



TECNOLOGÍA

en marcha

Revista trimestral
Abril – Junio 2019
Volumen 32 N° 2

ISSN-E 2215-3241

Publicación y directorio en catálogos

latindex

Dialnet
DOAJ

SciELO

REDIB
Red Iberoamericana
de Innovación y Conocimiento Científico

ET
Editorial Tecnológica
de Costa Rica

TEC | Tecnológico
de Costa Rica

Comisión Editorial

Ana Ruth Vilchez Rodriguez, Directora.
Instituto Tecnológico de Costa Rica

Juan Antonio Aguilar Garib
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Universidad Autónoma de Nuevo León,
México

Carlos Andrés Arredondo Orozco
Facultad de Ingenierías
Universidad de Medellín, Colombia

Lars Köhler
Experimenteller Botanischer Garten
Georg-August-Universität Göttingen,
Alemania

Jorge Solano Jiménez
Instituto Costarricense del Cemento
y del Concreto

Edición técnica

Alexa Ramírez Vega

Revisión filológica

Esperanza Buitrago Poveda

Diseño gráfico

Felipe Abarca Fedullo

Diagramación

Asesoría en Ediciones gráficas

Diseño de cubierta

Felipe Abarca Fedullo

Imagen de cubierta

<http://www.freeimages.com/>

Datos de catalogación en publicación

Tecnología en Marcha / Editorial Tecnológica
de Costa Rica. - Vol. 32-2, Abril-Junio (2019)
-Cartago: la Editorial, 2019 - Trimestral
ISSN-E 2215-3241

1. Ciencia y Tecnología -
Publicaciones periódicas CDD:600



TEC | Tecnológico
de Costa Rica

Apdo 159-7050 Cartago, Costa Rica
Tel.:(506) 2550-2297, 2550-2618

Correo electrónico: editorial@itcr.ac.cr

Web: editorial.tec.ac.cr

http://revistas.tec.ac.cr/tec_marcha



TEC | Tecnológico
de Costa Rica

La Editorial Tecnológica de Costa Rica es una dependencia especializada del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Desde su creación, en 1978, se ha dedicado a la edición y publicación de obras en ciencia y tecnología. Las obras que se han editado abarcan distintos ámbitos respondiendo a la orientación general de la Institución.

Hasta el momento se han editado obras que abarcan distintos campos del conocimiento científico-tecnológico y han constituido aportes para los diferentes sectores de la comunidad nacional e internacional.

La principal motivación de la Editorial es recoger y difundir los conocimientos relevantes en ciencia y tecnología, llevándolos a los sectores de la comunidad que los requieren.

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.

Publicación y directorio en catálogos





Revista trimestral
Abril – Junio 2019
Volumen 32 N° 2

ISSN 0379-3982 / ISSN-E 2215-3241

TECNOLOGÍA *en marcha*

Contenido

Adjusted models for individual culm biomass of guadua bamboo (*Guadua angustifolia* Kunth) in managed stands in Southern Costa Rica

Modelos ajustados para biomasa de culmos de guadua (*Guadua angustifolia* Kunth) individuales en rodales manejados en el su de Costa Rica

Elemer Briceño-Elizondo 3

Evaluación de materiales semiconductores utilizando simulación numérica con elementos finitos para la producción termoeléctrica en condiciones de vacío

Evaluation of semiconductor materials using finite-elements simulation for thermoelectric production in vacuum conditions

Adrián Quesada-Martínez, Carlos Meza-Benavides..... 18

Potencia Reactiva: del despacho óptimo al cobro de tarifas - PARTE B

Reactive Power: from the optimal dispatch to electrical rates - PART B

Gustavo Adolfo Gómez-Ramírez..... 30

Gestión y manejo de las aguas residuales no domésticas en la ciudad turística de La Libertad, El Salvador. Desafíos para alcanzar un desarrollo sostenible

Non domestic wastewater management for the city of La Libertad, El Salvador

Francisco Rosales-Ayala, Roel Campos-Rodríguez 43

Estado actual de la investigación sobre turbinas eólicas en Costa Rica

The current state of research on wind turbines in Costa Rica

Gustavo Richmond-Navarro, Gustavo Murillo-Zumbado, Pedro Casanova-Treto, Juan Francisco Piedra-Segura..... 54

Estudio experimental de la carbonatación del concreto

Experimental study of the concrete carbonation

Bruno Chinè-Polito, Rommel Cuevas-Kauffmann, Ronald Jiménez-Salas, Giannina Ortiz-Quesada..... 68

Otro uso importante de los hongos

Other important use of mushrooms

Catalina Rosales-López..... 82

Comparación de tres metodologías de aislamiento, purificación y cultivo *in vitro* de linfocitos T murinos

Comparison of three methodologies of isolation, purification and *in vitro* culture of murine T lymphocytes

María Chaves-Rodríguez, Johan Morales-Sánchez, Nazareth Mata-Rojas, Laura Calvo-Castro, Erick Hernández-Carvajal, Randall Loaiza-Montoya 91

Factibilidad técnica del uso de escorias de cobre como reemplazo de arena en morteros de pega de muros de albañilería

Technical feasibility of the use of copper slag as sand replacement in mortars of masonry walls

Mauricio Pradena-Miquel, Patricio Cendoya-Hernández, Andrés Borkowsky Opazo 100

Estimación de Demanda de Tránsito: modelos clásico, basado en circuitos y basado en actividades. (Revisión Literaria)

Estimation of Traffic Demand: classic, tour-based and activity-based models. (Review)

María Estefanía Coto-Solano 112

Utilización de un dispositivo electrónico de última generación para la determinación experimental del coeficiente de convección de una placa plana de aluminio

Use of last generation electronic device for the experimental computation of the convection coefficient over a flat aluminum plate

Luis Diego Ramírez-González, Luis Parras-Anguita, Carlos del Pino-Peñas 122

Economía Ambiental como elemento para el Desarrollo de la Asociación de Productores Lácteos LLAFRAK

Environmental Economy as an element for the Development of the Association of Dairy Producers LLAFRAK

Marcela Fernández-Rodríguez, Javier Gómez-Jara 134

Optimización de Recursos mediante la Simulación de Eventos Discretos

Optimization of Resources through Simulation of Discrete Events

Erik Orozco-Crespo, Neyfe Sablón-Cossio, Ramiro Saraguro-Piarpuezán, Dalila Hermoso, Yadamys Rodríguez-Sánchez 146

Adjusted models for individual culm biomass of guadua bamboo (*Guadua angustifolia* Kunth) in managed stands in Southern Costa Rica

Modelos ajustados para biomasa de culmos de guadua (*Guadua angustifolia* Kunth) individuales en rodales manejados en el su de Costa Rica

Elemer Briceño-Elizondo¹

Fecha de recepción: 13 de julio de 2018
Fecha de aprobación: 9 de octubre de 2018

Briceño-Elizondo, E. Adjusted models for individual culm biomass of guadua bamboo (*Guadua angustifolia* Kunth) in managed stands in Southern Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-2. Abril-Junio 2019. Pág 3-17.

DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v32i2.4345>



¹ Ingeniero Forestal. Escuela de Biología Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: ebriceno@tec.ac.cr

Keywords

Guadua angustifolia Kunth; carbon; biomass; management; forest modelling.

Abstract

This study aims to adjust field data to non-linear models in order to predict growth and estimate biomass accumulation according to allometric data of managed bamboo plantations from productive sites. The plantation is located near the community of Rio Claro in the district of Guaycará, Canton of Golfito, Province of Puntarenas, Costa Rica. Five stands were identified for the study, with three of them used for calibration and two for model validation. A classification by height cohort was needed in order to organize the database for better model adjustment; namely H¹: 0 to 4m., H²: 4.01 to 7m., H³: 7.01 to 10 m., H⁴: higher than 10.01 m. The inventory data was fit through non-linear regression to three selected biomass models used in previous bamboo biomass studies. The predicting variables used were diameter, height and basal area.

The quality of model prediction was tested using a Wilcoxon test for paired samples; the empirical biomass from the validation data set was paired to model predictions from the three models. Predictions from model B^{m1}, B^{m2} and B^{m3} are not significantly different from empirical data (p= 0.7064, 0.7735 0.8822 respectively). Only B^{m1} tends to overestimate but the range is acceptable for the prediction. The average results here obtained 12.49, 12.82 and 12.9 Mg ha⁻¹ of biomass for B^{m1}, B^{m2} and B^{m3} respectively, are a lower to those found by other authors in Moso bamboo forest of southern China where they found 8.13±2.15 Mg ha⁻¹ yr⁻¹. Although the comparison is against another species and different maximum age of the plantation (5 years in Moso compared to 3 years) it can be suggested that, as in trees, a range of biomass according to age, management and dimensions is expected.

Resumen

Este estudio tiene como objetivo ajustar datos de campo a modelos no lineales con el fin de predecir el crecimiento y estimar la acumulación de biomasa en plantaciones de bambú bajo manejo en sitios productivos. La plantación está ubicada cerca de la comunidad de Rio Claro en el distrito de Guaycará, Cantón de Golfito, Provincia de Puntarenas, Costa Rica. Cinco rodales fueron identificados para el estudio, con tres de ellos utilizados para la calibración y dos para la validación de modelos. Una estratificación por cohorte de altura fue necesaria para organizar la base de datos a un mejor ajuste; a saber H¹: 0 a 4 m., H²: 4,01 a 7 m., H³: 7,01 a 10 m., H⁴: superior a 10,01 m. Los datos de inventario se ajustaron mediante regresión no lineal a tres modelos de biomasa seleccionados utilizados en estudios anteriores de biomasa de bambú. Las variables predictivas utilizadas fueron diámetro, altura y área basal.

La calidad de la predicción del modelo se probó mediante la prueba de Wilcoxon para muestras pareadas; la biomasa empírica de la base de datos usada en validación se emparejó a las predicciones modelo de los tres modelos. Las predicciones de los modelos B^{m1}, B^{m2} y B^{m3} no son significativamente diferentes de los datos empíricos (p = 0.7064, 0.7735 0.8822 respectivamente). Sólo B^{m1} tiende a sobrestimar, pero el rango es aceptable para la predicción.

Los resultados promedio obtenidos aquí son 12,49, 12,82 y 12,9 Mg ha⁻¹ de biomasa en los modelos B^{m1}, B^{m2} y B^{m3} respectivamente, son mayores a los encontrados por otros autores en bosques de bambú Moso en el sur de China donde encontraron 8,13 ± 2,15 Mg ha⁻¹ Año⁻¹. Aunque la comparación es con otra especie y la edad máxima es diferente de la plantación (5 años en Moso en comparación con 3 años) se puede sugerir que, al igual que en árboles, se espera un rango de biomasa según edad, manejo y dimensiones.

Introduction

The renewed interest in the establishment, management, use and trade of guadua bamboo (*Guadua angustifolia* Kunth) for construction and other uses has led to a revival in interest in this natural resource, at a higher level than previously achieved. The genus *Guadua spp* is the most representative with the one with the greatest impact on human activities, since it brings together the largest and most economically important species of tropical America. This genus has more than thirty species, which are distributed from Mexico to Argentina, and are found from low elevations up to 2000 m. Its geographic distribution is mainly related to temperature, since it does not tolerate prolonged periods of very cold temperatures [1].

In Costa Rica, the most successful crops of the *Guadua* genus are between 240 and 500 m altitude, in areas with average annual rainfall of 3000- 4000 mm. It is difficult to determine the precise origin of the species and variations of guadua present in Costa Rica. It is suspected that some were directly imported from Colombia, Brazil and Peru [2]. As Montiel and Murillo [3] indicate, very particular morphological variations, identify the variations locally known as “South” due to being planted mostly in the southern region and “Atlantic” due to the same reason. There is a palpable development of the species in the Atlantic region as well as the South region of Costa Rica. Other areas have presence of guadua and other bamboo species, but not to the commercial avail found on these other two areas of the country. The level of organization varies from region to region as well; the south region shows successful enterprises working in the furniture industry, added value products, and culm length sales [4], as well as organized cooperatives planting the species along other crops in hopes of a potential market [5]. Many producers have been also encouraged to establish plantations within the scope supplying raw material to new potential products with high added value [6].

Once full dimensions are achieved, the bamboo culms enter a period of fiber maturity which can last up to 7 years depending on the species, after which they deteriorate rapidly, releasing carbon back into the atmosphere [7]. Therefore in a natural state, bamboo will reach a stable level of above ground carbon relatively quickly, where carbon accumulation through sequestration is counter off when decay comes. In order for the bamboo system to continue to be a net sink, carbon has to be stored in other forms, so that the total accumulation of carbon in a solid state exceeds the carbon released to the atmosphere. Chapters 7 and 8 discuss these questions, amongst other issues that can affect the length of storage of carbon [8].

In several studies, generally, at ages between five and seven years, a high variability of culms per hectare is reported; for example, from 5090 to 9416 culms ha⁻¹ according to Arango-Arango and Camargo [9], 11 827 ± 3884 culms ha⁻¹; according to Camargo-García, Rodríguez y Arango [10], 4050 culms ha⁻¹ and 10101 culms ha⁻¹ in the work of Castañeda-Mendoza, Vargas-Hernandez, Gomez-Guerrero, Valdez-Hernandez, Vaquera-Huerta [11]. The objective of this study is to adjust models of bamboo growth in order to predict growth and estimate biomass accumulation according to allometric data and the potential for carbon sink of managed bamboo plantations in a productive site in southern Costa Rica.

Material and methods

Study area

The selected plantation (8°71'N, -83°09'O) is located near the community of Rio Claro in the district of Guaycará, Canton of Golfito, Province of Puntarenas, Costa Rica (figure 1). The site is property of a bamboo producing company with a large trajectory of bamboo planting, silviculture and commerce. Elevation is between 200 and 300 meters above sea level; the annual rainfall is between 4000 to 5000 mm with an average temperature of 25°C. The bamboo area has different strata, which are differentiated by topography and age; with an area of 11.74 ha total. The property includes other vegetation coverage, classified official as non-forest land, forest and part of secondary forest. Soils are classified as entisols and inceptisols (suborder orthens and udepts).

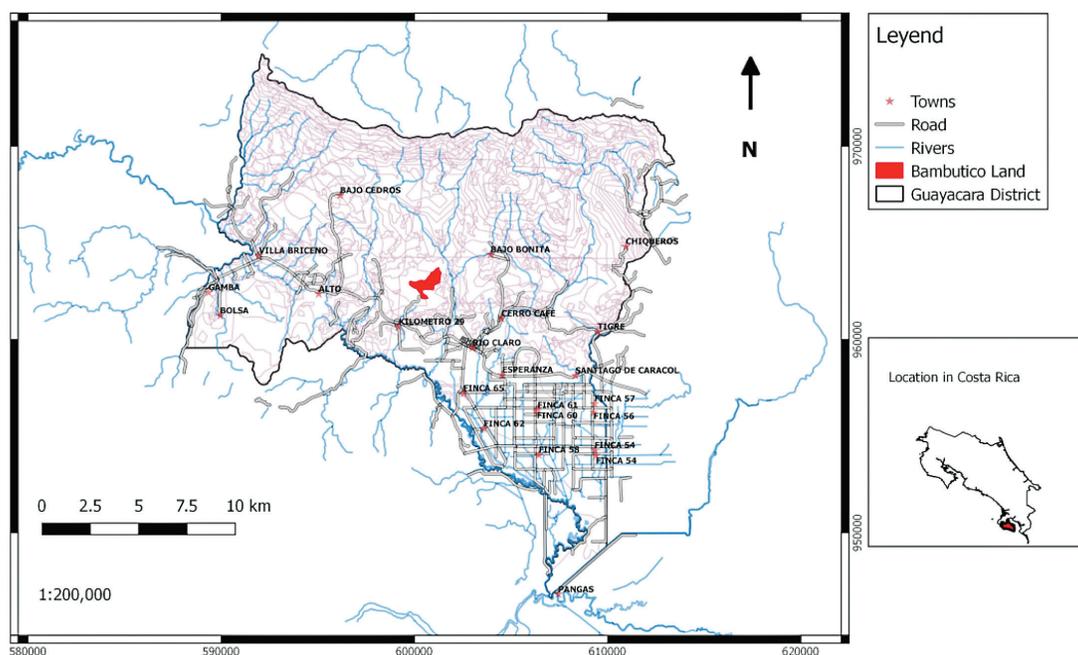


Figure 1. Site location within the Guaycará district of the 3 year old guadua bamboo plantation.

The terrain presents an evident deposition of organic matter, rocky outcropping all around the stand, but well planned and maintained inner roads.

Management regime

The site received intensive and meticulous management; the silvicultural practices include early elimination of primordial shoots, thinning of small culms, and pruning and bud control. The stand is well established, and despite its young age (3 years) already has a canopy closure (figure 2). These practices took place after the first year of establishment to guarantee that the clump has already establish itself ion the site. Normally only commercial shoots are left to reach 11 ± 4 culms in average at each clump. Thinning was designed to maintain a desired culm density per hectare, the average culm density of the plantation is 1942 culms ranging from 1105 culms in one strata up to 3166 in the denser strata. Thinning schedule and intensity followed recommendations based upon inventory data for 2015. Initial weed control takes place at

establishment with a proper weeding for each individual, followed by manual control until canopy closure. Bud control consists of the mechanical impediment of branch expansion, where a light punch is applied to the branch bud before the branch's emergence, facilitating later handling of the culm and saving management costs. Not all branches are treated as such due to the need of a healthy canopy, thus pruning is necessary before harvest, in order to facilitate extraction.



Figure 2. Managed *Guadua angustifolia* clump within Guaycará plantation of three years of age.

Inventory Data (2015-2016)

The sampling method was a modification of triplet sampling method for individual trees [12], renamed here “Individual Clump Method” (ICM). Five stands were identified for the study within the plantation (table 1), with three of them used for calibration (1, 4, and 7) of the models and two for model validation (5, 6). The separation of the stands was based purely on administrative boundaries within the plantation, following slope arrangements, the previous facilitated management activities and served as a way of stratification. All stands had the same age and received the same management. The sampling unit is made up of a clump with all its culms. The initial clump is randomly chosen, and then according to the defined sampling intensity sampling continues up to the next fixed determined clump. For a 2% sampling intensity, a clump is chosen each 50 clumps ($100/2 = 50$) and for a 4% a unit is selected every 25 clumps ($100/4 = 25$). Once at the selected clump, all culms are measured taking information on culm diameter, height, state of maturity, and sanitary state. The number of culms measured in this method is equivalent to the establishment of a plot of 500 m² where culms are randomly distributed throughout the stand [12].

The difference of this method being applied to a bamboo plantation from a tree plantation lies in the fact that the point of measurement yields data from many individual culms, allowing to capture more variation and information. This method is applicable to a plantation that has not lost its clump differentiation and is small in size. The method requires to survey the entire stand from start to finish by foot. Since all clumps in the plantation or stand are counted, it is possible to estimate the total number of culms and at the same time their state of maturity, which can then be extrapolated to hectare, namely:

$$\frac{\sum n^i * 100}{i\%} \quad (\text{equation 1})$$

$$\frac{n^i}{i\%} = \frac{x}{100\%} = N^i / ha \quad (\text{equation 2})$$

Where: n^i : total culms in the clump or per state of maturity

$i\%$: sampling intensity.

For the determination of empirical biomass and carbon, data from the inventory was used in combination with reported factors from literature for wall thickness, taper and bamboo wood density [13]. The volume of the cylinder was first used, then allometrically reduced using the taper factor, to get apparent volume. This was reduced by taking into account the average wall thickness reported for the species [14], in order to eliminate the “empty” volume of the interior of the culm. The inner empty volume was subtracted to get real volume present for the bamboo culm. The information on the specific weight of the species [15] for conversion is used to get biomass of the culm. Other components are left aside since there is not reliable information and the rhizome and leave remain at the site.

$$B_{ci}^{si} = \frac{\pi}{2} * \left(\frac{d_{ci}^{hi}}{100} \right)^2 * H_{ci}^{hi} * ff_g * D_{kg} \quad (\text{equation 3})$$

Where: B =empirical biomass of culm i within strata i (kg).

d_{ci}^{hi} = diameter of culm i within strata i (cm).

H_{ci}^{hi} = height of culm i within strata i (m).

ff_g =tapper factor for *G.angustifolia*.

D_{kg} = specific density in $kg\ m^{-3}$.

A classification by height cohort was needed in order to organize the database for better model adjustment; namely H¹:0 to 4m., H²: 4.01 to 7m., H³: 7.01 to 10 m., H⁴: higher than 10.01 m (table 1). The stratification of the database in these cohorts allows for a more precise model parameterization given than a single culm, according to the date of data collection will exhibit a height which will change in time, keeping however the same diameter from emergence to harvest. Three stands were used for model calibration and two for model validation.

Model selection and model adjustment.

The inventory data was fit through non-linear regression to three selected biomass models (equations 4-6) used in previous bamboo biomass studies. The predicting variables used were diameter ([16]: equation 4), diameter and height ([17]: equation 5) and basal area ([18]: equation 6). The previous cohort stratification was declared in model adjustment for the calibration runs

$$B^{m1} = a * DBH_{ci}^{hj^b} \quad (\text{equation 4})$$

$$B^{m2} = a * DBH_{ci}^{hj^b} * H_{ci}^{hi^c} \quad (\text{equation 5})$$

$$B^{m3} = a + b * G_{ci}^{hj} \quad (\text{equation 6})$$

Where: $B^{m1,2,3}$ = Biomass model (kg).

DBH_{ci}^{hj} = diameter at breast height of culm i within height cohort j (cm).

H_{ci}^{hj} = height of culm i within height cohort j (m).

G_{ci}^{hj} = basal area of culm i within height cohort j (m²).

a,b,c= parameters.

Table 1. Mean DBH, height and stand characteristics for *G.angustifolia* plantation within Guaycará district used for model calibration.

Stand	cohort	Stage of Maturity	DBH(cm)	Height (m)
1	1	J	3,50±1,98	2,85±0,85
		R	10,13±2,06	2,98±0,79
	2	J	4,58±1,50	6,05±0,91
		R	10,98±1,11	6,08±0,90
	3	J	6,54±2,48	8,59±0,72
		R	10,23±1,67	9,00±1,00
	4	J	9,15±1,70	12,81±0,91
		R	10,65±1,45	11,50±0,97
4	1	J	2,86±1,29	3,56±0,63
		R	10,15±2,37	2,69±0,63
	2	J	4,78±2,62	5,28±0,72
		R	11,17±1,43	5,71±0,95
	3	J	7,59±1,76	8,91±0,89
		R	9,45±1,04	9,17±0,75
	4	J	8,85±1,22	12,38±1,06
		R	8,90±0,83	12,00±0,82
7	1	J	3,17±1,71	3,46±0,64
		R	9,86±1,67	3,38±0,74
	2	J	4,32±1,84	5,39±0,74
		R	9,30±1,70	5,50±0,71
	3	J	7,28±1,13	9,05±0,79
		R	8,10±0,00	8,00±0,00
	4	J	7,29±1,09	11,40±0,75
		R	10,00±0,00	13,00±0,00

Sum of strata and Carbon calculations

Data from the inventory, model validation runs were sum up by stand and extrapolated to hectare basis in order to give an estimate of the carbon reservoir present and carbon sequestration potential of a well-managed plantation. These data were compared to empirical biomass present in the calibration stand by means of an analysis of variance.

Results

Model runs

Inventory data was fit to the selected models to approximate its variables; the results are presented in table 2. Allometric non linear models were fit to empirical biomass to approximate the constants for each model for each cohort. The p-values show significance for each constant used in the models ($p < 0.05$). The values were fit to respond to height cohorts and stage of maturity. An important difference among the models tested is the type of variable used, where in one of the models occupancy of the site takes relevance over individual dimension. The number of individuals to make sprout biomass predictions were less than for young culms due to the dynamics of bamboo stands, where it is expected to have less sprouts than young or mature culms at any age of the stand.

Table 2. Culm biomass estimation models for *Guadua angustifolia* Kunth, using non-linear regression, for different stages of maturity and height cohorts. Biomass is expressed in kg

Model	Growth stage	Cohorts	N	Parameters						
				a	b	c	Cmerror	p-value (a)	p-value (b)	p-value (c)
B ^{m1}	young	1	103	0.28	1.31	---	0.22	<0.0001	<0.0001	---
		2	140	0.49	1.31	---	0.5	<0.0001	<0.0001	---
		3	67	0.89	1.24	---	1.11	<0.0001	<0.0001	---
		4	59	1.2	1.26	---	1.96	<0.0001	<0.0001	---
	Sprout	1	24	0.25	1.32	---	1.85	0.2365	0.001	---
		2	21	1.48	0.84	---	2.94	0.1776	0.0106	---
		3	17	0.54	1.45	---	1.82	0.0115	<0.0001	---
		4	15	1.57	1.1	---	3.1	0.0172	<0.0001	---
B ^{m2}	young	1	103	0.0645	1.4307	1.0642	0.0148	<0.0001	<0.0001	<0.0001
		2	140	0.0827	1.2816	1.0527	0.0356	<0.0001	<0.0001	<0.0001
		3	67	0.103	1.2003	1.02	0.0201	<0.0001	<0.0001	<0.0001
		4	59	0.1161	1.1674	0.9983	0.0102	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	Sprout	1	24	0.1206	1.1476	1.0014	0.0004	<0.0001	<0.0001	<0.0001
		2	21	0.1262	1.1293	1.0002	0.0002	<0.0001	<0.0001	<0.0001
		3	17	0.124	1.1408	0.9957	0.0011	<0.0001	<0.0001	<0.0001
		4	15	0.1268	1.1293	0.9979	0.0017	<0.0001	<0.0001	<0.0001
B ^{m3}	young	1	103	0.45	798.83	---	0.32	<0.0001	<0.0001	---
		2	140	1.32	1213.85	---	0.92	<0.0001	<0.0001	---
		3	67	3.68	1519.77	---	1.68	<0.0001	<0.0001	---
		4	59	6.46	1914.82	---	2.15	<0.0001	<0.0001	---
	Sprout	1	24	1.47	1914.82	---	1.89	0.1055	0.0002	---
		2	21	6.22	507.04	---	2.95	0.0016	0.009	---
		3	17	4.15	1408.14	---	1.78	0.0022	<0.0001	---
		4	15	9.51	1305.53	---	3.04	0.0001	<0.0001	---

DBH: Diameter at breast height (cm); H: height (m); G: basal area (m²); young: young culm, Sprout: sprout culm
Cohorts: (1) from 0 to 4 meters in height, (2) from 4.01 to 7 meters in height, (3) from 7.01 to 10 meters in height, (4) higher than 10.01 meters in height; N: number of individuals; a,b,c: parameters; B^{m1}: Biomass (kg) = a*DBHb;
B^{m2}: Biomass (kg) = a*DBHb*Hc; B^{m3}: Biomass (kg) = a+b*G.

Validation

The stand characteristics of guadua bamboo used in the validation of the models is presented in table 3. The average DBH and height were divided into the height cohorts by stage of maturity, following the cohort separation used for calibration. The average DBH is higher in sprouts independently of the cohort, signaling that the new recruited culms have obtained the occupation capacity needed for bigger dimensions due to the absence of competition from older culms in the clump, influencing the new culms to reach higher dimensions; this is consistent with the correlation of mean DBH and stand density, where at lower density a higher DBH can be expected. The dimensions ranged from $2,87\pm 1,07$ up to $10,80\pm 0,99$ in stand 5 and from $2,78\pm 1,26$ up to $12,00\pm 0,001$ cm in stand 6. Some cohorts did not show data for sprouts due to aspects of presence in that height category.

Table 3. Mean DBH, height and stand characteristics for *G.angustifolia* plantation within Guaycará district used for model validation.

Stand	cohort	Stage of maturity	DBH (cm)	Height (m)
5	1	Young	$2,87\pm 1,07$	$3,83\pm 0,16$
		Sprout	$9,20\pm 0,001$	$4,00\pm 0,001$
	2	Young	$5,31\pm 2,46$	$6,68\pm 0,68$
		Sprout	$8,47\pm 1,10$	$5,67\pm 0,58$
	3	Young	$7,11\pm 2,18$	$8,30\pm 1,05$
		Sprout	$10,80\pm 0,99$	$8,50\pm 0,71$
	4	Young	$8,14\pm 1,52$	$12,00\pm 0,001$
		Sprout	$0,00\pm 0,001$	$0,00\pm 0,001$
6	1	Young	$2,78\pm 1,26$	$3,54\pm 0,54$
		Sprout	$9,70\pm 0,82$	$3,50\pm 0,50$
	2	Young	$5,91\pm 2,77$	$6,18\pm 0,87$
		Sprout	$0,00\pm 0,00$	$0,00\pm 0,00$
	3	Young	$7,45\pm 0,98$	$8,67\pm 1,03$
		Sprout	$11,60\pm 0,57$	$8,50\pm 0,71$
	4	Young	$8,10\pm 0,00$	$11,00\pm 0,001$
		Sprout	$12,00\pm 0,00$	$11,00\pm 0,001$

DBH: Diameter at breast height (cm); H: height (m); G: basal area (m^2); young: young culm, Sprout: sprout culm
 Cohorts: (1) from 0 to 4 meters in height, (2) from 4.01 to 7 meters in height, (3) from 7.01 to 10 meters in height, (4) higher than 10.01 meters in height;

The quality of model prediction was tested using a Wilcoxon test for paired samples; the empirical biomass from the validation data set was paired to model predictions from the three models. Table 4 shows that predictions from model B^{m1} , B^{m2} and B^{m3} are not significantly different from empirical data ($p= 0.7064, 0.7735, 0.8822$ respectively). Predictions between models were also

tested to realize differences on the number of variables or variables used; only B^{m1} and B^{m3} showed significance for their predictions ($p: 0,0272$).

Table 4. Wilcoxon test for paired samples, between empirical biomass (EB) and adjusted culm biomass models for *G.angustifolia* Kunth in the Guaycará site in Southern Costa Rica.

Obs(1)	Obs(2)	N	Suma(R+)	E(R+)	Var(R+)	DE(dif)	p(2 tails)
EB	B^{m1}	87	2003	1914	55824,5	1,1	0,7064
EB	B^{m2}	87	1982	1914	55824,5	0,14	0,7735
EB	B^{m3}	87	1949	1914	55824,5	2,37	0,8822
B^{m1}	B^{m2}	87	1757	1914	55824,5	1,12	0,5064
B^{m1}	B^{m3}	87	2436	1914	55823,13	2,31	0,0272
B^{m2}	B^{m3}	87	2006	1914	55824,5	2,38	0,697

EB: empirical biomass, B^{m1} : Biomass model 1; B^{m2} : Biomass model 2; B^{m3} : Biomass model 3.

This difference in model prediction between B^{m1} and B^{m3} can be observed in figure 3, where individual average biomass per culm is shown. Estimations are also shown per cohort with the typical error for the prediction. Only B^{m1} tends to overestimate but according to table 4 the range is acceptable for the prediction. The aim of model building is to have adequate culm biomass prediction which can be deducted from inventory data; the total biomass per hectare will depend on site density, which is a product of management.

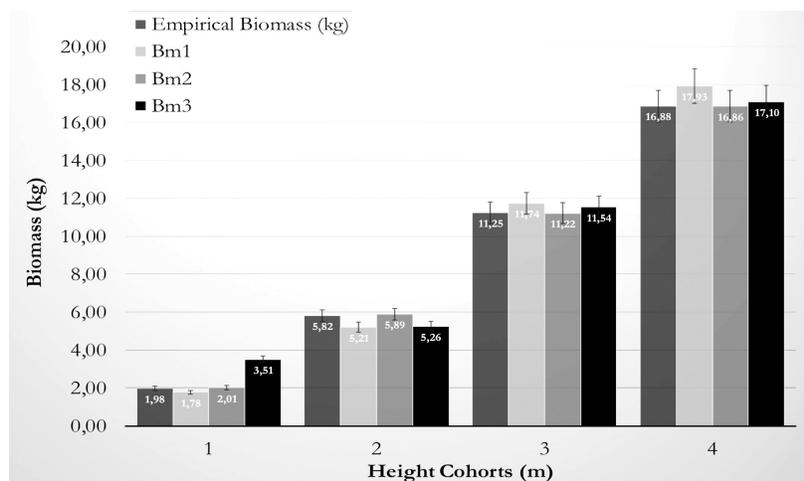


Figure 3. Average biomass under three adjusted culm biomass models and empirical data for *G.angustifolia* in the Guaycará site.

The necessity to separate the models by cohort can be reflected on the behavior observed on figures 4 through 7 where it can be seen the agreements for the models with empirical data; model accuracy is better when the culm has finished its vertical growth as related to cohort 4.

Sum strata and extrapolation to hectare

The usefulness of the models however is finally realized when the values per hectare are calculated. The biomass per hectare can be seen in table 5, where it can be seen that the empirical biomass does not vary greatly when using the models to compile the amount of Mg ha⁻¹ which consider also the actual density in the stands per maturity stage the biomass in stand. Stand 5 has a higher density than stand 6; where 8.7±0.15 Mg ha⁻¹ of biomass are accumulated in empirical data and 8.55±0.15, 8.88±0.14, 8.35±0.14 Mg ha⁻¹ of biomass are present when using B^{m1}, B^{m2} and B^{m3} respectively for 1185 young culms ha⁻¹. The amount of biomass for young culms in stand 6 is lower than stand 5 as mentioned before, where the density reaches 985 culms ha⁻¹; reporting 6.98±0.12 for empirical data and 6.89±0.11, 7.01±0.12, 6.72±0.11 Mg ha⁻¹ of biomass for B^{m1}, B^{m2} and B^{m3} respectively. Sprout biomass has lower values due to the lower density of this maturity stage, where stand 5 and 6 have 173 and 148 culms ha⁻¹ respectively; however, B^{m3} shows higher biomass accumulation than the empirical data and the other two models.

Table 5. Mean empirical and modeled biomass (Mg ha⁻¹), and mean culms ha⁻¹ for *G.angustifolia* Kunth for *G.angustifolia* Kunth in the Guaycará site in Southern Costa Rica.

Stand	Stage of maturity	Culms ha ⁻¹	Biomass (Ton ha ⁻¹)			
			EB	B ^{m1}	B ^{m2}	B ^{m3}
5	Young	1185	8.79±0.15	8.55±0.15	8.88±0.14	8.35±0.14
	Sprout	173	3.93±0.12	3.94±0.13	3.94±0.12	4.55±0.10
6	Young	985	6.98±0.12	6.89±0.11	7.01±0.12	6.72±0.11
	Sprout	148	3.54±0.13	3.70±0.15	3.56±0.13	5.26±0.12

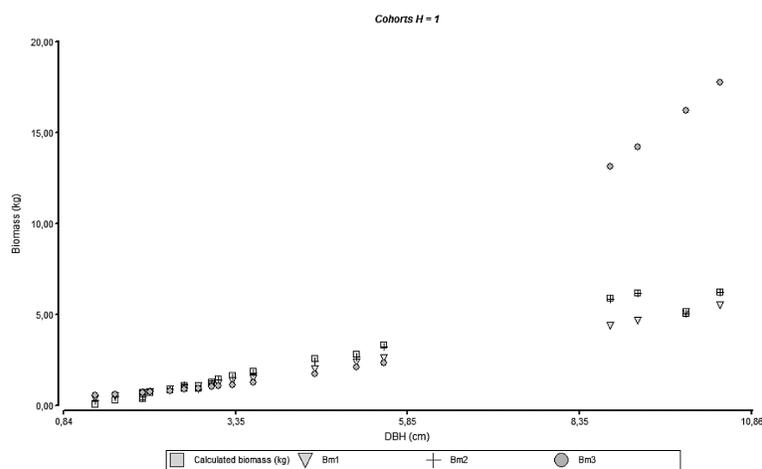


Figure 4. Relationship between diameter and biomass for the adjusted models and empirical data of different height cohorts.

