la cantidad de ferias a las que asisten.
Fuente: Elaboración propia con datos de campo.

En la Ley número 8533 sobre la regulación de las ferias del agricultor, en el artículo 33 se menciona lo siguiente: “si la producción lo amerita, podrán extenderse hasta dos carnés de vendedor auxiliar por finca, que los faculten para participar en un solo espacio por feria; sin embargo, podrán asistir a diferentes ferias” (CNP, 2008). Lo anterior es congruente con los datos que se observan en la figura 1, donde un 4% de los entrevistados mencionan participar en más de una feria, lo cual está ligado al tamaño de la actividad productiva y justifica su participación en otras ferias.

Del total de los ferieros, el 43% aseguró ser agricultor y comercializador de los productos que lleva a la feria. Esto se explica porque mantienen un sistema de organización según el cual, además de traer los productos que ellos mismos cosechan, comercializan productos de otros agricultores de la zona. Un 57% se identificó únicamente como agricultor.

Tal y como se muestra en el cuadro 5, de aquellos que dijeron ser solo agricultores, prácticamente más de la mitad ha comprado algún producto agrícola a otro productor y el 46,3%

asegura nunca haberlo hecho. En este sentido, queda de manifiesto la falta de claridad de los agricultores sobre la definición o características de la intermediación, esto queda demostrado con los datos que aparecen en el cuadro citado, en el cual el 53,8% ha realizado algún tipo de intermediación, sin embargo, no se consideran a sí mismos intermediarios.

Esta misma falta de claridad está presente en los agricultores-intermediarios; en este caso, un 74,3% indica que en algún momento ha comprado productos a otros productores, sin embargo, el 25,7% afirma no hacerlo. Esto se explica por varios motivos, entre ellos la participación de la agricultura familiar en estos mercados, en los que el vínculo familiar contribuye a aumentar la oferta de productos del feriero; otro motivo es la participación de grupos de productores organizados formal o informalmente que tienen un único representante para la comercialización en la feria.

Cuadro 5. Tipo de feriero según la participación en la compra a otros productores.

Tipo de feriero	¿Ha comprado a otro productor?	
	Sí	No
Agricultor	53,8%	46,3%
Agricultor-intermediario	74,3%	25,7%

Fuente: Elaboración propia con datos de trabajo de campo.

Sin embargo, en la Ley 8533 sobre la regulación de las ferias del agricultor, capítulo uno, artículo primero, se decretan las disposiciones generales: “créase el Programa Nacional de Ferias del Agricultor, como programa de mercadeo de carácter social, de uso exclusivo para los pequeños y medianos productores nacionales de los sectores de la producción agrícola, pecuaria y forestal, pesca y acuicultura, avicultura, agroindustria y artesanía, en forma individual u organizada con el objeto de poner en relación directa a consumidores y productores, de manera tal que los primeros obtengan mejor precio y calidad, y los segundos incrementen su rentabilidad, al vender de modo directo al consumidor” (CNP, 2008).

En mercadotecnia, este tipo de plaza se conoce como canal de comercialización directo, o de nivel cero, lo que explica la relación directa entre productores y consumidores, en ausencia de algún tipo de intermediación, como se muestra en la figura 2, donde está claro que, según lo expuesto por la ley, se pretende que ambas partes obtengan un beneficio.

De acuerdo con la información obtenida mediante el estudio y según consta en el cuadro 4, sobre el perfil de los ferieros que participan en la muestra seleccionada, el 53,8% de los agricultores y el 74,3% de los agricultores-intermediarios compran producto a otros productores. Esto plantea un esquema diferente de comercialización, donde aparece una intermediación, pasando de ser canal de comercialización directo a canal de comercialización indirecto nivel 1; por lo tanto, el nuevo esquema obedece a una mezcla entre lo que se dice canales de comercialización directos e indirectos, tal y como se muestra en la figura 3.

En mercadotecnia, y según lo expone Kotler, existe una diferencia entre los consumidores y los clientes. Los primeros son las personas que eventualmente realizan una compra, ya que andan en busca de satisfacción y bienestar a largo plazo, mientras que los segundos son aquellas personas que ya obtuvieron esa satisfacción y bienestar a largo plazo, por lo cual repiten

la compra y crean en alguna medida un grado de lealtad hacia el producto, una marca y/o empresa, o ferieros en el caso de esta investigación (Kotler, 2012).

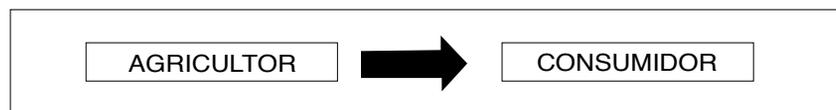


Figura 2. Canal de comercialización directo o de nivel cero, según la Ley 8533 de la República de Costa Rica. Fuente: Elaboración propia.



Figura 3. Canal de comercialización directo e indirecto. Fuente: Elaboración propia.

Se analizó, además, el comportamiento de la clientela de cada uno de los productos analizados en la investigación. Como se muestra en el cuadro 6, se pudo determinar que existe relación entre los consumidores y los productos de cada feriero, tal es el caso que, en promedio, el porcentaje de clientela habitual (lealtad de compra) oscila aproximadamente entre 40-60% entre los distintos productos analizados. Se determinó que el producto con menor porcentaje de clientela habitual es la vainica, con un 41,3%, mientras que el más alto corresponde a la piña, con un 58,2%.

Cuadro 6. Porcentaje de clientela habitual según el producto.

Producto	Porcentaje	Producto	Porcentaje
Banano	45,7	Papaya	57,4
Cebolla	46,7	Pepino	47,4
Chayote	42,6	Piña	58,2
Chile dulce	50,1	Plátano	51,7
Coliflor	55,7	Repollo	50,9
Limón	46,3	Sandía	57,7
Manga	47,9	Tomate	46,6
Melón	50,0	Vainica	41,3
Naranja	45,3	Yuca	51,2
Papa	52,6	Zanahoria	57,0

Fuente: Elaboración propia con datos de trabajo de campo.

Lo analizado anteriormente viene a complementarse con la información del cuadro 7, que muestra que para el caso específico de la feria de Tibás, los ferieros tienen una media de 74,6% de clientela habitual, siendo esta la feria de más alto porcentaje. Por el contrario, en la feria de Zapote el promedio es de 29,7%.

Cuadro 7. Porcentaje de clientela habitual por feria.

Feria	Porcentaje	Feria	Porcentaje
Grecia	54,7	Zapote	29,7
San Ramón	48,2	Desamparados	34,3
Coronado	41,5	Alajuelita	45,2
Hatillo	37,1	Plaza Víquez	41,0
Escazú	59,1	Oreamuno	58,7
Tibás	74,6	Tres Ríos	47,4
Pavas	52,8	Heredia	49,6

Fuente: Elaboración propia con datos de trabajo de campo.

En el caso de la regularidad de la oferta, se pudo determinar que un mismo comercializador normalmente tenía, al momento de ser entrevistado, más de un producto de los contemplados en el estudio. Por lo tanto, no es posible generalizar y hablar de una proporción de entrevistados que ofertan la misma cantidad de producto semanalmente en la feria durante todo el año. Sin embargo, sí se calculó la proporción para cada producto por tramo analizado, tal y como se puede observar en el cuadro 8.

La sandía y la manga obtuvieron los porcentajes más bajos de puestos con oferta constante, 25% y 38%, respectivamente. Esto quiere decir que la oferta de estos productos oscila durante el año, debido principalmente a su estacionalidad, como se mencionó anteriormente. Es importante señalar que estos resultados pudieron verse afectados, además, por las fechas en las que se realizó el estudio, puesto que entre diciembre y febrero no se hicieron encuestas.

Por su parte, el pepino y la yuca son los productos con porcentajes de oferta constante más altos, 87% y 86%, respectivamente; lo que significa que los ferieros tienden a mantener constante la cantidad que comercializan de estos dos productos semanalmente y durante el año.

De lo anterior, es importante mencionar que, del total de los 20 productos analizados, 18 mantienen más de un 50% de la oferta constante a lo largo del año, lo que se justifica con el hecho de que existe un porcentaje de entre 40-60% de clientela fija por producto, lo que permite a los ferieros planificar o controlar de forma más efectiva las cantidades de productos que deben ofrecer semanalmente.

Solo un 6% de los ferieros menciona haber adquirido en algún momento producto de lotes destinados a la exportación para llevar a la feria. Los productos que se mencionaron son piña, yuca y manga.

De acuerdo con los datos de la figura 4, se observa la existencia del porcentaje total de ventas por tramo, que mantiene una alta rotación de productos, ya que cerca del 73% de los ferieros expresaron tener un porcentaje de ventas que varía entre 80-100% del total de producto que ofrecen semanalmente en las ferias en que participan, con una media del 96%, lo que se considera alto para este tipo de mercado. Esto viene a reforzar la importancia de que los ferieros mantengan una cantidad mayor al 50% de clientela fija, que permite a los agricultores programar la oferta de productos, con cantidades más adaptadas a sus realidades y conocer épocas de mayor o menor demanda o la estacionalidad de ésta. Todo lo anterior genera resultados de mayores ventas y menores pérdidas y, por ende, mayor eficiencia en el proceso de comercialización.

Cuadro 8. Porcentajes de puestos que mantienen constante la cantidad de productos que comercializan.

Producto	%	Producto	%
Banano	71	Papaya	69
Cebolla	65	Pepino	87
Chayote	77	Piña	78
Chile dulce	78	Plátano	68
Coliflor	58	Repollo	77
Limón	70	Sandía	25
Manga	38	Tomate	77
Melón	50	Vainica	62
Naranja	70	Yuca	86
Papa	75	Zanahoria	76

Fuente: Elaboración propia con datos de trabajo de campo.

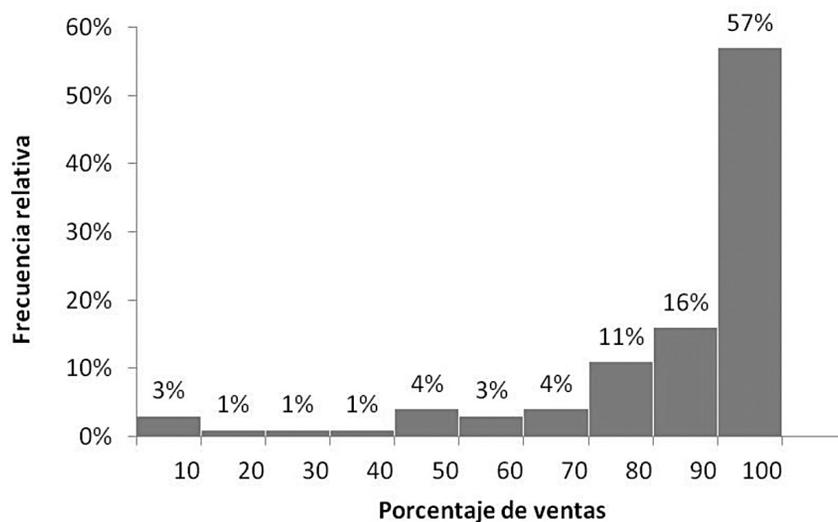


Figura 4. Distribución de los puestos según el porcentaje de producto vendido por semana en la feria. Fuente: Elaboración propia con datos de trabajo de campo.

Entre los 20 productos analizados no existen diferencias estadísticamente significativas en relación con este porcentaje de ventas. Sin embargo, entre las ferias incluidas en el estudio sí se encontrarán algunas diferencias; según el análisis de varianza y la prueba de LSD al 5% de significancia, se puede ver en el cuadro 9 que la feria de Alajuelita tiene el promedio más bajo de ventas (84,76%), lo que es estadísticamente diferente a las de Heredia, Desamparados, Grecia, Tibás y Pavas, que presentan los promedios más altos.

Es importante rescatar de este análisis que existe un porcentaje bastante alto de ventas en todas las ferias analizadas, superior al 84%, eso indica que los productores planifican muy bien las cantidades de productos que suelen llevar semanalmente y durante todo el año a las ferias del agricultor.

Cuadro 9. Análisis de varianza y prueba LSD al 5% del porcentaje de ventas por feria.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Probabilidad
Feria	20443,46	13	1572,57	1,8	0,0386
Error	823313,34	943	873,08		
Total	843756,79	956			
Feria	Medias	n	Error estandar		
Alajuelita	84,76	79	3,32	A	
San Ramón	85,32	79	3,32	A	
Hatillo	86,00	45	4,40	A	B
Oreamuno	87,67	96	3,02	A	B
Tres Ríos	89,18	73	3,46	A	B
Escazú	90,49	72	3,48	A	B
Plaza Viquez	91,36	55	3,98	A	B
Coronado	92,03	97	3,00	A	B
Zapote	92,19	32	5,22	A	B
Pavas	93,26	47	4,31	A	B
Tibás	94,00	67	3,61	A	B
Grecia	95,80	51	4,14	A	B
Desamparados	98,61	72	3,48		B
Heredia	99,17	92	3,08		B
Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,01$).					

Fuente: Elaboración propia con datos de trabajo de campo.

Finalmente, la investigación determinó que apenas un 7% de los ferieros entrevistados indican que tienen algún tipo de certificación, sin embargo, esta no corresponde a certificaciones de calidad de los productos o procesos productivos. Más bien, ellos hacen alusión, entre otros, a aspectos tales como tener el carné de manipulación de alimentos o el que los certifica como comercializadores de la feria del agricultor y que es expedido por el CNP, como se indica en su artículo “Entes administradores y emisores de carné de ferias del agricultor” (CNP, 2014a).

Conclusiones

De los productores que asisten a las diferentes ferias del agricultor analizadas se concluye que más del 90% visitan cada semana únicamente una. Este es un dato bastante alto y refleja un comportamiento estable, a pesar de que la legislación les permite participar en más de una feria.