Discussion

Biomass estimation is a step stone to quantify the amount of carbon locked into the biosphere. Such information aids on knowing the changes that occur when the forest is intervened, tracking changes in the carbon stocks of forest and as a way to fulfill international commitments on information on national carbon stocks. Direct method (destructive techniques) and indirect method (biomass equations) are generally used for biomass estimation of forests. Indirect methods such as biomass equations are less time consuming and more cost effective when compared to destructive methods, making them attractive tools in forest inventories. Different linear and non-linear models have been developed worldwide for estimating biomass, however due to the natural patterns of growth of most woody species, nonlinear equations are better suited for biomass estimation [19].

The present study aims at adjusting nonlinear equations to predict *G.angustifolia* culm biomass in managed stand for the species at a key site in southern Costa Rica. The selection of the models to use was based on previous studies on Moso bamboo, a very known and commercial species in Asia [16], [17] and a study base on allometry for *G.angustifolia* in northern Costa Rica [18]. There are many studies on allometric models for tree species, however bamboo seems neglected, despite being regarded as a woody plant; its growth patterns of woody bamboos are different from timber in that the former possess a woody vascular bundle structure of fast growth while the latter has clear tree rings [17]. Therefore, the use of models tested in some important species are of interest for *G.angustifolia* as well as models for the species which have been tested under different conditions, in order to project their usefulness with other management systems in the country.

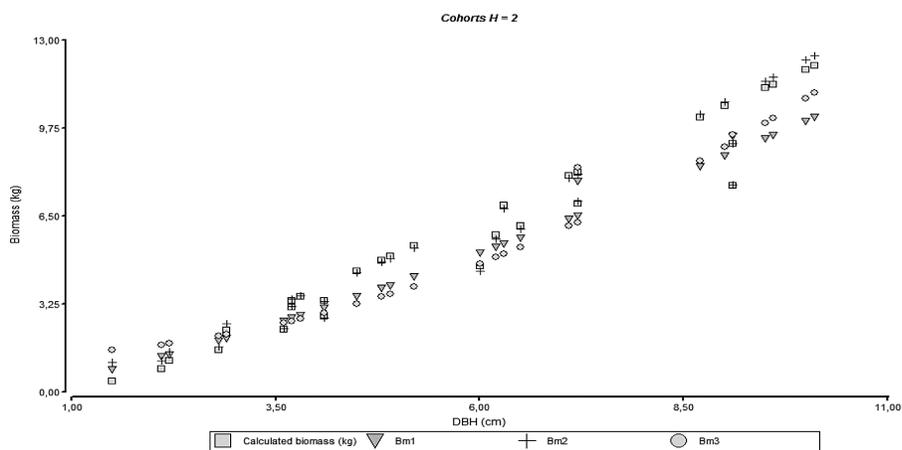


Figure 5. Relationship between diameter and biomass for the adjusted models and empirical data of different height cohorts.

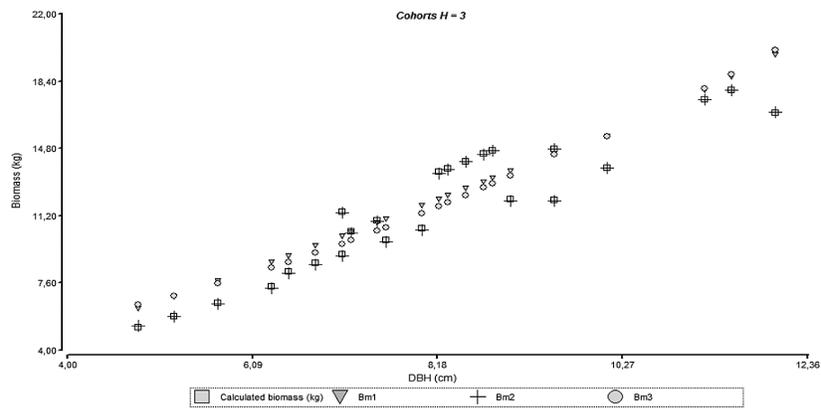


Figure 6. Relationship between diameter and biomass for the adjusted models and empirical data of different height cohorts

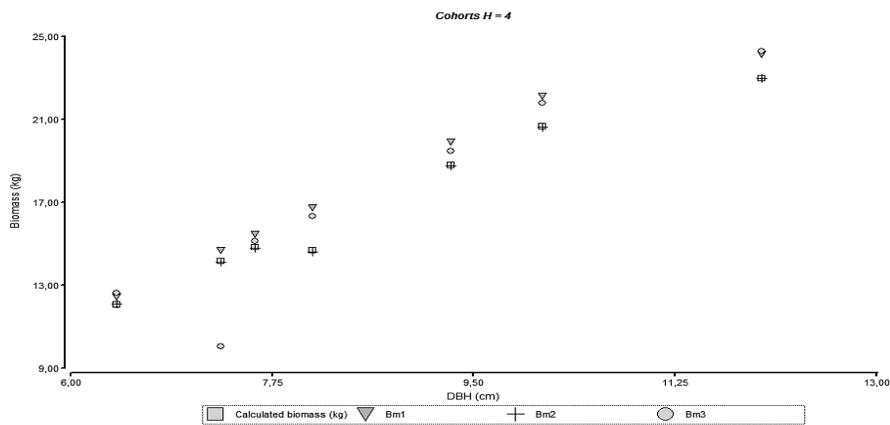


Figure 7. Relationship between diameter and biomass for the adjusted models and empirical data of different height cohorts.

The parameters for the models used depend on the nature of the data, therefore it was necessary to stratify the database to obtain a better fit of the model due to the dispersion of the data, as observed in the differences in DBH and height among the cohorts in the three stands used in calibration (table 1); equally this helps to better approximate model validity by focusing on a realistic number of culms that will endure until harvest or biological age is reached. The resulting stratification aided to obtain reliable biomass models for young culms; however, the model B^{m1} cannot be reliable when predicting biomass for sprouts at low height cohorts, the p values obtain demonstrate that the models are sensitive to variable variations (table 2). The previous might be explained by the fact that the culm, has not yet reached total height, and the variation for height is too large; since B^{m1} is base only on DBH for its prediction, it leaves this variable out when it can be seen that it can have an influence on the parameters and the prediction potential of the model. A similar situation is seen in B^{m3} for the first cohort, where the model is based on basal area only. Other cohorts for this models seem to work adequately, whilst B^{m2} includes height and is not subject to this source of variation. The models used in Yen et al [16], [17] are similar in terms of management and size as for the one suggested in Fonseca and Rojas [18] has similar size and weather conditions but no management; however, its age has taken it to a self-thinning stage which controls density.

Validation data had therefore similar dimensions, since all management in the site was standard, with sprouts reaching higher DBH dimensions. That pattern of growth in most bamboos would indicate that the plantation is increasing its biomass with time, by means of recruiting new culms with higher diameters. As table 4 indicates, there is no significance between empirical data and the models, except when comparing B^{m1} and B^{m3} ; the previous indicates that for all models tested (against empirical data), the predictions can be considered reliable, with the given degree of variation, which is answerable on the fact that two of the three models exclude height as a predicting variable, nevertheless the models are useful. The comparison between models aids to check congruency on the simulations, and the difference might arise from the combination of the entire data set when carrying on the comparison, as it must be remembered that the models carry different behaviors per cohort. The latest can be observed in figures 4 through 7, where observed and simulated data tend to be exponential at lower height cohorts to latter show a tendency to climax in the higher cohort. The use of DBH to predict biomass is a general method that has been widely applied in the bamboo forests [20]. This variable is the quickest and easiest available for allometry. In bamboo it is assumed that culm biomass accumulates mainly in the first year and then afterwards its biomass increased only slightly or not obviously compared with the same DBH; when other authors have used age, here a decision towards height stratification was followed to better approximate the levels of biomass variation, as the diameter within the same recruitment year might be similar if the same management is applied. This can be appreciated in figure 3, where the stratification shows a more accurate approximation for biomass.

The results here obtained (12.49 12.82 and 12.9 Mg ha⁻¹ of biomass for B^{m1} , B^{m2} and B^{m3} respectively), are a lower to those found by Yen et al 2011 in Moso bamboo forest of southern China where they found 8.13±2.15 Mg ha⁻¹ yr⁻¹; although the comparison is against another species and different maximum age of the plantation (5 years in Moso compared to 3 years) it can be suggested that , as in trees, a range of biomass according to age, management and dimensions is expected. Management and soil conditions have an important role to play, the values in this study area subject to an intensive management which has its density from 1133 to 1358 culms ha⁻¹ (table 5) as compared to 6500 to 7500 culms ha⁻¹ to that of Yen et al 2011, making them approximately 6 times lower in density than the Chinese bamboo forest. Studies in Costa Rica on plantations with high densities and zero management show values of 6 473±10.8% culms ha⁻¹ (all maturity stages) and 7.25 Mg ha⁻¹ for sprouts and young culms. One could argue the necessity of management here, however, 42.03 Mg ha⁻¹ are found within mature category [18], which did not get harvested, cramping growing space, and possibly possibilities to an optimized succession.

Allometric models are powerful tools that are widely applied to estimate volume, biomass and carbon storage of forests [16], [17]. As suggested by Zianis and Mencuccini [21], the most common variable used to predict volume, biomass and carbon storage is DBH. Bamboo plantations have a dynamic of growth different from that of trees and an effort to incorporate models that work with site occupancy and biomass are more reliable than volumetric models.

References

- [1] X. Londoño, G. C. Camayo, N. M. Riaño, y Y. López, «Characterization of the anatomy of *Guadua angustifolia* (Poaceae: Bambusoideae) culms», *Bamboo Science and Culture: The Journal of the American Bamboo Society*, vol. 16, n.º 1, pp. 18–31, 2002.
- [2] M. Montiel, V. M. Jiménez, y E. Guevara, “Caracterización anatómica ultraestructural de las variantes” *Atlántica, Sur*, *Revista de Biología Tropical*, vol. 54, n.º 2, pp. 1-12, 2006.
- [3] M. Montiel Longhi y L. Murillo Rodríguez, “Historia ecológica y aprovechamiento del bambú”, *Revista de biología tropical*, vol. 46, pp. 11–18, 1998.

- [4] Retana. Comunicacion personal. 2015.
- [5] A. Arguedas-Chaverri, «Guadua angustifolia Kunth: opción de diversificación productiva para productores en la Península de Osa, Costa Rica.» Tesis de graduación. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2015.
- [6] FONAFIFO. Comunicacion personal. 2017.
- [7] W. Liese, "Bamboo as carbon sink-fact or fiction?", *Journal of Bamboo and Rattan*, vol. 8, n.º 3/4, pp. 103–114, 2009.
- [8] R. Düking, J. Gielis, y W. Liese, «Carbon flux and carbon stock in a bamboo stand and their relevance for mitigating climate change», *J Am Bamboo Soc*, vol. 24, n.º 1, pp. 1–7, 2011.
- [9] A. M. Arango Arango y J. C. Camargo García, «Bosques de guadua del Eje Cafetero de Colombia: oportunidades para su inclusión en el mercado voluntario de carbono y en el Programa REDD+», *Recursos Naturales y Ambiente*. Número 61 (Diciembre 2010), páginas 77-85, 2010.
- [10] J. C. Camargo, J. A. Rodríguez, y A. M. Arango, "Crecimiento y fijación de carbono en una plantación de guadua en la zona cafetera de Colombia.", *Recursos Naturales y Ambiente*, n.º 61, pp. 86-94, 2010.
- [11] A. Castaneda-Mendoza, J. Vargas-Hernandez, A. Gomez-Guerrero, J. I. Valdez-Hernandez, y H. Vaquera-Huerta, "Carbon accumulation in the aboveground biomass of a *Bambusa oldhamii* plantation" *Agrociencia*, vol. 39, n.º 1, pp. 107–116, 2005.
- [12] O. Murillo, V. Badilla, y S. Morales, "Método de inventario para plantaciones pequeñas", Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica, pp. 4–5, 2012.
- [13] T. Morales-Pinzón, L. F. Durán, y C. A. Alzate, "Contenido de humedad en guadua rolliza preservada y secada en invernadero.", *Recursos Naturales y Ambiente*, n.º 65-66, pp. 45-50, 2012.
- [14] I. Widmer, "Caracterización botánica de los bambúes del género *Guadua* utilizados por el proyecto nacional de bambú en la construcción de viviendas en Costa Rica", CATIE, 1990.
- [15] S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, y K. Tanabe, Eds. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, vol. 5. Institute for Global Environmental Strategies Hayama, Japan, 2006.
- [16] T.-M. Yen, Y.-J. Ji, y J.-S. Lee, "Estimating biomass production and carbon storage for a fast-growing makino bamboo (*Phyllostachys makinoi*) plant based on the diameter distribution model", *Forest Ecology and Management*, vol. 260, n.º 3, pp. 339–344, 2010.
- [17] T.-M. Yen y J.-S. Lee, «Comparing aboveground carbon sequestration between moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla*) and China fir (*Cunninghamia lanceolata*) forests based on the allometric model», *Forest Ecology and Management*, vol. 261, n.º 6, pp. 995–1002, 2011.
- [18] W. Fonseca y M. Rojas, «Acumulación y predicción de biomasa y carbono en plantaciones de bambú en Costa Rica», *Ambiente y Desarrollo*, vol. 20, n.º 38, pp. 85–98, 2016. doi: 10.11144/Javeriana.ayd20-38.apbc
- [19] R. Kaushal et al., "Predictive models for biomass and carbon stock estimation in male bamboo (*Dendrocalamus strictus* L.) in Doon valley, India", *Acta Ecologica Sinica*, vol. 36, n.º 6, pp. 469–476, 2016.
- [20] X. Chen, X. Zhang, Y. Zhang, T. Booth, y X. He, «Changes of carbon stocks in bamboo stands in China during 100 years», *Forest Ecology and Management*, vol. 258, n.º 7, pp. 1489–1496, 2009.
- [21] D. Zianis y M. Mencuccini, «On simplifying allometric analyses of forest biomass», *Forest Ecology and Management*, vol. 187, n.º 2-3, pp. 311–332, 2004.

Evaluación de materiales semiconductores utilizando simulación numérica con elementos finitos para la producción termoeléctrica en condiciones de vacío

Evaluation of semiconductor materials using finite-elements simulation for thermoelectric production in vacuum conditions

Adrián Quesada-Martínez¹, Carlos Meza-Benavides²

Fecha de recepción: 26 de julio de 2018

Fecha de aprobación: 18 de setiembre de 2018

Quesada-Martínez, A; Meza-Benavides, C. Evaluación de materiales semiconductores utilizando simulación numérica con elementos finitos para la producción termoeléctrica en condiciones de vacío. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-2. Abril-Junio 2019. Pág 18-29.

DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v32i2.4346>

1 Profesor, Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: adquesada@tec.ac.cr

2 Profesor adjunto, Escuela de Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: cmeza@tec.ac.cr



Palabras clave

Termoelectricidad; Efecto Peltier; Efecto Seebeck.

Resumen

Los materiales termoeléctricos (TE) son usados para la generación de energía eléctrica usando cuando existe un diferencial de temperatura en sus extremos. Esta característica de los materiales se perfila como una fuente de energía alternativa, sobre todo en aquellas condiciones en donde no existen otras fuentes, como por ejemplo en el espacio. Este artículo presenta la evaluación por medio de simulaciones numéricas con método de elementos finitos, de materiales semiconductores termoeléctricos para su uso en vacío en el espacio.

Keywords

Thermoelectricity; Peltier Effect; Seebeck Effect.

Abstract

Thermoelectric materials (TE) are used for the generation of electrical energy when there is a temperature differential at their ends. Thermoelectricity is emerging as an alternative energy source, especially in situations where there are no other sources, such as outer space. This article presents the evaluation by means of finite-element numerical simulations of different thermoelectric semiconductor materials used in outer space.

Introducción

En la generación termoeléctrica se utiliza principalmente Teluro de Bismuto (Bi_2Te_3), Teluro de Plomo (PbTe) y Silicio - Germanio (SiGe) ya que son los materiales que presentan rangos de temperatura de operación baja, media y alta respectivamente, además, presentan una buena combinación de las tres variables que se deben considerar en los materiales termoeléctricos, estas son: coeficiente Seebeck, conductividad eléctrica y conductividad térmica [1].

Los materiales son clasificados según el rango de temperatura en el que operan como se muestra en el cuadro 1.

Cuadro 1. Clasificación de los semiconductores según su rango de temperatura.

Material	Clasificación de Temperatura	Rango de Temperatura
Teluro de Bismuto (Bi_2Te_3)	Baja	Hasta 450 K
Teluro de Plomo (PbTe)	Media	Hasta 850 K
Silicio-Germanio (SiGe)	Alta	Hasta 1300 K

En este documento se evalúa el comportamiento eléctrico del Bi_2Te_3 y PbTe ante cambios de temperatura que podrían experimentar estos materiales debido a la radiación solar en condiciones de vacío en el espacio.

El Efecto Seebeck para la Generación de Energía

El efecto termoeléctrico Seebeck describe el hecho de que un gradiente de temperatura impulsa la difusión de portadores cargados, que a su vez crea una tensión [2] [3]. El coeficiente de Seebeck de un material depende de la estructura del cristal, de la temperatura y del material. Los términos de energía termoeléctrica y termo potencia son nombres inapropiados ya que miden la tensión o el campo eléctrico (no la potencia eléctrica) inducido en respuesta a una diferencia de temperatura. Fundamentalmente, la termoeléctrica es una medida de la cantidad de entropía neta transportada por los portadores [4]. Los principales contribuyentes a la transferencia de entropía en la presencia de un gradiente de temperatura originados por difusión y / o los efectos de arrastre de fonones. Ambos efectos se observan en metales y semiconductores, sin embargo, uno domina típicamente sobre el otro. Por ejemplo, la difusión domina la termoeléctrica para la mayoría de los metales, mientras que el arrastre de fonones puede ser cien veces más grande que la difusión en los semiconductores.

Conversión de Potencia Termoeléctrica

El efecto Seebeck describe la generación de un gradiente de tensión termoeléctrico ΔV (la carga del electrón es $-e$, por lo tanto, $e > 0$ por un gradiente de temperatura ΔT , mientras que el efecto Peltier se refiere a la corriente de calor asociado con la corriente eléctrica [5].

Estos son los fenómenos termoeléctricos básicos que rigen la conversión del calor en energía eléctrica y viceversa en los conductores eléctricos. El efecto Peltier expresa la corriente de calor J_Q en presencia de corriente eléctrica J_C , definida como el flujo de carga, es decir, opuesta a la corriente de partículas

$$(\nabla V)^{Seebeck} = S \nabla T \quad (1)$$

$$J_Q^{Seebeck} = \Pi J_C \quad (2)$$

Donde $S \equiv (\nabla V / \nabla T)_{J_C=0}$ y $\Pi \equiv (J_Q / J_C)_{\Delta V=0}$ son los coeficientes Seebeck y Peltier, respectivamente. Cuando el calor y corrientes eléctricas son uniformes en una sección transversal A , los vectores de corriente $J_x = A J_x$ se describen en términos de las densidades J_x actuales. Al combinar el efecto Seebeck con la ley de Ohm $J_c = -A \nabla V$ y efecto el Peltier con la ley de Fourier $J_Q = -k A \nabla T$, donde σ y k son las conductividades eléctricas (en $\nabla T = 0$) y térmicas (en $J_c = 0$), las relaciones termoeléctricas tradicionales dicen que:

$$J_c = -\sigma A (\nabla V + S \nabla T) \quad (3)$$

$$J_Q = \Pi J_c - k A \nabla T \quad (4)$$

Considere un conductor como el que se representa en la Figura 1. En $z=0$, la temperatura es T_{Caliente} , mientras que en $z=l$, la temperatura es $T_{\text{Fría}}$, donde $T_{\text{Caliente}} > T_{\text{Fría}}$. De acuerdo con la ecuación (4), la corriente de calor J_Q depende de la carga de corriente J_c y el gradiente de temperatura dT/dz .

Cuando el anillo de corriente es cerrado por la resistencia de carga R_{Carga} y

$$\Delta V = \frac{R_{\text{carga}}}{R_{\text{carga}} + \frac{l}{\sigma A}} S (T_{\text{Caliente}} - T_{\text{Fría}}) \quad (5)$$

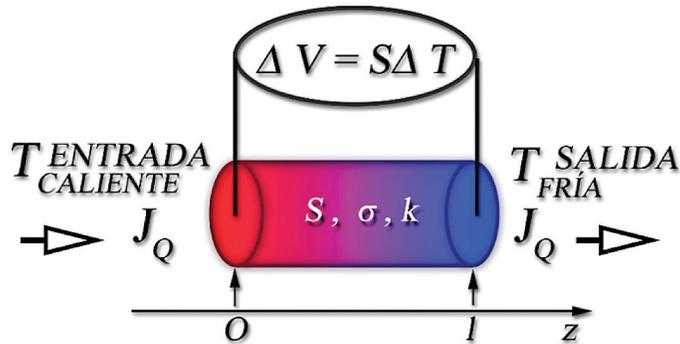


Figura 1. Elemento termoelectrico que consiste en un hilo conductor cuyos extremos se mantienen a diferentes temperaturas T_{Caliente} y $T_{\text{Fría}}$, generando una tensión termoelectrica $\Delta V = S\Delta T = S(T_{\text{Caliente}} - T_{\text{Fría}})$.

Con $|\Delta V| < |S(T_{\text{Caliente}} - T_{\text{Fría}})|$, la tensión termoelectrica es suprimida por el calentamiento Joule generado por la resistencia interna $l/\sigma A$.

A continuación, se considera un dispositivo que consta de dos hilos conductores con coeficientes Seebeck S_p y S_n conectados en un lado, es decir, lo que se denomina como termopar. Las etiquetas se refieren a los semiconductores, en los que uno puede ser de tipo p y la otra de tipo n dopado tal que $S_p > 0$ y $S_n < 0$. El circuito está cerrado por una resistencia de carga externa R_{Carga} (Figura 2). Las dos uniones se considera que tienen un buen contacto térmico para calentar los depósitos a temperaturas T_{Caliente} y $T_{\text{Fría}}$. La diferencia en los coeficientes Seebeck induce EMF $\varepsilon = (S_p - S_n)(T_{\text{Caliente}} - T_{\text{Fría}})$ y crea una tensión ΔV sobre la carga a temperatura constante $T_{\text{Fría}}$. El trabajo realizado por el sistema es la disipación óhmica en la carga.

$$W = \left(\frac{(S_p - S_n)(T_{\text{Caliente}} - T_{\text{Fría}})}{R_{\text{Carga}} + R_p + R_n} \right)^2 R_{\text{Carga}} \quad (6)$$

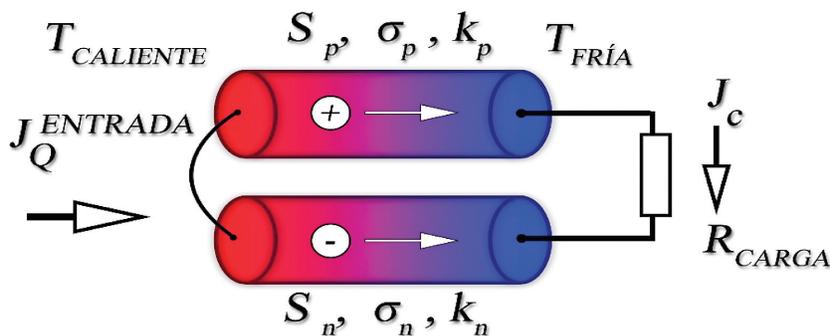


Figura 2. Termopar de dos conductores (por ejemplo, semiconductores, p y n dopados) que están conectados a una resistencia de carga R_{Carga} bajo un sesgo de temperatura. La diferencia de coeficientes de Seebeck induce una polarización de tensión isotérmica sobre la resistencia de carga y conduce una corriente de carga a través del circuito.

Esta potencia depende de los signos de la diferencia de temperatura ΔT y no de la diferencia de los coeficientes Seebeck.

La tensión de salida se puede aumentar mediante la conexión de los termopares en serie para formar una termopila. La tensión de salida es lineal al número de elementos.

Eficiencia Termoeléctrica

Los dispositivos termoeléctricos ofrecen generación de energía y refrigeración, sin partes móviles y el funcionamiento es casi libre de mantenimiento [2] [3]. Una diferencia de temperatura a través de cualquier material no superconductor creará una tensión que se puede utilizar para proporcionar energía.

Una corriente a través de ese mismo material se puede utilizar para enfriar un extremo para fines de refrigeración. Se puede decir que la termoelectricidad es esencialmente un motor térmico de partículas, donde el fluido de trabajo se compone de electrones o agujeros. El reto excepcional en el estudio de termoelectricidad es encontrar materiales que pueden proporcionar la energía y la refrigeración a una alta eficiencia termodinámica. En la actualidad, la termoelectricidad se encuentra entre un veinte y treinta por ciento menos eficiente que la quema de combustibles fósiles en las centrales eléctricas y refrigeradores basados en compresores. Los principios termoeléctricos se encuentran bien definidos para materiales que se obtienen a granel y los más eficientes se basan en aleaciones de Bi_2Te_3 con eficiencias que rondan el 10% [5].

La eficiencia de un material termoeléctrico se determina según la figura de mérito:

$$ZT = \frac{S^2 \sigma}{k} T$$

Donde:

S es la potencia termoeléctrica, definida como la tensión termoeléctrica (V) producida por la diferencia de temperatura por grado.

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta T}$$

σ es la conductividad eléctrica.

k es la conductividad térmica total, formadas por la contribución de fonones y electrones.

T es la temperatura.

La eficiencia se relaciona con ZT por la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\Delta T}{T_{\text{Caliente}}} \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + 1 - \frac{\Delta T}{T_{\text{Caliente}}}} \quad (7)$$

En la ecuación 7 se aprecia que la eficiencia tiende hacia el límite de Carnot cuando ZT tiende a infinito. Para competir con los refrigeradores modernos basados en compresores, el dispositivo termoeléctrico debe tener un $ZT > 3$. No hay límite teórico para ZT. Para maximizar ZT, S debe ser muy grande, de modo que una pequeña diferencia de temperatura pueda crear una gran tensión, σ debe ser muy grande con el fin de minimizar las pérdidas de calentamiento por efecto Joule, y k debe ser muy pequeño para reducir las fugas de calor y mantener una diferencia de temperatura [8]. S, σ , k no son mutuamente excluyentes. Por ejemplo, en un material a granel, la ley de Wiedemann-Franz limita la proporción σ/k_e , donde k_e es la contribución electrónica a la conductividad térmica total.

Caso de estudio simulado y entorno de simulación

Los generadores termoeléctricos propuestos constan de patas verticales de Telururo de Bismuto como el material termoeléctrico. En sistemas donde las dimensiones horizontales y verticales son limitadas, estos convertidores de energía termoeléctrica miniaturizados se utilizan para convertir el calor residual en electricidad.

Hay fundamentalmente dos diseños introducidos en este trabajo, el primer generador consta en una pierna simple, mientras que, el segundo generador consta en una pierna doble conectada eléctricamente en paralelo mediante una placa de cobre, en donde se tiene Telururo de Bismuto tipo p y n para cada una de las piernas como se muestra en la figura 3.

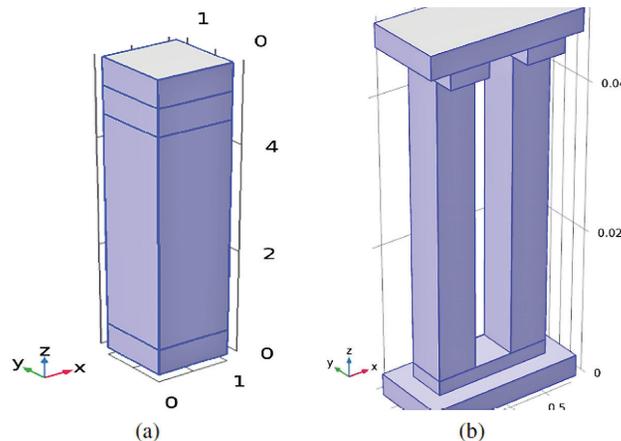


Figura 3. (a) Generador de pierna simple. (b) Generador de pierna doble.

En ambos TEG's los extremos superiores son de aluminio, cara en la que se inicia la transferencia de calor por radiación. El segundo elemento consta de una placa de cobre, donde se conectarán los electrodos para la conducción de la tensión, y por último, el semiconductor encargado de la producción de tensión a partir de la diferencia de temperatura.

La cara de aluminio expuesta a la radiación solar es donde inicia la transferencia de calor de los generadores, y se asume una temperatura de entrada o de exposición máxima de 100°C.

Además, se asumió una temperatura en el interior del TEG de 0 °C, ya que de la misma manera que, se asumió que la radiación solar incide únicamente en una cara del material de aluminio, ya que los demás materiales no tendrán exposición directa a la radiación.

Con base en esto, se tomaron las demás caras del generador aisladas térmicamente, ya que estas no tendrán exposición a la radiación solar, la cual sería el mayor aporque de temperatura al generador.

La simulación de los dos tipos de generadores se realizó utilizando el software COMSOL Multiphysics®, para esto se siguieron los siguientes pasos.

Se selecciono un estudio en 3D, se agregaron la física y multi física aplicadas en la simulación: Mecánica de Sólidos y Efecto Termoeléctrico (esta trae las físicas de Transferencia de Calor y Corrientes Eléctricas), se seleccionó un estudio transitorio.

Las geometrías se definieron como se observa en la figura 4 y se seleccionaron los materiales de cada TEG. Cobre-Telururo de Bismuto-Cobre-Aluminio, para el primer generador y Cobre-Telururo de Bismuto tipo p-Telururo de Bismuto tipo n-Cobre-Aluminio para el segundo generador.

En la física de Transferencia de calor se definió una condición de borde de temperatura inicial de 100°C en la cara superior del aluminio.

En la física de Mecánica de sólido, en la sección “Linear Elastic Material”, se selecciono “Thermal Expansion” y en la sección de “Thermal Expansion”, en “ T_{ref} ” se definió una temperatura de 100°C. Se definió una condición de borde de “Fixed Constraint”, el cual evita de forma puntual que la pieza se deforme, este se colocó en las 4 esquinas bajo el cubo de cobre que se encuentra más alejado a la temperatura de 100°C en el aluminio. Además, tiene como objetivo que la pieza se encuentre estáticamente determinada para que la simulación se lleve a cabo.

Se acoplo la física de Mecánica de Solidos a la de Transferencia de Calor, ya que la de Corrientes Eléctricas ya se encontraban acopladas.

Se definió una malla tetraédrica con tamaño extrafina y en “Study”, se estableció un rango de tiempo de 0 a 5 segundos, con un paso de 0.1 s.

Una vez que termino de correr la simulación, se presentan los resultados de transferencia térmica, voltaje y esfuerzo al que está sometido el TEG y se obtuvo el resultado de desplazamiento y densidad de corriente normal en el menú de opciones de sus físicas respectivas.

Discusión y resultados de simulación

Se realizaron diferentes mediciones con los materiales que presentan temperaturas de operación bajas (Teluro de Bismuto y Teluro de Plomo), esto para realizar una comparación entre el comportamiento de ambos materiales utilizados para TGEs. En cada una de estas simulaciones se obtuvieron los valores de la tensión en la entrada del TEG y la tensión en la cara de salida del TEG en función de la temperatura de entrada.

En el caso del TEG cuya pierna se realizó con Teluro de Bismuto se aplicó un rango de temperatura en la cara de entrada desde 100 K hasta 450 K para observar el comportamiento de la tensión a lo largo del TEG, este rango de temperatura se definió según la temperatura máxima de operación del material seleccionado de acuerdo con el cuadro 1. Los resultados de todas las mediciones obtenidas para el Bi_2Te_3 se muestran en el cuadro 2.

Cuadro 2. Resultados de la simulación termoeléctrica para la pierna simple de Bi_2Te_3 .

T (K)	T_{in} (°C)	V_{in} (V)	V_{out} (V)	J_{in} (A/mm ²)	J_{out} (A/mm ²)	T_{out} (°C)
100	-160	10	20	$4,9400 \times 10^6$	$1,050000 \times 10^5$	-20
150	-123	7,25	-13	$1,2435 \times 10^6$	$9,100000 \times 10^4$	-20
200	-74	4	-7	$1,5200 \times 10^6$	$1,860000 \times 10^5$	-20
250	-24	0,24	-0,3	$1,4680 \times 10^6$	$1,460000 \times 10^5$	-20
300	27	-3,5	6	$5,8500 \times 10^4$	$1,880000 \times 10^5$	-20
350	77	-7	13	$1,3460 \times 10^4$	$4,100000 \times 10^4$	-20
373,15	100	-9	16	$4,3140 \times 10^6$	$1,230000 \times 10^5$	-20
400	127	-11	19	$8,8870 \times 10^7$	$2,720000 \times 10^6$	-20
450	176	-14	25	$3,1300 \times 10^6$	$1,150000 \times 10^5$	-20

El mismo procedimiento se realizó para el caso del TEG cuya pierna se realizó con Teluro de Plomo, en donde se aplicó un rango de temperatura en la cara de entrada desde 100 K hasta

850 K. Este rango de temperatura se definió nuevamente tomando la temperatura máxima de operación del material de acuerdo con el cuadro 1. Los resultados de todas las mediciones obtenidas para el PbTe se muestran en el cuadro 3.

En la primera columna del cuadro se tiene la temperatura configurada a la entrada del elemento de aluminio que es la que iniciaría la transferencia de calor; en la segunda columna se tiene la temperatura en la entrada del TEG; las tensiones indicadas en las siguientes columnas corresponden a la tensión en el punto de entrada (T_{in}) y la tensión en el punto de salida (T_{out}) del TEG; por último, se tiene la densidad de corriente (J) en la entrada y en la salida del TEG y la temperatura en el punto de salida del TEG (T_{out}).

Cuadro 3. Resultados de la simulación corriente (J) en la entrada y en la salida PbTe.

T (K)	T_{in} (°C)	V_{in} (V)	V_{out} (V)	J_{in} (A/mm ²)	J_{out} (A/mm ²)	T_{out} (°C)
100	-173	4,2	-8,5	$1,8426 \times 10^8$	$2,5300 \times 10^6$	-20
150	-123	3	-6	$6,7400 \times 10^6$	$1,1700 \times 10^5$	-20
200	-73	1,43	-3	$4,8620 \times 10^6$	$1,3000 \times 10^5$	-20
250	-23	0	-0,2	$6,3700 \times 10^5$	$3,8000 \times 10^4$	-20
300	26	-1,5	3	$1,1280 \times 10^6$	$2,9800 \times 10^5$	-20
350	77	-3,2	6,5	$4,8900 \times 10^5$	$1,5300 \times 10^4$	-20
375,15	100	-4	8	$1,8520 \times 10^6$	$5,6000 \times 10^4$	-20
400	126	-6,3	9,2	$4,4400 \times 10^5$	$7,8000 \times 10^4$	-20
450	177	-7,5	15	$1,5350 \times 10^7$	$5,1500 \times 10^5$	-20
500	227	-10	20	$1,0066 \times 10^9$	$1,5000 \times 10^7$	-20
550	277	-13	26	$1,8602 \times 10^8$	$1,6200 \times 10^6$	-20
600	326	-16	33	$2,2610 \times 10^8$	$6,0000 \times 10^6$	-20
650	377	-20	40	$4,0600 \times 10^8$	$4,4000 \times 10^6$	-20
700	426	-24	48	$3,0490 \times 10^9$	$1,8200 \times 10^7$	-20
750	477	-28	56	$2,2490 \times 10^8$	$4,3000 \times 10^6$	-20
800	526	-32	64	$6,6840 \times 10^8$	$9,6000 \times 10^6$	-20
850	578	-36	73	$5,9800 \times 10^8$	$6,8000 \times 10^6$	-20

Cada uno de los valores se tabularon para ser graficados y poder observar el comportamiento de las tensiones generadas conforme la temperatura de entrada iba cambiando.

Una vez que se establecía un valor de temperatura se definía el valor aproximado del coeficiente de Seebeck de acuerdo con las figuras de mérito de cada material.

En la figura 4 se puede observar que la tensión disminuye con una tendencia lineal en la entrada del TEG conforme la temperatura va en aumento, mientras que, la tensión en la cara de salida en función de la temperatura va en aumento conforme aumenta la temperatura.

Además, se aprecia que la tensión toma valores positivos y negativos por arriba o por debajo de la temperatura de equilibrio, este comportamiento es el esperado de acuerdo con lo establecido en la ecuación 3.

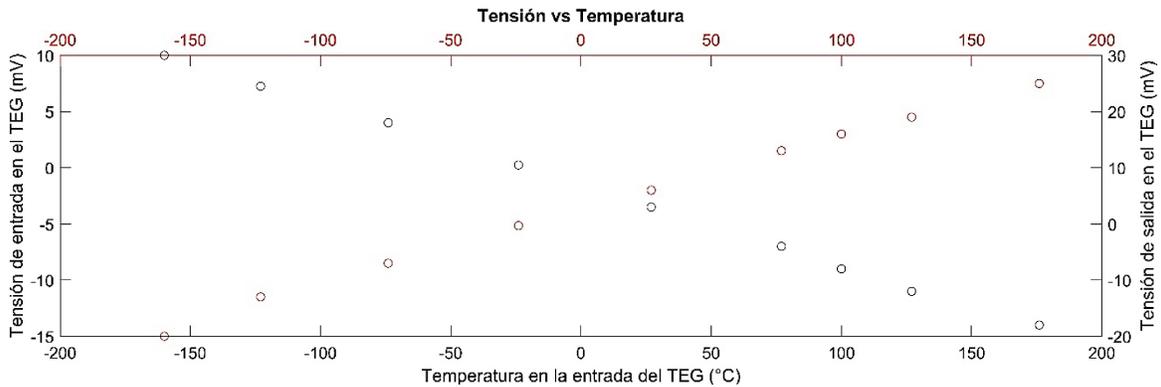


Figura 4. Tensión de entrada y de salida en función de la temperatura del TEG de Bi_2Te_3 .

En la figura 5 se puede observar un comportamiento similar al del Bi_2Te_3 para el PbTe , con valores absolutos mucho más grandes que los del material anterior y con una tendencia cuadrática. Este material alcanza el cero de la ecuación en un valor de temperatura aproximado de $500\text{ }^\circ\text{C}$, mientras que el Bi_2Te_3 lo hace a un valor cercano a $28\text{ }^\circ\text{C}$.

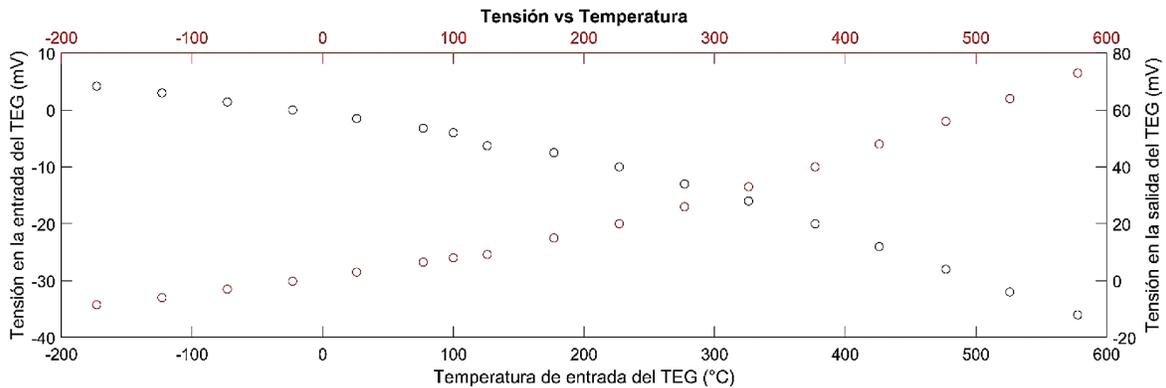


Figura 5. Tensión de entrada y de salida en función de la temperatura del TEG de PbTe .

Una vez que estos materiales pasan el cero de la ecuación, los valores de la tensión toman valores positivos y se puede observar que el Bi_2Te_3 toma estos valores a temperaturas más bajas de la temperatura máxima que puede alcanzar el TEG en condiciones de vacío en el espacio, e inclusive a temperaturas mucho más bajas que el PbTe .

El PbTe muestra una generación de tensión, en valor absoluto, mucho mayor que el Bi_2Te_3 ; que muestra una generación de tensión inclusive con cambio de signo en el intervalo de operación de temperatura.

Con los resultados obtenidos para la densidad de carga, se realizaron los gráficos con los valores de entrada y de salida para cada uno de los materiales, esto para poder observar el comportamiento de los valores conforme aumentaba la temperatura.

Los dos materiales presentan un comportamiento similar en las densidades de carga como se puede apreciar en la figura 6 y la figura 7 respectivamente, sin embargo, el PbTe muestra el punto más alto de los valores alrededor de los 426 ento similar en las BiTe presenta este punto alrededor de los $127\text{ }^\circ\text{C}$.

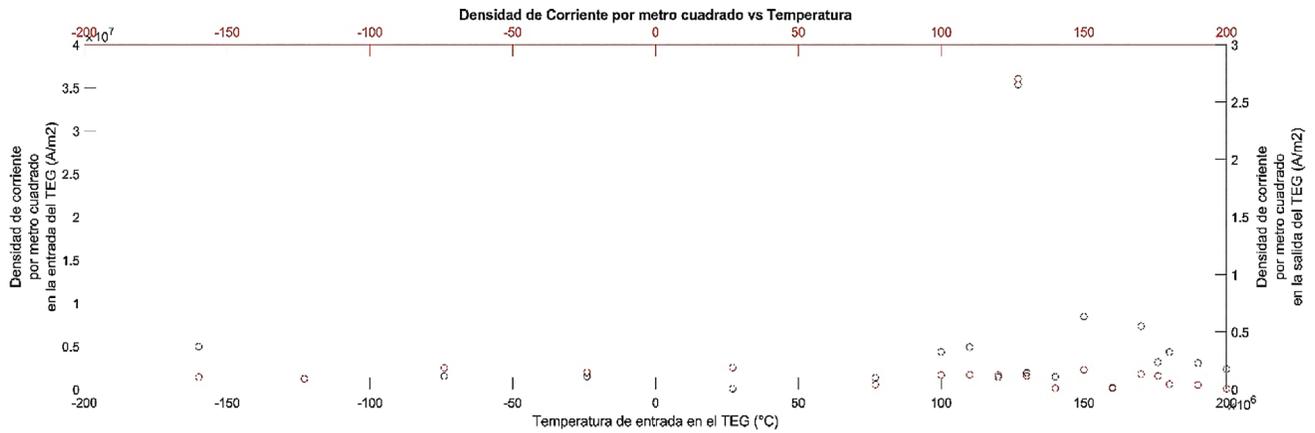


Figura 6. Densidad de carga por metro cuadrado de entrada y de salida en función de la temperatura del TEG de BiTe.

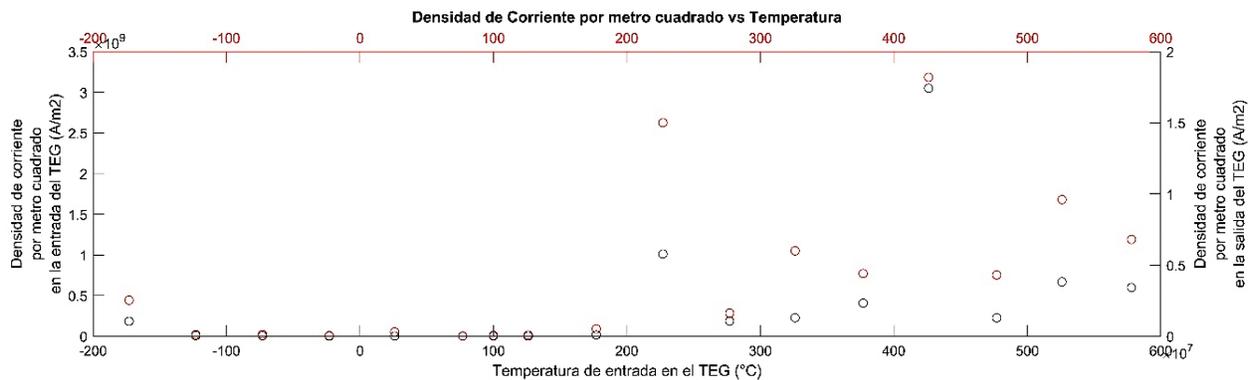


Figura 7. Densidad de carga por metro cuadrado de entrada y de salida en función de la temperatura del TEG de PbTe.

A la simulación realizada se le acoplo una resistencia de carga de 200 ohm. Este valor es la carga que representan las baterías completamente vacías del sistema de respaldo de un CubeSat para simular la carga de estas.

La ecuación 5 permite calcular el valor de la tensión de carga una vez que el circuito es cerrado por una resistencia de carga. Con el valor de la resistencia de carga de las baterías y esta ecuación, se realizó el cálculo de las tensiones de carga según el valor de la tensión en circuito abierto en función de la temperatura y se graficaron para ambos materiales para obtener un gráfico de tensión de carga en función de la temperatura como se muestra en la figura 8.

En esta grafica se observa que el Bi_2Te_3 toma valores de tensión de carga crecientes, con tendencia lineal, entre los rangos de operación del TEG, lo que hace que estos valores sean bajos alrededor de los -20 stos valores seanura teriPbTe los valores de tensión de carga crecen con una tendencia exponencial alrededor de los -10 °C, lo que hace que estos valores crezcan de una forma más rápida que el anterior.

Con la diferencia de tensión (ΔV) entre la entrada y la salida del TEG multiplicada por la densidad de carga (J_c) se obtuvo el valor de la potencia de salida del generador por unidad de área. Con estos resultados se obtiene un gráfico para cada material donde se puede estimar el punto de operación de estos generadores en función de la temperatura de entrada.

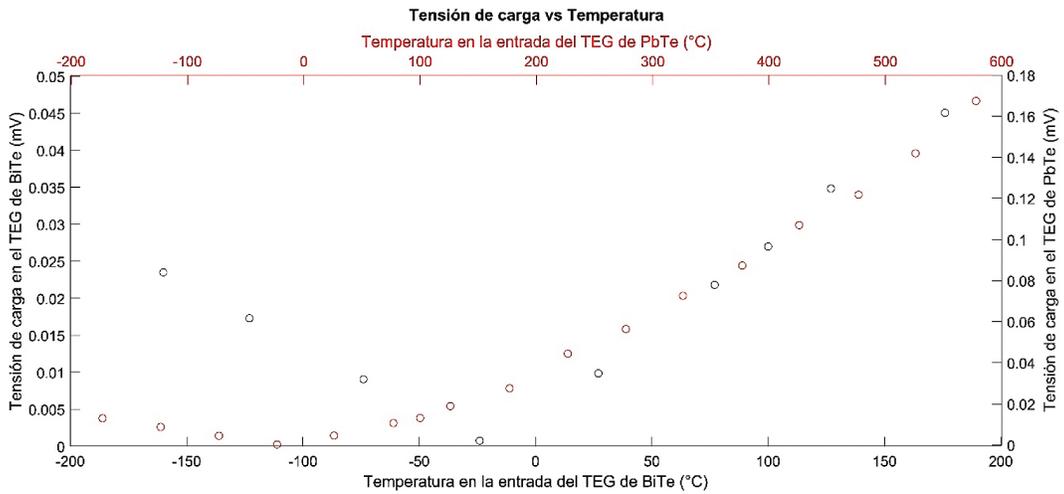


Figura 8: Tensión de carga en función de la temperatura del TEG.

Los gráficos para cada uno de los materiales se pueden observar en las figuras 9 y 10, para el Bi_2Te_3 y el PbTe respectivamente. En estas figuras se puede apreciar que el generador realizado con el Bi_2Te_3 presenta un valor de potencia máxima alrededor de los $127\text{ }^\circ\text{C}$, cuyo valor es aproximadamente 8.16 A/cm^2 , mientras que el PbTe presenta este punto máximo alrededor de los $426\text{ }^\circ\text{C}$, con un valor aproximado de 131.04 A/cm^2 .

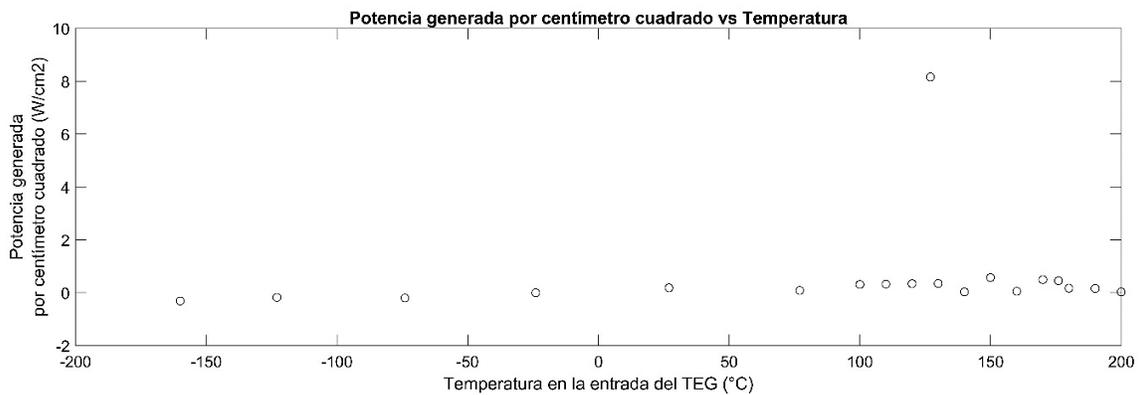


Figura 9: Potencia generada por centímetro cuadrado en función de la temperatura del TEG para el Bi_2Te_3 .

El valor máximo de potencia por centímetro cuadrado que presentan estos materiales en los puntos indicados es un valor único en la distribución de los datos, este punto concuerda con el valor máximo del coeficiente de Seebeck.

Conclusiones

Las condiciones más óptimas de potencia generada y tensión las presenta el Bi_2Te_3 , por esta razón se recomienda este material para la fabricación de los TEGs para uso en vacío en el espacio, a pesar de que el PbTe presente valores más altos de tensión y potencia generada, queda fuera de esta aplicación porque para alcanzar valores utilizables se requieren temperaturas más altas.

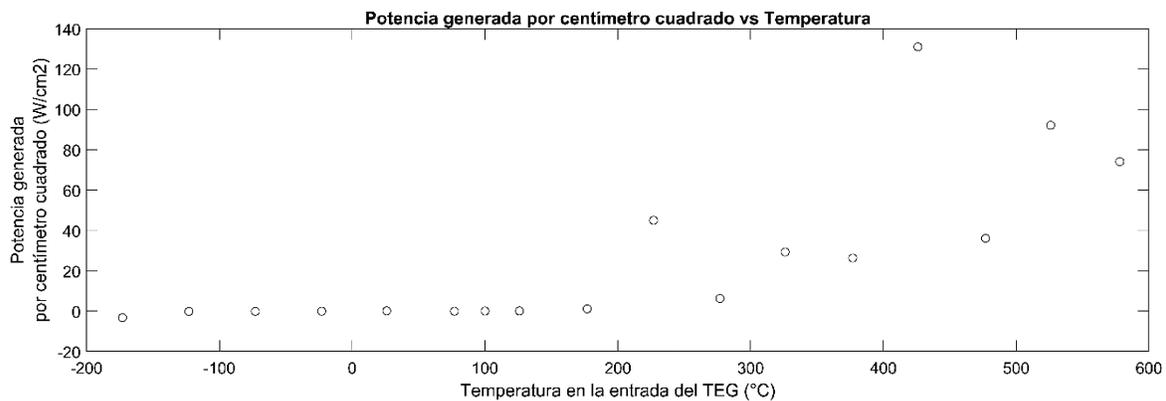


Figura 10: Potencia generada por centímetro cuadrado en función de la temperatura del TEG para el PbTe.

A pesar de que ambos materiales presenten un pico de potencia muy alto, no es recomendable trabajar con este valor, ya que, en los alrededores de este, decrece y crece la potencia de una forma muy rápida, lo que podría hacer que un pequeño cambio de temperatura genere un gran cambio en la potencia generada.

El material que se escogió para los módulos termoeléctricos son compuestos cuya base es Bi_2Te_3 . Estos compuestos son comerciales, lo que quiere decir que a pesar de haber sido escogidos como los mejores materiales termoeléctricos para el rango de temperatura del TEG con la cual se trabajó durante el proyecto, no lo son. La investigación sobre materiales con un ZT más alto a bajas temperaturas, el uso de nuevos materiales en este campo de estudio y la aparición o creación de mejores compuestos, teorías de creación de materiales y modificación de los ya existentes permite pensar que con el paso del tiempo saldrán a la venta más y mejores opciones de materiales termoeléctricos.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al “Programa de Maestría en Ing. Electrónica” por facilitar el desarrollo de este proyecto.

Referencias

- [1] M. D. Solís, “Diseño de Paneles Generadores de Electricidad por Efecto Seebeck,” Antioquia, 2013.
- [2] D. MacDonald, *Thermoelectricity: An Introduction to the Principles*, Dover Books on Physics. Dover Publications, 2013.
- [3] G. S. B. a. S. J. Mahan, *Thermoelectric Materials: New Approaches to an Old Problem*, *Physics Today*, 50(3):42., 1997.
- [4] H. Callen, *Thermodynamics*, New York, NY: Wiley, 1985.
- [5] D. Rowe, *CRC Handbook of Thermoelectrics*, CRC Press, 1995.
- [6] S. de Groot, *Thermodynamics of Irreversible Processes*, North-Holland, 1966.
- [7] L. Onsager, “Reciprocal relations in irreversible processes,” *Phys. Rev*, vol. 37, pp. 405-426, 1931.
- [8] G. D. M. S. D. G. F. J.-P. a. C. T. Chen, G. Chen, M. Dresselhaus, G. Dresselhaus, J.-P. Fleurial and T. Caillat, “Recent developments in thermoelectric materials,” *International Materials Reviews*, vol. 48, no. 1, pp. 45-66, 2003.
- [9] M. a. M. N. F. Cutler, “Observation of anderson localization in an electron gas,” vol. 181, p. 1336–1340, 1969.
- [10] X. H. Yang, “First principles study of seebeck coefficients of doped semiconductors,” *Journal of Applied Physics*, vol. 111, no. 3, 2012.

Potencia Reactiva: del despacho óptimo al cobro de tarifas - PARTE B

Reactive Power: from the optimal dispatch to electrical rates - PART B

Gustavo Adolfo Gómez-Ramírez¹

Fecha de recepción: 12 de junio de 2018

Fecha de aprobación: 6 de setiembre de 2018

Gómez-Ramírez, G. Potencia Reactiva: del despacho óptimo al cobro de tarifas - PARTE B. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-2. Abril-Junio 2019. Pág 30-42.

DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v32i2.4347>

¹ Profesor, Escuela de Ingeniería Electromecánica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: ggomez@tec.ac.cr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9195-072X>



Palabras clave

Tarifas eléctricas; cobro de potencia reactiva; precios de potencia reactiva.

Resumen

Hoy día los sistemas eléctricos han evolucionado desde ofrecer un servicio básico de electricidad hasta brindar servicios con las más estrictas normas de calidad del suministro eléctrico pues hoy día estos tienen un mayor valor agregado para con los clientes. En el caso de Costa Rica, se rigen bajo la normativa establecida por la ARESEP, tanto para los parámetros de calidad del servicio y los precios, en el caso de la calidad se requiere regulación y control de las variables de la frecuencia-tensión. La presente investigación propone un modelo de tarifa diferenciado, el cual hace suponer una baja sustancial a las tarifas eléctricas hoy día establecidas y se utiliza como referencia lo desarrollado en *parte-A* de la investigación. Por esta razón, buscando la reducción de los costos de electricidad, se ha desarrollado una optimización lineal para realizar un despacho económico de la potencia reactiva, dándole valor a esta. Se propone un modelo tarifario que contempla lo anteriormente mencionado a fin de solucionar los problemas de costos de electricidad para con los clientes, en el cual, a través de los mecanismos correctos, estos serán los más beneficiados a partir de una tarifa diferenciada.

Keywords

Electric rates; reactive power charging; reactive power prices.

Abstract

Nowadays, electricity systems have grown from offering basic electricity services to giving highest quality standards facilities. Today customers have an added value, in Costa Rica's case, they are regulated by ARESEP. This institution supervises parameters of quality, service and prices, it is therefore necessary a control and regulation of frequency-voltage variables. This investigation proposes a new rate model from its own research begun *part-A* that is used as a reference. Looking for electricity's cost decrease, a linear optimization is the solution to carry out an economic dispatch of the reactive power and through the correct mechanisms, customers will take advantage of a segregated rate.

Introducción

El establecimiento del monto a pagar por las tarifas eléctricas solamente comprende la componente de potencia de la potencia activa pues cobra en todos los casos la energía y en algunos la demanda. Por esta razón, las compañías eléctricas deben asegurar las condiciones operativas del SEP tanto para la tensión como la frecuencia y de esta manera se cuantifican aspectos técnicos que contribuyen en la regulación y control de las variables anteriormente mencionadas, de esta manera se presenta una oportunidad de mejora para la reducción de las tarifas eléctricas, considerando la potencia reactiva según su uso y por lo tanto poder estratificar los rubros que componen la fórmula de la tarifa de este servicio. Debido a lo anteriormente indicado, en este artículo se propone un nuevo modelo de tarifas con un despacho de potencia reactiva optimizado, tal y como se desarrolló en parte A de la investigación.

Teoría

Mercados Eléctricos

La operación de un SEP está orientada al despacho económico de las diversas fuentes de generación de electricidad, por esta razón, las transacciones entre las diferentes compañías implican el intercambio de la energía eléctrica al bajo costo, no obstante, debido a que comprar electricidad en otros sistemas de potencia puede resultar más económico que producirla, una compañía A con generación eléctrica disponible deberá tener una producción de energía menos costosa comparada con lo que costaría generar con la compañía B. Dicha compra de la energía a la compañía eléctrica A debe ser a un precio inferior comparado al que, si lo desea producir, obteniendo de esta manera un beneficio económico y por su puesto colocando energía ociosa para satisfacer el consumo de las cargas del sistema [1] [2]. El SEP debe tener la capacidad de generación para suplir la demanda máxima del conjunto pues debido a que la red eléctrica es variada y diversa en su configuración, se espera que exista exceso de generación para colocar la potencia eléctrica, al ser posible instalar unidades de generación de mayor tamaño se obtiene un mayor beneficio, lo cual será llamado economía de escala, en la figura 1 se muestra un esquema de un mercado eléctrico.

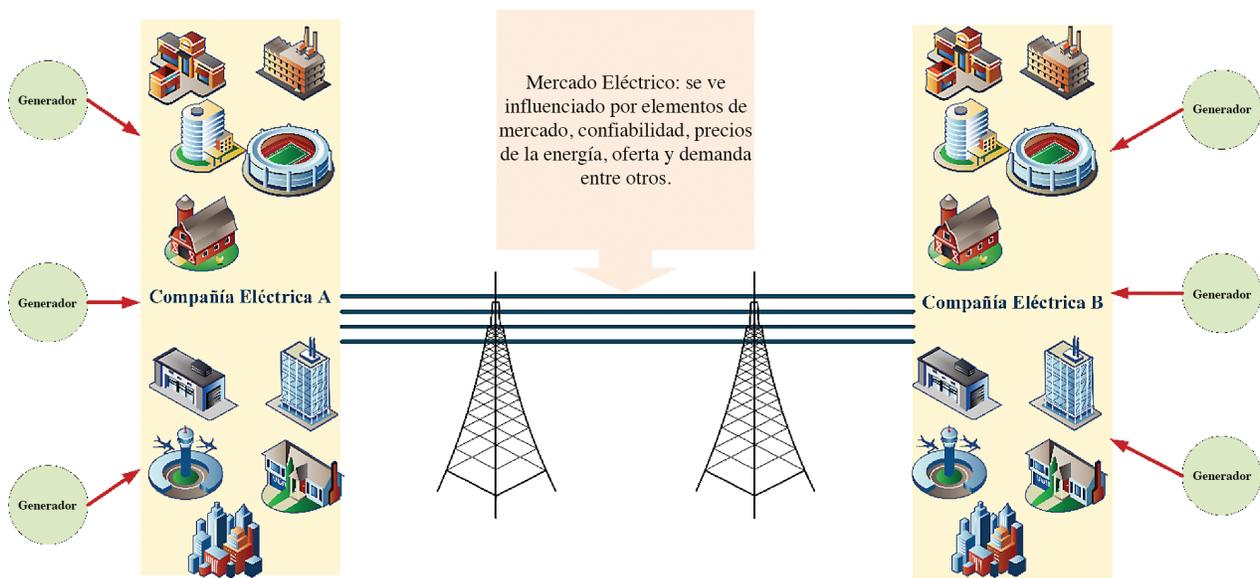


Figura 1. Estructura Básica de un Mercado Eléctrico basado en [1].

Precios de los bienes y servicios

El *precio* es la cantidad monetaria en la que se vende un artículo, considerando que quién lo compra está de acuerdo en pagar por el mismo [3]. De acuerdo con la oferta y demanda de los productos o bienes y servicios, estos variarían y será afectados por factores externos como los precios de la divisa, situaciones políticas, innovación y sustitución de productos entre otros. Entre las omisiones para fijar los precios según *Izar* son: estar muy orientados con un enfoque a los costos, hacia el mercado, no llevar un pulso adecuado a los precios de la competencia, fijar los precios de manera separada a las estrategias de mercadeo. El precio de un bien o servicio puede ser fijado por dos métodos: *los basados en el costo* y *los basados en el mercado*. En la figura 2 se muestra un esquema de los métodos de fijación de precios.

Métodos basados en el costo

Entre los métodos comunes para establecer precios se tienen los siguientes tipos de acuerdo con Izar Landeta son:

- El *método basado en el costo más el margen de ganancia*, toma en cuenta los costos de los bienes fabricados, por esta razón tendrá los siguientes tres componentes principales: materia prima, mano de obra y los gastos indirectos.
- El *método basado en el margen de ganancia* este es un método común para fijar precios y contabiliza el costo del producto y le suma el margen de beneficio.
- El *método de maximización de ganancias* es muy útil cuando la demanda es elástica y esta es afectada por la modificación de los precios.
- El *método de ajuste por inflación* es de utilidad si se tiene un precio anterior y este debe ser actualizado debido a la inflación.

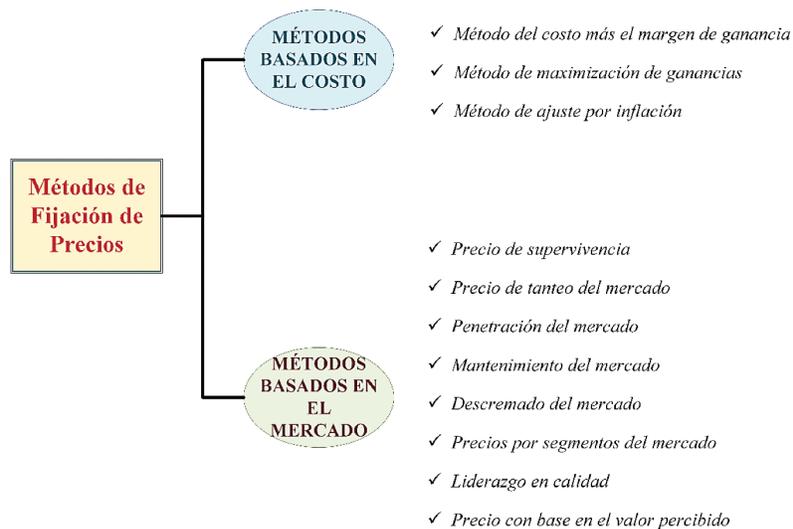


Figura 2. Métodos para fijación de precios basado en [3]

Métodos basados en el mercado

Entre los métodos comunes para establecer precios se tienen los siguientes tipos de acuerdo con Izar Landeta:

- *Supervivencia*: muy utilizados en empresas que se encuentran en estado de crisis y se establecen precios para subsistir a corto plazo.
- *Tanteo del mercado*: es muy utilizado para incursionar en nuevos segmentos de mercado y posicionarse con los bienes y servicios.
- *Penetración del mercado*: las empresas requieren de esta estrategia a fin de ganar un mercado de manera temporal.
- *Mantenimiento del mercado*: las empresas utilizan esta manera de establecer precios debido que desean mantener su cuota de participación en el mercado.
- *Descremado del mercado*: es muy utilizada cuando se desea segmentar una parte del mercado en la cual los clientes están dispuestos a pagar un precio mayor por un bien y servicio.

- *Segmentos del mercado:* aquí las empresas establecen precios de acuerdo con distintos segmentos de mercado.
- *Liderazgo en calidad:* se ofrece un bien o servicio de muy alta calidad y los clientes están dispuestos a pagar un precio mayor por ello.
- *Con base en el valor percibido:* las empresas establecen el precio de acuerdo con la percepción de los clientes por el bien y servicio.

Resultados

Importancia de asignación de costos de potencia reactiva para la reducción de las tarifas eléctricas

De acuerdo a lo planteado en la parte A del artículo, los beneficios de una metodología serán plantear una modificación a la tarifa actual cobrada para el caso de Costa Rica [4] [5], debido que esta posee componentes económicos en la tarifa que afectan directamente los clientes del servicio eléctrico, muchos de los cuales, han sido ampliamente cuestionados por el sector industrial principalmente y abogan por una baja sustancial en los costos de la electricidad cobrada. Los tres sectores eléctricos más importantes son los siguientes: *residencial, comercial e industrial*. A continuación, en la figura 3 se muestra un esquema de la participación de los sectores en el SEP:

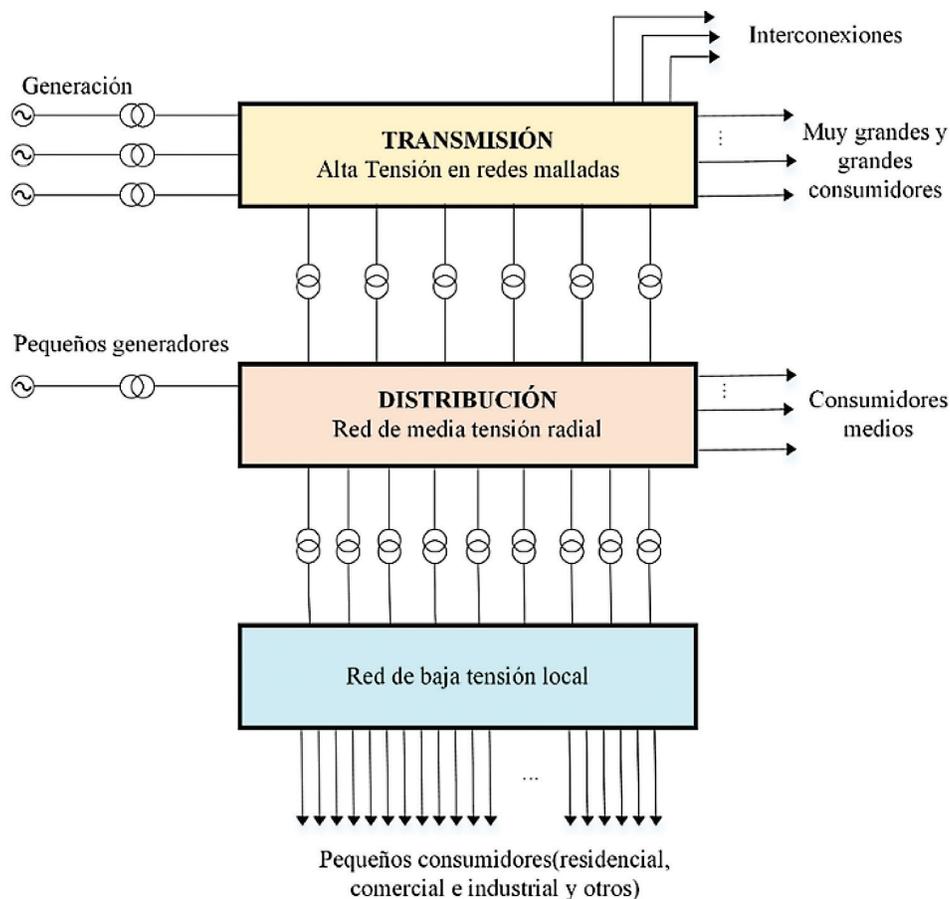


Figura 3. Participación de los componentes sectoriales de la Industria Eléctrica basado en [6].

Costa Rica cuenta con 8 compañías eléctricas, las empresas eléctricas pueden ser clasificadas de acuerdo con su capacidad de potencia generada, vendida, niveles de tensión de su sistema eléctrico, área de cobertura eléctrica, número de clientes entre otros factores. En la figura 4 según su naturaleza un mercado eléctrico puede tener los siguientes componentes: *Distribución, Transmisión, Generación y Comercialización*. No obstante, se deben tomar en cuenta otras tres perspectivas de análisis para considerar la potencia reactiva para valorar las diversas opciones de optimización de la tarifa eléctrica, estas son las siguientes: *el cliente, la compañía eléctrica y el regulador de servicios públicos*. A continuación, se describe y analiza cada una de ellas.

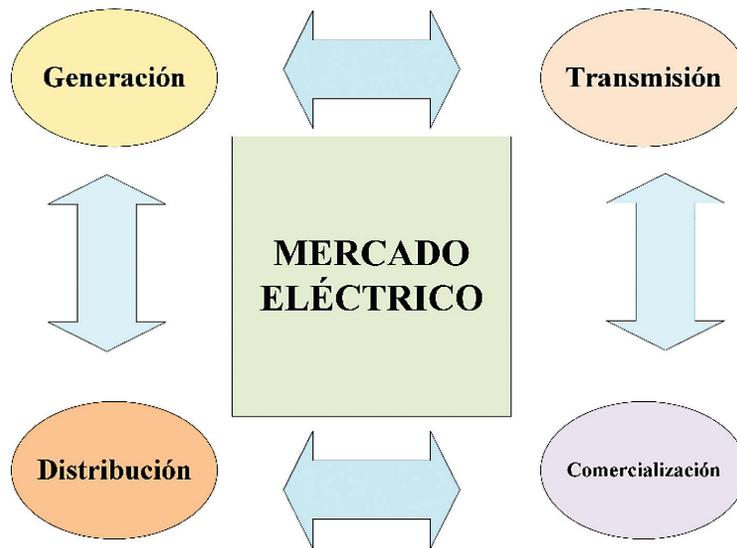


Figura 4. Componentes de un Mercado Eléctrico basado en [1].

Perspectiva del Cliente Electrointensivo

ARESEP actualmente cobra las tarifas [4] [5] para los clientes *electro-intensivos* de Costa Rica y acorde a los requerimientos energéticos, estos se dividen de acuerdo con la naturaleza de su servicio prestado en los siguientes: *residenciales, comerciales e industriales*. Cada uno de ellos, a partir de su capacidad instalada, tipo de empresa entre otros se ajustará a los requerimientos de tarifas, acorde a lo ofrecido en Costa Rica. Por esta razón, las tarifas ofrecidas a los clientes se muestran en el cuadro 1.