El 57% de la población encuestada afirmó ser agricultor, sin embargo, el 53,8% de los que se catalogan como tales mencionan haber realizado compras de productos agrícolas para traer a las ferias, situación que está relacionada con la falta de claridad de los agricultores sobre la definición o características de la intermediación.

El 43% de los encuestados se relaciona con agricultores-intermediarios; el 74,3% de estos menciona haber comprado producto para llevar a las ferias, lo que se justifica por cuanto ellos mismos se han reconocido como agricultores-intermediarios, sin embargo, el 25,7% de estos menciona no haber realizado nunca compra de productos agrícolas a otros productores. En este caso, de nuevo se manifiesta la falta de claridad sobre el concepto de intermediación, en el que está presente la participación de la agricultura familiar para aumentar la oferta de productos del feriero; y otro motivo es la participación de grupos de productores organizados formal o informalmente por uno de ellos.

Se determinó que los ferieros cuentan con clientela fija para cada uno de los productos analizados; si bien los porcentajes varían de acuerdo con los productos, la media está entre 40-60%. También se determinó que de una feria a otra la clientela habitual puede variar, siendo la de Tibás la que presenta el promedio más alto y la de Zapote el más bajo.

A pesar de que la Ley 8533 establece que los participantes en las ferias serán productores (agricultores), se identificó un tipo de intermediación que crea una mezcla de agricultor-intermediario. Sus características son ser productor agrícola y a la vez, para poder abastecer las necesidades de sus clientes fijos, en eventuales ocasiones en las que carece de productos para cumplir con la demanda, se ve obligado a adquirir producto de otros agricultores y así cumplir con el principio básico de la mercadotecnia, que es satisfacer las necesidades del segmento al que se dirige.

De los 20 productos analizados, que corresponden a los de mayor consumo en el mercado mayorista del CENADA, 18 mantienen un porcentaje que varía entre 50-83% de oferta constante a lo largo del año. Solo la sandía y el mango están por debajo de estos porcentajes y su comportamiento se explica por el carácter estacional que presentan ambas frutas.

En relación con el comportamiento de los porcentajes de ventas, el 80% de la población analizada asegura que logra vender entre 84-100% de la oferta que lleva cada semana a las ferias. Esto permite constatar que los ferieros planifican eficientemente la cantidad de producto que ofrecen, algo que, sin duda alguna, está estrechamente relacionado con los porcentajes tan altos de clientes fijos.

Bibliografía

- Arellano, R. (2000). *Marketing: enfoque América Latina*. 1 ed. México: McGraw Hill.
- Benassini, M. (2001). *Introducción a la investigación de mercados: un enfoque para América Latina*. México: Pearson Educación.
- CNP (Consejo Nacional de Producción). (18 septiembre, 2008). Reglamento a la Ley de Regulación de Ferias del Agricultor. La Gaceta N° 180. Disponible en http://www.cnp.go.cr/ferias/leyes/Reglamento_Ley_8533.pdf.
- CNP (Consejo Nacional de Producción) (2014a). *Entes administradores y emisores de carné de ferias del agricultor*. Disponible en http://www.cnp.go.cr/ferias/listas/Lista_Ferias_Agricultor.pdf.
- CNP (Consejo Nacional de Producción). (2014b). *¿Qué son las ferias?* Disponible en <http://www.cnp.go.cr/ferias/>
- Hair, J., Bush, R. & Ortinau, D. (2010). *Investigación de mercados: en un ambiente de información digital*. 4 ed. México: Mc Graw Hill.
- Hoyer, W. & MacInnis, D. (2010). *Comportamiento del Consumidor*. 5 ed. México: Cengage Learning.
- Kotler, P. & Armstrong, G. (2012). *Marketing*. 14 ed. México: Pearson Educación.
- Little, T. & Hills, F. (1983). *Statistical methods in agricultural research*. México: Editorial Trillas, S.A.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2006). *Regulación de Ferias del Agricultor*. Disponible en <http://www.mag.go.cr/legislación/2006/ley-8533.pdf>

Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos (2011). *Plan de ordenamiento territorial de la Gran Área Metropolitana 2011-2030*. Disponible en http://www.mivah.go.cr/Documentos/potgam/PROPUESTAS_3_21_AGOSTO_2012.pdf

Montgomery, D. (2004). *Diseño y análisis de experimentos*. 1 ed. México: Limusa S.A.

Navarro, J.R. (2006). *Diseño experimental: aplicaciones en agricultura*. 1 ed. Costa Rica: Editorial Universidad de Costa Rica.

Zikmund, W. & Babin, B. (2009). *Investigación de mercados*. 9 ed. México: Cengage Learning.

Enfoques de integración de información para sistemas de monitoreo de salud estructural de puentes

Approaches to Information Integration in Structural Health Monitoring Systems for Bridges

César Garita¹

Fecha de recepción: 28 de enero del 2015
Fecha de aprobación: 16 de junio del 2015

Garita, C. Enfoques de integración de información para sistemas de monitoreo de salud estructural de puentes. *Tecnología en Marcha*. Vol. 29, Nº 1, Enero-Marzo. Pág 96-107.

¹ Doctor en Ciencias de la Computación, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Computación. Teléfono: (506)8841-0021. Correo electrónico: cesar@itcr.ac.cr

Palabras clave

Integración de información; revisión; monitoreo de salud estructural; puentes.

Resumen

El diseño y desarrollo de sistemas que permitan recolectar, procesar, almacenar e integrar información asociada al monitoreo periódico de la condición de estructuras civiles como edificios y puentes, representa un gran reto desde el punto de vista computacional. En la práctica, podría ser necesario integrar un gran número de herramientas y componentes, con el fin de apoyar la toma ágil de decisiones estratégicas sobre el estado de salud de dichas estructuras por parte de los usuarios finales, incluyendo ingenieros y funcionarios de gobierno.

Muchos de estos componentes computacionales en general existen o han sido desarrollados previamente por diferentes organizaciones y exhiben un alto grado de heterogeneidad en cuanto a los modelos de datos y el *software* que utilizan. Este artículo presenta una revisión de enfoques de integración de información en áreas relacionadas con el monitoreo de la salud estructural, con énfasis en puentes. El estudio realizado busca recopilar experiencias que eviten “reinventar la rueda”, así como identificar oportunidades de diferenciación, que sirvan de base para proponer enfoques novedosos de integración de la información en este campo. Este trabajo se realizó como parte del proyecto de investigación e-Bridge 2.0, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Keywords

Information integration; survey; structural health monitoring; bridges.

Abstract

The design and development of systems aimed at gathering, processing, storing and integrating information associated to periodic monitoring of the condition of civil structures such as buildings and bridges, represent a challenge from a computational point of view. In practice, there exist countless tools and components that may need to be integrated in order to support agile strategic decision making regarding structural health conditions. Many of these computational components may already exist or have been developed by different organizations and present a high level of heterogeneity in terms of data models and software configurations. This paper provides a study of information integration approaches in areas related to structural health monitoring with emphasis on bridge structures. The proposed study aims at putting together experiences that may avoid the “reinvention of the wheel” as well as the identification of differentiating aspects which may serve as a base for innovative approaches for information integration in this area. This work has been carried out as part of the e-Bridge 2.0 research project at the Costa Rica Institute of Technology.

Introducción

El Monitoreo de Salud Estructural (conocido como SHM, siglas en inglés de *Structural Health Monitoring*) puede describirse como el registro permanente, continuo o periódico de parámetros que reflejan la condición y el rendimiento de una estructura civil (Glisic e Inaudi, 2007). Por ejemplo, los parámetros pueden asociarse con valores de vibración medidos a través de un sensor asociado a una viga de un puente, durante una serie de pruebas de tránsito

vehicular. La información obtenida a través del monitoreo se usa generalmente para planear y diseñar actividades de mantenimiento, aumentar la seguridad, verificar hipótesis y ampliar el conocimiento sobre la estructura en cuestión. El monitoreo contribuye a prevenir el impacto social, económico, ecológico y estético que pueda causar una falla en una estructura.

Con respecto a las herramientas computacionales y los sistemas de información que pueden utilizarse para apoyar el monitoreo y la subsecuente toma de decisiones en diversos ámbitos estratégicos, existe una amplia variedad de posibles soluciones y en la práctica las organizaciones que trabajan en este tema usan herramientas diferentes.

En el caso particular del monitoreo de la salud de los puentes, el sistema SHM, idealmente, debería apoyar procesos integrados para la toma de decisiones a través de funcionalidades tales como: interfaces *web* amigables, servicios de Sistemas de Información Geográfica (SIG), unidades de monitoreo continuo, procesos de recolección y administración de datos, bases de datos históricas, sistemas de inteligencia de negocios, integración de sistemas existentes de información técnica de puentes, etc.

Por lo tanto, la adecuada integración de la gran cantidad de información generada por estos sistemas heterogéneos para que pueda ser procesada y utilizada de manera efectiva por ingenieros o tomadores de decisiones de las diferentes instituciones, representa un desafío desde el punto de vista computacional.

En este contexto, este artículo presenta una revisión de enfoques de integración de información en áreas relacionadas con monitoreo de la salud estructural, con énfasis en estructuras de puentes.

Este trabajo se desarrolló como parte del proyecto e-Bridge 2.0 - Sistema de información integrado para determinación del desempeño de estructuras de puentes, que reúne a profesionales de varias disciplinas, incluyendo ingeniería en construcción, computación, electrónica y producción industrial y forestal en el Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) (Garita & Ortiz, 2014). El objetivo principal de e-Bridge 2.0 es desarrollar un prototipo de sistema integrado de información para consultas estratégicas sobre el desempeño de los puentes, basado en datos obtenidos por medio de SIG, sensores de medición del desempeño, modelos de confiabilidad estructural e información técnica. Cada uno de estos sistemas utiliza modelos y herramientas de *software* diferentes que requieren su integración a nivel de datos, con el fin de apoyar consultas y manipulación integral de información.

El objetivo principal de este trabajo es hacer un estudio del estado del arte de áreas relacionadas con SHM de puentes desde el punto de vista específico de integración de información, con el propósito final de comprender los conceptos y funcionalidades generales asociados a componentes que deberán ser integrados en proyectos de monitoreo de salud de puentes tales como e-Bridge 2.0. Además, el estudio propuesto busca recopilar experiencias que eviten “reinventar la rueda” así como identificar oportunidades de diferenciación de nuevos enfoques de integración de información en SHM.

El análisis de los enfoques relacionados con la integración de información en SHM de puentes se ha dividido en las siguientes áreas de estudio:

- a. Monitoreo de salud estructural de puentes: esta área representa el marco teórico del dominio de aplicación del sistema de integración.
- b. Sistemas de monitoreo de puentes: en esta área se estudian las funcionalidades y enfoques generales de los sistemas de monitoreo de puentes existentes.
- c. Administración de información en SHM: este punto incluye el estudio de modelos de información, bases de datos y sistemas administradores de datos en SHM de puentes.

d. Integración con componentes específicos: esta categoría revisa enfoques relacionados con los componentes específicos de una arquitectura de referencia de los sistemas de SHM de puentes.

e. Integración de información en redes colaborativas: esta categoría se refiere a un estudio de modelos de redes colaborativas aplicables a la integración de información en SHM.

En las siguientes secciones se ofrece un resumen del análisis de trabajos relacionados con cada área.

Monitoreo de salud estructural de puentes

En esta sección se revisan los conceptos generales, las revisiones del estado del arte y metodologías de salud estructural de puentes, como base para comprender y analizar los requerimientos de integración de información en este tipo de sistemas.

Conceptos generales

Teniendo en cuenta la definición del concepto de SHM dada anteriormente en este artículo, entre los beneficios más comúnmente citados de SHM en general se pueden incluir (Bisby, 2004): mejor comprensión del comportamiento in situ de la estructura, detección temprana de daños, garantía de fortaleza y capacidad de servicio de la estructura, reducción del tiempo fuera de servicio, mejor mantenimiento y estrategias de asignación de recursos. En Wenzel (2009c) se presenta una visión general del monitoreo de la salud de puentes como un sistema integrado de apoyo a decisiones, basado en la *web* y con una interfaz amigable, que contiene diferentes elementos. En resumen, la arquitectura del sistema SHM está compuesta por sensores que generan datos de monitoreo, una base de datos que sirven para evaluar la condición de la estructura y generar alertas de eventos, así como diferentes sistemas de apoyo a la toma de decisiones.

Estudios del estado del arte

Existen varios estudios sobre el estado del arte en monitoreo de salud estructural de puentes. El reporte de Ahlborn et al. (2010) estudia el estado de la práctica de SHM y ofrece un resumen de las tecnologías existentes, incluyendo sensores y redes in situ, técnicas remotas y estudios de casos de puentes instrumentados.

En Enckell (2011) se presentan tecnologías establecidas y emergentes así como ejemplos relacionados con SHM y tecnologías de sensores para monitoreo de estructuras civiles, enfocándose en puentes. El libro de Wenzel (2009c) se concentra en prácticas actuales y metodologías de monitoreo dinámico de puentes.

Metodologías

Existen diversas metodologías para la determinación del nivel de riesgo estructural de los puentes. El esquema de clasificación BRIMOS (Wenzel, 2009a) se basa en cinco niveles, dependiendo del grado de profundidad de la investigación, incluyendo: calificación (*rating*), evaluación de condición, evaluación de rendimiento, evaluación detallada y predicción de vida útil. BRIMOS define una matriz de riesgo que relaciona el resultado de la evaluación del puente (muy bueno, bueno, razonable, moderado, bajo) con el impacto o consecuencia en la estructura (bajo, poco, moderado, serio, muy serio).

Según Dong y Song (2010), un sistema de SHM usualmente tendrá los siguientes componentes o pasos de una metodología de monitoreo: adquisición de datos de sensores, comunicación de

datos, procesamiento y análisis de datos, almacenamiento de datos procesados, diagnóstico y pronóstico y acceso a datos. En el caso de e-Bridge (Fase I), la metodología propuesta de evaluación de puentes incluye principalmente los siguientes pasos: inventario (registro de datos técnicos), inspección visual, análisis y priorización, inspección detallada, pruebas de carga, monitoreo y análisis de confiabilidad.

Sistemas de monitoreo de puentes

El área de sistemas de monitoreo de puentes se divide en dos: revisiones generales de sistemas y sistemas específicos de SHM de puentes.

Revisiones de sistemas

En Gastineau, Johnson y Schultz (2009) se resumen los tipos de sistemas que están disponibles comercialmente para el monitoreo de la salud de los puentes. El reporte explica los criterios necesarios para determinar cuál sistema resultará más apropiado según las necesidades de los administradores de puentes. El trabajo reportado en Dong y Song (2010) tiene como objetivo sintetizar el conocimiento y las tecnologías actuales disponibles para monitoreo de infraestructuras civiles, y simplificar el proceso de seleccionar sistemas SHM para aplicarlos a estructuras de puentes.

Sistemas específicos de SHM en puentes

BRIMOS (*Bridge Monitoring System*) ofrece un método para la identificación de sistemas y detección de daño en puentes y otras estructuras civiles, basado en la respuesta dinámica a excitaciones del ambiente tales como viento, tráfico y actividades microsísmicas (Wenzel, 2009b). En resumen, la tecnología se basa en el monitoreo de las vibraciones en el ambiente y ofrece una amplia variedad de aplicaciones en SHM.

Por otro lado, el sistema SHM Live es un sitio *web* acoplado con una base de datos que administra y despliega datos de SHM monitoreados en tiempo real en cualquier lugar del mundo (Inaudi, 2012). Los servicios incluyen diseño, instalación, monitoreo y *hardware* por un monto mensual fijo. La base de datos puede recibir datos de muchos sistemas y sensores de medición. La información se incluye en la base central desde una unidad que se encarga a su vez de recolectar los datos directamente de todos los sistemas de adquisición de datos instalados.

Administración de información en SHM

El área de administración de información en SHM se divide en dos: modelos y bases de datos y sistemas administradores de datos.

Modelos y Bases de datos

En el campo particular de SHM y de estructuras civiles en general, hay poca estandarización en cuanto a modelos de datos, tecnologías, aplicaciones y herramientas. No obstante, existen prácticas que son comúnmente aceptadas por la comunidad de expertos. Algunos proyectos de investigación y desarrollo, tales como IRIS, han producido libros sobre seguridad industrial y ciclos de vida en ingeniería que proveen una base para la estandarización (Consortium, 2012). El proyecto SAMCO también dio lugar a que se escribieran libros que se han convertido en textos de referencia en este campo (Wenzel, 2009c). La herramienta GreenEyeData ofrece facilidades de despliegue y visualización básicas de datos de mediciones de SHM y cuenta con un estándar para especificar el formato de los datos de entrada (GreenEye, 2013).

Sistemas administradores de datos

En Koo y Battista (2011) se presenta un sistema administrador de datos para SHM construido sobre MySQL para el almacenamiento, recuperación y compartición de conjuntos de datos extremadamente grandes adquiridos constantemente de sistemas SHM. El sistema también tiene una interfaz MATLAB y una interfaz *web* para facilitar el acceso a datos por parte de los investigadores usuarios.

En Tas (2010) se presenta una plataforma llamada *Bridge Sensor Mart* para la recolección, almacenamiento y análisis de datos de SHM en puentes. Entre los aspectos novedosos de este sistema está el uso de una base de datos híbrida (utiliza dos bases de datos diferentes) para aumentar la velocidad de acceso a los datos.

En Inaudi, Glisic y Vurpillot (2002) se describe la estructura de datos desarrollada en el contexto del proyecto SOFO. La estructura se basa en una BD relacional (Microsoft) e incluye un modelo básico de sensores y lecturas. Hay un módulo de adquisición de datos que permite navegar sobre la información en una BD centralizada. Luego, hay diferentes componentes que permiten hacer análisis sobre los datos almacenados.

Enfoques de integración de componentes específicos

Como se mencionó anteriormente, un sistema integrado de información para consultas estratégicas sobre desempeño de puentes se basa en datos obtenidos por medio de diferentes componentes incluyendo, p. ej., sistemas de información geográfica, medición de desempeño mediante sensores, modelos de confiabilidad estructural e información técnica de la estructura. Por tal motivo, en esta sección se hace una revisión de trabajos relacionados con cada uno de estos componentes.

Sistema de Información Técnica

Los datos técnicos que se recopilan sobre un puente dependen directamente del estándar o guía de evaluación de puentes que se aplique según los propósitos que definan. Por ejemplo, en FHWA (1995) se describe la guía utilizada por el Departamento de Transporte de Estados Unidos para la evaluación y codificación de datos de puentes. Incluye códigos de ítems que son parte integral de la base de datos utilizada para reportes y consultas sobre el estado técnico de los puentes.

A continuación, se describen algunos proyectos relacionados con información técnica de puentes:

- NBI. Como proyecto relacionado, el National Bridge Inventory (NBI) (FHWA, 2013) es un sitio *web* que se ofrece como un servicio público a todos los interesados en la condición y administración de puentes en Estados Unidos. El NBI posee una colección de más de 600,000 puentes en vías públicas en ese país.
- AASHTOWare Bridge. La asociación estadounidense AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Office) ofrece el producto AASHTOWare Bridge, que consiste en un conjunto de herramientas para inventario, inspección, evaluación y diseño de puentes (AASHTO, 2013).
- SAEP–Conavi. En Costa Rica, el Consejo Nacional de Vialidad (Conavi) ha desarrollado un Sistema para la Administración de Estructuras y Puentes (SAEP) (Monge, 2011). La idea es que en el futuro cercano el SAEP contenga un inventario de los puentes nacionales con información técnica detallada que apoye funciones estratégicas de planificación y mantenimiento.

- Estudio JICA. La Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA) realizó hace algunos años un estudio, a solicitud del Gobierno de Costa Rica, sobre el desarrollo de capacidad en planificación, rehabilitación, mantenimiento y administración de puentes, basado en 29 puentes de carreteras nacionales (JICA, 2007). Entre los objetivos está el establecimiento de herramientas de mantenimiento de puentes con manuales y lineamientos.

Confiabilidad y modelos de interpretación de datos

En esta sección, se analizan algunos modelos o metodologías para detectar comportamientos anómalos en estructuras a partir de datos de mediciones.

En Posenato (2006) se presentan dos métodos para hacer interpretación de datos “libre de modelo” (permite detectar daños sin usar modelos de comportamiento sino que usan solo datos de sensores). Los algoritmos memorizan características de series de tiempo generadas por sensores para detectar anomalías en el comportamiento de estructuras civiles.

En Phillips y Spencer (2012) se ofrece una revisión de literatura sobre simulación híbrida (pruebas experimentales en conjunto con simulación numérica). Los autores presentan un enfoque avanzado para la evaluación dinámica del rendimiento de sistemas estructurales utilizando simulación híbrida. En Bonigo (2013) se presenta un enfoque basado en la nueva área de “diagnosticabilidad” de sistemas, que podría tener aplicación en monitoreo y predicción de fallas en puentes.

El enfoque utilizado en la fase I de e-Bridge se utilizan índices de confiabilidad estructural basados en relaciones de condiciones reales (p. ej., deformaciones medidas durante pruebas de carga) versus teóricas de una estructura.

Desde el punto de vista de integración de la información, la conclusión principal es que los modelos interpretativos necesitan tener acceso a datos generados por sensores, que son procesados por sistemas estadísticos, los que a la postre producen indicadores específicos de riesgo o confiabilidad que a su vez deben almacenarse en el sistema integrado.

Sistemas de información geográficos

En esta sección se incluyen trabajos relacionados con geoportales, herramientas para el desarrollo de geoportales y SIG y algunos casos de aplicación de geoportales en escenarios estratégicos de toma de decisiones.

Geoportales

Existen muchas definiciones comunes y clasificaciones sobre el concepto de geoportal (Tait, 2005). Básicamente, se puede concluir que se trata de un portal que ofrece información o servicios almacenados en un SIG.

Tecnologías para desarrollo de geoportales

De igual forma, existen muchas iniciativas, herramientas y programas que posibilitan el desarrollo de portales con información geográfica (Association, 2012). Entre los más comunes se encuentran Open Geospatial Consortium (OGC), MapServer, GvSIG, PostGIS, GeoServer, MapFish, CartoWeb y MapBox.

Aplicación de geoportales en escenarios estratégicos

La aplicación de geoportales y SIG en escenarios que involucran decisiones estratégicas en distintas áreas socioeconómicas de interés nacional, tales como como manejo de desastres naturales, riesgo ambiental asociado al transporte, manejo de suelos, desarrollos urbanísticos,

cambios en microcuencas, etc., debe tenerse en cuenta como referencia general en proyectos de monitoreo de la salud de los puentes.

El estudio presentado en López y Guevara (2012) busca detectar los cambios de cobertura del suelo en una microcuenca urbana en Colombia, ocurridos en un lapso de casi 20 años y utilizando fotografías aéreas digitales, para conocer la relación entre la presión humana sobre la cobertura del suelo y sus impactos en los hábitats urbanos vitales. El caso descrito en Pau Aragón (2012) se refiere a la aplicación de SIG en administración de riesgos de desastres asociados a alimentos y agricultura en Etiopía. En Moliner Santisteve (2012) se documenta un estudio en el que se utiliza un SIG con indicadores de huella de carbono y huella ecológica, para evaluar el impacto ambiental del transporte de residuos sólidos urbanos en España.

Sensores de monitoreo

Entre las variables que usualmente monitorean los sensores en SHM se encuentran: carga sobre la estructura, deformación, temperatura, aceleración y video. Quizás los sensores más comunes en SHM son los de fibra óptica, pues presentan ventajas específicas tales como: son no conductivos (presentan inmunidad a la interferencia electromagnética y frecuencias de radio), estabilidad, conveniencia y flexibilidad (Navarro-Henríquez, 2014). En Enckell (2011) también se indica que el mercado de tecnologías de sensores y de sistemas de adquisición de datos está cambiando aceleradamente y se señalan como tecnologías emergentes: emisión acústica, tecnologías de radar, fotogrametría, monitoreo de corrosión, sistemas de pesaje en línea, termografía infrarroja o imágenes térmicas y textiles técnicos inteligentes.

Integración de información en redes colaborativas

Esta sección revisa trabajos relacionados con conceptos y aplicaciones de redes colaborativas así como algunas herramientas disponibles actualmente para la administración de procesos de negocio (*Business Process Management - BPM*) y flujos de trabajo (*workflows*).

Conceptos y aplicaciones de redes colaborativas

Una Red Colaborativa (CN, por las siglas en inglés de *Collaborative Network*) es una alianza constituida por varias entidades (p. ej., organizaciones, sistemas y personas) que son autónomas o independientes en cuanto a administración y políticas, están geográficamente distribuidas y son heterogéneas en términos de su ambiente operativo y metas, pero que colaboran para poder alcanzar metas comunes y cuyas interacciones son apoyadas por redes de computadores (Camarinha-Matos y Afsarmanesh, 2005). En este contexto, las entidades colaboran estrechamente con el fin de, p. ej., ofrecer productos y servicios por parte de la red colaborativa que se llevan a cabo por medio de procesos desarrollados en varias organizaciones o por diversas personas. El paradigma de redes colaborativas ha sido aplicado con éxito en dominios tan variados como manufactura industrial, servicios en turismo, laboratorios virtuales y cuidado de adultos mayores.

El escenario del monitoreo de salud estructural de puentes puede verse como uno de redes colaborativas, pues involucra la interacción de entidades como municipalidades, instituciones de gobierno, universidades, centros de investigación, empresas privadas, tomadores de decisiones, ingenieros, etc., que son autónomas, heterogéneas y distribuidas, y necesitan colaborar de cerca con el fin de alcanzar una meta común: el monitoreo efectivo de la salud de los puentes bajo análisis. Para poder habilitar el paradigma de CN, se han propuesto varios modelos de referencia que describen diversas dimensiones y componentes de este tipo de redes. Uno de los elementos comunes de cualquier tipo de CN es un administrador de procesos de negocio (BPM, siglas de *Business Process Manager*) que se encarga de coordinar los

procesos que llevan a cabo las entidades de la red para la consecución de la meta común. En el caso de SHM de puentes, es posible definir procesos de negocios entre organizaciones o bien a lo interno de una organización, como el TEC, para coordinar la interoperación de los componentes del sistema SHM, tales como sistema de información técnica, geoportal, módulo de confiabilidad y sensores.

Este tipo de escenario ha sido modelado exitosamente mediante CN y en particular enfoques de flujos de trabajo. Entre los principales sistemas o herramientas disponibles actualmente para implementar procesos de negocio o flujos de trabajo que tienen potencial para servir de base para el enfoque de integración de información en SHM de puentes, se encuentran: Joget Workflow, Taverna, Bizagi, WebRatio, Bonita, ARIS (ver también Ami & Sommer, 2007).