De acuerdo con el cuadro 1, se puede observar que las principales tarifas para los clientes electro-intensivos son:

- a) T-AP: Tarifa de Alumbrado Público
- b) T-RE: Tarifa Residencial
- c) T-CO: Comercios y Servicios
- d) T-IN: Tarifa Industrial
- e) T-MT: Tarifa de Mediana Tensión
- f) T-A: Tarifa de Acceso
- g) T-SD: Ventas al servicio de Distribución

Cuadro 1. Cuadro Comparativo de Tipos de Tarifas en Costa Rica al año 2018.

Tipo de Tarifa	Compañía Eléctrica							
	CNFL	COOPE-ALFARORUIZ	COOPE-GUANACASTE	COOPE-LESCA	COOPE-SANTOS	ESPH	ICE	JASEC
T-AP: Alumbrado Público	X	X	X	X	X	X	X	X
T-CO: Comercios y Servicios	X	X	X	X	X	X	X	X
T-CS: Preferencial	X				X	X	X	X
T-IN: Industrial	X	X	X	X	X	X	X	X
T-MT: Mediana Tensión	X		X	X	X	X	X	X
T-MTb: Mediana Tensión							X	
T-PR: Promocional	X							
T-RE: Residencial	X	X	X	X	X	X	X	X
T-REH: Residencial Horaria	X							
T-TA: Tarifa de Acceso	X	X	X	X	X	X	X	X
T-SD: Ventas al servicio de Distribución			X	X	X	X	X	X
T-CB: Ventas a ICE							X	
T-UD: Ventas usuarios directos							X	

Las cinco primeras tarifas son las principales para los clientes residenciales, comerciales e industriales. La tarifa f) y g) son tarifas especiales, la primera se refiere a clientes que conectan por primera vez y requieren servicio temporal. La tarifa g) es una tarifa en la cual los cogeneradores venden electricidad al sistema de distribución.

Perspectiva de las Compañías Eléctricas

Las tarifas eléctricas en Costa Rica tienen una ecuación compleja que contempla muchas variables, entre las principales se pueden mencionar:

- a) Inversiones (INV) en SEP como subestaciones nuevas, infraestructura eléctrica, líneas de transmisión y distribución,
- b) Mantenimiento y mejoras (MyM) al sistema eléctrico.
- c) Costos por Mano de Obra (MO), estos costos pueden ser directos e indirectos. Los costos directos son del personal de operación y mantenimiento. Los costos indirectos corresponden a la estructura administrativa de las empresas eléctricas.

d) Depreciación (DEP) de los equipos e instalaciones

Por lo tanto, la ecuación final para tarifas eléctricas comprende las siguientes componentes:

$$\text{Precio}_{TARIFA} = INV + MyM + MO + DEP$$

Por lo tanto, la tarifa deberá contemplar aspectos técnicos necesarios para los servicios complementarios tales regulación y compensación de potencia reactiva, flujo de potencia reactiva entre otros y todo lo necesario para mantener la estabilidad de tensión en las barras del sistema eléctrico. Así mismo, todo el referente para el trasiego de potencia activa como lo necesario para que esta se encuentre disponible a lo largo del SEP. Con respecto a las principales tarifas (residenciales, comerciales e industriales), el tipo de tarifa de cobro es el siguiente:

- a) *T-RE Tarifa Residencial*: se cobra por bloques de Energía (KWH) durante un periodo determinada, normalmente mensual solamente, no es estacional ni horaria.
- b) *T-CO Comercios y Servicios*: se cobra por bloques de Energía (KWH) y la potencia activa pico (KW) es cobrada de acuerdo con el máximo del periodo de cobro, no es estacional ni horaria.
- c) *T-IN Tarifa Industrial*: se cobra por bloques de Energía (KWH) y la potencia activa pico (KW) es cobrada de acuerdo con el máximo del periodo de cobro, no es estacional ni horaria.
- d) *T-MT Tarifa de Mediana Tensión*: se cobra por bloques de Energía (KWH) y la potencia activa pico (KW) es cobrada de acuerdo con el máximo del periodo de cobro, es horaria acorde a la hora de consumo.

Por esta razón, cada compañía eléctrica dispondrá de valores diversos costos de tarifa para cada cliente en particular.

Perspectiva del Regulador de Servicios Públicos

Uno de los aspectos más importantes para las compañías es mantener la ventaja competitiva sobre sus similares [7]. Por esta razón y emulando las buenas prácticas de otras empresas exitosas a nivel mundial, se deben establecer objetivos estratégicos a fin de afianzar la posición de éstas ante la competencia. A pesar que las empresas en cierta manera son monopolios naturales en sus áreas de concesión, es necesario que estas amplíen su portafolio de opciones para con los clientes debido a amenazas externas como lo será a futuro la generación distribuida (generación eléctrica para autoconsumo) en los sectores residencial, comercial e industrial y por lo consiguiente cada vez, una pérdida de los ingresos por la energía que no se coloca.

Una de las razones de ser del regulador de servicios públicos será la de buscar optimizar el servicio que las compañías ofrezcan, tales como combustibles, agua, electricidad entre otros. Con respecto al tema de electricidad, en el presente trabajo de investigación se plantea un despacho económico de potencia reactiva al menor costo en un SEP. Cabe destacar, en Costa Rica se establecen tarifas diferenciadas para cada uno de los sectores eléctricos. Tanto la generación, transmisión y distribución tiene sus tarifas diferenciadas de acuerdo con su consumo y capacidad instalada [4]. En la mayoría de los casos es cobrada tanto por el consumo de la energía (kilowatt-hora, KWH) y por la demanda máxima que se tenga en un periodo de cobro.

De la misma manera esta es estacional porque depende de si es en periodo de verano o invierno, es decir en periodos donde hay escasez o abundancia de agua para la generación de electricidad, sobre todo a que Costa Rica posee una malla energética donde cerca del 80%

de la generación es hidráulica [8]. De esta manera la ecuación general para el cobro de tarifas contiene las siguientes componentes:

$$\text{Costo}_{TARIFA} = (kWH_{periodo}) * \left(\frac{\$}{kWH} \right) + (kW_{m\acute{a}x}) * \left(\frac{\$}{kW} \right)$$

Ecuación 1. Ecuación General Actual de Costos

donde

$kWH_{periodo}$ = Cantidad de Energía Eléctrica consumida en un periodo determinado [KWH]

$kW_{m\acute{a}x}$ = Demanda máxima del periodo [kW]

$\frac{\$}{kWH}$ = Tarifa por consumo de energía del periodo [dólares/KWH]

$\frac{\$}{kW}$ = Tarifa por demanda del periodo [dólares/KW]

Tal y como se mencionó anteriormente, a nivel residencial (T-RE) solamente se cobra el consumo de energía del periodo en cuestión. No obstante, para el resto de las tarifas (T-CO, T-IN, T-MT) la tarifa contiene otra variable: la demanda eléctrica. A la demanda eléctrica máxima (kW) del periodo se multiplica por un factor de cobro y en algunas tarifas se hace seccionada con la finalidad de no sobrepasar cierto valor. Esto estimula una buena utilización de la energía eléctrica, se trata de hacer más plana la curva de demanda y exigir lo menos posibles las fuentes de generación del SEP.

Propuesta de cobro tarifario

Una vez analizada la situación anterior se plantea una mejora sustancial a la ecuación final de cobro, con la idea de reducir los costos de energía eléctrica cobrados a los clientes del sistema eléctrico. Apegados al principio del *buen uso y la eficiencia* de la energía eléctrica se propone la siguiente fórmula:

$$\text{Costo}_{TARIFA} = \left[(kWH_{periodo}) * \left(\frac{\$}{kWH} \right) + (kW_{m\acute{a}x}) * \left(\frac{\$}{kW} \right) \right] + \left[(kVArH_{periodo}) * \left(\frac{\$}{kVArH} \right) + (kVAr_{m\acute{a}x}) * \left(\frac{\$}{kVAr} \right) \right]$$

Ecuación 2. Ecuación General de Costos Propuesta para Cobro de Tarifas

donde

$kVArH_{periodo}$ = Cantidad de potencia reactiva consumida en un periodo [KVArH]

$kVAr_{m\acute{a}x}$ = Potencia Reactiva máxima del periodo [kW]

$\frac{\$}{kVArH}$ = Tarifa por consumo de potencia reactiva [dólares/KVArH]

$\frac{\$}{kVAr}$ = Tarifa por Potencia Reactiva del periodo [dólares/KVAr]

Análisis de Escenarios de la propuesta de cobro de potencia reactiva

Conforme a lo establecido en ecuación 1, se plantea un análisis de calor para el cobro de tarifas el cual incluye la componente de potencia activa y reactiva. Esto se ve en la figura 5 que se muestra y a continuación se dará una explicación de las condiciones planteadas.

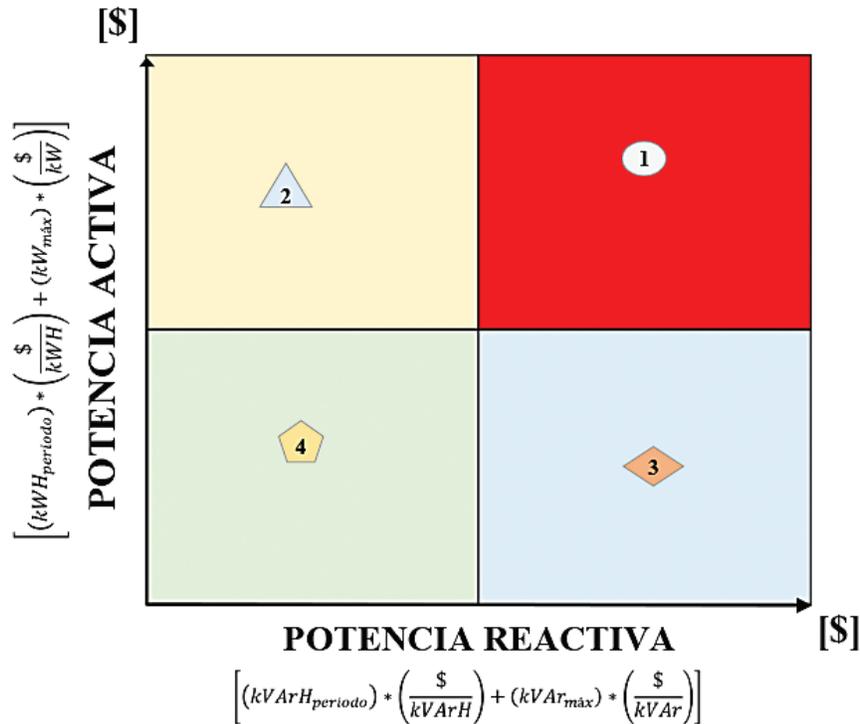


Figura 5. Análisis de Calor para el Cobro de Tarifas Eléctricas Propuesto basado en datos de esta investigación.

Por esta razón y de acuerdo con los planteado en ecuación 2 se modela de manera general la siguiente ecuación de costos de la electricidad al cliente final:

$$Costo_{tarifa} = [E_{kW} + D_{kW}] + [E_{kVAr} + D_{kVAr}]$$

Ecuación 3. Modelo Genérico de Tarifas Eléctricas

donde

$[E_{kW} + D_{kW}]$ = Costo de tarifa por potencia activa en unidades monetarias.

$[E_{kVAr} + D_{kVAr}]$ = Costo de tarifa por potencia reactiva en unidades monetarias.

E: Energía, es un término para indicar el consumo de potencia en función del tiempo.

D: demanda eléctrica, es un término para indicar el valor máximo de potencia en un periodo determinado.

A continuación, se hace un análisis del modelo propuesto en figura 5 y acorde a ecuación 3, para el costo de las tarifas eléctricas:

- a) Condición 1: Es escenario en el cual se tiene un alto costo de $\uparrow E_{kW}$ y $\uparrow D_{kW}$ para la *potencia activa*; con respecto a la *potencia reactiva* $\uparrow E_{kVAr}$ y $\uparrow D_{kVAr}$. Por lo tanto, el $Costo_{tarifa}$ será muy alto comparado en todas las demás combinaciones del modelo.

- b) Condición 2: Es un escenario en el cual se tiene un costo medio de $\uparrow E_{kW}$ o $\uparrow D_{kW}$ para la *potencia activa*; con respecto a la *potencia reactiva* $\downarrow E_{kVAr}$ y $\downarrow D_{kVAr}$. Por lo tanto, el Costo_{tarifa} será alto comparado en todas las demás combinaciones del modelo.
- c) Condición 3: Es un escenario en el cual se tiene un costo medio de $\downarrow E_{kW}$ y $\downarrow D_{kW}$ para la *potencia activa*; con respecto a la *potencia reactiva* $\uparrow E_{kVAr}$ o $\uparrow D_{kVAr}$. Por lo tanto, el Costo_{tarifa} será alto comparado en todas las demás combinaciones del modelo.
- d) Condición 4: Es un escenario en el cual se tiene un bajo costo de $\downarrow E_{kW}$ y $\downarrow D_{kW}$ para la *potencia activa*; con respecto a la *potencia reactiva* $\downarrow E_{kVAr}$ y $\downarrow D_{kVAr}$. Por lo tanto, el Costo_{tarifa} será muy bajo comparado en todas las demás combinaciones del modelo.

Cabe destacar, cuando se requiera de consumir potencia reactiva, se debe aplicar metodología de despacho óptimo y con esto se despacharía potencia a un bajo costo para el cliente final y por esta razón, se tendrían sistemas eléctricos más eficientes con tarifas diferenciadas de acuerdo con el uso de la potencia eléctrica al bajo costo. Igualmente, se buscaría de mayor manera que los clientes eléctricos industriales compensen con bancos de capacitores las instalaciones eléctricas a fin de consumir el mínimo de potencia reactiva y de esta forma solamente pagar por la componente de potencia activa, la cual sería mucho menor a la actual pues no incluiría los servicios auxiliares de regulación de tensión, despacho de potencia reactiva, peajes entre otros.

De la misma manera las compañías eléctricas y los clientes del servicio eléctrico tendrán un *desempeño excelente y cadenas de Valor en ventajas competitivas*, ya que, si se alinean a sus objetivos estratégicos en la búsqueda de la excelencia en sus procesos, implicaría una baja en los costos de producción y por lo tanto servicios más económicos para las personas. Una buena estrategia aunada a una buena ejecución supondrá una buena dirección [7]. Así mismo se fomentará una creciente conciencia de desarrollar estrategias orientada al aumento de la *productividad y la baja de costos* como lo son las siguientes de acuerdo con lo planteado por Thompson y otros:

- a) *Estrategias de bajos costos*
- b) *Estrategias de diferenciación amplia*
- c) *Estrategias centradas en bajos costos*
- d) *Estrategias centradas en diferenciación*
- e) *Estrategias de mejores costos del proveedor*

Es importante mencionar que una baja de los costos de electricidad será un *impulsor de los costos* pues logrará bajar los costos de producción de las empresas y por su puesto una mayor rentabilidad de las empresas ante sus competidores. A mayor escala, si Costa Rica realiza una baja de los costos de electricidad hará que los bienes y servicios prestados por las empresas seas más diferenciados con respecto a la región o a nivel internacional.

Las empresas eléctricas deben *generar opciones estratégicas para mejorar su posición y esto se logrará no sólo con calidad sino con bajos costos*, pues se contribuye a fomentar una creciente industria y comercios locales en las áreas de concesión de estas. Por ello, una *eficiente estructura de costos competitiva y propuestas de valor* a los clientes deben ser el norte de las compañías eléctricas a fin de mantener la supervivencia ante mercados que, a pesar de ser monopolistas, están bajo la tutela de ARESEP y está ante una mala gestión está en la facultad de quitar la posibilidad de brindar el servicio.

Para finalizar, es importante mencionar que, ante una futura Ley de Electricidad, posiblemente se abra el mercado interno de ventas de electricidad y se fomente la libre competencia de las empresas eléctricas, tal y como se investigó en las entrevistas de los expertos técnicos en

anexo 1, por lo tanto, los clientes eléctricos podrían escoger su proveedor de electricidad y solamente estos debería pagar los peajes de electricidad, debido al trasiego de la potencia por las líneas de distribución y transmisión.

Esto supondría una baja importante de los costos de electricidad pues obliga a las empresas eléctricas a vender al bajo costo. Aquí la metodología propuesta cobra trascendencia pues una tarifa diferenciada con un despacho de potencia óptimo *beneficiará grandemente el cliente eléctrico tanto económica como en calidad del servicio*.

Discusión Final

Una propuesta de metodología de asignar costos de potencia reactiva en un sistema eléctrico puede ser lograda con un despacho óptimo al menor costo, por esta razón identificar los costos más importantes y de peso en el sistema de potencia. Aplicar conceptos de la administración para la toma de decisiones y buscar soluciones a un problema técnico como el trasiego y despacho de potencia eléctrica es hoy día un tema relevante y que debe ser tomado en consideración para la minimización de los costos de la electricidad.

Por esta razón, se requiere que las tarifas sean diferenciadas y cobradas acorde a su uso tal y como se plantea en este artículo. En este contexto, en la actualidad el cobro de tarifas solamente contempla la demanda y la energía que se consume, por lo tanto, el cobro diferenciado hará que los clientes electro-intensivos solamente paguen por los costos que realmente estos demanden debido al uso de la energía eléctrica.

Un cliente residencial pagaría energía (kWH) debido a que las cargas que se tienen consumen solo este tipo de potencia, mientras un cliente comercial consumirá en alguna medida la potencia reactiva acorde a los equipos que tenga instalados, por último, un cliente industrial consumirá la potencia reactiva, en la medida que su sistema lo requiera y no se encuentre acorde a los requerimientos técnicos establecidos (mejoramiento de factor de potencia) y de esta manera pagará por el uso que demande de esta y cuando se le requiera será despacha a un bajo costo si se aplica la metodología planteada también. Para finalizar, es importante mencionar que el concepto de aplicar tarifas diferenciadas traerá consigo un cambio total del paradigma de tarifas eléctricas manejado en Costa Rica durante muchos años.

Agradecimientos

Agradezco a la Escuela de Ciencias de la Administración y al Posgrado en Administración de Negocios de la UNED por las herramientas y conocimientos gerenciales adquiridos para realizar este proyecto de investigación.

Lista de Abreviaturas

ARESEP: Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos

MER: Mercado Eléctrico Regional

SEN: Sistema Eléctrico Nacional

SEP: Sistema Eléctrico de Potencia

KVAr: kilo Voltio Amperios reactivos

kVArH: kilo Voltio Amperios reactivos-hora

IEEE-14: Sistema Eléctrico de Potencia de prueba de 14 barras

Referencias

- [1] A. Gómez Expósito, J. L. Matínez Ramos, J. A. Rosendo Macías, E. Romero Ramos and J. M. Riquelme Santos, *Sistemas Eléctricos de Potencia*, Madrid: PEARSON, 2003.
- [2] J. D. Daniels , L. H. Radebaugh and D. P. Sullivan, *Negocios Internacionales*, México: PEARSON, 2013.
- [3] J. M. Izar Landeta, *Gestión y Evaluación de Proyectos*, México: CENGAGE Laerning, 2015.
- [4] ARESEP, "[https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiY2I2YTM1MzEtYzlmYS00NmE1LWFIM2QtYWM2YTZyY-TEzMmFlliwidCI6IjBkNzIzOGY4LWI3ODQtNDk2MC1iZGUyLTZIMzM1MWQyNDcwZCIsImMiOjR9,"](https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiY2I2YTM1MzEtYzlmYS00NmE1LWFIM2QtYWM2YTZyY-TEzMmFlliwidCI6IjBkNzIzOGY4LWI3ODQtNDk2MC1iZGUyLTZIMzM1MWQyNDcwZCIsImMiOjR9,) 12 abril 2018. [Online]. Available: www.aresep.go.cr.
- [5] ARESEP, *AR-NT-POASEN-2015*, San José, 2016.
- [6] M. Eremia and M. Shahidehpour, *Handbook of Electrical Power System Dynamics*, New Jersey: WILEY, 2013.
- [7] A. A. Thompson, M. A. Peteraf, J. E. Gamble and A. Strickland III, *Administración Estratégica*, México: McGraw-Hill, 2015.
- [8] CEPAL, *Energía Sustentable-Perspectiva para los Países del SICA*, San José, San José: CEPAL, 2013.
- [9] A. Carbajo, "Los mercados eléctricos y los servicios de ajuste del sistema," *Red Eléctrica de España*, pp. 55-62, 2007.
- [10] V. M. Doña and A. N. Paredes, "Reactive power pricing in competitive electric markets using the transmisión losses function," in *2001 IEEE Porto Power Tech Conference*, Porto, Portugal, 2001.
- [11] C. Hsu and M.-S. Chen, "Reactive Power Planning and Operation in the Deregulated Power Utilities," in *Electricity Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies 2000*, London, England, 2000.
- [12] R. Kumar and A. Kumar, "Real and Reactive Power Price of Generators to Load in Pool Based Electricity Market Model," in *Energy Economics and Environment (ICEEE), 2015 International Conference on*, Noida, India, 2015.
- [13] J. I. S. Macías and P. C. Pérez, "Regulación de las tarifas de acceso a las redes y liberación del sector eléctrico español," *Revista de Economía pública*, pp. 61-83, 2003.
- [14] ARESEP, *Ley que Autoriza la Gneración Eléctrica Autónoma o Paralela*, San José, 1995.
- [15] ARESEP, *Supervisión de la comercialización del suministro eléctrico en baja y mediana tensión*, San José, 2016.
- [16] ARESEP, *Reglamento Sectorial de Sectores Eléctricos*, San José, 2001.

Gestión de las aguas residuales en la ciudad La Libertad, El Salvador

Wastewater management for the city of la Libertad, El Salvador

Francisco Rosales-Ayala¹, Rooel Campos-Rodríguez²

Fecha de recepción: 5 de julio de 2018
Fecha de aprobación: 19 de octubre de 2018

Rosales-Arala, F; Campos-Rodríguez. Gestión de las aguas residuales en la ciudad La Libertad, El Salvador. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-2. Abril-Junio 2019. Pág 43-53.

DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v32i2.4348>



- 1 Investigador. Universidad Estatal a Distancia. Costa Rica. Correo electrónico: francisco.rosales@attecs.com
- 2 Doctor en Ciencias Naturales para el Desarrollo, profesor-investigador de la Escuela de Agronegocios. Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: rocampos@tec.ac.cr

Palabras clave

Aguas residuales de tipo especial, Planta de tratamiento, Alcantarillado.

Resumen

Esta investigación tuvo como objetivo caracterizar la gestión municipal de las aguas residuales de tipo especial, generadas por el sector comercial y de servicios de la ciudad de La Libertad en El Salvador; lo que permitió identificar los desafíos para alcanzar un desarrollo sostenible.

Para desarrollar esta investigación se consultaron fuentes secundarias y se realizaron entrevistas semiestructuradas al personal técnico, y político de la Alcaldía Municipal.

La ciudad de La Libertad es emblemática del turismo nacional costero; sin embargo, presenta serios problemas ambientales: el 28% de los negocios son generadores de aguas residuales de tipo especial; el sistema de alcantarillado es obsoleto, con una cobertura del 61,7%; mientras que la planta de tratamiento municipal se encuentra en malas condiciones, con una eficiencia depurativa del 50%. Fruto de la mala gestión de las aguas residuales se producen colapsos tanto en el sistema de alcantarillado como de las aguas lluvias de la ciudad.

Todo esto genera deterioro en la imagen de la ciudad, mayor insalubridad, contaminación de ríos, quebradas y playas; dificultando el desarrollo turístico sostenible. Aunque la municipalidad tiene conciencia de la problemática, por el momento no cuenta con estrategias e instrumentos necesarios para hacer una gestión de las aguas residuales.

El ordenamiento territorial, la mejora de equipamiento e infraestructura sanitaria, la educación ambiental y el fortalecimiento de las capacidades locales para la aplicación de la legislación ambiental municipal, son desafíos claros para lograr el desarrollo sostenible de la ciudad.

Keywords

Wastewater of special type, Treatment plant, Sewage system.

Abstract

The objective of this research was to know about residual wastewater, generated by commercial and service industries. This research allowed us to identify the areas of improvement in order to achieve sustainable development.

In order to carry out this research, secondary resources were asked, also the technical and political personnel of the municipality were interviewed. La ciudad de la libertad is a well know spot for coast local tourism however, it has serious environmental issues, 28% of the business generate wastewater, the sewage system is obsolete and it only covers 61.7%. Besides that the municipal treatment plant is not in a good condition because, its cleaning efficiency is of 50%. Due to the miss management of wastewater the sewage collapses, in addition to this, the city rainwater sewage is collapsed.

All the previous issues create a wrong image of the city as well as health problems, also river and beaches pollution. This troubles the sustainable touristic development. Even though the municipality is aware of the problem, right now they do not have the necessary instruments nor strategies for an adequate wastewater management plan.

Territorial arrangement, sanitary infrastructure, equipment improvement, environment education and to strength the local capability to apply the municipal environment legislation are clear challenges in order to achieve a proper sustainable development in the city.

Introducción

La gestión ambiental de los vertidos líquidos en un territorio está estrechamente vinculada al desarrollo sostenible del mismo, ya que el crecimiento económico y social depende del estado de los recursos naturales y en especial del agua [1].

La contaminación del medio ambiente por el mal manejo de los vertidos líquidos deteriora la salud de los seres humanos y compromete el futuro, en tanto contamina el suelo, los cuerpos de aguas superficiales y los mantos acuíferos. La búsqueda de la sostenibilidad en los centros urbanos debe enfocarse, entre otros aspectos importantes, en la gestión de las aguas residuales [2].

Este tipo de gestión en una localidad tiene como función principal la mejora de las condiciones socioeconómicas de los pobladores, así como la creación de un ambiente propicio para la vida y la reproducción de las especies animales y vegetales existentes en el territorio de impacto [1].

Una gestión de aguas residuales implica tener una visión global de todos los aspectos relacionados con estas, y permite tomar decisiones menos parciales y más sostenibles [3] y [4]. Toma en cuenta en dónde, por quiénes y cómo se generan las aguas; las características físicas y químicas de las mismas y de los cuerpos receptores; posibles reusos de estas y de los lodos generados durante su tratamiento.

El entorno social y legal son aspectos a considerar dentro de la gestión, como forma de garantizar la aceptación de las acciones que se emprenden y su viabilidad legal. Una visión integral, que toma en cuenta los aspectos anteriormente descritos, permite tomar decisiones menos parciales y más sostenibles.

La gestión de las aguas residuales, como parte importante del desarrollo sostenible, debe tomar en cuenta situaciones a futuro, como el crecimiento poblacional, los desarrollos urbanísticos y el cambio climático; y además debe buscar alternativas creativas tanto para disminuir la generación de aguas residuales y sus niveles de contaminación en los puntos de generación, así como encontrar alternativas tecnológicas sostenibles para el tratamiento de estas [1], [5]; [6].

La reducción en cantidad de agua residual y carga contaminante en los puntos de origen, permite disminuir los requerimientos tanto de infraestructura, energía, y de consumo de productos químicos, reduciendo así, los costos económicos y la huella ecológica de los sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales, volviéndolos de esta manera procesos más sostenibles [7], [8].

La implementación de estos mecanismos preventivos sugiere que las comunidades, empresas e instituciones participen en el manejo de las aguas residuales que generan, para ello es importante la implementación de procesos de educación ambiental que posibiliten la aceptación y el cambio a un comportamiento congruente con estos mecanismos.

La ciudad de La Libertad es uno de los sitios más representativos del turismo nacional costero; por su cercanía a la capital del país, es visitada por un número importante de turistas, nacionales y extranjeros; lo que genera un acelerado crecimiento en la demanda de comercios y servicios; y, por tanto, una creciente presión sobre los recursos naturales.

Esta investigación tiene como objetivo conocer la gestión de las aguas residuales en la ciudad costera de La Libertad.

Características territoriales

La ciudad de La Libertad es el centro urbano del municipio del mismo nombre, ubicado en el Departamento de La Libertad (figura 1), en la zona central de El Salvador. La ciudad está a 30,4 kilómetros de la ciudad de San Salvador, y sus coordenadas son 13°29'17.15" latitud norte y 89°19'14.19" latitud oeste. La ciudad está limitada por al oeste por el río Chilama y al este por el río El Jute.

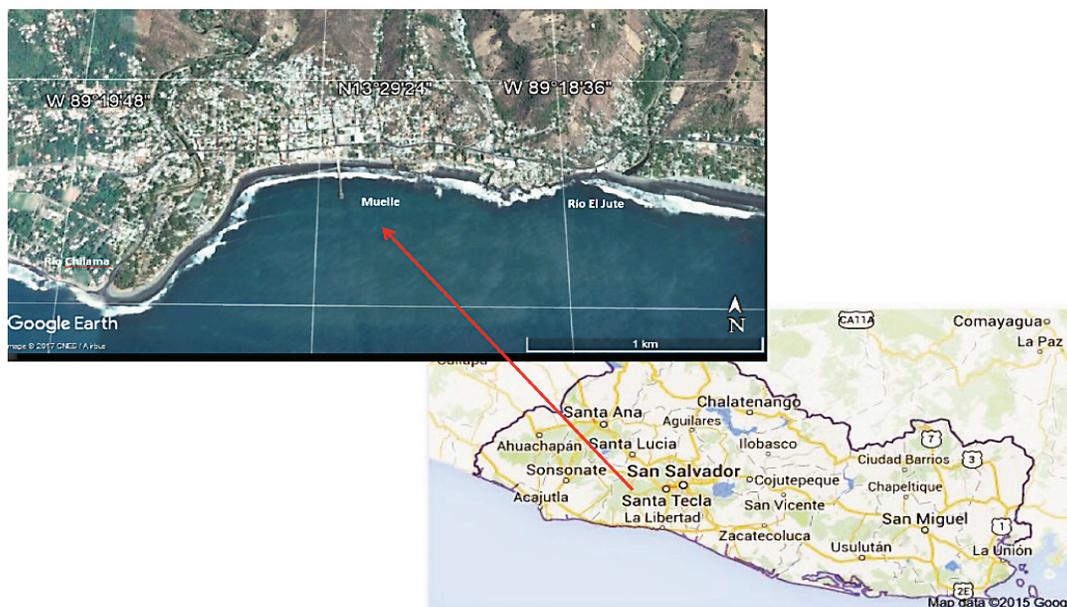


Figura 1. Fotos aéreas de la ciudad La Libertad y el caso urbano. Fuente [9]

El municipio cuenta con una extensión territorial de 162 km², mientras que la ciudad cabecera posee una extensión de 3 km². El municipio tiene una población total de 40 867 habitantes, de los cuales el 32,5% es urbana y el 52,2% son mujeres [10], [11], así mismo cuenta con 10 cantones (figura 2) en donde se distribuye la población rural: Cangrejera, El Cimarrón, El Majahual, Melara, San Alfredo, San Diego, San Rafael, Santa Cruz, Tepeagua y Toluca. La ciudad de la Libertad cuenta con una población, según estimaciones de la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), de 7 980 habitantes.

La zona costera de la ciudad de La Libertad, así como la de todo el municipio, es muy reconocida por la belleza de sus playas, su gastronomía y oferta hotelera. Su cercanía a la capital, la convierte en uno de los sitios más importantes y emblemáticos del turismo nacional.

Es por ello, que su actividad económica gira alrededor del turismo local e internacional, por lo que su desarrollo depende esencialmente de los recursos naturales existentes. La ciudad también constituye un centro de comercio importante para los municipios que lo rodean [12], [13].

La ciudad de La Libertad posee un muelle artesanal en donde se comercializan mariscos provenientes de la pesca artesanal de lugareños, que representa un centro de distribución que abastece el comercio de la ciudad, restaurante, hoteles y al mercado capitalino.

Pese a sus posibilidades territoriales, la ciudad de La Libertad presenta graves problemas debido a la falta de salubridad y la contaminación que genera el mal manejo de sus aguas residuales; situación que está deteriorando los cuerpos de agua superficiales, tanto los ríos como las playas, y está imposibilitando su desarrollo sostenible.

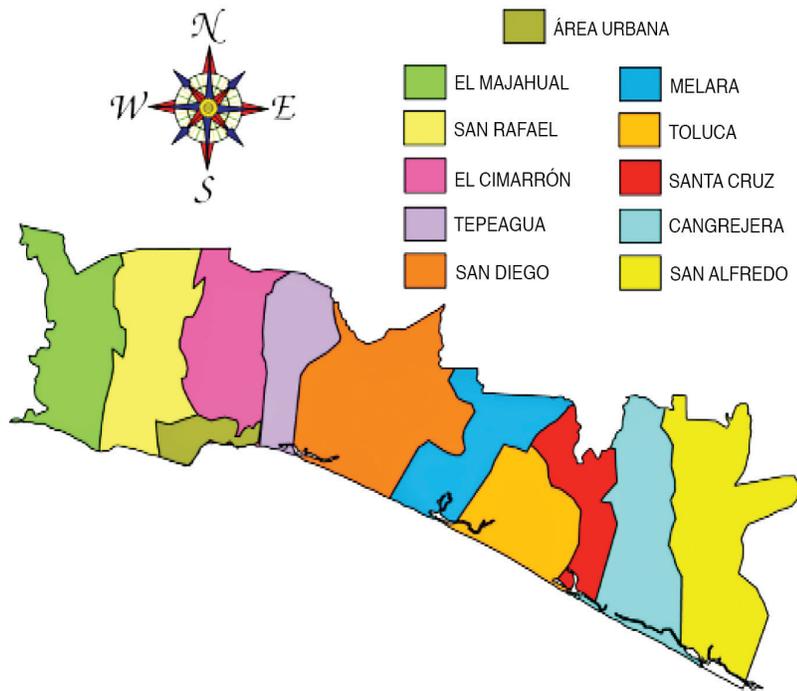


Figura 2. Municipalidad de La Libertad. Fuente: [13]

El agua potable que abastece la ciudad de La Libertad proviene de una planta potabilizadora, que se abastece del río Chilama en la cuenca alta. El agua alcanza para abastecer la parte comercial y servicios de la ciudad, pero escasamente la parte alta de ésta, en donde se ubica una parte importante de las zonas habitacionales de la ciudad.

Metodología

Para el desarrollo de la investigación se consultaron fuentes secundarias y además se realizaron entrevistas semi estructuradas al personal técnico y político de la Alcaldía Municipal.

Las fuentes secundarias que se consultaron fueron documentos y estudios gubernamentales, que permitieron conocer las características socioeconómicas del municipio y de la ciudad, además se consultaron los planes estratégicos y de desarrollo territorial del municipio, así como diagnósticos locales.

El instrumento para las entrevistas fue validado con criterio experto y se realizó una prueba piloto para depurar el mismo. Las entrevistas tuvieron una duración entre 1 y 2 horas y se realizaron de noviembre 2016 a enero de 2017.

Para triangular la información obtenida en las entrevistas se realizaron visitas a diferentes puntos de la ciudad, para constatar los problemas de insalubridad, el mantenimiento de trampas de grasas, estado del alcantarillado de aguas lluvias, las condiciones de la planta de tratamiento municipal, así como observar puntos de descarga de aguas residuales en las playas. Además, se realizaron entrevistas a funcionarios de ANDA y del Ministerio de Salud (MINSAL).

Se realizaron 25 entrevistas entre las siguientes personas e instancias municipales: Alcalde Municipal, Gerente Municipal, jefaturas y personal de la Oficina de Medio Ambiente, Departamento de Saneamiento Ambiental, Departamento de Proyectos, Departamento Jurídico, Administración de Rastro Municipal, Oficina de Turismo, Oficina de Gestión Nacional e

Internacional, Oficina de Protección Civil, Administración de Mercados, Departamento de Recursos Humanos y el Departamento de Servicios Generales.

Con todo lo anterior se logró construir una línea base sobre: a) Situación socioeconómica, b) Tipología de los negocios y c) Gestión de aguas residuales.

La Gestión de aguas residuales cómo la concibe la alcaldía municipal engloba el sistema de alcantarillado, tratamiento de aguas residuales y descarga de las mismas.