Otras áreas relacionadas

En general, existen muchas otras áreas de la computación que poseen un alto potencial para ser aplicadas en integración de información en SHM de puentes. A continuación se ofrece una breve descripción de algunas de ellas y sus relaciones con SHM:

- **Grandes datos (*big data*).** Este concepto se refiere al análisis avanzado de grandes volúmenes de datos de formato variable, que son alimentados al sistema a altas velocidades y requieren tiempos de respuesta cortos (Alexandrov, Brucke y Markl, 2013). Claramente, SHM presenta características que lo hacen un campo de aplicación de grandes datos y sus tecnologías.
- **Computación en la nube.** Armbrust y Konwinski (2009) se refieren a la computación en la nube como las aplicaciones ofrecidas como servicios a través de internet así como el *hardware* y los sistemas computacionales en los centros de datos que proveen esos servicios. Las ventajas de este enfoque incluyen que los usuarios pueden acceder al servicio en cualquier momento y lugar sin tener que preocuparse por la administración del *software* y *hardware* requerido. En el caso de SHM, el sistema de administración de datos podría alojarse en la nube, incluyendo las funcionalidades para visualización, análisis estadístico, panel de indicadores de control, etc.
- **Minería de datos e inteligencia de negocios.** En Wenzel, Furtner y Clifton (2013) se presentan algunos métodos novedosos para automatizar el proceso de evaluación de estructuras y, en particular, muestra el enfoque hacia la aplicación de instrumentos de minería de datos. Se presentan algunos indicadores clave de rendimiento de estructuras de puentes, incluyendo: integridad, evaluación de fatiga, localización de daño y curva del ciclo de vida. Los indicadores corresponden a un modelo de inteligencia de negocios para apoyar la toma de decisiones.
- **Inteligencia artificial y aprendizaje máquina.** Existen muchos procesos en SHM que presentan problemas que podrían resolverse utilizando técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje máquina, por ejemplo: extracción de las variables o indicadores (p. ej., grado de daño), predicción de fallas, filtrar información, coordinación de sensores inteligentes y sistemas expertos. Para este tipo de problemas, es posible usar técnicas computacionales como: redes neuronales, algoritmos y programas genéticos, redes bayesianas y árboles de decisión, entre muchas otras. Ver enfoques en Hernandez-Garcia y Sanchez-Silva (2007) acerca de las máquinas de aprendizaje para la detección de daños estructurales.
- **Ontologías para integración semántica.** Básicamente, las ontologías representan un vocabulario común que diferentes sistemas pueden utilizar para interoperar y comunicarse. En Küng, Sonnleitner, Stumptner, Kosorus y Anderlik (2013) se presenta un enfoque de integración ontológica de sistemas heterogéneos de apoyo a la toma de decisiones y al intercambio de conocimiento entre las instituciones involucradas en SHM.

Conclusiones y recomendaciones

A continuación se destacan las conclusiones y recomendaciones principales derivadas del estudio realizado sobre trabajos relacionados con integración de información en SHM, clasificadas según las áreas de análisis definidas:

- SHM de puentes. El área de SHM es un campo extenso, complejo y muy rico en cuanto a su potencial para el desarrollo de aplicaciones computacionales novedosas. Existen varios estudios del estado del arte en esta área, sin embargo, no están muy actualizados y no se enfocan específicamente en aspectos de integración de datos. A pesar de que hay muchos sistemas y tecnologías para SHM, persisten retos importantes con respecto al manejo de grandes cantidades de información en tiempo real, así como en análisis y predicción de las condiciones de los puentes.
- Sistemas de monitoreo de puentes. Del estudio realizado, los proyectos de BRIMOS y SHMLive están entre los sistemas más completos e integrales para el monitoreo de puentes. Cabe mencionar que estos son proyectos comerciales y no son sistemas de código abierto.
- Administración de información en SHM. El SHM de puentes es un dominio que está muy poco estandarizado en cuanto a modelos y enfoques de administración de datos. En la mayoría de los enfoques revisados se utiliza una base de datos relacional centralizada para recopilar la información de las unidades que a su vez obtienen los datos de los sensores.
- Integración de componentes específicos. Los componentes específicos que deben integrarse para un sistema de monitoreo de puentes presentan enfoques y tecnologías muy heterogéneos desde el punto de vista computacional. La integración de información de estos componentes debe realizarse mediante un mecanismo lo más general posible, tomando en cuenta los altos niveles de heterogeneidad, distribución física y autonomía en el manejo de información que presentan estos sistemas. Se recomienda que el enfoque de integración esté basado en servicios web, para efectos de interoperabilidad, reutilización y escalabilidad del sistema.
- Integración de información en redes colaborativas. El paradigma de redes colaborativas es aplicable al área de SHM de puentes. Con base en el presente estudio, se puede concluir que ninguno de los enfoques y proyectos revisados aplica la disciplina de redes colaborativas y, en particular, ninguno aplica la administración de procesos de negocios con el fin de integrar información entre entidades o componentes. Se recomienda analizar la posibilidad concreta de utilizar modelos y herramientas de flujos de trabajo para este propósito.
- Otras conclusiones y recomendaciones. Existen muchas tecnologías computacionales relacionadas con administración de información en SHM que podrían aplicarse, incluyendo: *big data*, computación en la nube, minería de datos, inteligencia de negocios, etc. Sin embargo, se recomienda que estas tecnologías potenciales sean evaluadas en función del alcance, recursos y calendario en su debido contexto, antes de ser consideradas para su implementación.

Por último, el material sintetizado y analizado en este documento representa una base sólida para la toma de decisiones en proyectos de uso o desarrollo de sistemas de información en SHM de puentes.

Bibliografía

- AASHTO. (2013). *AASHTOWare Bridge*. Obtenido de <http://www.aashtoware.org/Bridge/Pages/default.aspx>
- Ahlborn, T.M., Shuchman, R., Sutter, L.L., Brooks, C.N., Harris, D.K., Burns, J.W. & Oats, R.C. (2010). *The State-of-the-Practice of Modern Structural Health Monitoring for Bridges: A Comprehensive Review*. Michigan Technological University.
- Alexandrov, A., Brucke, C. & Markl, V. (2013). *Issues in big data testing and benchmarking*. Paper presented at the Proceedings of the Sixth International Workshop on Testing Database Systems - DBTest '13, New York.
- Ami, T. & Sommer, R. (2007). Comparison and evaluation of business process modelling and management tools. *International Journal of Services and Standards*, 3(2), 249-261.
- Aragó, P., Kasie, T., Grandío, A., Sergio Clark, S. & Huerta, J. (2012). *GVSIG education for Disaster Risk Management within an international cooperation project*. Paper presented at the 8as Jornadas Internacionales gvSIG, Valencia, España.
- Armbrust, M., Griffith, R., Joseph, A.D., Katz, R., Konwinski, A., Patterson, D.A., Rabkin, A., Stoica, I. & Zaharia, M. (2009). *Above the Clouds: A Berkeley View of Cloud Computing* (E. E. a. C. Sciences, Trans.). University of Berkeley.
- Association, U.I.R.M. (2012). *Geographic Information Systems: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*.
- Bisby, L.A. (2004). *ISIS Educational Module 5: An Introduction to Structural Health Monitoring*. ISIS Canada.
- Bonigo, L.B. (2013). *Diagnosability Behaviour over Faulty Concurrent Systems*. Paper presented at the XXXIX Conferencia Latinoamericana en Informática - CLEI 2013, Naiguatá, Venezuela.
- Camarinha-Matos, L.M. & Afsarmanesh, H. (2005). Collaborative networks: a new scientific discipline. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 16(439-452).
- Consortium, I. (2012). *Industrial Safety and Life Cycle Engineering - Technologies / Standards / Applications*.
- Inaudi, D., Glisic, B. & Vurpillot, S. (2002). *Database structures for the management of monitoring data*. Paper presented at the Structural Health Monitoring Workshop, Winnipeg, Canada.
- Dong, Y. & Song, R. (2010). *Bridges Structural Health Monitoring and Deterioration Detection. Synthesis of Knowledge and Technology*. (D. o. C. E. Engineering, Trans.). University of Alaska Fairbanks.
- Enckell, M. (2011). *Lessons Learned in Structural Health Monitoring of Bridges Using Advanced Sensor Technology*. Doctorate Ph.D. Thesis, Royal Institute of Technology, Sweden.
- FHWA. (1995). *Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nation's Bridges*. Federal Highway Administration.
- FHWA. (2013). *The National Bridge Inventory*. Obtenido de <http://nationalbridges.com/nbi>
- Garita, C. & Ortiz, G. (2014). *Towards a Workflow Management Approach for Health Monitoring of Bridges*. Paper presented at the 15th IFIP International Working Conference on Virtual Enterprises PRO-VE, Amsterdam, The Netherlands.
- Gastineau, A., Johnson, T. & Schultz, A. (2009). *Bridge Health Monitoring and Inspections. A Survey of Methods*. University of Minnesota.
- Glisic, B. & Inaudi, D. (2007). *Fibre Optic Methods for Structural Health Monitorin*. 1 ed. John Wiley & Sons.
- GreenEye. (2013). *Green Eye Data*. Obtenido de http://www.green-eye-data.com/default_en.htm
- Hernandez-Garcia, M. & Sanchez-Silva, M. (2007). Learning Machines for Structural Damage Detection. En N. Lagaros y Y. Tsompanakis (Eds.), *Intelligent Computational Paradigms in Earthquake Engineering*. IGI Global.
- Inaudi, D. (2012). *SHMLive Web-based Data Management Software*.
- JICA. (2007). El estudio sobre el desarrollo de capacidad en la planificación de rehabilitación, mantenimiento y administración de puentes basado en 29 puentes de la red de carreteras nacionales en Costa Rica. Resumen de Informe Final.
- Koo, K.Y. & Battista, N.D. (2011). *SHM Data Management System Using MySQL Database with MATLAB and Web Interfaces*. Paper presented at the 5th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-5), Cancún, México.

- Küng, J., Sonnleitner, E., Stumptner, R., Kosorus, A.H. & Anderlik, S. (2013). Utilizing Ontologies to Integrate Heterogeneous Decision Support Systems. En H. Wenzel (Ed.), *Industrial Safety and Life Cycle Engineering. Technologies / Standards / Applications*.
- López, J. & Guevara, C. (2012). *Análisis del cambio de tipo de cobertura en la microcuenca urbana Hato de la Virgen ubicada en el municipio de Ibagué*. Paper presented at the 8as Jornadas Internacionales gvSIG, Valencia, España.
- Moliner Santistevé, R.V.N., Garraín Cordero, D., Gasch García, C. & Muñoz Suárez, I. (2012). *Aplicación de GVSIG en un Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental del Transporte de Residuos*. Documento presentado en las 8as Jornadas Internacionales gvSIG, Valencia, España.
- Monge, A. (2011). *Manual de Instalación de Versión Educativa del Sistema de Administración de Estructuras y Puentes (SAEP)*. San José: Conavi.
- Navarro-Henríquez, F. (2014). Sensores de fibra óptica FBG para el monitoreo de la salud estructural de los puentes. *Tecnología en Marcha*, 27(4).
- Phillips, B.M. & Spencer, B.F., Jr. (2012). Model-Based Framework for Real-Time Dynamic Structural Performance Evaluation. *Newmark Structural Engineering Laboratory Report Series 031*.
- Posenato, D., Lanata, F., Inaudi, D. & Smith, I.F.C. (2006). Model Free Interpretation of Monitoring Data. *Intelligent Computing in Engineering and Architecture*, 4200.
- Tait, M. (2005). Implementing geoportals: applications of distributed GIS. *Computers, Environment and Urban Systems*, 29(1).
- Tas, N.C., Dejori, M. & Neubauer, C. (2010). *Bridge Sensor Mart: A Flexible and Scalable Data Storage and Analysis Framework for Structural Health Monitoring*. Paper presented at the 5th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Philadelphia, USA.
- Wenzel, H. (2009a). *From Structural Health Monitoring to Risk based Infrastructure Management*. Paper presented at the 4th International Conference on Structural Health Monitoring on Intelligent Infrastructure (SHMII-4) 2009, Zurich, Switzerland.
- Wenzel, H. (2009b). *From Structural Health Monitoring to Risk based Infrastructure Management*. Paper presented at the 4th International Conference on Structural Health Monitoring on Intelligent Infrastructure - SHMII-4 2009, Zurich, Switzerland.
- Wenzel, H. (2009c). *Health Monitoring of Bridges* (1st ed.): Wiley.
- Wenzel, H., Furtner, P. & Clifton, R. (2013). *The Role of Structural Health Monitoring in the Life-Cycle-Management of Bridges*. Paper presented at the 8th International Cable Supported Bridge Operators Conference - ICSBOC 2013, Edinburgh, Scotland.

Evolución de los modelos en los procesos de innovación, una revisión de la literatura

Evolution of innovation process models, a literature review

Leonel Fonseca-Retana¹, Raquel Lafuente-Chryssopoulos²,
Ronald Mora-Esquivel³

Fecha de recepción: 25 de febrero del 2015

Fecha de aprobación: 6 de julio del 2015

Fonseca-Retana, L; Lafuente-Chryssopoulos, R; Mora-Esquivel, R. Evolución de los modelos en los procesos de innovación, una revisión de la literatura. *Tecnología en Marcha*. Vol. 29, Nº 1, Enero-Marzo. Pág 108-117.

1 Ingeniero Industrial, Escuela de Ingeniería en Producción Industrial, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: lfonseca@tec.ac.cr

2 Ingeniera Industrial, Escuela de Ingeniería en Producción Industrial, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: rlafuente@tec.ac.cr

3 Economista y Administrador de Empresas, Escuela de Administración de Empresas, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: rmora@itcr.ac.cr

Palabras clave

Innovación; proceso de innovación; modelos; innovación tecnológica.

Resumen

Se considera que la innovación es un factor relevante en el desempeño de las organizaciones, porque implica llevar al mercado ideas novedosas que representan valor para los clientes. Uno de los aspectos que ha llamado la atención es el proceso que llevan a cabo las organizaciones para innovar.