Resultados y Discusión

Situación socioeconómica

El municipio de La Libertad ocupa a escala nacional el lugar número 90 de 262 municipios, con un Índice de Desarrollo Humano (IDH) de 0,689, siendo el nacional de 0,67 en 2017 [14]; considerándose que el municipio de La Libertad tiene un desarrollo humano medio.

El PIB para el año 2017 fue de US \$3 470, la esperanza de vida de 70,4 años, con un nivel muy bajo de escolaridad, 4,8 años a nivel municipal y 5,2 años en el área urbana [15].

Según la misma fuente, el 31,6% de los hogares no cuenta con agua dentro de su hogar; en el área urbana el déficit de agua es de 19,8% y en el área rural es de 55,1. Así mismo, el 51,2% de los hogares no cuenta con servicio de alcantarillado; en el sector urbano el 39,3% de los hogares carece de este servicio [15], los cuales están ubicados principalmente en las colonias de los alrededores de la ciudad de La Libertad.

Según el Sistema de Información de Morbilidad del Ministerio de Salud (MINSAL), dentro de las 10 primeras causas de enfermedades registradas en el sistema público de salud del municipio de La Libertad, se encuentran las infecciones gastrointestinales y las infecciones de la piel y del tejido subcutáneo, las cuales están asociadas directamente a la insalubridad causada por el contacto con aguas contaminadas [16]. Se debe tomar en cuenta que La Libertad es una ciudad turística, y que la gran mayoría que visitan las playas y restaurantes pertenecen a otros municipios y países, por tanto, el impacto en la salud de estas personas no está registrado en el municipio.

La ciudad de La Libertad es un centro para el comercio de una microrregión constituida por otros municipios, que no cuentan con el equipamiento urbano como mercado municipal, bancos, almacenes de ropa y calzado, supermercados, entre otros. Estos municipios suman una población de 106 943 habitantes, que adicionan a la huella ecológica de los lugareños y turistas (cuadro 1).

Cuadro 1. Municipios que comercializan en la ciudad de La Libertad

Municipios	Habitantes (Proyección 2017)
Chilitupán	11 708
Comasagua	12 236
Jicalapa	5 839
Tamanique	15 845
Teotepeque	12 954
Zaragoza	33 731
Rosario de Mora	14 630
TOTAL	106 943

Fuente [10]

Tipología de los negocios generadores de agua residual

La actividad económica de la ciudad está concentrada principalmente en el sector servicio, especialmente en la actividad de restaurantes, (247 negocios en total); y el mercado municipal con 51 comercios (cuadro 2). Estos 298 negocios son los que generan aguas residuales especiales, concepto que según la norma salvadoreña obligatoria NSO13.49.01:09, son aguas residuales generadas por actividades agroindustriales, industriales, hospitalarias y todas aquellas que no se consideran de tipo ordinario, es decir, que no sean generadas por actividades domésticas.

Cuadro 2. Tipología de negocios e la ciudad La Libertad

Tipo de negocio	Cantidad
Restaurantes	247
Mercado Municipal	51
Servicios varios (Gimnasio, ferreterías, telefonía, barberías, ventas celulares)	99
Comercios varios (zapaterías, granos básicos, medicinas, farmacias, pulperías)	464
Gasolineras	2
Venta de ropa, zapaterías y bazares	51
Clínicas de salud privadas, laboratorios clínicos y ópticas	50
Transporte (buses, taxis y pickups)	109
TOTAL	1 073

Gestión de aguas residuales

Las aguas residuales de tipo especial generadas en La libertad corresponden a restaurantes y el mercado municipal. Aunque estos negocios solamente representan el 28% del total de comercios en La Libertad (cuadro 1), el impacto ambiental negativo y de salubridad que están ocasionando al entorno de la ciudad es altamente significativo, ya que, en la mayoría de estos negocios, no se realiza la separación de grasas, aceites, sólidos sedimentables, residuos sólidos, lo que causa colmatación del alcantarillado sanitario y el desbordamiento de las aguas en las calles.

La gestión de las aguas residuales de la ciudad de La Libertad es un tema aún por abordar. La Administración Municipal reconoce como problemas serios el deterioro ambiental y la falta de salubridad, así como el impacto que estos tienen sobre las principales actividades económicas del municipio; sin embargo, esta preocupación no se refleja de forma concreta en los objetivos y ejes de acción definidos en el Plan Estratégico Participativo de Desarrollo del Municipio con énfasis en el Desarrollo Económico del territorio. Este plan tiene una vigencia de 5 años a partir del año 2014 [13].

A nivel de ordenanzas, en el año 2013, se crea la primera con el fin de regular el manejo de residuos sólidos [17] y en septiembre de 2016 se crea la segunda ordenanza con la finalidad de tener un marco regulatorio para el manejo integral de los residuos sólidos. En esta última ordenanza se prohíbe el vertimiento de aguas residuales y residuos sólidos a las calles, tragantes de aguas lluvias, cuerpos de agua superficial o en lugares públicos [18] Esta prohibición no se cumple.

Dentro del municipio, existe la oficina de medioambiente que tiene entre sus funciones la sensibilización sobre temas ambientales, gestión de permisos y verificación de su cumplimiento; la unidad está constituida por tres personas.

Pese a los esfuerzos realizados por la unidad, no cuentan con presupuesto para realizar iniciativas que incidan en los comportamientos de los habitantes, empresarios y visitantes de la ciudad, para disminuir la generación y el grado de contaminación de las aguas residuales.

Por otra parte, la Unidad de Mantenimiento de la municipalidad, que es la responsable de velar por el buen estado de la red de agua potable y aguas residuales y de todo el equipamiento municipal, no posee planes de mantenimiento preventivo.

Si bien es cierto, la municipalidad realizó de forma participativa su plan estratégico de desarrollo, el nivel de participación fue mayor por parte de algunos actores territoriales, pero el sector comercio y servicio de la ciudad de Libertad poco se ha involucrado en la gestión ambiental. Su participación, cuando se ha logrado, se reduce a ser de tipo informativa o en el mejor de los casos consultiva.

Sistema de Alcantarillado

La ciudad cuenta con una red de alcantarillado que recoge y transporta las aguas residuales de tipo especial. El alcantarillado está construido con tuberías de asbesto-cemento que ya cumplieron su vida útil, y se encuentran en malas condiciones; incluso hay tramos donde ya no existe tubería y el agua residual corre por los orificios que quedaron formados por estas.

Los problemas por fugas de aguas residuales dentro del casco urbano son frecuentes, provocadas también por obstrucciones de sólidos, grasas y aceites. Debido al relieve plano del terreno, el alcantarillado posee dos pozos de bombeo frente a las playas, una en la parte oeste y otra al este de la ciudad. Esto genera un impacto negativo para los turistas por la emanación de malos olores, y un riesgo para la salud, debido a que no existen las contingencias necesarias ante fallos eléctricos, ya que eventualmente, las aguas residuales rebalsarían de los pozos hacia las playas. Las mejoras en la infraestructura turística de la ciudad en los últimos 10 años no se realizaron de manera integral, muchos de los colectores y pozos de registros necesarios para el mantenimiento del alcantarillado quedaron inaccesibles y actualmente no se conoce su ubicación exacta.

Las zonas urbanas que rodean la ciudad no están conectadas a la red de alcantarillado sanitaria, por lo que cada negocio cuenta con fosa séptica. No hay control sobre los diseños, ni la condición de estos por parte de entidades del gobierno central ni por la administración municipal.

En algunos puntos de la ciudad los habitantes han realizado conexiones clandestinas interconectando aguas residuales a la red de aguas lluvias y viceversa. El impacto de las aguas lluvias sobre el caudal de ingreso a la planta en temporada lluviosa no representa un aumento considerable, mientras que es evidente el desalojo de aguas residuales en la red de aguas lluvias cuando desembocan en la playa.

En el entramado de la ciudad es común que los propietarios de negocios desalojen en el alcantarillado y tuberías de aguas lluvias, aguas residuales, provenientes del lavado de utensilios de cocina, lavados de maíz, aguas grasosas, y además residuos sólidos.

Tratamiento de Aguas Residuales

La ciudad de La Libertad cuenta con una planta de tratamiento municipal aerobia de lodos activados, posee un tratamiento primario para la remoción de sólidos como materiales plásticos, trapos, arena entre otros; un tratamiento secundario, que consiste en un reactor biológico, un clarificador circular, una cámara de cloración, un digestor de lodos y patios de secado de lodos. La planta trata un caudal diario de 1 123 m³ aproximadamente; fue construida en 1981, por lo que su vida útil ha caducado. Actualmente la planta no cuenta con la capacidad para depurar

las aguas residuales a un nivel que permita cumplir con la norma nacional (NSO.13.49.01:09); su nivel de depuración alcanza únicamente el 50% de remoción de la carga orgánica.

Descarga de aguas residuales

Las descargas provenientes de la planta de tratamiento, misma se encuentra dentro del entramado urbano generando problemas de malos olores y contaminación al Río Chilama donde se realiza la descarga. Este río es uno de los más importantes de la zona. Los niveles de coliformes fecales en dicho río alcanzan 81 900 NMP/100 ml, lo cual indica lo severo de la contaminación por materia fecal [19].

De acuerdo al MARN las aguas de las playas del municipio de La Libertad poseen las características adecuadas para realizar actividades de recreación en contacto directo con el agua, cataloga como “Buena”; no obstante; frente a la desembocadura del río Chilama, en períodos vacacionales, cuando se incrementa la afluencia turística, la calidad del agua se ve afectada, pasando de “Buena” a “Mala”, ya que no se recomienda el contacto humano y dificulta el desarrollo de la vida acuática [19].

El cuadro 3 muestra resultados sobre el grado de contaminación del río Chilama.

Cuadro 3. Parámetros físico-químicos medidos en muestras del Río Chilama, aguas arriba y abajo del punto de descarga de la Planta de Tratamiento Municipal.

Parámetros físico-químicos	Aguas Arriba 50 m	Aguas Abajo 50 m	Desembocadura del Río Chilama en la Playa	Límite máximo
DBO ₅ (mg/l)	2,1	17,8	7,0	<5,0*
Oxígeno Disuelto	6,2	4,4	4,9	>5,0*
pH	7,8	7,3	7,6	6,5 – 7,5*
Coliformes Totales (NMP/100ml)	54 000,0	16 000 000,0	1 400 000,0	<1 000,0**
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	350,0	12 800,0	1 600,0	<200,0**

Fuente: * [20] y ** [21].

Los niveles aguas arribas del punto de descarga de la planta de tratamiento son aceptables de acuerdo a los parámetros de DBO₅, Oxígeno Disuelto, y pH. Sin embargo, muestra un grado de contaminación biológica principalmente por el pastoreo de animales y lavado de ropa en el río; 50 metros aguas debajo de la descarga y 600 metros, este último punto justo en la desembocadura del mar, donde los niveles tanto de contaminación orgánica como biológico son altos, lo que vuelve inviable al río Chilama para actividades recreativas de contacto directo.

Conclusiones

La presión sobre los recursos naturales de la ciudad de La Libertad no procede exclusivamente de los habitantes de ésta, sino también de los pobladores que comercializan productos y buscan servicios sociales debido a la falta de equipamiento en sus municipios de origen. Así mismo, la afluencia de turistas tanto nacionales como extranjeros incrementa la presión sobre los recursos naturales. Esta situación incide en la generación de aguas residuales y en el grado de contaminación de éstas.

Las condiciones precarias del sistema de alcantarillado y la baja eficiencia del sistema de tratamiento de aguas residuales municipales, inciden en aspectos claves del desarrollo sostenible, como son el desarrollo social, el crecimiento económico y la preservación de los recursos naturales, especialmente ríos, quebradas y los costeros marinos.

En general la gestión de las aguas residuales en la ciudad de La Libertad es deficitaria, aunque existe la preocupación por el deterioro ambiental, la insalubridad, el deterioro estético y el impacto sobre el crecimiento económico que genera el mal manejo de éstas, no ha sido posible impactar de forma positiva en estos temas por razones políticas, técnicas y económicas, situación que imposibilita un mejor desempeño ambiental de la ciudad de La Libertad.

Entre los principales retos que tiene la administración municipal, para garantizar la sostenibilidad de las iniciativas para mejorar la gestión de las aguas residuales se puede mencionar la necesidad de mejorar la participación de la sociedad hasta alcanzar niveles de decisión y de contraloría, ya que es permitiría mayor transparencia y control sobre la gestión municipal, los generadores de aguas residuales y de las instituciones gubernamentales a cargo del tratamiento de las mismas.

Además, es necesario que la administración municipal, en conjunto con otras instituciones y actores locales, impulsen programas de educación ambiental, que propicien un mejor desempeño ambiental de los sectores económicos, de los ciudadanos, de visitantes y turistas. De igual forma se deben mejorar los canales de comunicación social para aumentar la sensibilidad hacia el componente ambiental y la protección del mismo, además de poner en rigor las normas legales municipales en cuanto a la temática ambiental existente.

Así mismo, la comunicación entre las entidades del gobierno central y el gobierno local se debe mejorar, debido a que limita la posibilidad de sinergias, que ayudarían a una mejor gestión de las aguas residuales, desde la etapa de generación, recolección y transporte, tratamiento, vertido y reutilización en zonas verdes y agrícolas. Esto es relevante, ya que, dado el incremento de la actividad turística y los mayores niveles de utilización de agua potable, el re-uso de aguas residuales es necesario, especialmente por la escasez en el municipio [22]; [23].

El traslado a una zona adecuada y la ampliación de la capacidad de la planta de tratamiento municipal, así como el aumento de cobertura del sistema actual de alcantarillado, son necesarios para aumentar los niveles de saneamiento, de protección de los recursos naturales y del desarrollo económico y social de la ciudad, del municipio y del territorio al que pertenece. Estos son temas que deben de abordarse entre el gobierno local, las entidades del gobierno central y los actores locales estratégicos para aumentar las posibilidades de un desarrollo sostenible.

El fortalecimiento de la administración municipal es necesario para mantener el progreso de los planes de desarrollo estratégicos que van emergiendo, para que no se vean afectados por los cambios de gobierno. Aspectos como el ordenamiento territorial y la gestión de aguas residuales deben ser tomados como una prioridad dentro de estos planes, ya que especialmente la ciudad de La Libertad depende de sus recursos naturales para mantener su atractivo turístico.

Por lo expuesto, es necesario que la la gestión de las aguas residuales de tipo especial que se generan en el sector comercial de la ciudad de La Libertad incluya aspectos como el monitoreo de las descargas a los cuerpos receptores como playas, ríos o quebradas para determinar el cumplimiento de las normativas nacionales que rigen la descarga a cuerpo receptor. Este monitoreo debe incluir la toma de muestras realizado por un laboratorio acreditado donde se determinen parámetros físico químicos tales como DQO, DBO5, aceites, grasas, sólidos suspendido totales entre otros, que permitan una caracterización de las aguas residuales especiales.

Agradecimientos

A la Alcaldía Municipal de La Libertad por el apoyo brindado en este estudio.

Bibliografía

- [1] E. Corcoran, C. Nellemann, E. Bakery, R. Bos, D. Osborn y H. Savelli, "Sick Water? The Central Role of Wastewater Management in Sustainable Development. A Rapid Response Assessment". United Nations Environment Programme, UN-HABITAT, 2010.
- [2] W. Judyta, "Urban infrastructure facilities as an essential public investment for sustainable cities – indispensable but unwelcome objects of social conflicts". Case study of Warsaw, Poland, Faculty of Architecture, Warsaw University of Technology, 55 Koszykowa St., Warsaw 00-659, Poland, transportation Research Procedia, pp. 553 – 565, 2016.
- [3] B. Choi, y A. Pak, "Multidisciplinarity, interdisciplinarity and transdisciplinarity in health research, services, education and policy: Definitions, objectives, and evidence of effectiveness" Clin Invest Med, vol. 29, n° 6, pp. 352 – 364, 2006.
- [4] M. Gil y H. Reyes, "Gestión integral del agua desde un enfoque social hacia una economía ecológica", Revista de ciencias sociales y humanidades, vol. 24, pp.158-174, 2015.
- [5] M. Massoud, A. Tarhini y J. Nasr, "Decentralized approaches to wastewater treatment and management: applicability in developing countries". Journal of Environmental Management. 2015
- [6] J. Parkinson, y K. Taylor, "Decentralized wastewater management in peri-urban areas in low-income countries" Environment & Urbanization, vol. 15, n° 1, pp. 75-90,2003. [En Línea] Disponible en <http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/095624780301500119>.
- [7] Z. Ujang, y M. Henze, "Wastewater management in developing countries", AWA Publishing. Londres,2006.
- [8] E. Medilanski, L. Chuan, H. Mosler, R. Shertenleib. y T. Larsen, "Wastewater management in Kunming, China: a stakeholder perspective on measures at the source", Environment & Urbanization, International Institute for Environment and Development (IIED), pp. 353–368, 2006.
- [9] Google Earth. V. 9.2.52.4. Ciudad de La Libertad, 13°29'17.15" N, 89°19'14.19" W, altura de ojo 3.18 km. Disponible en <http://earth.google.com>.: [Accedido: 8-nov-2017].
- [10] DIGESTYC, EL Salvador: "Estimaciones y Proyecciones de Población Municipal 2005-2025", 2014. [En Línea] Disponible en <http://www.digestyc.gob.sv/index.php/novedades/avisos/540-el-salvador-estimaciones-y-proyecciones-de-poblacion.html>
- [11] DIGESTYC, "Censo de Población y Vivienda", 2007. [En Línea] Disponible en: <http://www.digestyc.gob.sv/index.php/temas/des/poblacion-y-estadisticas-demograficas/censo-de-poblacion-y-vivienda/poblacion-censos.html>
- [12] SACDEL, "Plan de competitividad municipal del Municipio de La Libertad", La Libertad, 2012-2016. USAID, San Salvador, 2012.
- [13] SACDEL, "Plan estratégico participativo del Municipio de La Libertad". San Salvador, 2014.
- [14] PNUD, "Objetivos de desarrollo sostenible". 2017. [En Línea] Disponible en http://www.sv.undp.org/content/el_salvador/es/home/presscenter/articles/2017.html.
- [15] Gobierno de la República de El Salvador. Ministerio de Economía. Dirección General de Estadística y Censos. Encuesta de Hogares de Propósitos Múltiples, 2017.
- [16] Minsal. "Lista Internacional de Morbilidad por área, periodo del 01/01/2017 al 15/09/2017, SIBASI La Libertad" [En Línea] Disponible en <http://simmow.salud.gob.sv>.
- [17] MARN, "Plan nacional de gestión integrada del recurso hídrico de El Salvador, con énfasis en zonas prioritarias", San Salvador, El Salvador, 2017.
- [18] Alcaldía Municipal de La Libertad, "Decreto No 5, Ordenanza reguladora de la disposición final de desechos sólidos del Municipio de La Libertad. Diario Oficial República de El Salvador", 2016
- [19] Jiménez, C; Blanca, E. Información y calidad del agua en México. Trayectorias [en línea] 2007, IX (Mayo-Agosto) : [Fecha de consulta: 4 de diciembre de 2018] Disponible en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=60715115006>> ISSN 2007-1205
- [20] MARN. Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales." Reglamento Especial de Normas Técnicas de Calidad Ambiental de El Salvador", 2000.
- [21] C. Sierra. "Calidad del agua, evaluación y diagnóstico" 1ª edición. Universidad de Medellín, Colombia, Ediciones de la U, 2011.
- [22] J. Vera, "Agua y modelo de desarrollo turístico. La necesidad de nuevos criterios para el desarrollo turístico", pp. 155-178, 2006.
- [23] J. Silva, P. Torres y C. Madera, "Reuso de aguas residuales domésticas en agricultura", Agronomía Colombiana, vol. 26, n2, pp. 347-359, 2008.

Estado actual de la investigación sobre turbinas eólicas en Costa Rica

The current state of research on wind turbines in Costa Rica

Gustavo Richmond-Navarro¹, Gustavo Murillo-Zumbado², Pedro Casanova-Treto³, Juan Francisco Piedra-Segura⁴

Fecha de recepción: 23 de junio de 2018

Fecha de aprobación: 28 de setiembre de 2018

Richmond-Navarro, G; Murillo-Zumbado, G; Casanova-Treto, P; Piedra-Segura, J. Estado actual de la investigación sobre turbinas eólicas en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-2. Abril-Junio 2019. Pág 54-67.

DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v32i2.4349>

1 Ing. Electromecánico. Escuela de Ingeniería Electromecánica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: grichmond@tec.ac.cr

2 Meteorólogo. Escuela Física, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: gmurillo@tec.ac.cr

3 Ing. Mecánico. Instituto de Investigaciones en Ingeniería (IINI), Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: pedro.casanova@ucr.ac.cr

4 Ing. Electromecánico. Escuela de Ingeniería Electromecánica, Instituto Tecnológico de Costa Rica y Dirección de Proyectos Caja Costarricense de Seguro Social. Costa Rica. Correo electrónico: jpiedra@tec.ac.cr



Palabras clave

Turbinas eólicas; Costa Rica; investigación; energía eólica.

Resumen

Se presenta una revisión de literatura y el producto de entrevistas realizadas a los principales actores en el campo de las turbinas eólicas en Costa Rica. Luego de dar un panorama general del rol de la energía eólica en la matriz energética del país, se profundiza en los logros obtenidos en el campo de la investigación en la academia, centros de investigación y el sector empresarial.

En el campo académico, destaca la turbina eólica fabricada en el Instituto Tecnológico de Costa Rica en la década de 1990, un valioso antecedente por ser el primer aerogenerador fabricado en el país usando tecnología moderna. En cuanto a centros de investigación se brindan detalles del aerogenerador fabricado en Ad Astra Rocket entre 2012 y 2016. Dentro del sector empresarial se enfatiza en la SkyTwister, una turbina eólica que ha sido objeto de investigación y desarrollo por más de 10 años en Costa Rica y que ha recibido múltiples galardones a nivel nacional e internacional.

En síntesis, la investigación en el campo de turbinas eólicas se desarrolla únicamente por Carlos Acosta Nassar con la turbina SkyTwister, la empresa Interdinámica Energía y el Instituto Tecnológico de Costa Rica mediante el Laboratorio de Investigación en Energía Eólica (LIENE).

Keywords

Wind turbines; Costa Rica; research; wind energy.

Abstract

The result of some interviews made to the main actors in the wind turbines field in Costa Rica, as well as a literature review are presented in the current work. First, an outline of the roll of wind power in the national electrical power system is given, then, the achievements in wind energy research in the academic field, the research centers and the business sector are pointed out.

In the academic field, the wind turbine built in the 1990s at the Costa Rican Institute of Technology, points out, being the first aerogenerator manufactured in the country using modern technology. With regard to research centers, the details about Ad Astra Rocket's wind turbine, built between 2012 and 2016, are given. In the business sector, an emphasis is made on the SkyTwister, which has been subject of research and development in Costa Rica for more than 10 years and has received multiple awards nationally and internationally.

Summarizing, the current research in the field of wind turbines, is exclusively carried out by Carlos Acosta Nassar with the SkyTwister turbine, the company "Interdinámica Energía", and the Costa Rica Institute of Technology through its Wind Power Research Lab (known in Spanish as LIENE).

Introducción

La República de Costa Rica es un país pequeño en superficie continental, con 51 100 km², pero grande en el uso de energías renovables, en el 2016 su matriz eléctrica superó el 98% de generación renovable en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), con una amplia dominación

hidroeléctrica 74,35% y un 10,30% en eólica [1]. Según datos del Centro Nacional de Control de Energía Costa Rica (CENCE), la producción de energía eólica ha venido al alza en los últimos 5 años, tal como se muestra en la figura 1.

El país se ha posicionado como un destino turístico verde y se propuso en 2012, la ambiciosa meta de alcanzar la carbono neutralidad para el 2021, que posteriormente fue aplazada para el 2100 [2].

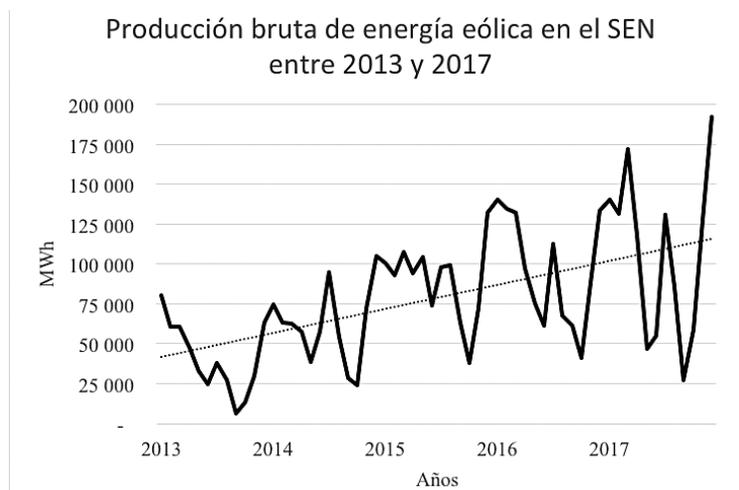


Figura 1. Producción de energía eólica en el SEN entre 2013 y 2017. Elaboración propia con datos de [3].

Para lograr estos objetivos, entre muchas otras acciones, Costa Rica se ha provisto de parques eólicos públicos y privados, según se detalla en el cuadro 1, siendo públicos los primeros tres de la lista; todos con turbinas eólicas diseñadas en el exterior.

Dentro de los planes de expansión [7] del principal actor en la generación y distribución de electricidad en Costa Rica, el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), se prevé que la capacidad instalada del conjunto de energías eólica + solar + bagazo pase de un 11% en 2015 a un 18% en 2035, refiriéndose a la matriz eléctrica del país. Este bajo crecimiento fue advertido por el Ing. Óscar Jiménez del Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA) en [8], específicamente en cuanto a solar y eólica; lo cual podría significar un desincentivo para la investigación en este tipo de energías.

Lo anterior se afirma sin desconocer los estudios recientes de penetración para la incorporación de energías renovables variables (particularmente solar y eólica), en donde por medio de simulaciones en estado estacionario y simulaciones dinámicas del SEN, se indica que para el 2018 se pueden añadir 100 MW adicionales de energía eólica, sin problemas de seguridad operativa. Esta potencia debe ser integrada en la zona norte de Guanacaste debido al recurso eólico disponible. Incluso, el SEN no presentaría problemas de estabilidad dinámica con una penetración instantánea superior al 70% de energías renovables variables para el 2024 [9].

En contraste con el crecimiento proyectado, el país inició ensayos técnicos y estudios de potencial eólico desde la década de 1970 [10] y de alguna manera se continúa a la fecha con el desarrollo de investigación en este campo.

En este artículo se detalla el rumbo que han tenido estas investigaciones y se brinda un panorama de los principales retos y desafíos a futuro. Se compone de 4 secciones: investigación en la academia, centro de investigación, sector empresarial y comentarios finales.

Cuadro 1. Parques eólicos en operación en Costa Rica

Nombre	Ubicación	Turbinas	Potencia (kW) por turbina	Potencia total (kW)	Fabricante
Tejona	Tilarán, Guanacaste	30	660	19 800	Vestas. Modelo V47
Valle Central	Santa Ana, San José	17	900	15 300	Enercon, Modelo E44
Coope Santos	Los Santos*	15	850	12 750	Gamesa, Modelo G52
Plantas Eólicas S.A.	Tilarán, Guanacaste	58	410	19 800	Kenetech. Modelo VS33
Aeroenergía	Tilarán, Guanacaste	9	750	6400	NegMicon. Modelo 750
Tilawind	Tilarán, Guanacaste	7	3000	20 000	Vestas. Modelo V90
MOVASA	Tilarán, Guanacaste	32	750	20 000	NegMicon. Modelo 750
Vientos del Este	Tilarán, Guanacaste	3	3000	9000	Vestas. Modelo V90
Mogote	Bagaces, Guanacaste	7	3000	20 000	Vestas. Modelo V90
Altamira	Tilarán, Guanacaste	10	2000	20 000	Gamesa. Modelo G87/90
Campos Azules	Tilarán, Guanacaste	10	2000	20 000	Gamesa. Modelo G87/90
Vientos de Miramar	Libería, Guanacaste	10	2000	20 000	Gamesa. Modelo G87/90
Vientos de La Perla	Libería, Guanacaste	10	2000	20 000	Gamesa. Modelo G87/90
PE Guanacaste	Bagaces, Guanacaste	55	900	49 700	Enercon. Modelo E44
Chiripa	Tilarán, Guanacaste	33	1500	49 500	Acciona. Modelo AW77
Orosí	Libería, Guanacaste	25	2000	50 000	Gamesa. Modelo G80
Totales		331 turbinas		372.25 MW	

Fuentes: [4], [5].

Nota: La potencia total en algunos casos no es el producto de la potencia unitaria por la cantidad de aerogeneradores. Los datos se presentan como se tomaron de las fuentes respectivas. Según [6] en 2017 la capacidad llegó a 382 MW, lo que coincide con la suma simple del producto de la potencia unitaria por la cantidad de turbinas en cada parque.

* Ubicado entre Desamparados, San José y El Guarco, Cartago.

Investigación en la academia

La investigación académica en el campo de turbinas eólicas ha sido desarrollada por las principales universidades públicas: Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), Universidad de Costa Rica (UCR) y Universidad Nacional de Costa Rica (UNA). Tomando las primeras 20 universidades según el Ranking Nacional [11] para Costa Rica, se encuentra mediante consulta por diferentes medios, que actualmente en el resto de casas de enseñanza superior no se desarrollan investigaciones en este campo. Cabe mencionar que en el Instituto Nacional de Aprendizaje (INA) existe un Laboratorio de Generación de Energías Renovables, inaugurado en

septiembre de 2017, que cuenta con un sistema de generación de energía eólica compuesto por un aerogenerador en miniatura. El sistema está orientado a experimentar y simular escenarios, para adiestrar en diseño, instalación, operación y mantenimiento de proyectos [12]. Por otra parte en la Universidad EARTH se imparten cursos de capacitación en el tema de energías renovables, incluyendo la energía eólica [13].

Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC)

En la década de 1980 existió el Centro de Investigaciones en Energía, adscrito a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) del TEC. En 1990, la VIE inicia contacto con el ECN (Energy Research Centre of the Netherlands). Del ECN visita a Costa Rica el Dr. Hermanus (Herman) Snel en 1994, quien imparte varios cursos a nivel centroamericano y realiza, dentro del TEC, una caracterización del viento en el campus para posteriormente ajustar un perfil NACA² a esas condiciones. Con este insumo en el TEC se logra construir e instalar, sin la participación del Dr. Snel, un aerogenerador de eje horizontal, mostrado en la figura 2. Modelos adicionales de las aspas construidas fueron ensayados y fallados por carga estática en la misma institución. En 1996 finalizó la participación del Dr. Snel con el TEC [14]. De estos desarrollos no fue posible ubicar registros escritos. La turbina de la figura 2 fue descartada de la institución entre 2015 y 2016 según testimonio de varios funcionarios del Departamento de Administración de Mantenimiento del TEC.

Adicionalmente, se han generado en esta institución trabajos de graduación y otras publicaciones en el campo del mantenimiento de aerogeneradores, entre otros [15] y [16].

En la actualidad, el TEC posee el proyecto Skygrap: Visualización de vientos en Costa Rica (iReal 4.0) que pretende generar la primera visualización de los vientos del país, con filtros de tiempo y altura [17].

En el campo específico de la investigación en energía eólica y turbinas eólicas, se crea en 2018 el LIENE: Laboratorio de Investigación en Energía Eólica, que pretende desarrollar proyectos como caracterización y aprovechamiento del recurso eólico en zonas de bajo potencial eólico y alta turbulencia, enfocándose en turbinas de pequeña escala [18]. Este laboratorio tiene como antecedente algunas investigaciones, desarrolladas parcialmente en Costa Rica, en torno a modelos para la potencia extraíble de turbinas eólica tipo Magnus [19].

Universidad de Costa Rica (UCR)

Según se indica en [10], “En la década de los setenta, la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Costa Rica (UCR) realizó los primeros ensayos técnicos sobre la energía eólica al diseñar e instalar un aerotransductor en la Finca Experimental Fabio Baudrit en Alajuela”.

En julio de 2005, la UCR concluye la construcción del túnel de viento didáctico mostrado en la figura 3, con una sección de trabajo de 270 mm x 265 mm x 530 mm, un rango de operación de velocidades del viento entre 4 y 55 m/s y provisto de un motor de 5 kW [20]. Desde su construcción el equipo ha sido utilizado únicamente con fines didácticos y no se ha empleado para investigación [21].

2 National Advisory Committee for Aeronautics, en español, Comité Consejero Nacional para la Aeronáutica, agencia gubernamental de los Estados Unidos de Norteamérica.



Figura 2. Turbina eólica instalada en el TEC, cortesía de [14].



Figura 3. Túnel de viento diseñado y construido en la UCR³.

3 Cortesía del Ing. Juan Gabriel Monge Gapper. Laboratorios de la Facultad de Ingeniería de la UCR (2006).

Por otra parte, el Laboratorio de Arquitectura Tropical de la UCR posee un túnel de viento del fabricante GUNT, el cual también ha sido utilizado principalmente con fines educativos, para estrategias y principios de ventilación en cursos de grado y maestría [22].

Recientemente, en 2017 la Escuela de Ingeniería Mecánica adquirió un túnel de viento con una sección de trabajo de 800 mm x 600 mm, con una velocidad máxima en el ducto de hasta 20 m/s y provisto de un motor de 30 kW que acciona un ventilado centrífugo [23]. Estaba previsto que el nuevo túnel entrara en operación durante el segundo semestre de 2018 [21], lo cual se ha prorrogado para el segundo semestre de 2019..

Se ha propuesto en esta institución, al menos en dos ocasiones (ver [24] y [25]), la construcción de otros túneles de viento que sean aptos para investigación.

En cuanto a investigaciones propiamente en el campo de turbinas eólicas, sólo se ubicó un proyecto registrado en la Vicerrectoría de Investigación de la UCR desde 1975 hasta la fecha [26], el cual fue desarrollado entre 2013 y 2015 [27] y posee publicaciones asociadas como [28] y [29]; las cuales versan sobre simulaciones computacionales del perfil aerodinámico S809. Se pueden mencionar otros proyectos sobre el recurso eólico, registrados en la misma Vicerrectoría, uno desarrollado en 1995 [30] y otro llevado a cabo entre 2008 y 2009 [31].

Adicionalmente, dentro de las investigaciones desarrolladas en el marco de esta Vicerrectoría, destaca el estudio de [10] titulado “Perspectivas de la energía eólica en Costa Rica: estado, retos y oportunidades” que presenta un enfoque político, económico y social.

Por otra parte, dentro de la UCR se han desarrollado algunas tesis por parte de estudiantes principalmente de ingeniería eléctrica, relacionadas al tema de energías renovables y específicamente en eólica como [32] y [33].

Un caso de particular interés es el proceso de solicitud de patente de una turbina eólica denominada SkyTwister desarrollada por el profesor Carlos Acosta Nassar, de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UCR [34], sin embargo, este tema será abordado en detalle en la sección del sector empresarial.

Universidad Nacional (UNA)

En 2012 el Departamento de Física de la UNA, a través del Dr. Shyam Nandwani inició una cooperación con el profesor Carlos Acosta Nassar, creador de la turbina eólica SkyTwister. La Universidad construyó una torre para el aerogenerador y lo instaló junto con equipos de medición tanto propios como del señor Acosta. Por dificultades técnicas no se han obtenido datos confiables del funcionamiento de este sistema [35]. Una descripción más detallada del trabajo realizado por la UNA con este aerogenerador se brinda en el apartado de sector empresarial del presente artículo.