Desde la primera mitad del siglo XX se han propuesto varios modelos de procesos de innovación, los cuales han ido evolucionando según el contexto económico prevaleciente en su momento, desde la expansión industrial posterior a la segunda guerra mundial, cuando el desarrollo de innovaciones seguía un proceso lineal secuenciado que se iniciaba con la investigación básica, y que predominó hasta mediados de los años 70. Después se desarrollaron modelos que consideran que el proceso no necesariamente empieza con la investigación, sino que puede provenir de otras áreas de la empresa. Esto significa que el conocimiento no solo reside en la investigación y el desarrollo (I+D), ya que los desarrollos pueden surgir incluso de la demanda de los clientes; además, la secuencia para lograr una innovación no es lineal ni unidireccional. Estos modelos tuvieron su mayor aplicación hasta mediados de los años 80; luego se incorporó el concepto de “etapas y puertas”, según el cual, debe haber una evaluación para que el desarrollo de una innovación pueda pasar de una etapa a otra del proceso. Considerando lo anterior, el presente artículo busca describir las principales características de los modelos que señala la literatura, su evolución y el contexto en el que surgieron.

Keywords

Innovation; innovation process; models; technological innovation.

Abstract

Innovation has been considered a relevant factor in the performance of organizations since it involves taking innovative ideas to market that represent a value for customers. One of the aspects that has caught the attention in this field of study is the process organizations deploy to innovate, that is, the process of innovation.

Regarding this matter, different models of innovation processes have been proposed, which began to arise in the first half of 20th century, and later evolved according to the prevailing economic context, that is, from the industrial expansion that took place after the Second World War when innovations followed a sequenced linear process that began with basic research, this model was dominant until the mid-1970s; subsequently new models were developed that considered that the process does not necessarily starts with the research, but that it might come from other areas of the firm, since the knowledge not only lies in R&D, it even considered that developments could arise from the customer's demand for specific solutions furthermore, the sequence is not linear or unidirectional in order to obtain an innovation, these models had its greater application until the mid-1980s, to then incorporate the concept of “stages and gates”, according to which, the development of an innovation could go from one stage to another in the process, only after it had complied a specific assessment. Considering the above, this article describes the main features of these models according to the literature, its evolution and the context in which they arose.

Introducción

Desde el siglo pasado, la innovación ha sido un campo de interés de estudio debido al papel que juega en el desempeño de las organizaciones. Además de las diversas definiciones que existen de este concepto, así como de las implicaciones que encierra, uno de los aspectos que han creado mayor interés es conocer la forma en que se realiza el proceso de innovación. Es decir, las etapas por medio de las cuales las empresas realizan sus desarrollos de innovación. Lo anterior tiene una importancia evidente pues si se tiene claro cómo se hace, podrían darse las pautas para que las organizaciones que no tienen un proceso de innovación propiamente dicho, o que por su posición en el mercado están en la búsqueda de ventajas competitivas derivadas de nuevos productos o mejoras en sus procesos, pueden utilizar este conocimiento para mejorar el proceso por medio del cual desarrollan sus innovaciones.

Debido a la forma en que operan las empresas, así como a la aceleración de los cambios que se dieron en el ambiente económico y competitivo de la segunda mitad del siglo XX, tanto en el orden académico como empresarial, gradualmente surgen propuestas que describen lo que es o proponen lo que debería ser un modelo de proceso de innovación. Estos modelos han mostrado cambios en el tiempo y parecen estar sujetos a condiciones del contexto de su época. Por estas razones, el objetivo de este artículo es describir las principales características de los modelos que destaca la literatura, su evolución y algunos rasgos del contexto de la época en que surgieron.

La innovación y el proceso de innovación

La innovación desempeña un papel importante en las empresas pues se considera una fuente de ventaja competitiva (Dess & Pickens, 2000; Brown & Eisenhardt, 1995). De hecho, se ha señalado la capacidad de innovar como uno de los determinantes importantes del desempeño empresarial (Mone, Mckinley & Barker III, 1998). En este sentido, la capacidad de innovación contribuye a la materialización económica de las ideas (González-Pernía & Peña-Legazkue, 2007, pág. 131).

Conceptualizar la innovación no es sencillo, debido a la variedad de definiciones que presenta la literatura. A pesar de ello, es posible destacar tres elementos que sobresalen en las definiciones a la hora de caracterizar la innovación: a) “novedad”, b) su aplicación, uso práctico o comercialización y c) “idea”. El primero se refiere a la innovación como “algo nuevo”, de tipo radical, o una mejora significativa en algo existente, de tipo incremental (Crossan & Apaydin, 2010, pág. 1167).

Según el segundo elemento, la innovación debe serlo para algún usuario, por lo tanto, un segundo atributo inherente a la innovación es lo afirmado por varios autores,⁴ al dejar claro que una invención o novedad no es innovación si no tiene un uso práctico o comercial. Finalmente, la tercera característica es vista como una fuente para innovar (Crossan & Apaydin, 2010). De acuerdo con lo señalado por Amabile, Conti, Coon, Lazenby y Herron (1996, pág. 1154), todas las innovaciones comienzan con ideas creativas, con el hecho de que una persona o grupo aporte buenas ideas y se logre desarrollarlas más allá de su propuesta inicial.

Unas de las categorías de innovación es la de tipo tecnológico. A ella pertenecen las innovaciones de producto definidas como la “introducción de un bien o un servicio nuevo, o

4 Entre ellos, Myers y Marquis (1969), Utterback (1971), Freeman (1982), Goshal y Barlett (1987), Pérez C. (1988), Delaney (1993), Amabile et al (1996), Levitt (2001), Means y Faulkner (2001) y Evans (2004).

significativamente mejorado, en cuanto a sus características o en cuanto al uso al que se destina” (Eurostat & OCDE, 2006, pág. 58). También forman parte de esta categoría las innovaciones de proceso que se han conceptualizado como la “introducción de un nuevo, o significativamente mejorado, proceso de producción o de distribución” (Eurostat & OCDE, 2006, pág. 59).

En términos generales, un proceso se define como un conjunto, secuencia o interrelación de actividades (Collier & Evans, 2009, pág. 17; Lager, Hallberg & Ericksson, 2010, pág. 287), así como una mezcla o transformación de insumos (Scherkenbach, 1998, pág. 19), todos orientados a producir un determinado resultado. Tomando estos dos conceptos, podemos definir un proceso de innovación como un conjunto de actividades que tienen como resultado “productos y servicios nuevos y mercadeables” (Burgelman, Maidique & Wheelwright, 2001, pág. 4). Es por eso que el proceso centra la atención en buscar respuestas a la pregunta del “cómo” innovar (Crossan & Apaydin, 2010).

Para una empresa, conocer y comprender el proceso de innovación es de gran importancia, especialmente para entender la variedad de formas en que podría organizar sus actividades innovadoras y evaluar sus resultados.

La literatura ofrece modelos de procesos de innovación de tipo descriptivo y normativo. Los primeros se nutren de estudios empíricos para describir y evaluar la práctica real y están orientados a servir como herramientas didácticas. Los segundos son el resultado de estudios de casos o estudios cuantitativos que analizan el desarrollo de nuevos productos con éxito. Estos se presentan como modelos de procesos ideales o como herramientas de gestión (Verworn & Herstatt, 2004).

Modelos de procesos de innovación

El primer modelo conceptual que describe el proceso de innovación en las empresas surge en la década de los años 40 del siglo XX. Se da en un contexto caracterizado por una rápida expansión industrial, producto de las oportunidades ofrecidas por las tecnologías emergentes (semiconductores, computación, materiales sintéticos). Destacan, asimismo, las políticas de apoyo gubernamental a las actividades de I+D. En este sentido, se pueden citar los programas de estímulo para el avance científico en universidades y laboratorios, la preparación de mano de obra especializada y el apoyo financiero a grandes proyectos de I+D en las empresas; o las grandes corporaciones que ponían énfasis en las actividades de I+D para la creación de nuevos productos ante la creciente demanda (Rothwell, 1994).

En este contexto, se propone un modelo que describe el proceso de innovación como una secuencia de etapas que toma la investigación básica (fuente de los descubrimientos científicos) como el punto de partida para el desarrollo de las innovaciones. Esta alimenta la etapa de diseño e ingeniería, luego la de producción, posteriormente la de mercadeo y, por último, la de ventas (Rothwell, 1994); de ahí proviene su denominación de “modelo lineal de innovación” (Castro, 2013). Considerando la investigación básica como el factor impulsor de la innovación, esta responde a un modelo de *technology push* (Rothwell, 1994).

Según Castro (2013), este modelo llegó a ser el pensamiento convencional entre las décadas de 1950-1970, siendo de gran ayuda principalmente en las actividades generales que suponían una innovación. Sin embargo, fue criticado ya que en muchos casos las innovaciones no nacen necesariamente de una investigación básica ni todas son de origen radical.

Posteriormente, se menciona en la literatura una variante del modelo que conserva el carácter secuencial y lineal, aunque, a diferencia del anterior, la fuente inicial del proceso está dominada por factores de mercado. Este modelo surge en un momento en el que las compañías enfatizaron

sus objetivos de crecimiento (orgánico o por adquisición) y sus estrategias de diversificación, con un énfasis en el *marketing* para lograr cuota de mercado (Rothwell, 1994). De acuerdo con Rothwell, en esa época se puso el acento en las economías de escala y en el desarrollo de productos basados en tecnologías existentes. El modelo conceptual propuesto tenía como punto de partida los factores de la demanda del mercado, que alimentan la etapa de diseño e ingeniería seguida por la etapa de producción, luego la de mercadeo y, finalmente, la etapa de ventas. A este tipo de proceso de innovación se le conoce como *market pull* (Rothwell, 1994).

En un tercer momento surge el modelo propuesto por Summer Myers y Donald Marquis, considerado por Rothwell (1994, pág. 330) como un modelo descriptivo que sirve de marco de referencia conceptual para el estudio de los procesos de innovación, el cual también es mencionado por Escorsa y Valls (2003, pág. 27) como un esquema próximo a la realidad empresarial. Este modelo propone que las innovaciones tecnológicas tienen como punto de partida una propuesta de idea (fase de iniciación). Esta idea es el resultado de la síntesis de información proveniente de dos fuentes: a) el estado del conocimiento técnico existente y disponible en ese momento y b) el grado de uso económico y social de los productos y procesos existentes, que está determinado por la competencia y consumidores actuales o potenciales.

El modelo propone (Escorsa & Valls, 2003) que la innovación proviene no necesariamente de un proceso de investigación sino de cualquier área de la organización, asumiendo que para generar innovación debe existir un conocimiento (*know-how*) que alimente las distintas etapas, entre las que están: el reconocimiento de la factibilidad técnica, reconocimiento de una demanda potencial, actividades de investigación y desarrollo e información utilizable. En este caso, resalta el hecho de que el proceso puede desarrollarse en distintos departamentos a la vez, que entre sí alimentan la idea o solución al problema planteado para luego implementar o difundir los resultados. A esta síntesis de necesidad potencial y de medios factibles para desarrollarla se la considera el factor crucial del proceso (Utterback, 1971, pág. 79).

En esta fase, la empresa pone en marcha el proceso que “examinará las posibilidades de la tecnología y, si estas se muestran insuficientes, ‘retrocederá’ hasta la investigación aplicada, o incluso a la investigación básica, a partir de combinaciones nuevas de las tecnologías existentes” (Escorsa & Valls, 2003, pág. 28). Esta fase se alimenta del estado del conocimiento actual para generar una solución. El resultado de esta fase es lo que Utterback (1971, pág. 77) denomina “invención” y que define como una solución original que proviene de la síntesis de la información acerca de una necesidad.

De acuerdo con lo señalado por Rothwell (1994), a finales de los años 60 y 80, las empresas debieron adoptar estrategias orientadas a la eficiencia y la racionalización de recursos, debido a la crisis del petróleo, fenómenos inflacionarios y saturación de la demanda. Señala este autor que durante esos años se produjeron diversos estudios empíricos sobre procesos de innovación que buscaban comprender la base de su éxito.

Hasta este punto, el modelo parecía ser más acorde con las necesidades empresariales, sobre todo para poder responder a los acelerados cambios de los mercados. Atendiendo a tal necesidad, aparecen otras propuestas que ayudan a definir internamente el proceso de desarrollo de las actividades para cada departamento involucrado.

Como consecuencia, en 1983 nace el modelo de Robert Cooper (Carbonell Fouquie, 2001), que propone un proceso de innovación basado en etapas y puertas. Rothwell (1994, pág. 330) afirma que este modelo es de tipo normativo y lo considera una base para la estandarización de modelos de procesos de innovación en las empresas.

Cooper (1994, págs. 3-4) menciona que en los años 80 estudios de la empresa de consultoría Booz Allen Hamilton Inc. evidenciaban que la mitad de los esfuerzos se destinaba a nuevos productos que no lograban ser exitosos. Ante ello, Cooper propone un modelo denominado

de segunda generación de etapas y puertas, como muestra la figura 1. Cooper advierte que el concepto de etapas y puertas no es nuevo, ya que el esquema de primera generación se ubica en la década de los años 60, cuando la NASA desarrolló el Programa PPP (Phased Project Planning). Este programa consistía en una desagregación de fases discretas que contenían puntos de revisión del tipo “pasa/no pasa” al final de cada una.