Centros de investigación

En Costa Rica la mayor parte de los centros de investigación están adscritos a las universidades estatales, por lo que en esta sección se detalla únicamente el trabajo realizado en centros que sean externos a la academia, los cuales en el campo de ingeniería, son escasos.

Ad Astra Rocket Company Costa Rica

Entre 2012 y 2016 Ad Astra realizó un exitoso proceso de investigación para la construcción de una turbina eólica de 5 kW con aspas de 3,5 metros fabricadas en fibra de vidrio. El objetivo era aprovechar un potencial eólico bajo, con brisas constantes entre diciembre y mayo de 6

m/s (que se reducen a 3 m/s en condición de lluvia), el insumo del recurso eólico fue los datos tomados durante 10 años en el aeropuerto Daniel Oduber Quirós.

El foco de esta investigación fue el aspa de la turbina, para lo cual se realizaron estudios aerodinámicos y se generó un perfil que finalmente fue construido en Costa Rica y al que se le realizaron –también en el país– pruebas de esfuerzo mecánico.

El aerogenerador de Ad Astra se muestra en la figura 4, una particularidad es que su góndola fue diseñada en 2015 por una estudiante del TEC [36]. En el proceso de construcción se afrontaron dificultades por el alto costo de los componentes eléctricos y electrónicos como el generador y el inversor, se descartó -por un asunto de costos- la posibilidad de gobernar el ángulo de ataque de las aspas. Dentro del mismo proyecto se valoró la opción de construir un túnel de viento, el cual fue diseñado, pero no llegó a construirse.



Figura 4. Turbina eólica de Ad Astra Rocket con góndola diseñada por [36], imagen tomada de [37] y reproducida con autorización de [38].

Luego de 2016 y a la fecha, no se ha dado seguimiento al proyecto de la turbina eólica, siendo eventualmente el próximo paso la construcción de nuevas aspas que sean más livianas, con mayor resistencia mecánica y con una menor inercia rotacional para favorecer el arranque de la turbina [38].

Previo a 2012, el Ing. Aeroespacial Marco Gómez Jenkins formó parte de Ad Astra y realizó investigación en perfiles aerodinámicos, participó en la manufactura de otro prototipo de turbina eólica que llegó a ser instalado. En este caso se diseñó un software para selección de aspas, el cual, basándose en la potencia del viento entregaba el valor del giro aerodinámico y el ancho de la cuerda [39].

De estos trabajos no se ubican reportes de dominio público.

Instituto Costarricense de Electricidad (ICE)

El Instituto Costarricense de Electricidad es sin duda y como ya se mencionó, el mayor actor en el sector de producción y distribución de energía eléctrica en Costa Rica. Entre muchas otras

cosas, se puede afirmar que a través de ese Instituto pasa toda la energía producida en los parques eólicos detallados en el cuadro 1.

A pesar de no ser un centro de investigación propiamente dicho, posee una numerosa cantidad de investigadores e investigaciones realizadas, tanto en el campo del recurso eólico⁴, como en almacenamiento de energía (tema de interés en virtud de las fluctuaciones que presentan las fuentes renovables como la energía eólica o solar), esto a cargo del Grupo de Investigación en Almacenamiento de Energía [40].

Es importante indicar que el ICE no realiza investigación relacionada con el diseño de aspas, torres o perfiles aerodinámicos de turbinas eólicas [4].

Sector Empresarial

Dentro del sector empresarial en el campo de turbinas eólicas, el principal giro del negocio en Costa Rica es la realización de los estudios del potencial eólico, así como la importación, venta e instalación de equipos. Por ejemplo, Dyscresa reporta ser una microempresa que desarrolla proyectos eólicos de pequeña escala, con turbinas importadas [41]. Nace en 2006 y ofrece consultorías, diseño y servicios de instalación en energías renovables, entre otros campos, en el de turbinas eólicas [42].

Interdinámica Energía

Es una empresa especializada en soluciones con fuente de energía renovable, en mayor medida hidroeléctrica; sin embargo, posee dentro de su cartera de soluciones, la generación eólica a pequeña escala. Su galería de proyectos en línea muestra tres sitios con pequeños aerogeneradores instalados en Costa Rica [43]. Durante 2017 y 2018 han realizado investigación, de carácter privado y confidencial, sobre el diseño de una turbina eólica de eje vertical [44].

Turboeoms S.A. y Balances Dinámicos S.A.

La única iniciativa empresarial que ha abarcado investigación y diseño de una turbina eólica en Costa Rica, ha sido por parte del físico Carlos Acosta Nassar, mediante las empresas Turboeoms S.A. en cuanto a comercialización y Balances Dinámicos S.A. en lo referente a la producción del aerogenerador [35]. La turbina eólica fue llamada SkyTwister, obtuvo varios galardones y entró en un proceso de obtención de patente [45], además estuvo instalada tanto en la UCR [34] como en la UNA [35].

En el caso de la UCR, en [35] se detalla que en 2008 la casa de enseñanza adquirió dos turbinas por un monto de 16 millones de colones, pero por múltiples dificultades de diversas índoles, el proyecto no concluyó exitosamente. Por su parte, [34] destaca lo novedoso del diseño de la turbina SkyTwister, enfatizando que Carlos Acosta también fue profesor de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UCR. Las dos turbinas SkyTwister adquiridas por la UCR estuvieron instaladas en el techo del edificio de ingeniería de la universidad, como se muestra en la figura 5.

En el año 2012 la SkyTwister visita la UNA, por una iniciativa de cooperación entre su inventor y el Dr. Shyam Nandwani. Ambos presentaron un trabajo [45] que contiene resultados técnicos del funcionamiento de la turbina.

4 La información generada es confidencial [47].

Reportan que las SkyTwister R1,0 poseen 1 m de radio, 18 álabes y una potencia máxima teórica de 1kW operando con vientos de 11 m/s. Sus resultados experimentales preliminares indican potencias de hasta 28 W con vientos de hasta 5 m/s.



Figura 5. Turbina SkyTwister instalada en la UCR, cortesía de [34].

El documento cubre aspectos como mantenimiento, detalles de fabricación, materiales, aspectos de conversión de la energía mecánica en eléctrica y medición de variables eléctricas y mecánicas.

Menciona como aspecto por destacar que la SkyTwister opera por transferencia de momentum y no por diferencia de presión como las turbinas eólicas convencionales de eje horizontal.

Se concluye que la turbina fue localizada en un sitio con vientos poco favorables, sin embargo, destaca que durante la fase de pruebas la turbina operó bien y generó electricidad; posteriormente se enumeran mejoras de índole mecánica que han hecho más confiable la turbina.

Carlos Acosta Nassar ha continuado con su investigación con recursos privados hasta la fecha, los reportes sobre sus resultados no han sido publicados.

Luego de la experiencia en la UNA, nuevas versiones de la turbina SkyTwister fueron instaladas en diversos sitios en Costa Rica: Hotel Sheraton en Escazú (figura 6), Coronado de San José, La Fortuna de Bagaces (2014) y San Rafael de Alajuela (2015). Todas han sido desinstaladas para ser objeto de mejoras. Este aerogenerador también ha sido exportado, particularmente hacia Texas, en Estados Unidos de Norteamérica.



Figura 6. Turbina SkyTwister instalada en el Hotel Sheraton, cortesía de [46].

En total, la investigación ha producido 12 variantes de la SkyTwister, con mejoras en todos sus componentes incluyendo partes eléctricas, mecánicas y aspectos específicos como la cola de la turbina, que se encarga de alinear el aerogenerador con la dirección predominante de la corriente de viento incidente [46].

Al momento de la consulta de esta información, no se encontraba en operación ninguna SkyTwister. Además, vale la pena indicar que no ha sido publicado en ningún sitio de dominio público una curva de potencia de esta turbina eólica.

Comentarios finales

Costa Rica es un país que posee parques eólicos desde la década de 1990 y figura en Latinoamérica como referente en el campo de la energía eólica, no obstante, sólo se han desarrollado y concretado tres iniciativas aisladas de investigación en el campo de los aerogeneradores en el país. Al día de la redacción de este artículo solamente se mantiene activa una de ellas, el trabajo de Carlos Acosta Nassar con la SkyTwister.

En la academia por su parte, se encuentra en etapa de fundación el Laboratorio de Investigación en Energía Eólica (LIENE) dentro del TEC, que promete investigar aspectos como el recurso eólico y las turbinas eólicas de pequeña escala. El eventual éxito y resultados de este laboratorio dependerán en gran medida de la estabilidad y arraigo que logre desarrollar en la institución promotora, lo cual no ha ocurrido anteriormente en los proyectos llevados a cabo en la academia en este campo, por lo que se puede afirmar que este será el principal desafío del LIENE.

Finalmente, un conjunto de actores que deben ser al menos mencionados, son los investigadores vinculados con el tema de la energía eólica que, siendo costarricenses, trabajan en el extranjero. Algunos de ellos son⁵: PhD Carlos Arce León de LM Wind Power en los Países Bajos, PhD Fernando Borbón del Centro Nacional de Energía Renovables (CENER) en España, MSc Sebastián Flores de DEWI-OCC en Alemania, MSc Ricardo Faerron Guzmán de Stuttgarter Lehrstuhl für Windenergie en Alemania y MSc Alessandra Salgado de la International Renewable Energy Agency (IRENA) en Alemania.

5 La lista no pretende ser exhaustiva.

Un gran reto para el país es lograr desarrollar de manera estable y sostenible la investigación en turbinas eólicas, echando mano del recurso humano de alto nivel que posee dentro de sus fronteras y aprovechando la oportunidad que le brinda la existencia de varios investigadores en este campo, que laboran en el extranjero y poseen amplia experiencia en la industria de clase mundial.

Agradecimientos

Al Instituto Tecnológico de Costa Rica y a su Vicerrectoría de Investigación y Extensión por el financiamiento parcial para esta investigación, mediante el proyecto 134105.

Al LIENE: Laboratorio de Investigación en Energía Eólica del TEC.

Referencias

- [1] Presidencia de la República de Costa Rica, «Sitio Web Oficial - Presidencia de la República de Costa Rica,» 03 Enero 2017. [En línea]. Available: <http://presidencia.go.cr/comunicados/2017/01/costa-rica-supera-98-de-generacion-renovable-por-segundo-ano-consecutivo/>. [Último acceso: 03 Abril 2018].
- [2] M. Avendaño A, «La utopía de una Costa Rica carbono neutral en 2021,» *El Financiero: Economía y Política*, 11 Noviembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.elfinancierocr.com/economia-y-politica/la-utopia-de-una-costa-rica-carbono-neutral-en/IYM5MH2PNZCP7BOHSZ5NV7CAQM/story/>. [Último acceso: 03 Abril 2018].
- [3] Instituto Costarricense de Electricidad, «Centro Nacional de Control de Energía,» 03 Abril 2018. [En línea]. Available: <https://appcenter.grupoice.com/CenceWeb/CenceMain.jsf>. [Último acceso: 03 Abril 2018].
- [4] R. Quirós Balma, Interviewee, *División Corporativa Electricidad, ICE*. [Entrevista]. 09 Febrero 2018.
- [5] J. Bonilla Morales, «Energía eólica en Costa Rica: Potencial-plantas instaladas-restricciones-red de medición,» Instituto Costarricense de Electricidad, 17 Septiembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.grupoice.com/wps/wcm/connect/12a7d75f-c615-4587-b3c4-d6d89ee2bc1d/Eolico+JavierBonilla+ForoER.pdf?MOD=AJPERES>. [Último acceso: 06 Abril 2018].
- [6] Elpais.cr, «Costa Rica alcanzó en 2017 la mayor generación eólica de su historia,» *Economía*, 10 Enero 2018. [En línea]. Available: <https://www.elpais.cr/2018/01/10/costa-rica-alcanzo-en-2017-la-mayor-generacion-eolica-de-su-historia/>. [Último acceso: 06 Abril 2018].
- [7] Instituto Costarricense de Electricidad, «Plan de expansión de la generación eléctrica 2016-2035,» Planificación y desarrollo eléctrico, proceso expansión del sistema, San José, Costa Rica, 2017.
- [8] Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, «Debate de Infraestructura 2018,» 05 Marzo 2018. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=No7vu0tZvko&t=3463>. [Último acceso: 11 Abril 2018].
- [9] A. Energynautics GmbH, «Ánisis de Opciones para Manejar una Mayor Incorporación de Energías Renovables Variables,» Banco Interamericano de Desarrollo, Darmstadt, 2018.
- [10] L. Contreras y P. Sauma, «Perspectivas de la energía eólica en Costa Rica: estado, retos y oportunidades,» Observatorio del Desarrollo y Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, 2017.
- [11] Ranking Web of Universities, «Ranking Web de Universidades,» Enero 2018. [En línea]. Available: http://www.webometrics.info/es/Latin_America_es/Costa%20Rica. [Último acceso: 03 Abril 2018].
- [12] Banco Centroamericano de Integración Económica, «INA inaugura Laboratorio de Generación de Energías Renovables con apoyo del BCIE,» 04 Septiembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.bcie.org/prensa/noticias/articulo/ina-inaugura-laboratorio-de-generacion-de-energias-renovables-con-apoyo-del-bcie/>. [Último acceso: 01 Abril 2018].
- [13] Universidad EARTH, «Curso Energía Eólica -EARTH La Flor,» 16 Mayo 2014. [En línea]. Available: <https://www.earth.ac.cr/es/2014/05/16/curso-energia-eolica-earth-la-flor/>. [Último acceso: 13 Abril 2018].
- [14] G. Jiménez Soto, Interviewee, [Entrevista]. 01 Diciembre 2017.
- [15] C. Vargas González, «Mantenimiento Preventivo aplicado a Aerogeneradores Neg Micon NM750.,» Instituto Tecnológico de Costa Rica, Tilarán, 2004.

- [16] A. L. Loría García, «Diseño de un modelo de toma de decisiones para mantenimiento basado en el monitoreo del deterioro multiestado para un sistema de aerogeneración instalado en Costa Rica,» Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, 2016.
- [17] Instituto Tecnológico de Costa Rica, «Skygrap: Visualización de vientos en Costa Rica (iReal 4.0),» [En línea]. Available: <https://www.tec.ac.cr/en/node/15303/proyectos/skygrap-visualizacion-vientos-costa-rica-ireal-40>. [Último acceso: 11 Abril 2018].
- [18] Instituto Tecnológico de Costa Rica, «LIENE: Laboratorio de Investigación en Energía Eólica,» [En línea]. Available: <https://www.tec.ac.cr/laboratorio-investigacion/liene-energia-eolica>. [Último acceso: 11 Abril 2018].
- [19] G. Richmond-Navarro, W. R. Calderón-Munoz, R. LeBoeuf y P. Castillo, «A Magnus wind turbine power model based on direct solutions using the Blade Element Momentum Theory and symbolic regression,» *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 8, n° 1, pp. 425-430, 2017.
- [20] Monge & Gapper, «Túnel de viento para visualización de flujo,» 2006. [En línea]. Available: <http://windtunnel.mogap.net/>. [Último acceso: 04 Abril 2018].
- [21] R. Murillo Muñoz, Interviewee, *Escuela de Ingeniería Civil, UCR*. [Entrevista]. 02 Abril 2018.
- [22] E. Vargas Soto, Interviewee, *Laboratorio de Arquitectura Tropical, UCR*. [Entrevista]. 03 Abril 2018.
- [23] J. G. Monge Gapper, «Ingreso de nuevo Túnel de Viento de Capa Límite,» 05 Noviembre 2017. [En línea]. Available: <http://www.eim.ucr.ac.cr/?q=node/159>. [Último acceso: 04 Abril 2018].
- [24] J. G. Monge-Gapper, «Dimensionado y Construcción de un túnel de viento de baja velocidad,» *Ingeniería*, vol. 16, n° 2, pp. 45-54, 2006.
- [25] J. G. Monge-Gapper, «Concepto para un túnel de viento con vórtice variable,» *Métodos y Materiales*, vol. 4, n° 1, pp. 33-40, 2014.
- [26] Universidad de Costa Rica, Vicerrectoría de Investigación, «Sistema de información y gestión de proyectos, programas y actividades,» [En línea]. Available: <http://www.vinv.ucr.ac.cr/sigpro/web/>. [Último acceso: 04 Abril 2018].
- [27] P. Casanova Treto y K. Solís Ramírez, «Comportamiento aerodinámico del perfil S809 mediante técnicas de la dinámica de los fluidos computacional,» [En línea]. Available: https://vinv.ucr.ac.cr/sigpro/web/app_dev.php/projects/B3225. [Último acceso: 04 Abril 2018].
- [28] W. Martins Ribeiro, J. C. Costa Campos, Á. M. Bigonha Tibiriça, H. M. Pereira Rosa, R. Fernandes Brito y P. Casanova Treto, «Utilização de uma malha estruturada na análise do aerofólio s809,» de *Congresso Nacional de Matemática Aplicada à Indústria*, Caldas Novas - Goiás, 2014.
- [29] J. C. Gaigher Junior, J. C. C. Campos, Á. M. Bigonha Tibiriça, H. M. Pereira Rosa, M. M. Beraldo, A. C. de Andrade, R. Fernandes Brito y P. Casanova Treto, «S809 airfoil: Reynolds number effect on the aerodynamics of wind turbine blades,» de *23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering*, Rio de Janeiro, Brasil, 2015.
- [30] C. Quesada Mateo, «Análisis espacial de correlación de archivos planos mediante SIG: Una aplicación con datos de viento para un proyecto eólico en Costa Rica,» [En línea]. Available: <http://www.vinv.ucr.ac.cr/sigpro/web/projects/95718>. [Último acceso: 04 Abril 2018].
- [31] J. Amador Astúa, E. Rivera Fernández y E. Alfaro Martínez, «Elaboración de mapas del recurso eólico en Costa Rica,» [En línea]. Available: <http://www.vinv.ucr.ac.cr/sigpro/web/projects/A8401>. [Último acceso: 04 Abril 2018].
- [32] Universidad de Costa Rica, «Catálogo del sistema de bibliotecas, documentación e información,» [En línea]. Available: <http://aleph.sibdi.ucr.ac.cr/F>. [Último acceso: 03 Abril 2018].
- [33] Universidad de Costa Rica, «Red de Unidades de Información Especializada,» [En línea]. Available: <http://ruie.ucr.ac.cr/catalogo/>. [Último acceso: 06 Abril 2018].
- [34] C. A. Parral, «Patentan novedoso diseño de turbina eólica para generar electricidad,» *Girasol*, vol. 14, n° 44, pp. 3-7, 2011.
- [35] E. Alonso, «Informe Estado de la Ciencia, Tecnología e Innovación. Uso del conocimiento científico tecnológico,» Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. CONARE., San José., Julio, 2013.
- [36] E. Vargas Gómez, «Diseño de góndola y componentes que integran las partes mecánicas y eléctricas de un aerogenerador,» Escuela de Ingeniería en Diseño Industrial, ITCR., Liberia, Costa Rica, 2015.

- [37] K. Mora Pérez, «Hoy en el TEC,» Estudiante de Diseño Industrial colabora en Diseño de dispositivo para Ad Astra Rocket, 08 Diciembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.tec.ac.cr/hoyeneltec/2015/12/08/estudiante-diseno-industrial-colabora-diseno-dispositivo-ad-astra-rocket>. [Último acceso: 04 Abril 2018].
- [38] J. A. Castro Nieto, Interviewee, *Chief Scientist, Ad Astra Rocket Company Costa Rica*. [Entrevista]. 21 Febrero 2018.
- [39] M. Gómez Jenkins, Interviewee, *Space Systems Laboratory (SETEC), ITCR*. [Entrevista]. 05 Diciembre 2017.
- [40] A. Árias Pérez, «Almacenamiento de Energía para la integración de energías renovables fluctuantes,» Foro iberoamericano energías renovables no convencionales, San José, Costa Rica, 2015.
- [41] M. Alabi, Interviewee, *DYSCRESA*. [Entrevista]. 02 Abril 2018.
- [42] Diseños y Soluciones Creativas, «Dyscresa,» [En línea]. Available: <http://www.dyscresa.com/#>. [Último acceso: 03 Abril 2018].
- [43] Interdinámica Energía, «Sistema de energía aislados,» Eólica, [En línea]. Available: <http://www.interdinamic.com/>. [Último acceso: 26 Abril 2018].
- [44] I. L. Coronado, Interviewee, *Interdinámica Energía*. [Entrevista]. 26 Abril 2018.
- [45] S. S. Nandwani y C. Acosta-Nassar, «Diseño, Construcción y Estudio de un Molino del Viento en el clima del Heredia, Costa Rica.,» de *12th World Wind Energy Conference & Renewable Energy Exhibition*, Havana, Cuba, 2013.
- [46] C. Acosta Nassar, Interviewee, *Inventor de la turbina SkyTwister*. [Entrevista]. 24 Abril 2018.
- [47] A. Arias Pérez, Interviewee, *Ingeniería y Construcción. ICE*. [Entrevista]. 13 Abril 2018.

Estudio experimental de la carbonatación del concreto

Experimental study of the concrete carbonation

Bruno Chinè-Polito¹, Rommel Cuevas-Kauffmann²,
Ronald Jiménez-Salas³, Giannina Ortiz-Quesada⁴

Fecha de recepción: 27 de julio de 2018

Fecha de aprobación: 13 de octubre de 2018

Chiné-Polito, B; Cuevas-Kauffmann, R; Jiménez-Salas, R; Ortiz-Quesada, G. Estudio experimental de la carbonatación del concreto. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-2. Abril-Junio 2019. Pág 68-81.

DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v32i2.4350>

1 Escuela de Ciencia e Ingeniería de Materiales. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: bchine@tec.ac.cr

2 Escuela de Ingeniería en Construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: rcuevas@tec.ac.cr

3 Escuela de Ciencia e Ingeniería de Materiales. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: rjimenez@tec.ac.cr

4 Escuela de Ingeniería en Construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: gortiz@tec.ac.cr



Palabras clave

Concreto; carbonatación; cámara de carbonatación acelerada; técnicas experimentales.

Resumen

En el sector civil de la construcción, el concreto y el refuerzo metálico representan aun los materiales de mayor importancia, aunque sean muy vulnerables por los agentes atmosféricos, como en el caso de su degradación por corrosión. En Costa Rica, debido a la falta de métodos de monitoreo de las estructuras existentes y a una deficiente política preventiva en términos de mantenimiento, se hace urgente el desarrollo de modelos predictivos que permitan intervenir a tiempo las estructuras antes de que se comprometa de alguna forma la integridad de los usuarios. En este artículo se presentan los resultados de una investigación sobre la carbonatación por causa del gas CO_2 , considerando el estudio experimental de la carbonatación del concreto sin la presencia del refuerzo metálico. Se usan métodos de carbonatación en cámara acelerada bajo condiciones muy controladas, ensayos de difracción de rayos X y químicos con el propósito de verificar el avance de la profundidad de carbonatación en el tiempo. Los resultados experimentales demuestran la efectividad del proceso en la cámara de carbonatación acelerada y brindan la variación de la resistencia a compresión de los especímenes de concreto, con el avance del frente de carbonatación en el tiempo.

Keywords

Concrete; carbonation; accelerated carbonation chamber; experimental techniques.

Abstract

In the construction sector, the concrete and the steel bars represent still the key components, although they are very vulnerable by the atmospheric agents, as in the case of their degradation caused by corrosion. In Costa Rica, due to the absence of effective monitoring methods of civil structures and preventive maintenance actions, predictive model are required to avoid damages to the structure and protect the safety of the users. In this work, we present the results of a study for the carbonation due to the CO_2 gas, considering the experimental study of the concrete carbonation without the reinforcing bar. We use an accelerated carbonation chamber under strictly controlled conditions, X ray diffraction and chemical analysis to verify the progress of the carbonation depth in time. The experimental results show the effectiveness of the accelerated carbonation process and give the compression strength of the concrete samples for the different carbonation depth measured in time.

Introducción

En el sector civil de la construcción, el concreto y el refuerzo metálico representan aun los materiales de mayor importancia, aunque sean muy vulnerables por los agentes atmosféricos, como en el caso de su degradación por corrosión (figura 1). Acciones para analizar y limitar el impacto de la corrosión atmosférica de estructuras, debido al aumento de dióxido de carbono (CO_2) en la atmosfera como consecuencia del cambio climático, son apoyadas por los gobiernos de diferentes países [1]. En Estados Unidos un informe del ASCE [2] subraya la deficiencia del sistema de transporte, en particular la degradación de las estructuras de los puentes y los altos costos asociados con la corrosión del acero. En Costa Rica debido a la falta de métodos de monitoreo de las estructuras existentes y una deficiente política preventiva en

términos de mantenimiento, se hace urgente el desarrollo de modelos predictivos que permitan intervenir a tiempo cualquier tipología de construcción antes de que se comprometa de alguna forma la integridad de los usuarios. Dichos modelos podrían colaborar en la implementación de nuevos métodos y reglas, como requisitos de diseño en los códigos nacionales. Por otro lado, en el ITCR se mantiene desde hace tiempo el área de la corrosión y protección de los materiales como una de las áreas prioritarias de investigación. Diversos proyectos han sido llevados a cabo en el área de la corrosión atmosférica, para citar un caso el proyecto internacional CYTED “Corrosión y protección de metales en las atmosferas de Iberoamérica” [3], así como varias acciones de divulgación en este campo. Actualmente el proyecto *e-bridge* del ITCR se encuentra realizando un modelo predictivo de falla en los puentes del País, habiéndose determinado el gran deterioro de las secciones de concreto estructural, como consecuencia de la corrosión del acero de refuerzo de las losas.



Figura 1. Carbonatación del concreto y consecuente descamado.

El fenómeno de la carbonatación se puede relacionar con la caída de la resistencia a la compresión del concreto estructural. La importancia de los estudios en el concreto hidráulico radica en que este aglutinante se encuentra entre los materiales de mayor consumo en el mundo. Por otro lado, el estudio de la carbonatación del concreto por causa del gas CO_2 que permea su matriz porosa, es un requisito fundamental para establecer la probabilidad de que el concreto se degrade y que el refuerzo metálico pueda enfrentar mecanismos de corrosión, lo que finalmente incide en la durabilidad de las construcciones. El grado de carbonatación del concreto puede inducir el cambio en las condiciones protectoras del refuerzo metálico, lo cual acarrea fenómenos de corrosión y facilita la degradación de los elementos estructurales.

Marco teórico

Carbonatación del concreto

El concreto es fundamentalmente un material cerámico poroso [4,5,6,7]. La estructura porosa del concreto está expuesta siempre más a procesos de corrosión atmosférica, siendo la

carbonatación uno de los mecanismos principales de corrosión. Este fenómeno afecta también el metal del concreto reforzado, el cual mantiene una capa oxidada en su superficie, siendo esta estable termodinámicamente y protegiendo el metal de la corrosión (pasivación). Sin embargo, el CO_2 puede difundir en el interior del material y reaccionar con los compuestos hidratados del concreto para formar calcita (CaCO_3), que sucesivamente precipita en las paredes de los poros del concreto. El proceso modifica las condiciones alcalinas de la solución presente en los poros causando que la superficie metálica pierda la capa de protección (depasivación), ver por ejemplo Tuuti [8]. Sobre el tema, muy importante para predecir la degradación de las propiedades mecánicas y la durabilidad de una estructura civil, existen en literatura diversos trabajos publicados. Una serie de artículos de referencia sobre el proceso de carbonatación se deben al grupo de investigación ligado al autor Papadakis [9,10,11,12,13]. En particular en [10] se estudia el efecto de la dimensión de los poros, de la difusividad del CO_2 en el concreto carbonatado y de la humedad relativa. En [12] se analiza la carbonatación del cemento puzolánico mientras en [13] se brinda un estudio de la evolución temporal de la carbonatación en concretos y morteros. La dependencia de la velocidad de carbonatación del silicato cálcico hidratado (gel C-S-H) presente en el concreto con la presión de CO_2 ha sido objeto de estudio, en particular Hyvert *et al.* [14] demuestran que la cinética del proceso depende de la presión parcial de este gas. Un trabajo experimental para estudiar el efecto de concentración de CO_2 y humedad relativa se debe a Zhiguon y Ri [15] que implementan un proceso de carbonatación acelerada en laboratorio. También mediante pruebas aceleradas Chi *et al.* [16] evalúan los efectos de la carbonatación sobre propiedades mecánicas y durabilidad del concreto. Recientemente ha sido publicado un análisis estadístico sobre la velocidad de carbonatación del concreto a partir de datos publicados en literatura [17], con el propósito de brindar un modelo de previsión de la carbonatación de concretos.

Carbonatación en condiciones aceleradas

Las cámaras de carbonatación tienen la finalidad de estudiar el proceso de carbonatación que ocurre en los cementos y concretos hidráulicos, simulando ambientes de exposición con concentraciones controladas de CO_2 y humedad relativa. Como el fenómeno es lento, se construyen cámaras que permitan aumentar la concentración de CO_2 y realizar ensayos en tiempos más cortos. Las concentraciones usuales de CO_2 en la atmosfera natural pueden ubicarse en aproximadamente 0,03% en volumen [18], por lo que se requerirían años para realizar los estudios de un determinado concreto. Es así como muchas investigaciones analizan diferentes porcentajes de CO_2 , que pueden ir desde el 3% (100 veces mayor que las concentraciones naturales) hasta valores de 10% ÷ 50% [19]. Otro de los aspectos importantes de la carbonatación es la humedad relativa a la que se exponen los especímenes, siendo los valores recomendados entre 50 y 70%, ya que de este modo el proceso se lleva a sin alcanzar condiciones de saturación completa. En efecto, si la humedad relativa supera los valores límites, los poros se obstruyen y no hay transporte del CO_2 , mientras si los valores son muy bajos, no hay suficiente fase acuosa para que se desarrollen las reacciones de carbonatación, con sucesiva disolución de hidróxido de calcio y precipitación de calcita [20]. Para lograr las condiciones idóneas de experimentación, las cámaras deben asegurar el flujo continuo de CO_2 , ser herméticas y controlar y mantener las condiciones de proceso. Se requiere además un sistema que mezcle aire húmedo y aire seco para regular la humedad en los rangos operativos. Usando sensores, el sistema de control de la cámara de carbonatación puede ser capaz de controlar tanto la concentración de CO_2 como la humedad relativa, además de monitorear la temperatura que se encuentra en los valores ambientales. El sistema de regulación se completa mediante válvulas con control automático, adoptando microcontroladores y reguladores de corriente, propios de la lógica de control.

Trabajo experimental

Preparación de los especímenes de concreto

Los especímenes cilíndricos de concreto para los ensayos de carbonatación, de altura 20 cm y diámetro 10 cm, se prepararon de acuerdo a la secuencia de actividades que se muestra en la figura. 2. Para caracterizar los agregados tanto gruesos como finos (piedra y arena), se llevaron a cabo los siguientes ensayos:

- ensayo estándar para la determinación de la densidad aparente (“peso unitario”) y vacíos en el agregado [21]
- método de ensayo estándar para la densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso y fino [22], [23]
- método de prueba estándar para la granulometría de agregados gruesos y finos [24].

En el cuadro 1 se brindan los valores de la caracterización del agregado grueso y fino, mientras que en las figuras 3 y 4 se trazan las respectivas curvas granulométricas. La caracterización del material aglutinante (cemento hidráulico) se desarrolla a partir de las fichas de control de calidad de dicho material y de su contenido puzolánico. Según los datos suministrados, el cemento hidráulico corresponde a un MP/A-28 y su composición química se brinda en el cuadro 2. Los valores de la adición puzolánica del material aglutinante, se presentan en el cuadro 3, de acuerdo a la información suministrada por el proveedor. El diseño de la mezcla de concreto se basó en lo estipulado en la normativa ACI 211.1, de volúmenes absolutos, donde se determinó una resistencia mínima a compresión, a desarrollar por el concreto a los 28 días, de 20,59 MPa (210 kg/ cm²). Sucesivamente se calcularon las dosificaciones necesarias de cemento hidráulico, arena, piedra y agua (su relación agua cemento (a/c)) en función de la resistencia antes mencionada. El cuadro 4 muestra un resumen de los valores finales obtenidos para dicho diseño. Para la evaluación del comportamiento del concreto en estudio se fabricaron 200 especímenes cilíndricos de 100 mm x 200 mm, de las cuales 60 muestras fueron utilizadas para la investigación y el restante como testigos. Para la preparación de los especímenes de concreto se siguió lo indicado en [25]. Una vez terminada la elaboración de los especímenes, estos permanecieron en cámara húmeda por un periodo de curado de 90 días a una temperatura de 23± 2 °C y una humedad relativa superior al 95%.

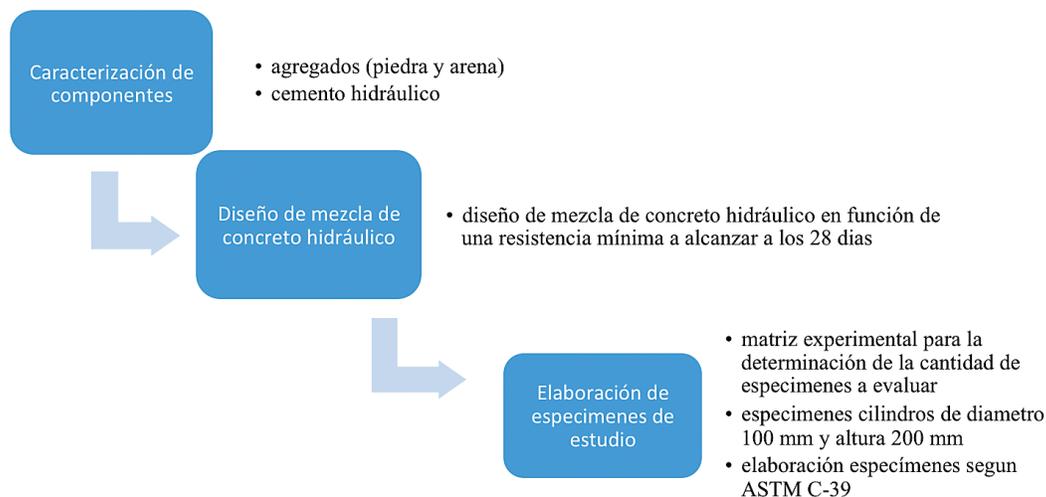


Figura 2. Secuencia de elaboración de los especímenes de concreto hidráulico.

Cuadro 1. Propiedades de los agregados del concreto.

Material	Propiedad					Porcentaje de absorción %D
	Peso unitario suelto (kg/m ³)	Peso unitario compactado (kg/m ³)	Gravedad específica			
			Gbss	Gbs	Gs	
Agregado grueso	1480	1560	2,63	2,57	2,61	2,10
Agregado fino	1500	1710	2,39	2,20	2,22	8,00

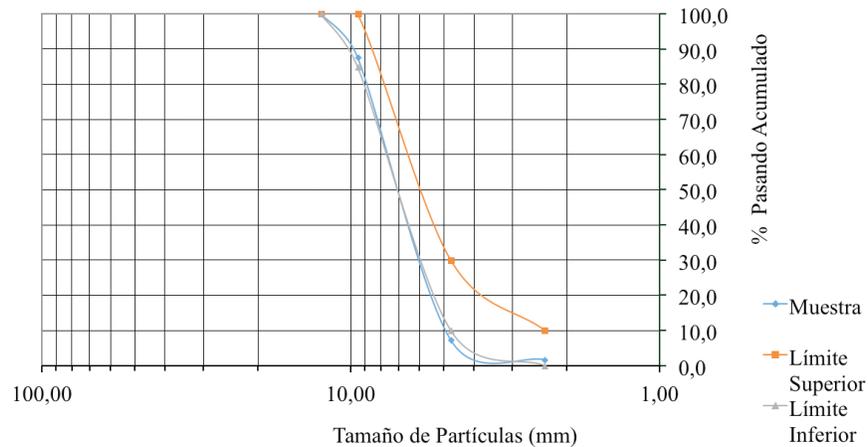


Figura 3. Curva granulométrica de los agregados gruesos.

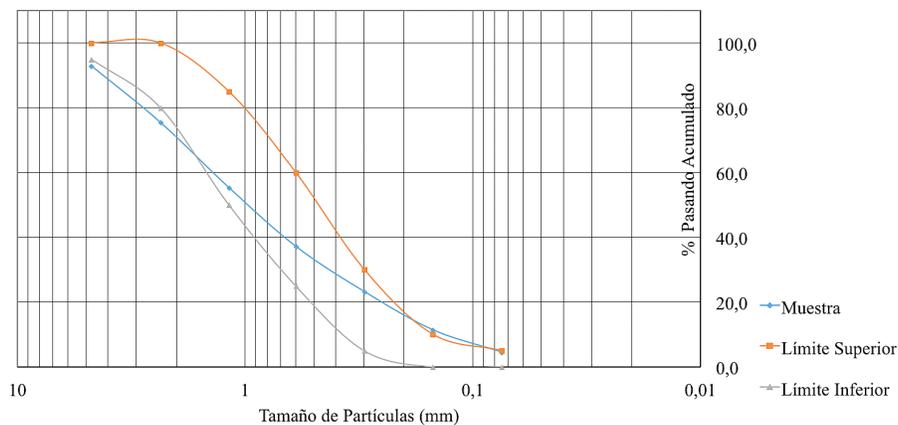


Figura 4. Curva granulométrica de los agregados finos.

Cámara de carbonatación acelerada

La cámara de carbonatación ha sido fabricada con una estructura en acero inoxidable AISI 304 y láminas de material acrílico de 4,5 mm de espesor. La figura 5 muestra una imagen de la cámara y la figura 6 brinda un esquema de las conexiones de flujo para la regulación de los gases y del relativo sistema de control automático. La cámara tiene dimensiones de 1,5 de alto, 1,5 de ancho y 0,75 m de profundidad, con un volumen aproximado de 1,688 m³. Para medir la

concentración de CO₂ dentro de la cámara se usaron dos modelos de sensores de la empresa CO2 Meter, Inc. El primero mide concentraciones de CO₂ que van desde 0% hasta 30%, mientras el segundo soporta atmósferas de hasta 100% CO₂. En particular el sensor de 0-30% brinda también tanto la temperatura como la humedad relativa. El segundo modelo se completó con los sensores de temperatura Electronic Brick 3362 y de humedad relativa HIH-4030/31. Para la regulación automática del nivel de concentración de CO₂ y de humedad relativa se instalaron tres válvulas de expansión electrónica de la empresa Fujikoki Corporation. La primera válvula regulaba el flujo de gas proveniente del balón de CO₂, en cambio las otras dos válvulas controlaban la mezcla de aire seco y aire húmedo proveniente del compresor y del humidificador, respectivamente. La figura. 6 muestra la distribución de los diferentes componentes del sistema de alimentación de los gases, las interconexiones, el microcontrolador y la una unidad de control, implementados en una interfaz de LabVIEW®.

Cuadro 2. Composición química del cemento MP/A-28.

Compuesto	Contenido (%)	Parámetro (%) RTCR 479:2015
% Óxido de magnesio (MgO)	2,19	≤ 6,0
% Trióxido de azufre (SO ₃)	2,51	≤ 4,0
Aluminato Tricálcico (C3A)	8,30	---
Silicato Tricálcico (C3S)	62,4	80-94%*
Silicato Tricálcico (C2S)	12,5	
Ferroaluminato tetracálcico (C4AF)	9,30	

Nota (*): Valor total de clinker para el MP/A lo cual corresponde a la sumatoria de los porcentajes de los componentes de este material. Fuente: LafageHolcim, control de calidad Junio 2017.

Cuadro 3. Composición química del material puzolánico del cemento hidráulico MP/A-28.

Compuesto	Contenido (%)
SiO ₂	83,6
Al ₂ O ₃	0,2
Fe ₂ O ₃	1,6
CaO	0,8
MgO	0,1
SO ₃	0,9
K ₂ O	0,0
Na ₂ O	0,2

Fuente: LafageHolcim, control de calidad Junio 2017

Cuadro 4. Resultados de resumen del diseño de mezcla para un m³ de concreto hidráulico.

Material	Condición	Peso (kg)	Dosificación
Cemento Hidráulico	Seco	381,97	1
Arena	Húmeda	687,31	1,80
Piedra	Húmeda	907,12	2,37
Agua	Sin aditivo	197,45	0,52

Cámara de carbonatación acelerada

La cámara de carbonatación ha sido fabricada con una estructura en acero inoxidable AISI 304 y láminas de material acrílico de 4,5 mm de espesor. La figura 5 muestra una imagen de la cámara y la figura 6 brinda un esquema de las conexiones de flujo para la regulación de los gases y del relativo sistema de control automático. La cámara tiene dimensiones de 1,5 de alto, 1,5 de ancho y 0,75 m de profundidad, con un volumen aproximado de 1,688 m³. Para medir la concentración de CO₂ dentro de la cámara se usaron dos modelos de sensores de la empresa CO2 Meter, Inc. El primero mide concentraciones de CO₂ que van desde 0% hasta 30%, mientras el segundo soporta atmósferas de hasta 100% CO₂. En particular el sensor de 0-30% brinda también tanto la temperatura como la humedad relativa. El segundo modelo se completó con los sensores de temperatura Electronic Brick 3362 y de humedad relativa HIH-4030/31. Para la regulación automática del nivel de concentración de CO₂ y de humedad relativa se instalaron tres válvulas de expansión electrónica de la empresa Fujikoki Corporation. La primera válvula regulaba el flujo de gas proveniente del balón de CO₂, en cambio las otras dos válvulas controlaban la mezcla de aire seco y aire húmedo proveniente del compresor y del humificador, respectivamente. La figura 6 muestra la distribución de los diferentes componentes del sistema de alimentación de los gases, las interconexiones, el microcontrolador y la una unidad de control, implementados en una interfaz de LabVIEW®.



Figura 5. Cámara de carbonatación acelerada.

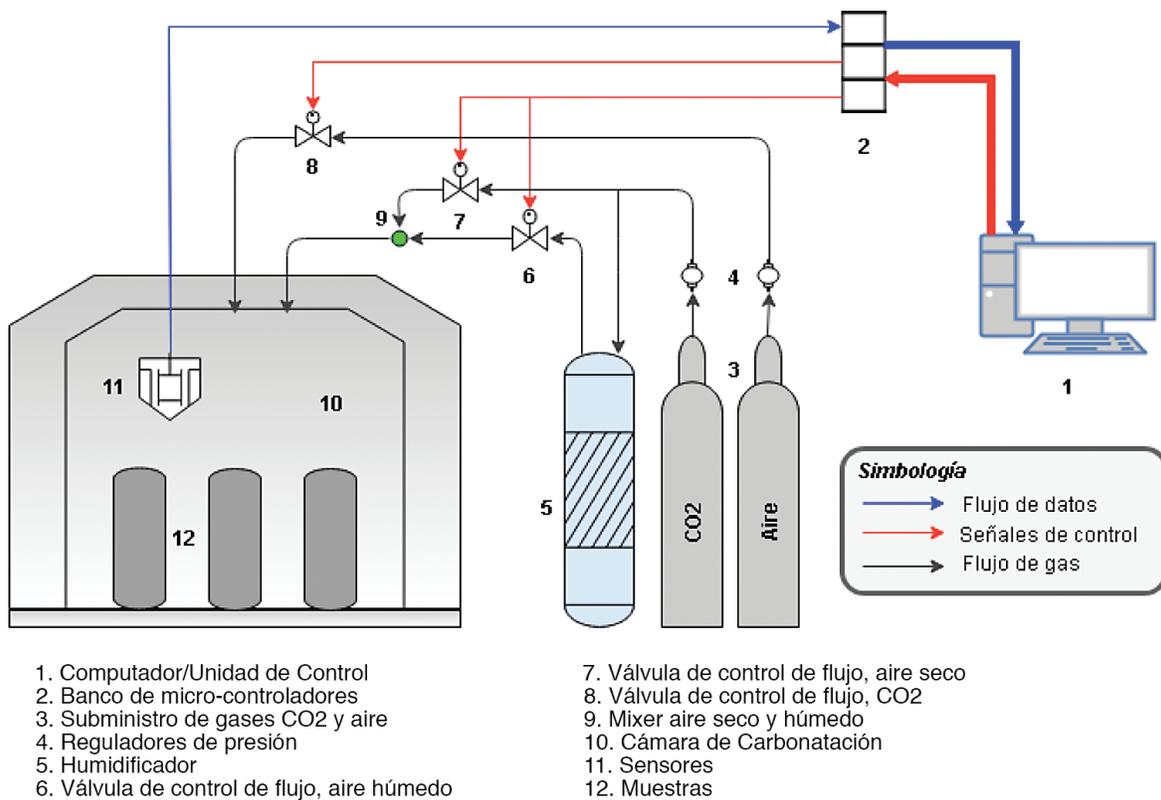


Figura 6. Componentes de la cámara de carbonatación acelerada.

Ensayos de carbonatación acelerada

Los especímenes de ensayo se dividieron en un total de 6 grupos, uno para cada tiempo de carbonatación acelerada indicado en el cuadro 5. Cada grupo estaba formado por siete especímenes, de los cuales cuatro fueron sometidos a carbonatación y tres se usaron como testigos para los ensayos mecánicos de control. Los 24 especímenes sometidos a las pruebas de carbonatación fueron sellados con papel aluminio en las bases, permitiendo así condiciones de carbonatación a través de la superficie cilíndrica exterior, es decir en dirección radial. De los cuatro especímenes carbonatados de cada grupo, uno se usó para los análisis químicos y tres para las pruebas mecánicas. Los tres especímenes de cada grupo no expuestos al CO₂ se mantendrían para comparar el desempeño mecánico entre las muestras carbonatadas y no carbonatadas. Antes de iniciar el proceso de carbonatación acelerada, las muestras se secaron en un horno a 60°C durante 24 horas y posteriormente fueron expuestas en la cámara de carbonatación a una humedad relativa del 65%, durante un periodo de 7 días.

Cuadro 5. Tiempo de exposición de las muestras en la cámara de carbonatación acelerada.

Grupo	1	2	3	4	5	6
Días de exposición	2	4	8	16	28	44

Después del acondicionamiento, las muestras fueron sometidas a una concentración de CO₂ de 25%, con humedad relativa de 65% y registrando los valores de temperatura.

Extracción y preparación de las muestras

En correspondencia de cada tiempo de extracción, el espécimen para el análisis químico fue cortado en discos transversales (figura 7). De acuerdo al avance de carbonatación en dirección radial r , revelado usando el indicador fenolftaleína, se recabaron muestras en el disco de concreto, en la superficie externa ($r = 0$), para valores del radio de 5, 10, 15, 20 mm y en el centro del disco ($r = 50$ mm). Las muestras se obtuvieron por perforación y extrayendo en varios puntos circunferenciales a la distancia r , luego fueron molidas con mortero, homogenizadas (figura 7) y analizadas con difracción por rayos X y termogravimetría (TGA).



Figura 7. Extracción y preparación de las muestras para análisis con difracción de rayos X y TGA.

Resultados y análisis

Los resultados del ensayo colorimétrico con el indicador fenolftaleína se muestran en figura 8. El cuadro 6 y la correspondiente figura 9 proporcionan los valores medio de la profundidad de carbonatación en función del tiempo de exposición. Se observa el avance radial del frente de carbonatación, el cual ya alcanza 4 mm de profundidad para dos días de exposición en la cámara con una atmosfera con el 25% de CO_2 . Los valores experimentales confirman el comportamiento asintótico de la carbonatación en el tiempo. En efecto la velocidad del avance del frente de carbonatación inicialmente es mayor y sucesivamente disminuye, brindando una pendiente siempre menor que es típica de los fenómenos difusivo- reactivos que controlan el mecanismo de carbonatación del concreto. Los valores anteriores han sido confirmados por los análisis de difracción de rayos X. Los resultados, obtenidos para las muestras con diferentes tiempos de carbonatación, indican la presencia de calcita en la parte más externa de la sección transversal del concreto, que disminuye a medida que se avanza hacia la región central. La figura 10, que se refiere a los ensayos difraccionometricos en el espécimen con un tiempo de exposición de 28 días, evidencia este comportamiento señalando adicionalmente la presencia de anortita (aluminosilicato de calcio). El análisis por TGA confirma la presencia de CaCO_3 y la disminución de su concentración con la profundidad, como muestra el grafico de figura 11. En el grafico se observa la descomposición de la calcita a una temperatura cercana a los 700 °C, para diferentes profundidades del espécimen con 44 días de exposición. Finalmente, la figura 12 brinda los valores medios de la resistencia a compresión de las muestras carbonatadas en correspondencia de los diversos tiempos de carbonatación ensayados. De acuerdo a los resultados experimentales se nota una disminución de esta propiedad mecánica con un aumento del tiempo de carbonatación.

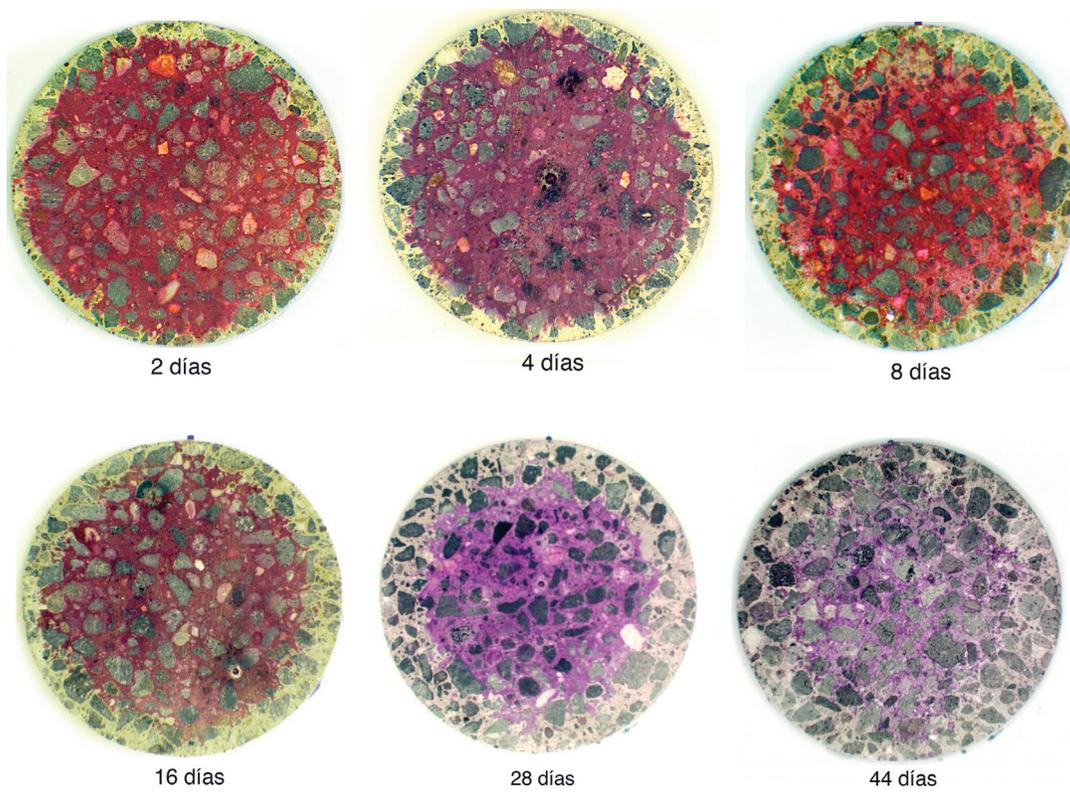


Figura 8. Profundidad de penetración de carbonatación mediante la prueba colorimétrica con fenolftaleína al 1% en función del tiempo de exposición.

Cuadro 6. Resultados de la prueba de colorimetría, que indican la profundidad de carbonatación promedio en función de los días de exposición

Días de exposición	2	4	8	16	28	44
Profundidad de carbonatación (mm)	4	6	8	10	12	15

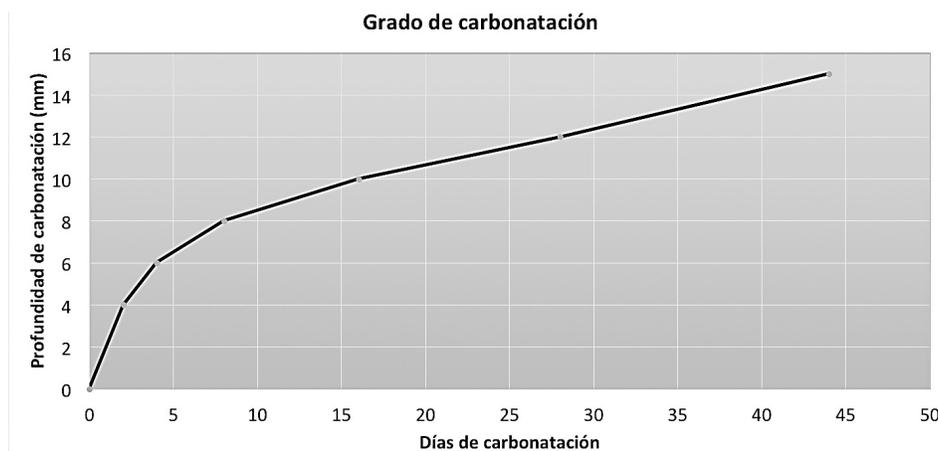


Figura 9. Profundidad de carbonatación (promedio) en función de los días de exposición.

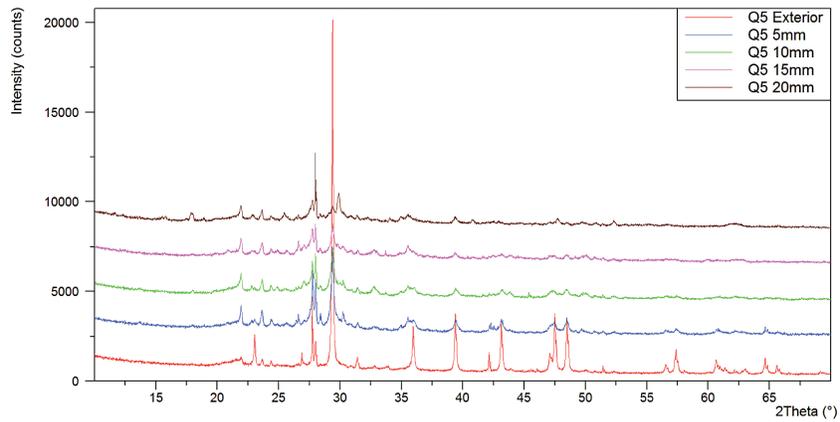


Figura 10. Difracción de rayos X de la muestra con 28 días de exposición, para diferentes profundidades (C: calcita (CaCO_3), A: anortita ($\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$)).

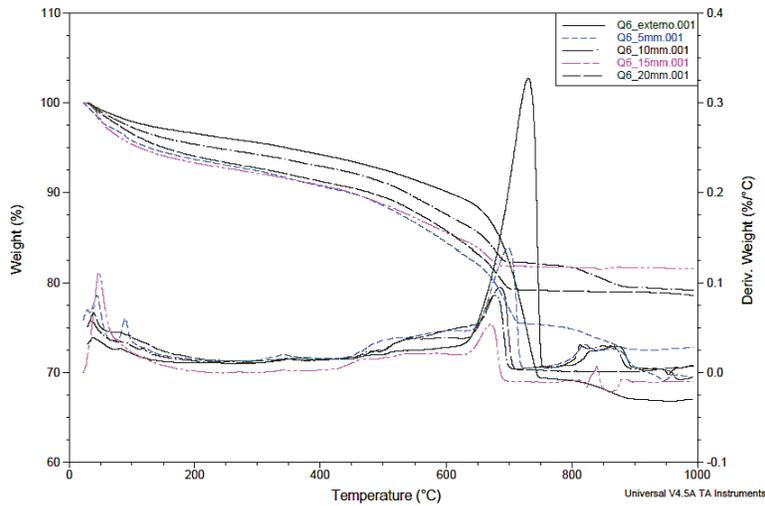


Figura 11. Análisis TGA de la muestra de concreto carbonatado con 44 días de exposición.

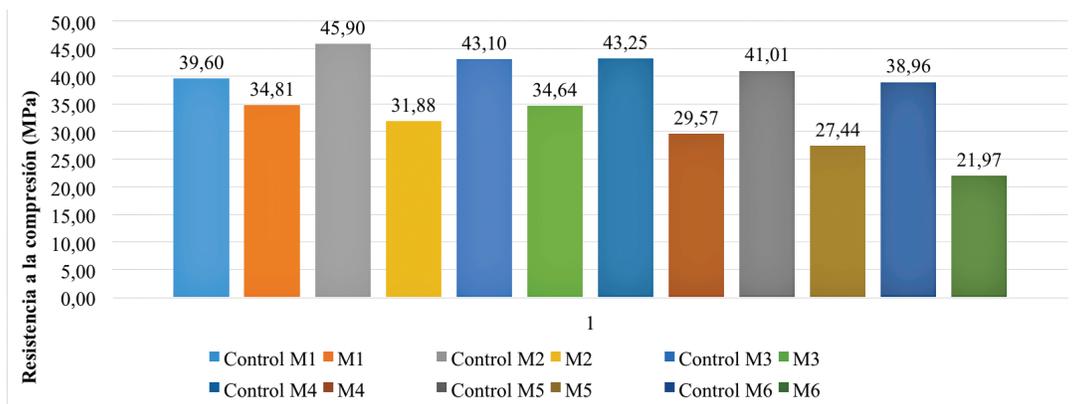


Figura 12. Resistencia a compresión de las muestras de concreto para los diferentes tiempos de carbonatación de cuadro 5.

Conclusiones

Se ha desarrollado un trabajo experimental de carbonatación de muestras de concreto en condiciones aceleradas, con una atmosfera de 25% de CO₂ y humedad relativa del 65%. Se han realizado ensayos de difracción de rayos X y químicos con el propósito de obtener datos experimentales del avance de la profundidad de carbonatación en los especímenes y de resistencia a compresión de estos. Los resultados obtenidos demuestran la efectividad del proceso en la cámara de carbonatación acelerada y brindan además la variación de la resistencia a compresión del concreto con el avance del frente de carbonatación en el tiempo.

Agradecimientos

Se agradece la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del ITCR en el marco del proyecto “*CORROSIÓN DEL CONCRETO REFORZADO Y DEGRADACIÓN DE SUS PROPIEDADES MECÁNICAS (CODE_MEC1): Etapa 1 Estudio experimental y modelación computacional de la carbonatación del concreto*”, código 1490017.

Referencias

- [1] Wang X., Nguyen M., Stewart M., Syme M. and Leitch A., *Analysis of climate change impacts on the deterioration of concrete infrastructure. Part 1: Mechanisms, Practices, Modeling and Simulations - A Review*, CSIRO, Canberra, 2010.
- [2] ASCE, *Report card for America's infrastructure*, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2013.
- [3] Morcillo M., Almeida M.E.M., Rosales B.M., Uruchurtu J. y Marrocos M., *Corrosión y Protección de metales en las atmosferas en Iberoamérica-Parte 1, Programa CYTED*, Madrid, 1998.
- [4] Hayden H. W., Mofatt W.G. and Wulff J., *The structure and properties of materials, Vol. III Mechanical Behavior*, John Wiley and Sons, New York, 1965.
- [5] Muñoz F.M., *Componentes principales de las mezclas de concreto*, Editorial de la Universidad de Costa Rica, San Pedro, Costa Rica, 1998.
- [6] Neville A.M., *Tecnología del concreto*, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, Editorial Limusa, México, 1998.
- [7] ACI 318 S-14, *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural y Comentario*, American Concrete Institute, USA, 2010.
- [8] Tuutti K., *Corrosion of steel in concrete*, Swedish Cement and Concrete Institute RIT-Stockholm, 1982. [9] Papadakis V.G., Vayenas C.G. and Fardis M.N., A reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation, *American Inst. of Chemical Engineers*, 35, N.10, 1639-1650, 1989.
- [9] Papadakis V.G., Vayenas C.G. and Fardis M.N., A reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation, *American Inst. of Chemical Engineers*, 35, N.10, 1639-1650, 1989.
- [10] Papadakis V.G., Vayenas C.G. and Fardis M.N., Experimental investigation and mathematical modelling of the concrete carbonation problem, *Chemical Engineering Science*, 46, N.5/6, 1333-1338, 1991.
- [11] Papadakis V.G., Fardis M.N. and Vayenas C.G., Fundamental Modeling and experimental investigation of concrete carbonation, *ACI Materials Journal*, 88, N.4, 363-373, 1991.
- [12] Papadakis V.G., Fardis M.N. and Vayenas C.G., Hydration and carbonation of pozzolanic cement, *ACI Materials Journal*, 89, N.2, 119-130, 1992.
- [13] Papadakis V.G., Fardis M.N. and Vayenas C.G., Effect of composition, environmental factors and cement-lime mortar coating on concrete carbonation, *Materials and Structures*, 25, 293-304, 1992.
- [14] Hyvert N., Sellier A., Duprat F., Rougeau P. and Francisco P., Dependency of C-S-H carbonation rate on CO₂ pressure to explain transition from accelerated tests to natural carbonation, *Cement and Concrete Research*, 40, 1582-1589, 2010.
- [15] Zhiguon N. and Ri Y., Experimental investigation of concrete carbonation under different conditions, *Study of Civil Engineering and Architecture (SCEA)*, 2, N.4, 114-117, 2013.

- [16] Chi J.M., Huang R. and Yang C.C., Effects of carbonation on mechanical properties and durability of concrete using accelerated testing method, *Journal of marine science and technology*, 10, N.1, 14-20, 2002.
- [17] Hills T.P., Gordon F., Florin N.H. and Fennell P.S., Statistical analysis of the carbonation rate of concrete, *Cement and Concrete Research*, 72, 98-107, 2015.
- [18] Chávez-Ulloa E., Perez-Lopez T., Reyes-Trujeque J., Corvo-Perez F. y Osorno-Carrillo J.B., Carbonatación de concreto en atmósfera natural y cámara de carbonatación acelerada, *Revista CENIC-Ciencias Químicas*, 41, 2010.
- [19] Pham S. T., Experimental Investigation and Modelling of Carbonation Process in Cement Materials, *The Open Civil Engineering Journal*, 7, 116-125, 2013.
- [20] Talukdar S., Banthia N. and Grace J., Carbonation in concrete infrastructure in the context of global climate change- Part 1: Experimental results and model development, *Cement and Concrete Composites*, 34, N. 8, 924-930, 2012.
- [21] American Society for Testing and Materials, *ASTM C 29 Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*, 2017.
- [22] American Society for Testing and Materials, *ASTM C 127: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*, 2015.
- [23] American Society for Testing and Materials, *ASTM C 128: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*, 2015.
- [24] American Society for Testing and Materials, *ASTM C 136: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*, 2014.
- [25] American Society for Testing and Materials, *ASTM C192: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*, 2016.

Otro uso importante de los hongos

Other important use of mushrooms

Catalina Rosales-López¹

Fecha de recepción: 6 de marzo de 2018

Fecha de aprobación: 7 de setiembre de 2018

Rosales-López, C. Otro uso importante de los hongos. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-2. Abril-Junio 2019. Pág 82-90.

DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v32i2.4351>

¹ Profesor-Investigador, Escuela de Biología, Centro de Investigación en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: crosales@tec.ac.cr.



Palabras clave

Hongos; usos medicinales; pigmentos.

Resumen

A los hongos se le atribuyen muchos beneficios sobre la salud humana, tal como a las plantas medicinales. No todos son venenosos o comestibles, existen otros usos importantes. En este artículo se resalta la propiedad que tienen los hongos para obtener pigmentos naturales. Los colorantes obtenidos de microorganismos cuentan con la ventaja de ser pigmentos con tonalidades específicas, sin efectos nocivos para la salud y con múltiples beneficios económicos a nivel industrial. Esta investigación tuvo como objetivo la obtención de pigmentos naturales (carotenoides específicamente) para su uso en animales a partir de dos hongos: *Pycnoporus sanguineus* y *Rhodotorula spp.* *P. sanguineus* se encuentra como cuerpos fructíferos de color rojo-anaranjado, ha sido estudiado principalmente para degradar lignina y celulosa de la madera y por la producción de cinabarina (antibiótico). En el caso de *Rhodotorula spp* es una levadura, sus colonias se caracterizan por ser de color anaranjado brillante, ha sido muy estudiada por la presencia de carotenoides. En el laboratorio, se aislaron y purificaron en medio sólido, se realizaron pruebas de medios líquidos que favorecieran su crecimiento y producción del colorante y se realizó el escalamiento para la mayor obtención de biomasa y por ende, del pigmento. Los hongos fueron liofilizados, se realizó una ruptura células con nitrógeno líquido y se tamizó, obtenido un polvo fino que se les suministró a los animales como parte de su dieta, con quienes se logró aumentar la coloración de la yema del huevo, de 12 a 14 de tonalidad, según el abanico de color amarillo.

Keywords

Mushrooms; medicinal uses; pigments.

Abstract

The fungi are attributed many benefits on human health, such as medicinal plants. Not all are poisonous or edible, there are other important uses. In this article, the property of fungi to obtain natural pigments is highlighted. The dyes obtained from microorganisms have the advantage of being pigments with specific shades, without harmful effects for health and with multiple economic benefits at an industrial level. This research aimed to obtain natural pigments (carotenoids specifically) for use in animals from two fungi: *Pycnoporus sanguineus* and *Rhodotorula spp.* *P. sanguineus* is found as red-orange fruiting bodies, it has been studied mainly to degrade lignin and wood cellulose and for the production of cinnabarin (antibiotic). In the case of *Rhodotorula spp* is a yeast, its colonies are characterized by being bright orange, has been studied for the presence of carotenoids. In the laboratory, they were isolated and purified on solid media, liquid media tests were carried out that favored their growth and production of the dye, and scaling was carried out to obtain the highest biomass and, therefore, the pigment. The fungi were lyophilized, cells were ruptured with liquid nitrogen and sieved, obtaining a fine powder that was given to the animals as part of their diet, with which it was possible to increase the egg yolk coloration, from 12 to 14 of tonality, according to the yellow fan.

Introducción

El reino Fungi representa uno de los más grandes acervos de biodiversidad con actividades biológicas, dada la gran diversidad que abarca (setas, levaduras, mohos, entre otros). Algunos

hongos son muy grandes pero otros son tan pequeños que sólo pueden verse utilizando un microscopio. Entre los organismos incluidos en la categoría de hongos se pueden describir, en su mayoría, como filamentosos con crecimiento apical, eucarióticos, heterótrofos por absorción, con reproducción asexual y sexual por medio de esporas, y con pared celular principalmente constituida por quitina o celulosa [1]. Se estiman alrededor de 140 000 hongos en la tierra y solo se conocen los usos del 10% de ellos, entre los cuales se encuentran los champiñones (hongos comestibles) que son solo el 5%, lo que implica que son 7000 todavía las especies no descubiertas que podrían tener un posible beneficio para la humanidad [2] y [3].

Su importancia es innegable en muchas áreas, tanto para el ser humano como para el medio ambiente en general. Durante milenios, los hongos han sido valorados por la humanidad como un recurso comestible y médico. Su consumo es sumamente popular en la gastronomía de ciertas regiones; quizá los champiñones y setas son los hongos más consumidos. En cuanto a lo medicinal, se han identificado varias moléculas bioactivas, incluidas sustancias antitumorales, en muchas especies de hongos [4], [5], [6], y [7]. Los polisacáridos son las sustancias derivadas de las setas más conocidas y más potentes con propiedades antitumorales e inmunomoduladoras [8] y [9].

Otras actividades que se le atribuyen a los hongos están: antimicrobianos [10]. Efecto antiviral [11]. Manejo de plagas como fitopatógenos, [12] y [13]. Bioantagonistas como *Paenibacillus lentimorbus*, *Trichoderma harzianum* y *Trichoderma polysporum*, pueden controlar el fitopatógeno *Rhizoctonia solani* [14].

Y el atributo que se desea resaltar en esta publicación es, como proveedores de pigmentos naturales (sustancias coloridas sintetizadas, acumuladas o excretadas a partir de células), que pueden ser empleados para colorear alimentos, en la industria farmacéutica y textil. Estos colorantes cuentan con la ventaja de que pueden ser de tonalidades específicas, sin efectos nocivos para la salud y con múltiples beneficios económicos a nivel industrial, desplazando a los pigmentos sintetizados químicamente, que presentan desventajas toxicológicas [15].

Los hongos filamentosos son los microorganismos más importantes y estudiados en la obtención de pigmentos naturales, en especial los géneros *Monascus spp* (reconocidos por producir monacolina, pigmentos amarillos, anaranjados y rojos), *Paecilomyces spp.*, *Aspergillus spp* y *Penicillium spp*. Pero además de los hongos filamentosos, también las levaduras son utilizadas para producir pigmentos rojos de importancia en alimentos.

Con esta investigación se extrajeron los pigmentos naranjas de un hongo filamentoso *Pycnoporus sanguineus* y una levadura: *Rodotorula sp*.

Materiales y métodos

Esta metodología se desarrolló en los laboratorios del Centro de Investigación en Biotecnología (CIB) del Instituto Tecnológico de Costa Rica, como parte de un proyecto de investigación, en conjunto con la empresa Laboratorios Gaher S.A., y con quienes se está tramitando el licenciamiento del proceso de producción, razón por la cual las metodologías y resultados presentados son muy limitados.

Aislamiento y purificación

Tanto la levadura como el cuerpo fructífero se introdujeron en medio sólido por medio de técnicas biotecnológicas. Se aisló y purificó el microorganismo realizando varios subcultivos en medio estéril nuevo. Una vez puro, se realizó prueba de medios de cultivo (sintéticos y de bajo costo) para determinar en cuál de ellos aparece mayor pigmento.

Establecimiento en medio líquido

Se realizó una prueba de medios líquidos para determinar en cuál de ellos se producía mayor coloración. Los microorganismos puros se pusieron a crecer en Erlenmeyer de 250ml durante 4 días. Una vez optimizadas las condiciones de cultivo se realizó escalamiento en Biorreactores de 10L.

Obtención de colorantes

Se separa el microorganismo del medio de cultivo para poder recuperar el pigmento, para ello se utilizaron técnicas sencillas de extracción y disrupción celular. Se realizó una identificación y cuantificación de los carotenoides presentes.

Prueba de efectividad del colorante

Esta metodología se realizó con la ayuda de los veterinarios de Laboratorios Gaher S.A. Se compraron diez codornices hembras y un macho, de coloración negra, rompiendo postura (estado fisiológico) y en condiciones óptimas de salud. Las 10 codornices se dividieron en dos grupos, uno control y otro al que se le proporcionó el extracto de hongos.

Primero se les definió una dieta común, dieta *El Campesino* para ponedoras (producto comercial), durante una semana hasta su adaptación. Durante la primera producción de huevos se analizaron la coloración inicial de las yemas. La coloración de la yema se comparó con un abanico de colores de la yema de huevo de aves, Basf®-Alemana, con un gradiente de tonos de amarillo que van desde amarillo pálido (color paja) hasta un amarillo naranja-rojo intenso, con gradiente numérico de 1 a 15 respectivamente (Figura 3). Seguido, se decidió reducir la coloración de la yema, para determinar el aumento de color, para ello se les sometió a una dieta empírica, donde se suprimió de carotenos. Para finalmente, suministrar una tercera dieta incluyendo el extracto de hongos a una concentración de 100mg/kg.

Se realizaron pruebas sensoriales para determinar alguna variación en el sabor del huevo, color de la cáscara y brillantez de la membrana de la yema.