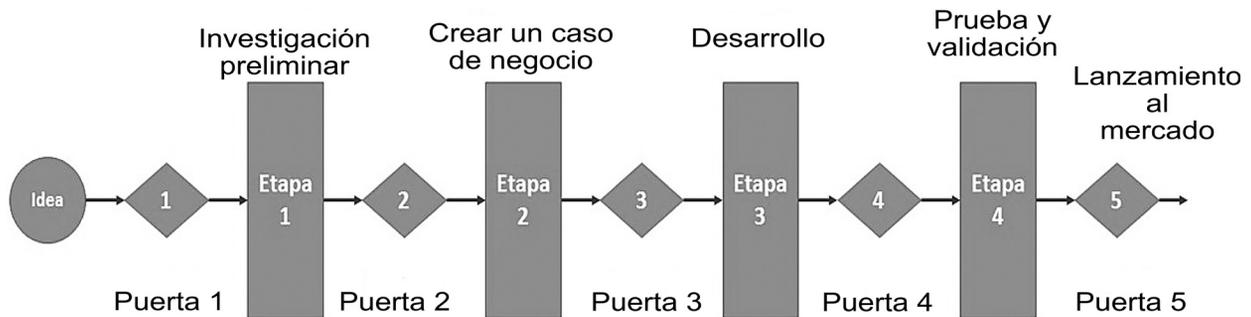


Figura 1. Modelo de etapas y puertas de Cooper. Fuente: Cooper (1994, pág. 5).

De acuerdo con el modelo, el proceso de innovación se puede representar como un conjunto de fases, cada una compuesta por una serie de buenas prácticas (requeridas o recomendadas) necesarias para hacer avanzar el proyecto hacia la siguiente puerta. Esta última la definen decisiones del tipo “pasa/no pasa”, que sirven como puntos de chequeo de control de calidad, de priorización de decisiones y para consensuar si se debe o no seguir el camino a la siguiente etapa (Cooper, 2008).

El proceso se inicia con una idea de producto que es evaluada de acuerdo con criterios y que, si estos son satisfechos, pasa a una primera fase de evaluación del proyecto en términos de mercado, tecnología y recursos financieros. Una vez pasado el segundo tamiz, se continúa con la siguiente etapa, en la que se llevaría a cabo un estudio mucho más detallado que se traducirá en un plan de negocios, que será la base para la evaluación en la siguiente puerta. De continuar, seguiría a la fase tres, en el cual la idea se convierte finalmente en un prototipo de producto que se somete al siguiente filtro de evaluación que asegure el cumplimiento de las especificaciones. En la cuarta etapa se realizan diferentes pruebas de validación del nuevo producto, cuyo filtro consiste en la decisión de si este pasará o no a la etapa de producción y su lanzamiento al mercado. Estos filtros tienen el objetivo de valorar los resultados del proyecto de desarrollo del nuevo producto (Herstatt & Verworn, 2004, pág. 331).

El modelo de Cooper, en conjunto con el modelo de Marquis, podrían tomarse como complementos para la organización y ayudar a reducir la incertidumbre que se produce como resultado del cambio inherente a una innovación. En adelante, los modelos se basan más en la flexibilidad y en la retroalimentación interna como base de la innovación. Este enfoque lo comparte Kline (1985), quien critica la simplicidad de los modelos y propone cinco caminos o trayectorias que deben seguir, todas alimentadas por el conocimiento, tal como lo estableció Marquis, pero con mayor detalle entre la retroalimentación y la información que debe trasladarse de una etapa a otra, según Escorsa y Valls (2003), la diferencia con el modelo lineal es que el de Kline relaciona la ciencia y la tecnología en todas sus partes y no solo al principio; además resalta la posibilidad de encontrar y solucionar problemas, por medio de propuestas que no necesariamente implican el desarrollo de algo totalmente nuevo, como lo suponía el modelo lineal.

En relación con la innovación, Kline y Rosenberg (1986) mencionan que:

- a) Existen dos fuerzas conductoras que controlan el desarrollo de las innovaciones, a saber:
 - 1) las fuerzas del mercado, que tienen relación con variables que continuamente ofrecen oportunidades comerciales para el desarrollo de innovaciones de producto, y 2) las fuerzas del progreso científico y tecnológico, que ofrecen posibilidades para desarrollar, mejorar productos o producirlos a menor costo. Estas dos fuerzas hacen de la innovación un proceso de una gran incertidumbre.
- b) El proceso de innovación no está dominado por la investigación básica, ya que esta puede surgir de: 1) la que disponga la organización, 2) la que provee la tecnología en su momento y 3) del proceso de aprendizaje a través de la experiencia que se acumula en la producción continua de un producto. En caso de que las fuentes disponibles de información no puedan resolver problemas, se plantea la necesidad de recurrir a la investigación básica para completar la innovación.
- c) Las innovaciones no tienen que ser homogéneas en términos del grado (incremental o radical), aun cuando hay una tendencia a identificar las de tipo tecnológico con innovaciones radicales, ya que estas pueden ser mejoras significativas en los procesos o los productos.
- d) Las interacciones y retroalimentaciones son dos elementos esenciales en los procesos de innovación. Los obstáculos y las fallas son parte del proceso de aprendizaje en su desarrollo, por lo que se requiere la retroalimentación y el seguimiento de las acciones.

Las cinco rutas (ver figura 2) que pueden seguirse son (Kline & Rosenberg, 1986): primero, la cadena central de la innovación, en la que una necesidad del mercado conduce a un invento o diseño analítico. De acuerdo con Escorsa y Valls (2003), este se denomina diseño de ingeniería, utiliza componentes y resulta en un artefacto o sistema que le da forma a la idea inicial. Seguidamente, se pasa a un proceso de diseño más detallado que acaba en un prototipo, que se prueba en la etapa de desarrollo tecnológico incorporando distintos elementos al producto para su fabricación y comercialización.

La segunda trayectoria está constituida por un conjunto de interacciones entre cada etapa del camino central de la innovación y su etapa anterior. Por otro lado, están las retroalimentaciones entre el producto final y las etapas antecesoras, que procuran crear correcciones o mejoras a estas fases previas para próximos diseños. Sin embargo, en el modelo destacan la interacción entre el producto final y el mercado potencial. De acuerdo con el modelo “la retroalimentación es parte de la cooperación entre la especificación del producto, su desarrollo, los procesos de producción, el *marketing* y los componentes de servicio de una línea de producto” (Kline & Rosenberg, 1986, pág. 289).

En la tercera ruta se postula la conexión del conocimiento y la investigación con la cadena central de innovación, vista como vínculos que se extienden a lo largo del proceso. Como se observa en la figura 2, cuando cada etapa enfrenta un problema recurriría primero al conocimiento existente; cuando no se logra obtener la información que se necesita, se debería recurrir al siguiente nivel de la investigación.

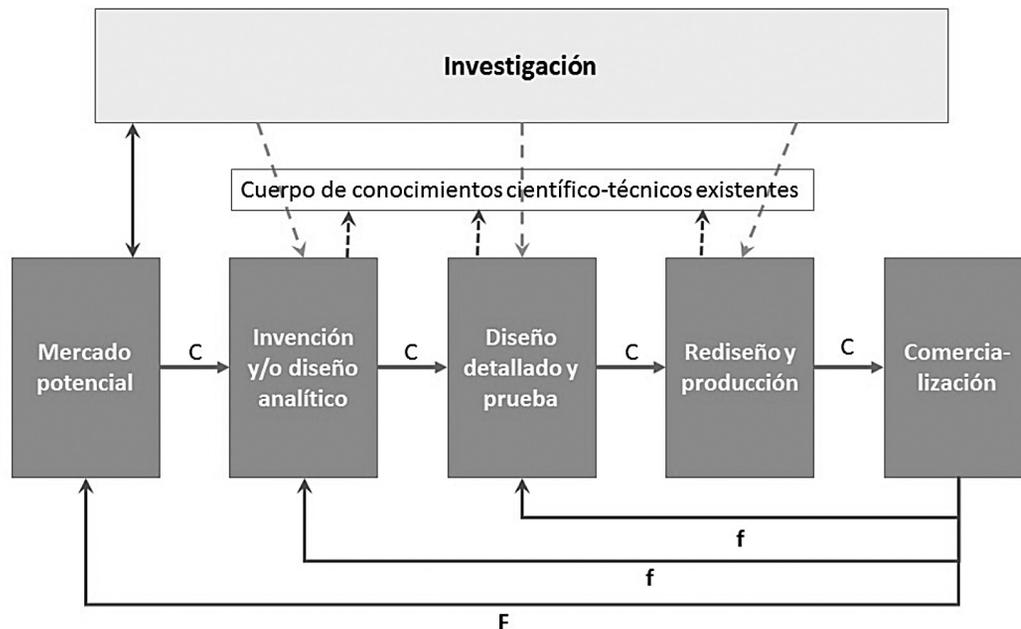


Figura 2. El modelo de enlaces en cadena de Kline. Fuente: Tomado de Kline y Rosenberg (1986, pág. 290).

Una cuarta ruta en el modelo representa el vínculo posible entre la investigación y la fase de invención o diseño analítico, en el sentido de que la nueva ciencia podría hacer posible la creación de innovaciones radicales. De acuerdo con sus proponentes, este vínculo no es usual en las empresas, pero no debería dejarse de lado. Finalmente, la última trayectoria simboliza la retroalimentación entre la fase del producto final y la investigación.

Como se ha visto, la evolución de las propuestas se enfoca en dar mayores probabilidades a la empresa para desarrollar sus innovaciones en menor tiempo, tal es el caso del modelo de Hughes y Chafin (1996), Ahmed y Sheperd (2010) y Damanpour y Schneider (2006), quienes presentan, cada uno según su propuesta, ciclos de desarrollo que agilizan el resultado final y el lanzamiento al mercado del producto o servicio.

Conclusiones

La revisión de los modelos referentes que han intentado describir los procesos de innovación en las empresas hace patente la diversidad con que se han enfocado las etapas del desarrollo de innovaciones tecnológicas. En efecto, las propuestas han ido agregando una mayor complejidad a través del tiempo, debido a la identificación de elementos fuera de la ciencia que intervienen de forma activa en la forma en que se hacen las innovaciones.

Los primeros modelos centraron su fundamento en el aporte preponderante de la investigación básica y la investigación aplicada al desarrollo de nuevos productos, lo que fue consecuencia del impulso que tuvieron los centros de investigación con aportes de los gobiernos en materia de I+D, con la consecuente y gradual creación de nuevas industrias ligadas a la tecnología. Posteriormente se privilegian factores de mercado como desencadenadores del proceso de innovación, ante la crítica de que no necesariamente todo proceso de innovación se nutre de investigación básica. Estos modelos describieron el desarrollo de innovaciones como un proceso lineal en el que las etapas debían necesariamente darse en forma secuencial.

Modelos propuestos posteriormente plantearon que tal linealidad no era un requisito del proceso de innovación, además de que el inicio de las ideas no necesariamente debía provenir de la investigación y desarrollo, sino que también podían originarse en otras unidades de la organización e incluso de otros actores externos a la empresa (como clientes o proveedores, entre otros). Otra particularidad que deja ver esta nueva visión de los procesos de innovación es el carácter interactivo y concurrente que podría estar presente en las etapas de desarrollo de innovaciones.

Conforme se hicieron más comprensivas las propuestas de modelos de los procesos de innovación, se llegó al modelo de Etapas y Puertas, considerado como dominante posteriormente. Este propone que, además de las etapas que ya se habían planteado en modelos anteriores, debía darse en cada una un proceso de evaluación en el que se decidiera si el desarrollo podía pasar o no a la siguiente etapa. Al parecer, elementos nuevos, como flexibilidad e interacciones, podrían estar presentes en los modelos de innovación. En este sentido, resulta importante estudiar el fenómeno de los procesos de innovación para determinar qué tan cerca se encuentra la práctica empresarial de las propuestas de modelo que se describieron en este artículo.

Bibliografía

- Ahmed, P. & Sheperd, C. (2010). *Innovation Management, Context, strategies, systems and processes*. London: Financial Times Press.
- Amabile, T., Conti, R., Coon, H., Lazenby, J. & Herron, M. (1996). Assessing the work environment for creativity. *Academy of Management Journal*, 39(5), 1154-1184.
- Brown, S. & Eisenhardt, K. (1995). Product development: Past research, present finding, and future directions. *Academy of Management Review*, 20(2), 343-378.
- Burgelman, R., Maidique, M. & Wheelwright, S. (2001). *Strategic management of technology and innovation*. 3 ed. New York: McGraw-Hill/Irwin.
- Carbonell Fouquie, M. (2001). Caracterización de los modelos etapa-puerta de desarrollo de nuevos productos. *Cuadernos de Administración*, (25), 104-120.
- Castro, E. (2013). El significado de innovar. Documento de Trabajo del Programa de *Experto en divulgación y comunicación de la ciencia y la tecnología*, Universidad de Oviedo, Instituto de Gestión de la Innovación y del Conocimiento, Organización de Estados Iberoamericanos, España
- Collier, D. & Evans, J. (2009). *Administración de operaciones: Bienes, servicios y cadenas de valor*. 2 ed. México: Cengage Learning.
- Cooper, R. (1994). Perspective: Third Generation New Product Processes. *Journal of Product Innovation Management*, 11, 3-14.
- Cooper, R. (2008). Perspective: The Stage-Gate Idea-to-Launch Process-Update. What's new, and NexGen Systems. *Journal of Innovation Management*, 25, 213-232.
- Crossan, M. & Apaydin, M. (2010). A Multi-Dimensional Framework of Organizational Innovation: A Systematic Review of the Literature. *Journal of Management Studies*, 47(9), 1154-1190.
- Damanpour, F. & Schneider, M. (2006). Phases of the adoption of innovation in organizations: effects of environment, organization and top managers. *British Journal of Management*, 216-236.
- Delaney, E. (1993). Technology search and firm bounds in biotechnology: New firms as agents of change. *Growth and Change*, 24, 206-228.
- Dess, G. & Pickens, J. (2000). Changing roles: Leadership in the 21st century. *Organizational Dynamics*, (28), 18-34.
- Escorsa, P. & Valls, J. (2003). *Tecnología e innovación en la empresa*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, SI.
- Eurostat & OCDE. (2006). *Guía para la recogida e interpretación de datos sobre innovación*. 3 ed. España: Grupo Tragsa.

- Gómez, G. (2009). La innovación como estrategia y solución empresarial para impulsar la competitividad y un crecimiento sostenible a largo plazo. *Ciencia y Mar*, 13(38), 51-60.
- González-Pernía, J. & Peña-Legazkue, I. (2007). Determinantes de la capacidad de innovación de los negocios emprendedores en España. *Economía Industrial*, 129-148.
- Herstatt, C. & Verworn, B. (2004). Innovation process models and their evolution. En D. Probert, O. Granstrand, A. Nagel, B. Tomlin, C. Herstatt, H. Tschirky y T. Durand, *Bringing technology and innovation into the boardroom: Strategy, innovation and competences for business value* (pp. 326-346). New York: Palgrave Macmillan.
- Kline, S. & Rosenberg, N. (1986). An overview of innovation. En R. Landau y N. Rosenberg, *The positive sum strategy: Harnessing technology for economic growth* (pp. 275-305). Washington, D.C.: National Academy Press.
- Lager, T., Hallberg, D. & Ericksson, P. (2010). Developing a process innovation work process: The LKAB experience. *International Journal of Innovation Management*, 14(2), 285-306.
- Mone, M., Mckinley, W. & Barker III, V. (1998). Organizational decline and innovation: A contingency framework. *Academy of Management Review*, 23(1), 115-132.
- Rothwell, R. (1994). Towards the fifth-generation innovation process. *International Marketing Review*, 11(1), 7-31.
- Scherkenbach, W. (1998). *La ruta Deming a la calidad y la productividad: Vías y barreras*. 4 reimp. México: Compañía Editorial Continental.
- Utterback, J. (1971). The process of technological innovation within the firm. *Academy of Management Journal*, 14(1), 75-89.
- Verworn, B. & Herstatt, C. (2004). Innovation Process Models and Their Evolution. En T. Durand, *Bringing technology and innovation into the boardroom: Strategy, innovation and competences for business value* (pp. 326-346). Basingstoke: Palgrave MacMillan.

Serialización/deserialización de objetos y transmisión de datos con JSON: una revisión de la literatura

Object serialization/deserialization and data transmission with JSON: paper review

Juan Antonio Mora-Castillo¹

Fecha de recepción: 22 de abril del 2015

Fecha de aprobación: 27 de agosto del 2015

Mora-Castillo, J. Serialización/deserialización de objetos y transmisión de datos con JSON: una revisión de la literatura. *Tecnología en Marcha*. Vol. 29, Nº 1, Enero-Marzo. Pág 118-125.

¹ Gerente de Desarrollo de Sistemas en la empresa Desert Development Company. Estudiante de la Maestría en Administración de la Tecnología de Información, Universidad Nacional, Costa Rica. Correo electrónico: jmora_castillo@ice.co.cr Teléfono: (506)8842-7994.

Palabras clave

Desarrollo de software; JSON; transmisión de datos; serialización/deserialización de datos; revisión de literatura.

Resumen

En este artículo se presentan los resultados de la revisión de literatura sobre uno de los métodos de serialización/deserialización de objetos que usa la notación JSON (siglas en inglés de JavaScript Object Notation, o Notación de Objetos de JavaScript).

Uno de los resultados más importantes de dicha revisión es que JSON es el método con mayor desempeño a la hora de serializar/deserializar objetos. También se concluye que no existen muchas revisiones de literatura sobre el uso de JSON como herramienta de serialización/deserialización sino casos prácticos. Si se toma en cuenta que la serialización/deserialización de objetos es un mecanismo por el cual un objeto pasa de ser objeto a texto, es transportado a cualquier destino y finalmente se vuelve a transformar a objeto, dicha información teórica resulta importante, ya que enriquecería más el tema para los usuarios de JSON en el desarrollo de sus aplicaciones.

Keywords

Software Development; JSON; Data Transmission; Data Serialization/Deserialization; Literature Review.

Abstract

The present systematic literature review is to review the literature of one method of serialization / deserialization of objects which uses JSON notification. Among the most important results of this review is that JSON is the method with higher performance when serializing / deserializing; also, a conclusion is that there are not many reviews literature on the use of JSON as serialization tool / deserialization but practical cases. Considering that the serialization / deserialization of objects is a mechanism by which an object changes from a text object is transported to any destination and finally becomes transform object. This theoretical information would be important because the issue further enrich users JSON in developing their applications.

Resumen

Introducción

Hoy en día, los desarrolladores de aplicaciones *web* enfrentan el reto de incluir en sus programas algoritmos de serialización/deserialización y transmisión de datos que permitan convertir objetos de diferentes tipos a texto, transportarlos y finalmente volver a ser el objeto que eran antes.

Según la definición que proporciona Microsoft en su sitio web oficial para desarrolladores MSDN, JavaScript Object Notation (JSON) es un formato de codificación eficaz que permite intercambios rápidos de cantidades pequeñas de datos entre los exploradores de cliente, tales como Internet Explorer, Google Chrome y servicios web, por lo cual se le considera un gran método de desarrollo web para la serialización/deserialización en la creación de aplicaciones.

La literatura seleccionada explica el proceso de serialización/deserialización y transporte de objetos por medio de JSON, con un enfoque de comparación del rendimiento sobre otras tecnologías similares.

Esta revisión de literatura busca ofrecer un panorama del uso de JSON como librería de programación para realizar la serialización/deserialización y transmisión de datos en el campo del desarrollo de aplicaciones web, con el fin de ofrecer información sobre cómo otros investigadores profundizaron en el tema.

Método de revisión de la literatura

Para llevar a cabo la revisión de la literatura se realizó un proceso iterativo de lectura a través de la investigación de otras revisiones de literatura, artículos y páginas web oficiales que tratan el tema del desarrollo de aplicaciones y de diferentes tecnologías relacionadas con la serialización/deserialización de objetos mediante la notación JSON.

Esta revisión de literatura se apoyó en la taxonomía de Cooper para definir cada uno de los aspectos sugeridos por dicho autor, dando un enfoque de investigación de resultados, cuyo objetivo es la exploración del tema de serialización/deserialización de objetos y transmisión de datos por medio de JSON.

La perspectiva aplicada, según la taxonomía de Cooper, es una representación neutral de la información brindada por los artículos encontrados e incluidos en dicha revisión de literatura, proporcionando una cobertura representativa de la información.

Entre otros aspectos, está la cobertura, que es de tipo representativo; el tipo de organización, que es conceptual; y la audiencia a la que va dirigida la presente revisión de literatura, que está constituida por personas relacionadas con el área de desarrollo de aplicaciones web, por lo que se considera una audiencia especializada.

Una vez clasificada la información, se definieron los principales temas y conceptos relacionados con JSON, serialización/deserialización y transmisión de datos, con el fin de argumentar la búsqueda y evaluación de la teoría.

Las búsquedas realizadas para encontrar la información fueron ejecutadas en Google Académico, que fue la base de datos en la que se pudo encontrar la información con los criterios de búsqueda primarios utilizados en este buscador.

El criterio número uno fue “JSON” + “Serialization” + “Literature Review”, con un resultado de 127 hipervínculos, de los cuales se utilizaron los artículos llamados “Issues of Modeling Web Information Systems: A Literature Review” y “Evaluation of Protocol Buffers as Data Serialization Format for Microblogging Communication. A Literature Review”.

Seguidamente, se ejecutó otro criterio de búsqueda para obtener más documentación referente al tema. El criterio ejecutado fue “JSON” + “Serialization”, con un resultado de 3680 hipervínculos de los cuales se tomaron dos artículos llamados “Comparison of JSON and XML Data Interchange Formats: A Case Study” y “Comparison between JSON and YAML for data serialization: A Case Study”.

También se consideró como fuente secundaria la página MSDN de Microsoft y se realizaron los mismos filtros en el buscador de la página, con un resultado de 153 hipervínculos, de los cuales se tomó el artículo “Serialización JSON”.

Durante la selección de temas, se hizo un diagrama de afinidad en el cual se organizaron los temas que estarían cubiertos por la revisión de literatura, como son: 1) la serialización/deserialización de objetos, 2) transmisión de datos y 3) la notificación notación JSON. El primer tema se subdividió en los subtemas 1.1) desempeño con respecto a XML, 1.2) desempeño

con respecto a YAML y 1.3) transformación de objetos a textos y viceversa. El segundo gran tema elegido para esta revisión de literatura se dividió en los siguientes subtemas: 2.1) envío y recepción de mensajes y 2.2) buen desempeño en redes computacionales. Y por último, el tercer gran tema tiene como subtemas 3.1) JSON y la serialización de objetos y 3.2) JSON y la transmisión de datos.

Introducción a los conceptos y formulación de la revisión de literatura

JSON (JavaScript Object Notation)

Según MSDN, el sitio *web* oficial para desarrolladores de Microsoft, JSON es un formato de codificación de datos eficaz que permite intercambios rápidos de cantidades pequeñas de datos entre los exploradores de cliente como Internet Explorer, Google Chrome y servicios web, por lo cual se le considera una gran librería de desarrollo web para la serialización/deserialización y la transmisión de datos.

El artículo “Comparison between JSON and YAML for data serialization” indica que JSON fue especificado e introducido por Douglas Crockford en 2001, utilizándolo en su compañía. Crockford no fue el creador pero sí fue el primero en darle una especificación completa.

Ahora bien, si se revisa el artículo “Comparison of JSON and XML Data Interchange Formats”, JSON fue diseñado para ser un lenguaje de intercambio de datos comprensible para los seres humanos, fácil de interpretar y usar por las computadoras. JSON es directamente soportado por el lenguaje de programación JavaScript y es la mejor opción para la serialización/deserialización e intercambio de datos.

Además, se estima que JSON puede serializar/deserializar 100 veces más rápido que otras tecnologías, tales como las librerías de XML en navegadores modernos, pero a pesar de esto, existen muchas quejas de que JSON no puede manejar NameSpaces, validaciones de datos no tiene extensibilidad, lo que es visto como una debilidad de dicha tecnología, pero este tema no será abordado en el presente artículo.

La sintaxis de JSON debe poder ser interpretada por los humanos de una forma fácil. La figura 1 describe cómo se utiliza JSON para codificar el nombre y apellido de un objeto persona.

```
{
    "firstname" : "John",
    "lastname"  : "Smith"
}
```

Figura 1. Codificación de nombre y apellido de un objeto persona.

Imagen tomada del artículo “Comparison of JSON and XML Data Interchange Formats”, de los autores Nurzhan Nurseitov, Michael Paulson, Randall Reynolds y Clemente Izurrieta, del departamento de Ciencias de la Computación de la Universidad Montana State Bozeman, Estados Unidos.

Serialización/deserialización de objetos con JSON

El artículo “Evaluación of Protocol Buffers as Data Serialization Format for Microblogging Communication” menciona que la serialización es un proceso para convertir datos en grandes

cantidades de bits llamados en inglés Stream, que luego pueden ser enviados por la red o almacenados en bases de datos. Lo opuesto a esto se conoce como deserialización, que sería volver un objeto a su estado natural. Este proceso lo utilizan la mayoría de aplicaciones en internet.

Existen dos tipos de serialización/deserialización: 1) el que tiene formato de texto para poder ser interpretado por el ser humano y las computadoras, y 2) la binaria, que solo es interpretada por las computadoras. El presente artículo se enfoca en el formato de texto que puede ser interpretado por el ser humano, como se indica en el ejemplo (figura 2) de un objeto persona serializado por medio de JSON.

```
message Person {
  required string name = 1;
  required int32 id = 2;
  optional string email = 3;
  enum PhoneType {
    MOBILE = 0;
    HOME = 1;
    WORK = 2;
  }
  message PhoneNumber {
    required string number = 1;
    optional PhoneType type = 2;
  }
  repeated PhoneNumber phone = 4;
}
```

Figura 2. Ejemplo de un objeto persona serializado por medio de JSON. Fuente: Imagen tomada del artículo “Evaluation of Protocol Buffers as Data Serialization Format for Microblogging Communication”, de Canggih Puspo Widowo.

La interpretación de la imagen anterior, según el autor, es un objeto persona que tiene las siguientes propiedades 1) Nombre, 2) Identificación, 3) Email, 4) Tipo de teléfono, 5) Número de teléfono.

El sitio web oficial de desarrolladores de Microsoft presenta el siguiente ejemplo de cómo se puede llevar a cabo la serialización/deserialización de un objeto a través del lenguaje JavaScript utilizando la notación de JSON.

El primer paso es definir la clase que contendrá el objeto que se va a serializar, como se muestra en la figura 3.

```
[DataContract]
class Person
{
    [DataMember]
    internal string name;

    [DataMember]
    internal int age;
}
```

Figura 3. Clase de objeto que se va a serializar. Fuente: Imagen tomada del sitio web MSDN de Microsoft (2015).

Seguidamente, se realiza el proceso de serialización, como se ilustra en la figura 4.

```

Person p = new Person();
//Set up Person object...
MemoryStream stream1 = new MemoryStream();
DataContractJsonSerializer ser = new DataContractJsonSerializer(typeof(Person));
ser.WriteObject(stream1, p);
    
```

Figura 4. Proceso de serialización. Fuente: Imagen tomada del sitio web MSDN de Microsoft (2015).

Con lo cual se genera el resultado que se describe en la figura 5.

```

{"age":42,"name":"John"}
    
```

Figura 5. Resultado al ejecutar código. Fuente: Imagen tomada del sitio web MSDN de Microsoft (2015).

Por último, el receptor debe realizar el algoritmo mostrado en la figura 6 para deserializar el objeto.

```

Person p2 = (Person)ser.ReadObjectct(stream1);
    
```

Figura 6. Proceso de deserialización del objeto. Fuente: Imagen tomada del sitio web MSDN de Microsoft (2015).

Transmisión de datos con JSON

Según el artículo “Comparison of JSON and XML Data Interchange Formats”, se realizó un caso práctico en el que se utilizó JSON y otra tecnología para comparar la serialización/deserialización y transmisión de datos en un ambiente igual para ambas tecnologías, con un servidor receptor y un cliente emisor de iguales características para la prueba. Se seleccionaron ciertas medidas para ejecutarlas en la prueba, básicamente con el fin de medir el rendimiento de las dos tecnologías.

En esta prueba se pudo constatar que JSON corre más rápido en la serialización/deserialización de datos, pero requiere de más recursos de CPU, lo que no es una limitante hoy en día. Ambas tecnologías hicieron el mismo uso de la memoria y en la transmisión de datos las dos hicieron el mismo uso de CPU y Memoria.

El artículo “Comparison between JSON and YAML for data serialization” hizo la misma investigación, pero en vez de utilizar XML como contraparte, usó YAML. De manera similar, JSON resultó ser mucho más rápido a la hora de serializar/deserializar datos pero utilizando mayores recursos. La transmisión fue similar entre ambas tecnologías.

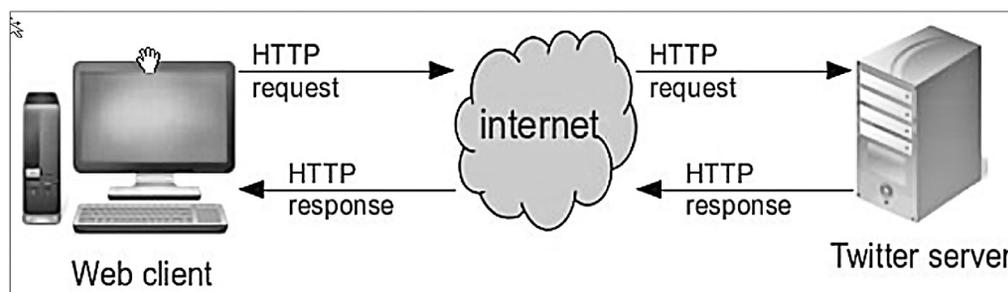


Figura 7. Arquitectura de las pruebas aplicadas por los investigadores. Fuente: Imagen tomada del artículo “Evaluation of Protocol Buffers as Data Serialization Format for Microblogging Communication”, de Canggih Puspo Widowo.

El artículo “Esquema de Servicios para Televisión Digital Interactiva, Basados en el Protocolo REST-JSON” indica que una buena práctica para el transporte de mensajes a través de internet es el protocolo REST. El protocolo REST y JSON conforman la plataforma completa requerida para un rápido envío de datos serializados que es consumido por cualquier aplicación por medio de una dirección URL, proceso llamado servicios web, según el autor. En el artículo se menciona que este esquema es el utilizado hoy en día por importantes páginas web como Facebook y Twitter.

Resultados y discusión

Basado en la información encontrada en las fuentes primarias y secundarias se generaron las siguientes notas, que constituyen un resultado esperado debido al uso que hoy en día tiene la tecnología JSON en sitios web importantes a nivel mundial.

1. JSON debe ser fácil de interpretar por el ser humano y el resultado final de su serialización siempre es texto plano.
2. JSON es una librería utilizada para la serialización y transmisión de datos en las plataformas web.
3. JSON es considerada la librería más rápida para la serialización y deserialización de datos con respecto a XML y YAML; sin embargo, hace mayor uso de recursos de CPU.
4. JSON es considerada similar a otras tecnologías con respecto a la transmisión de datos, pero se puede utilizar el mecanismo de servicios web, como lo es el protocolo REST para efectuar una buena transmisión de datos.
5. Después de la comprensión del artículo, los investigadores serán capaces de seleccionar JSON como herramienta de serialización/deserialización, ya que se demostró, por medio de pruebas encontradas en las revisiones de literatura y casos de estudio, que es la forma más rápida de serializar y deserializar objetos.
6. Actualmente, la serialización/deserialización con JSON es un tema muy técnico, por lo que no existen muchas revisiones de literatura en las bases de datos consultadas.

Teniendo en cuenta los resultados de las pruebas ejecutadas en los artículos y siendo JSON la notación más utilizada en la industria del software web en las principales páginas, se podría recomendar su uso a la comunidad desarrolladora de software.

Conclusión

En este artículo se presentaron los resultados de una revisión de literatura sistemática sobre la serialización/deserialización de objetos y transmisión de datos con JSON. Se definió un criterio de búsqueda y se seleccionaron elementos de la literatura representativos, que fueron evaluados y seleccionados para tomarlos en cuenta en este trabajo a partir de fuentes primarias como revisiones de literatura y casos de estudio. Además, se tomó la información referente al problema planteado y se utilizaron algunas otras fuentes secundarias para ilustrar el tema.

La revisión de literatura se enfocó en la información sobre el uso de JSON para el proceso de serialización/deserialización. También se revisaron los casos de estudio sobre la comparación de JSON con otras tecnologías con relación a su desempeño. Se revisó la literatura sobre transmisión de datos, enfocando el tema del transporte de datos serializados y concluyendo con los resultados recomendados por las revisiones de literatura acerca del uso de JSON como herramienta para el desarrollo web.

En conclusión, se considera que la literatura es mala, ya que existe mucha información técnica y ejemplos de código de programación pero muy poca información teórica o revisiones de literatura sobre la serialización/deserialización y la transmisión de datos utilizando la notación JSON.

La principal limitación del estudio de la revisión de literatura es la cantidad excesiva de información técnica que se encontró, por lo que se tuvieron que especificar más puntualmente las necesidades que tenía esta revisión a partir de criterios en la búsqueda y del conocimiento del autor como especialista en tecnología. Otra de las limitaciones fue el poco tiempo que se tuvo para llevar a cabo la revisión, que fue de un mes.

Como trabajo futuro, se recomienda hacer más revisiones de literatura sobre el tema, ya que es mucha la información sobre como implementar JSON en programas computacionales pero poca la información teórica. También es aconsejable realizar pruebas funcionales del uso de JSON con más tecnologías; profundizar en su rendimiento con respecto a la serialización y deserialización de objetos y, por último, agregar más información acerca del porcentaje de uso a nivel mundial; es decir, conocer un aproximado de la cantidad de sitios web que usan JSON y están registrados en dominios oficiales.

Bibliografía

Chanchí, G.E. (2011). *Esquema de servicios para Televisión Digital Interactiva, basados en el Protocolo REST-JSON*.
Obtenido de <http://scholar.google.com/>

Ericksson, M. Hallberg, V. (2011). *Comparison between JSON and YAML for data serialization: A Case Study 2011*.
Obtenido desde la página: <http://scholar.google.com/>

Molnar, B. & Benczura, A. (2013). *Issues of Modeling Web Information Systems*.

Nurseitov, N., Paulson, M. & Reynolds, R. (2013). *Comparison of JSON and XML Data Interchange Formats: A Case Study*. Obtenido de <http://scholar.google.com/>

Página web:

Serialización JSON, Microsoft MSDN Web Page. (01/04/2015). Obtenido de [https://msdn.microsoft.com/es-es/library/bb410770\(v=vs.110\).aspx](https://msdn.microsoft.com/es-es/library/bb410770(v=vs.110).aspx)

Cronograma 2016

	Vol. 29-1	Vol. 29-2	Vol. 29-3	Vol. 29-4	Vol. 30-1	Vol. 30-2	Vol. 30-3
Recepción de artículos	Mayo - julio 2015	Agosto - octubre 2015	Noviembre 2015 - enero 2016	Febrero - abril 2016	Mayo - julio 2016	Agosto - octubre 2016	Noviembre 2016 - enero 2017
Evaluación de expertos y aprobación	Agosto - setiembre 2015	Noviembre - diciembre 2015	Febrero - marzo 2016	Mayo - Junio 2016	Agosto - setiembre 2016	Noviembre - diciembre 2016	Febrero - marzo 2017
Revisión de estilo y corrección	Octubre 2015	Febrero 2016	Abril 2016	Julio 2016	Octubre 2016	Enero 2017	Abril 2017
Diagramación y correcciones finales	Enero 2016	Marzo 2016	Mayo - junio 2016	Agosto - setiembre 2016	Noviembre - diciembre 2016	Febrero - marzo 2017	Mayo - junio 2017
Publicación del número	Febrero 2016	Mayo 2016	Julio 2016	Octubre 2016	Febrero 2017	Abril 2017	Julio 2017

La revista *Tecnología en Marcha* es publicada por la Editorial Tecnológica de Costa Rica, con periodicidad trimestral. Su principal temática es la difusión de resultados de investigación en áreas de Ingeniería. El contenido de la revista está dirigido a investigadores, especialistas, docentes y estudiantes universitarios de todo el mundo.

1. Los artículos deberán ser originales, inéditos y no pueden participar simultáneamente en otros procesos de publicación.
2. La extensión de los trabajos debe oscilar entre 10 y 20 páginas de 21,59 x 27.94 cm (8,5 x 11 pulgadas). Se debe presentar en un documento de Microsoft Word, con interlínea de espacio y medio, en una columna, en letra Times 12 pts.
3. Los títulos de los artículos deben ser sencillos, claros, cortos y estar en español e inglés.
4. Es necesario indicar claramente el nombre y los dos apellidos del autor, nacionalidad, profesión, teléfonos, correo electrónico, dirección exacta, lugar de trabajo y país de origen de dicha entidad.
5. Las palabras clave deben presentarse en español y en inglés. Además, el resumen debe estar compuesto por 250 palabras y aparecer en ambos idiomas.
6. Las imágenes se deben enviar en un archivo aparte del documento principal. En caso de ser escaneadas, la resolución mínima es de 300 ppi. Los formatos permitidos son: .jpg, .tiff, .eps, .psd y .ai.
7. Las fórmulas y ecuaciones matemáticas deben realizarse con el editor de ecuaciones de Word.
8. En lo pertinente, se usará el Sistema Internacional de Unidades.
9. La bibliografía debe aparecer al final del documento, ordenada según su aparición en el documento y utilizar el formato IEEE.
10. Los documentos deberán enviarse a las direcciones electrónicas editorial@itcr.ac.cr o alramirez@itcr.ac.cr
11. La Comisión editorial no dará trámite de edición al artículo que no cumpla con estos requisitos.

Nota importante

Los originales serán sometidos a un proceso editorial que se desarrollará en varias fases. En primer lugar, serán objeto de una evaluación preliminar por parte de los miembros del Comité Editorial, quienes determinarán la pertinencia de su publicación. Una vez establecido que cumple con los requisitos temáticos y formales indicados en estas instrucciones, será enviado a dos pares académicos externos para decidir en forma anónima (doble ciego) si debe publicarse, si necesita cambios o si se rechaza. En caso de que ambos llegaran a discrepar, el artículo será enviado a un tercer evaluador, para tomar la decisión. Los resultados del dictamen académico serán inapelables en todos los casos. En caso de que el artículo sea aprobado para su publicación, el autor autoriza a la Editorial Tecnológica de Costa Rica para que lo incluya en la revista y pueda editarlo, reproducirlo, distribuirlo, exhibirlo y comunicarlo en el país y en el extranjero mediante medios impresos y electrónicos bajo la licencia *Creative Commons*.

Instructions to publish in **TECNOLOGÍA** *en marcha*

The journal *Tecnología en Marcha* is published by the Editorial Tecnológica de Costa Rica every three months. It focuses mainly in disseminating the results of research of engineering areas. The journal's contents are intended for researchers, experts, teachers and university students around the world.

1. All articles must be originals, unpublished, and cannot be simultaneously used in other processes.
2. Papers may be 10-20 pages long (8.5 x 11 in, or 21.59 x 27.94 cm). All documents must be submitted in MS Word, 1.5 line spacing, using Times 12 pts. font and in one column.
3. Article titles must be simple, clear, short, and be included in both Spanish and English.
4. The name and (two) last names of the author should be clearly indicated, along with their profession, telephone numbers, email, physical address, place of work (organization, department, school), and where the organization is based.
5. The key words must be included in both Spanish and English. Furthermore, the abstract must be 250 words long, and should also be submitted in both languages.
6. The images must be delivered in a separate document. If scanned, the minimum resolution is 300 ppi. The formats allowed are .jpg, .tiff, .eps, .psd, and .ai.
7. Mathematical equations and formulas must be done with MS Office's Equation Editor.
8. Where necessary, use the International System of Units.
9. Bibliography will be included at the end of the document, arranged order based on IEEE format.
10. Papers should be sent to the following emails: editorial@itcr.ac.cr, or alamirez@itcr.ac.cr
11. The Editorial Committee will only consider for publication the articles meeting the above requirements.

Important note

All originals will be subject to an editorial process consisting of several phases. First, a preliminary assessment will be done by members of the Editorial Committee, the Director, and the editors, who will jointly determine whether the article would make a relevant publication. After determining that an article meets the thematic and formal requirements established in these Instructions, it will be sent to two outside academic peers who will decide anonymously (double-blind) whether it should be published, if it needs any changes, or whether it should be turned down. In case of disagreement between these peers, the article will be sent to a third evaluator in order to reach a decision. In no case may the results of this decision be appealed. If the article is accepted for publication, the author authorizes the Editorial Tecnológica de Costa Rica to edit, reproduce, distribute, exhibit and communicate at the country and abroad through print media and electronic equipment under the *Creative Commons* license.