Resultados y discusión

Los hongos constituyen una fuente abundante de bioproductos que abarca enzimas, ácidos orgánicos, extractos proteicos, vitaminas y metabolitos secundarios. La producción de pigmentos naturales con el empleo de microorganismos y en particular, hongos, recientemente ha tomado gran auge. La variedad de metabolitos secundarios producidos por los hongos podría deberse a su incapacidad de sintetizar macromoléculas a partir de dióxido de carbono o de energía lumínica ya que no contienen clorofila, por lo tanto, su supervivencia depende de las condiciones ambientales y del sustrato donde se desarrollan [16]. Razón por lo cual, fue para nosotros importante, primero optimizar las condiciones de crecimiento y producción del pigmento, cumpliendo con lo exigido por los hongos, hasta lograr un cambio o alteración en su metabolismo, para originar gran cantidad de los compuestos de interés.

La principal característica de *Pycnoporus sanguineus*, es su coloración naranja fuerte, tanto en el cuerpo fructífero como el micelio *in vitro* (Figura 1), razón por la cual fue de interés para este proyecto. *Pycnoporus* es un hongo filamentoso perteneciente a los basidiomicetos, el cual ha sido estudiado principalmente por su capacidad para degradar lignina. Se encuentra ampliamente distribuido, creciendo de manera silvestre en ambientes tropicales y subtropicales, sobre sustratos tan diversos como troncos de encino, eucalipto, caucho, palma de aceite, e incluso sobre troncos quemados [17]. También se ha reportado su interés como colorante [18].

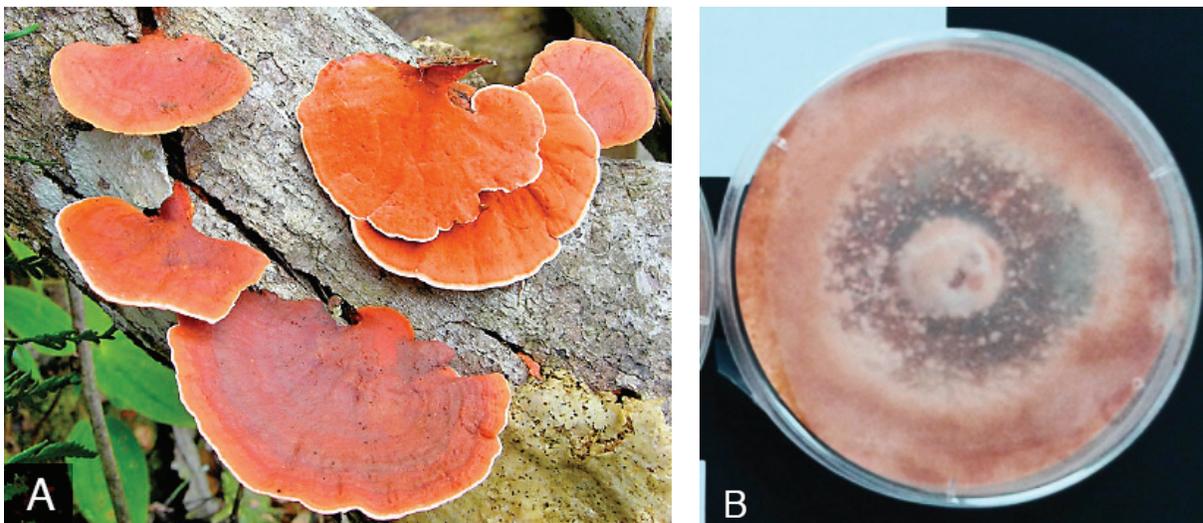


Figura 1. Hongo *Pycnoporus sanguineus*: A) Cuerpos fructíferos en el campo (fuente: <https://www.naturalista.mx/taxa/179081-Pycnoporus-sanguineus>) y B) Hongo cultivado *in vitro* en el laboratorio CIB

Por otro lado, el género *Rhodotorula* ya ha sido estudiado por la presencia de carotenoides, principalmente las variedades *R. glutinis* y *R. mucilaginosa*. *Rhodotorula* es una levadura roja oleaginosa que puede acumular tanto lípidos como β -caroteno como principales carotenoides [19]. A ella se le atribuyen varias acciones biológicas importantes como provitamina A, antioxidante, actividades anticancerígenas e inmunomodulación [20]. Las variedades analizadas en este estudio fueron *Rhodotorula. sp* y *R. rubra*, quienes presentaron un crecimiento en placa distinto, pero de coloración característica del género. En el caso de *R. rubra*, sus colonias eran de mayor tamaño y la tonalidad del naranja más fuerte a diferencia del *Rhodotorula sp*, quien presentaba tonalidades de naranja más claras (figura 2).

Las coloraciones se deben al grupo de carotenoides presentes. Los carotenoides son pigmentos orgánicos liposolubles formados a partir de unidades de isopreno, principalmente de 40 carbonos, que se encuentran ampliamente distribuidos en la naturaleza (plantas, microalgas, bacterias, levaduras y hongos). Hasta el momento se reportan más de 600 carotenoides conocidos, que involucran diversas funciones tales como precursores de vitamina A, agentes antioxidantes, pigmentos fotosintéticos y de alimentos, atrayentes visuales en el cortejo entre animales o bien, en procesos de polinización entre insectos y flores [21] y [22]

Como se observa en las figuras 1 y 2, los colorantes naturales obtenidos a partir de los microorganismos analizados, se producen paralelo al crecimiento de biomasa del mismo. Este tipo de pigmentos son sustancias coloridas sintetizadas, acumuladas en las células, la cuales pueden ser empleadas para colorear los alimentos, evitando las desventajas toxicológicas de los pigmentos sintetizados químicamente.

Esta nueva forma de producción de colorantes a partir de microorganismos, se obtiene gracias a la presencia de metabolitos secundarios con tonalidades específicas, sin efectos nocivos para la salud y con múltiples ventajas económicas a nivel industrial [23]. En el continente asiático, no sólo se utilizan para colorear alimentos, sino también en la industria farmacéutica y textil, como conservadores de carne y pescado, como agentes de sabor debido a sus aromas y sabores especiales, y en la producción de vino de arroz rojo[24].

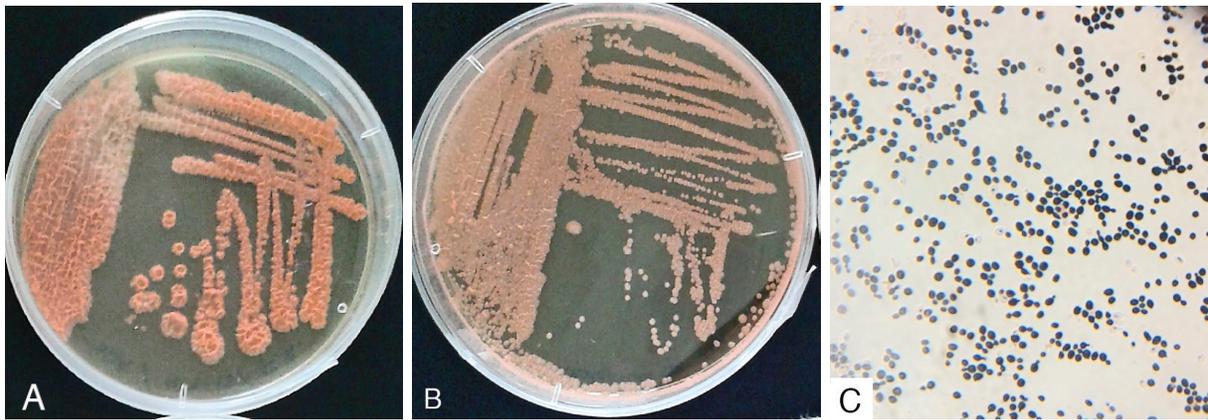


Figura 2. Levadura *Rhodotorula* crecida en medio sólido A) *Rhodotorula rubra* y B) *Rhodotorula* sp y la identificación de ambas al microscopio

En cuanto a la prueba de efectividad de los pigmentos naturales obtenidos, se puede decir que la dieta común suministrada para ponedoras (producto comercial), permitió la producción de huevos por parte de todas las codornices. Al analizar la coloración de las yemas con el abanico de colores de yema de huevo de aves, Basf-Alemana (figura 3), se determinó que las yemas obtenidas por las codornices sin suministrar el extracto se encuentran dentro del gradiente 12 (aunque la sombra en la foto no ayuda mucho a ver la debilidad del color).



Figura 3. Abanico de colores para yema de huevo de aves, marca Basf®-Alemana

Al variar la dieta, a un alimento sin xantinas (carotenoides) se observó una disminución en la tonalidad de la yema (figura 4, D), así como un aumento gradual en la coloración al suministrarles *Rhodotorula* y *Pycnoporus* (figura 4, C y E, respectivamente).

Con los resultados anteriores, se puede observar como al suministrar los extractos de hongos, el tono de la coloración de la yema aumentó efectivamente, logrando obtener yemas con una tonalidad hasta 14, según la marca Basf®-Alemana.

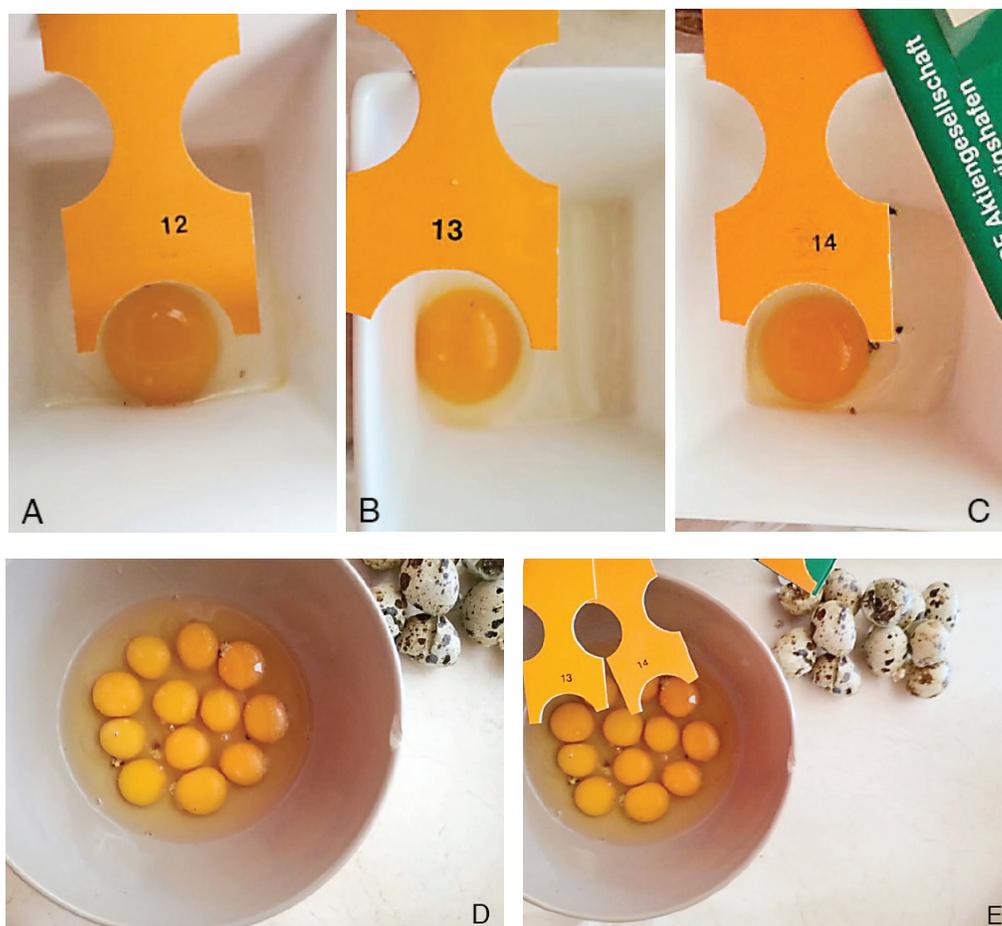


Figura 4. Prueba de coloración de la yema de huevo. A) Coloración de la yema de huevo, proporcionándoles a las codornices una dieta comercial. B) Coloración de la yema de huevo gracias al extracto de *Pycnoporus sanguineus*, C) Coloración de la yema de huevo proporcionándoles a las codornices extracto de *Rhodotorula*. D) Yemas de huevo con una dieta sin ningún carotenoide (ni comercial ni con los extractos de hongos). E) Yemas de huevo coloradas con extractos de hongos.

Al realizar las pruebas sensoriales al huevo, se determinó que no hubo variación en el sabor del huevo, pero sí la apariencia de la membrana que cubre la yema obteniendo un brillo más intenso. La levadura afecta apreciablemente la pigmentación de la yema, una dieta que contiene aproximadamente de 1% a 2% de levadura seca aumentó el color de la yema. La incorporación de la levadura a la dieta de los pollos es un amplio uso comercial, ya que aparte de que proporcionan coloración a la yema, brindan altas concentraciones de vitaminas del complejo B, proteínas y minerales [25]

Actualmente, existe evidencia científica que expone los beneficios potenciales de los carotenoides en la salud animal y humana. En humanos los beneficios incluyen un incremento de la respuesta inmune, fuente de precursores para vitamina A, agente captador de radicales de oxígeno, y se ha sugerido la inhibición del inicio de enfermedades tales como arterosclerosis, esclerosis múltiple y cáncer, en donde los radicales libres juegan un papel importante en su iniciación [21], [26], [27] y [28]. En el caso de los animales, no pueden sintetizar carotenoides por lo que su presencia en estos organismos se asocia al consumo de estos a través de la dieta. Como elemento adicional cabe destacar que para el año 2005 se estimó un mercado global de \$935 millones asociado al uso de carotenoides como suplemento nutritivo y colorante de alimentos [29].

Conclusiones

Las especies de *Rhodotorula* analizadas en este estudio, coinciden con las otras especies del género ya estudiadas por otros investigadores, donde describen a la levadura como capaces de sintetizar pigmentos carotenoides. *Pycnoporus sanguineus* es un hongo cuya superficie de color rojo-anaranjado se debe a la presencia de carotenoides como pigmentos naturales. Dada la efectividad en la tinción de la yema de huevo, se comprueba que ambos hongos (tanto la levadura como el hongo filamentoso), tienen potencial como colorante natural.

Yo sé que por el licenciamiento del producto no se menciona mucho sobre el aislamiento, purificación y establecimiento del cultivo, pero no sé si es posible indicar muy sutilmente un poco para saber si es de fácil producción pensando en la comercialización.

Referencias

- [1] T. Herrera, y M. Ulloa. "El Reino de los Hongos: micología básica y aplicada". *Fondo de Cultura Económica de España*, 1990.552 p. ISBN: 9789681657376
- [2] DL. Hawksworth. "Mushrooms: the extent of the unexplored potential". *Int J Med Mushrooms*, vol.3, pp: 333–337, 2001. DOI: 10.1615/IntJMedMushr.v3.i4.50
- [3] P. Stamets. "Growing gourmet and medicinal mushrooms", 3rd Edition. *Ten Speed Press, Berkeley, California, EEUU*, 2000.
- [4] T. Mizuno, E. Yamaha, M. Wakahara, A. Kuroiwa, and H. Takeda. "Mesoderm induction in zebrafish". *Nature*, vol.383, N° 6596, pp: 131-132, 1996. DOI: 10.1038/383131a0
- [5] SP. Wasser, and AL. Weis. "Medicinal Properties of Substances Occurring in Higher Basidiomycetes Mushrooms: Current Perspectives". *International Journal of Medicinal Mushrooms*, vol. 1, pp: 31-62, 1999. DOI: <http://dx.doi.org/10.1615/IntJMedMushrooms.v1.i1.30>
- [6] SP. Wasser and AL. Weis. "Therapeutic effects of substances occurring in higher Basidiomycetes mushrooms: a modern perspective". *Crit.Rev Immunol*, vol. 9, N° 1, pp: 65-96, 1999. DOI: [7] T. Ikekawa. "Beneficial effects of edible and medicinal mushrooms in health care". *Int J Med Mushrooms* vol.3, pp: 291–298, 2001. DOI: [http://www.dl.begellhouse.com/download/article/265eb15d56891c02/IJM%200302-3%20\(79\).pdf](http://www.dl.begellhouse.com/download/article/265eb15d56891c02/IJM%200302-3%20(79).pdf)[8] V.E.C. Ooi y F. Liu. "A review of pharmacological activities of mushroom polysaccharides". *Int J Med Mushrooms*, vol.1, pp: 195– 206, 1999. DOI: 10.1615/IntJMedMushrooms.v1.i3.10[9] S.V. Reshetnikov, S.P. Wasser, K.K. Tan. "Higher Basidiomycota as a source of antitumor and immunostimulating polysaccharides". *Int J Med Mushrooms*, vol. 3, pp: 361–394, 2001
- [10] U. Lindequist, E. Teuscher, G. and Narbe. "Neue Wirkstoffe aus Basidiomyceten". *Z Phytother*, in German; 244páginas, 1990. [11] C.R. Brandt and F. Piraino. "Mushroom antivirals". *Recent Res Dev Antimicrob Agents Chemother*, vol. 4, pp:11–26, 2000.
- [12] S. Ahmed, C. Pérez, C. Egea and M.E. Candela. "Evaluation of the capacity of *Trichoderma harzianum* controlling rot caused by *Phytophthora capsici* in pepper plants". *Plant Pathol*, Vol.48, pp: 58-65, 1999. DOI: 10.1046/j.1365-3059.1999.00317.x
- [13] M. Ezziyani, C. Sánchez, M.E. Requena, S. Ahmed y M. Candela. "Evaluación del biocontrol de *Phytophthora capsici* en pimiento (*Capsicum annum* L.) por tratamiento con *Burkholderia cepacia*". *Anales de Biología*, vol. 26, pp: 61-68, 2004. DOI: <http://revistas.um.es/analesbio/article/view/30461>
- [14] A.R. Podile and V.DV. Laxmi. "Seed bacterization with *Bacillus subtilis* AF1 increases phenylalanine ammonia lipase and reduces the incidence of fusarial wilt in pigeonpea". *Journal Phytophathol*, vol. 146, pp: 255-259, 1998. DOI: 10.1111/j.1439-0434.1998.tb04687.x
- [15] E., M. Aguirre-Acosta, S. Ulloa, J. Aguilar, R. Cifuentes. "Biodiversidad de hongos en México". *Revista Mexicana de Biodiversidad*, vol. 85, pp: 76-81, 2014. DOI: 10.7550/rmb.33649
- [16] A. Zuluaga-Montero, C. Toledo-Hernández, J.A. Rodríguez, A.M. Sabat, and P. Bayman. "Spatial variation in fungal communities isolated from healthy and diseased sea fans *Gorgonia ventalina* and seawater". *Aquat Biol*, vol. 8, pp: 151–160, jun.2010. DOI: 10.3354/ab00218
- [17] L. Acosta-Urdapilleta, G. A. Paz, M. Rodríguez, D. Salgado, J. Salgado, M. Montiel-Peña, F. Medrano-Vega, y E. C. Villegas Villarreal. "*Pycnoporus sanguineus*, un hongo con potencial biotecnológico", *Hacia un Desarrollo*



Sostenible del Sistema de Producción-Consumo de los Hongos Comestibles y Medicinales en Latinoamérica: Avances y Perspectivas en el Siglo XXI. Capítulo 28, pp. 531-562.

- [18] D. Martínez-Carrera, M. Sobal, P. Morales, W. Martínez, M. Martínez y Y. Mayett “Los hongos comestibles: propiedades nutricionales, medicinales, y su contribución a la alimentación mexicana”. *Colegio de Postgraduados, Campus Puebla, Biotecnología de Hongos Comestibles*. Puebla, México.
- [19] D. Somashekar and R. Joseph. “Inverse relationship between carotenoid and lipids formation in *Rhodotorula gracilis* according to the C/N ratio of the growth medium World”. *J Microbiol Biotechnol*, vol.16 pp. 491-493, 2000.
- [20] F. Granado, B. Olmedilla, E. Gil-Martinez and I. Blanco. “A fast, reliable and low-cost saponification protocol for analysis of caretenoids in vegetables”. *Journal Food Comp Analyze*, vol.14, pp. 479-489, 2001.
- [21] G. Ferengova and D. Beshkova “Carotenoids from *Rhodotorula* and *PhaYa*: Yeasts of biotechnological importance”. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, vol. 36, pp: 163-180, 2009.
- [22] J. Kim, N. Lee, Y. Hahm, M. Baik and B.Kim. “Extraction of β -carotene produced from yeast *Rhodospirium* sp. and its heat stability. *Food Science and Biotechnology*, vol. 19, N°1, pp: 263-266, 2010
- [23] L.C. Mata-Gómez, J.C. Montañez, A. Méndez-Zavala and C.N. Aguilar. “Biotechnological production of carotenoids by yeasts”. *Microbial Cell Factories*, Vol.13, pp.12, 2014. DOI: <http://www.microbialcellfactories.com/content/13/1/12>
- [24] P. Buzzini, M. Innocenti, B. Turchetti, D. Libkind, M. Van Broock and N. Molinacci “Carotenoid profiles of yeast belonging to the genera *Rhodotorula*, *Rhodospiridium*, *Sporobolomyces*, and *Sporidiobolus*”. *Canadian Journal of Microbiology*, vol.53, pp: 1024-1031, 2007. DOI: 10.1046/j.1365-2672.2001.01319.x.
- [25] J. White, “Yeast technology”. *John Wiley & Sons, Inc.*, New York. 1954
- [26] A. Jimenez, I. Jimenez, C. Sanchez and F. Saura. “Evaluation of free radical scavenging of dietary carotenoids by the stable radical 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl”. *Journal of Science, Food and Agriculture*, vol.80, pp: 1686–1690, 2000. DOI: 10.1002/1097-0010(20000901)80:11<1686:AID-JSFA694>3.0.CO;2-Y
- [27] M. Forman, S. Hursting, A. Umar and J. Barret. “Nutrition and cancer prevention: a multidisciplinary perspective on human trials”. *Annual Reviews of Nutrition*, vol.24, pp: 223–254, 2004. DOI: <http://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.nutr.24.012003.132315>
- [28] Y. Kiokias and M.Gordon. “Antioxidant properties of carotenoids *in vitro* and *in vivo*”. *Food Reviews International*, vol.20, pp: 99–121, 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1081/FRI-120037155>
- [29] M. Certic, V. Hanusová, E. Breierová, I. Márová, and P. Rapta. “Biotechnological production and properties of carotenoid pigments”. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. Hou C, Shaw J (editores). Primera edición. CRC Press. Estados Unidos de América. 442p. 2009

Comparación de tres metodologías de aislamiento, purificación y cultivo *in vitro* de linfocitos T murinos

Comparison of three methodologies of isolation, purification and *in vitro* culture of murine T lymphocytes

María I. Chaves-Rodríguez¹, Johan E. Morales-Sánchez²,
Nazareth Mata-Rojas³, Laura A. Calvo-Castro⁴,
Erick Hernández-Carvajal⁵, Randall Loaiza-Montoya⁶

Fecha de recepción: 13 de junio de 2018
Fecha de aprobación: 6 de octubre de 2018

Chaves-Rodríguez, M; Morales-Sánchez, J; Mata-Rojas, N; Calvo-Castro, L; Hernández-Carvajal, E; Loaiza-Montoya, R. Comparación de tres metodologías de aislamiento, purificación y cultivo *in vitro* de linfocitos T murinos. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-2. Abril-Junio 2019. Pág 91-99.

DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v32i2.4352>



- 1 Investigador Instructor. Ingeniero en Biotecnología. Centro de Investigación en Biotecnología, Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: marchaves@tec.ac.cr
- 2 Investigador Instructor. Ingeniero en Biotecnología. Centro de Investigación en Biotecnología, Tecnológico de Costa Rica.
- 3 Ingeniero en Biotecnología. Centro de Investigación en Biotecnología, Tecnológico de Costa Rica.
- 4 Investigador Instructor. Investigador Adjunto. Doctora en Ciencias Naturales. Centro de Investigación en Biotecnología, Tecnológico de Costa Rica.
- 5 Investigador Asociado. Doctor en Biomedicina. Centro de Investigación en Biotecnología, Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: erhernandez@tec.ac.cr
- 6 Investigador. Doctor en Fisiología. Centro Nacional de Innovaciones Biotecnológicas (CENIBiot-CENAT)..

Palabras clave

CD3, amortiguador ACK; adherencia celular; Ficoll; microesferas magnéticas.

Resumen

El aislamiento y selección de linfocitos T puros de cultivo primario de bazo de ratón puede obtenerse de manera rápida y fácil utilizando *kits* comerciales con microesferas magnéticas para capturar y purificar las células. A pesar de estas ventajas, la carga financiera que puede representar para el presupuesto de un laboratorio, la adquisición constante de estos *kits* justifica la evaluación de otras opciones de menor costo. Por ello, se comparó el porcentaje de recuperación celular, viabilidad y pureza de tres métodos de aislamiento y purificación de linfocitos T; dos de bajo costo y fácil implementación (aislamiento con amortiguador de amonio-cloruro-potasio (ACK)-adhesión celular y aislamiento con Ficoll), y un *kit* comercial de selección negativa con microesferas magnéticas. Con el método de amortiguador ACK-adhesión celular se obtuvo un porcentaje de recuperación y purificación de linfocitos T viables comparable al obtenido con el *kit*. Aunque este método requiere más tiempo, dado que las células deben ser incubadas durante toda la noche, es de fácil implementación y tiene una eficiencia comparable al *kit*, así como un menor costo. Este método puede ser tomado en cuenta para utilizar en experimentos que puedan trabajar con linfocitos activados.

Keywords

CD3; ACK buffer; cellular adherence; Ficoll; magnetic microbeads.

Abstract

The isolation and selection of pure T lymphocytes from spleen primary culture can be obtained easily and quickly using commercial kits that use magnetic microbeads to capture and purify the cells. Despite these advantages, the financial burden that the constant acquisition of these kits can impose to a laboratory budget makes it important to evaluate other options. We compared the cell recovery, viability and purity percentage of three isolation and purification methods; two of them of low cost and easy implementation (cell adhesion of cultures treated with Ammonium-Chloride-Potassium (ACK) buffer, and Ficoll), and a commercial with kit of negative selection with magnetic microbeads. With the ACK-cell adhesion method, we found a recovery and purity percentage of lymphocytes T comparable to the one obtained with the kit. Although this method requires more time, as cells must be incubated overnight, it is easily implemented and has a comparable efficiency to the kit, as well as a lower cost. This method can be taken into account for experiments that can use activated cells.

Introducción

Los linfocitos T son células del sistema inmunitario adaptativo que generan una respuesta dirigida contra células que son consideradas como extrañas en el contexto del organismo por presentar antígenos de microorganismos patogénicos, células cancerígenas, partículas virales, etc[1]. Los linfocitos T se distinguen de otras poblaciones celulares del sistema inmune por medio de una serie de marcadores de membrana, como las proteínas de *cluster* de diferenciación: CD3, CD4 y CD8, que pueden ser utilizados para aislar esta fracción celular para su estudio particular [2]–[4]. Su estudio se ha desarrollado tanto en enfermedades propias del sistema inmune como patologías autoinmunitarias [5], deficiencias en la respuesta inmunitaria [6], [7] alergias[8], y enfermedades complejas como el cáncer (en el caso de linfomas y leucemias), desde el punto de vista patológico y terapéutico[9]–[12].

El estudio de linfocitos T a nivel *in vitro* se ha establecido a través de protocolos de aislamiento basados en las propiedades del cultivo (son células que crecen en suspensión y pueden ser seleccionadas por afinidad a anticuerpos específicos). Sin embargo, los diferentes métodos varían en el costo, el tiempo de implementación, la necesidad de realizar cultivo celular tras el aislamiento, así como en la reproducibilidad y confiabilidad [13]. De igual manera, el rendimiento en la recuperación y pureza puede variar entre los diferentes métodos.

Actualmente, existen *kits* comerciales de purificación de linfocitos mediante selección por anticuerpos acoplados a microesferas magnéticas. La afinidad de la unión célula-anticuerpo garantiza que la fuerza magnética permita recuperar la fracción celular con rendimientos y pureza muy altos [14]. Sin embargo, estos *kits* poseen un costo económico alto, lo cual constituye una limitante en laboratorios con presupuestos limitados. Algunos de los protocolos tradicionales de aislamiento de linfocitos han reportado buenos rendimientos [3]; sin embargo, no se ha realizado una comparación de este tipo de protocolos con respecto al rendimiento presentado con el empleo de *kits* de microesferas magnéticas, lo cual podría representar una disminución de costos económicos en un procedimiento fundamental del cual se derivan células para otras aplicaciones. Así, el objetivo de este trabajo fue comparar la eficiencia en recuperación y pureza de linfocitos T murinos de dos protocolos tradicionales, utilizando separación con solución amortiguadora ACK y separación con Ficoll, con un protocolo comercial más reciente de aislamiento por selección negativa empleando microesferas magnéticas.

Metodología

Todos los experimentos que involucraron el uso de animales fueron previamente aprobados por el Comité sobre el Cuido y Uso de Animales (CICUA-044-2015) de la Universidad de Costa Rica (UCR).

Se utilizaron ratones sanos adultos de aproximadamente 3 meses de edad y 25 g de peso, de la cepa C57BL/6J, provenientes del Laboratorio de Ensayos Biológicos (LEBi) de la UCR o bien, criados en el Centro Nacional de Innovaciones Biotecnológicas (CENIBiot). Todos los animales se mantuvieron en cautiverio durante el tiempo previo a los ensayos, en condiciones de alimentación y agua *ad libitum* con recambio de jaula una vez por semana, en condiciones de aislamiento ambiental con filtros de aire de alta eficiencia tipo HEPA (*High Efficiency Particulate Air*).

Extracción de órgano

Para la extracción del bazo, se utilizó una combinación de 100 mg/kg ketamina + 10 mg/kg xilacina inyectada por vía intraperitoneal como anestesia quirúrgica en los animales. Posteriormente, se realizó dislocación cervical como método de eutanasia previo a la extracción del bazo. Luego, se retiró el pelaje de los animales cercano a la zona de incisión en el costado izquierdo del animal, y se realizó una desinfección con 50% etanol y 30% yodo v/v, transfiriendo finalmente el animal a una zona estéril.

Bajo técnica aséptica, se realizó una incisión vertical de aproximadamente 1.5 cm en el cuadrante abdominal superior izquierdo, justo por debajo de las costillas. Cuidadosamente se extrajo el bazo, y se eliminó todo el tejido conectivo o grasa que tuviera adherido. El bazo se transfirió a un tubo estéril con medio de transporte *Roswell Park Memorial Institute* (RPMI)-1640 + 5% penicilina-estreptomocina, a 4°C.



Aislamiento de células

Se maceró el órgano a través de un tamiz de 100 μm (Corning®), y se realizaron dos lavados con solución salina de fosfatos (PBS) libre de Ca^{2+} y Mg^{2+} suplementado con 2% suero fetal bovino (SFB) y 2 mM de ácido etilendiaminotetraacético (EDTA). Posteriormente, se centrifugó por 10 minutos a 100 g. Se descartó el sobrenadante y el precipitado fue resuspendido en 1 mL de medio de cultivo RPMI-1640 + 10% SFB. Se tomó una muestra de 10 μL a la que se le realizó un conteo celular con hematocitómetro utilizando azul tripán (Gibco®) en una proporción 1:1, para determinar el porcentaje de viabilidad tal como se indicó anteriormente. Con base en esto, se ajustó el volumen a la concentración celular requerida.

Selección de linfocitos T

Para la selección de linfocitos T, en dos de los métodos de selección utilizados, se preparó previamente placas de cultivo celular de 96 pozos con 100 μL de anticuerpo para detección del receptor CD3 (eBioscience®, 16-0032-82) a una concentración de 25 $\mu\text{g}/\text{mL}$, y se incubó durante toda la noche a 4°C. Luego de retirar el exceso de anticuerpo, se agregó 200 μL de solución post-cobertura (PBS pH 7.2 + 5% SFB) por pozo y se incubó por 4 horas a 4°C. Posteriormente, se realizaron tres lavados con PBS a toda la placa.

Método 1. Selección con solución amortiguadora de amonio-cloruro-potasio (ACK) y adherencia empleando anticuerpos anti-CD3 (anti-CD3): Se resuspendió el precipitado celular obtenido en 10 mL de solución amortiguadora ACK (1.5 M NH_4Cl , 100 mM KHCO_3 , 10 mM EDTA), y luego se centrifugó a 100 g durante 10 minutos. Se descartó el sobrenadante, y se sembró en una placa de 6 pozos con 3 mL de medio de cultivo RPMI-1640 + 10% SFB con activadores para proliferación linfocitaria (250 $\mu\text{g}/\text{mL}$ ionomicina y 5 $\mu\text{g}/\text{mL}$ forbol 12-miristato 14-acetato (PMA por sus siglas en inglés)) por pozo, y se incubaron durante toda la noche a 37°C. Posteriormente, se inoculó 100 μL de suspensión celular por pozo, con aproximadamente 7×10^4 células/pozo en la placa sensibilizada con anti-CD3, y se incubaron por 2 h a 37°C. Luego de ello, se realizó un conteo de las células en suspensión en el sobrenadante, y se contabilizó la cantidad de células adheridas por exclusión.

Método 2. Selección con Ficoll y adherencia empleando anti-CD3: Se agregó el precipitado celular resuspendido en 4 mL de RPMI-1640 con 3 mL de Ficoll Paque PLUS (GE Healthcare®), y se centrifugó a 400 g durante 30 minutos. Se separó la capa superior sin perturbar los linfocitos acumulados en la interfaz.

Estas células se ajustaron a la misma concentración que en el método anterior, y se continuó el proceso de la misma manera para la selección positiva por adherencia con anti-CD3.

Método 3. Selección negativa empleando microesferas magnéticas: Para estos ensayos se utilizó un *kit* de selección negativa para linfocitos T por microesferas magnéticas. Se resuspendió el precipitado celular a una concentración de 1×10^7 células/mL y se tomaron 500 μL , a los que se agregó 100 μL de SFB inactivado por calor a 56°C durante 30 minutos y 100 μL de mezcla de anticuerpos del *kit*. Se incubó durante 20 minutos a 4°C.

Posteriormente, se realizó un lavado con 10 mL de amortiguador de aislamiento del *kit*, y se centrifugó por 8 minutos a 350 g. Luego, el precipitado celular se resuspendió en 4 mL de amortiguador de aislamiento y se agregó 1 mL de las microesferas magnéticas preparadas como indica la casa comercial. Se incubó durante 15 minutos a 25°C, y posteriormente se agregó 5 mL de amortiguador de aislamiento. Las células resuspendidas se expusieron a un imán para separar las células no deseadas (adheridas a las microesferas magnéticas), se recuperó el sobrenadante con las células de interés y se realizó un conteo celular como se indicó anteriormente.

En los tres métodos, una vez que se seleccionaron los linfocitos T, se realizó un conteo celular. La relación entre la cantidad de células iniciales aisladas del bazo y la cantidad de linfocitos T viables, se considera el porcentaje de recuperación.

Identificación de linfocitos T

Se realizaron ensayos de inmunofluorescencia para identificar linfocitos T. Para ello se colectaron aproximadamente 4×10^5 células por muestra, tanto de las células obtenidas del aislamiento del bazo, como de las obtenidas al final de cada método de selección.

Se realizó un bloqueo a las células con 100 μ L de solución de bloqueo (PBS + 2% SFB + 1 mM EDTA) durante 1 hora a 4°C, para reducir interferencias en la identificación de los linfocitos T, y luego se centrifugó durante 5 minutos a 300 g. Cada precipitado celular se resuspendió en 100 μ L de la dilución 1:250 del anticuerpo primario anti-CD3 en solución de bloqueo, se incubó por 30 minutos a 4°C y luego se centrifugó 5 minutos a 300 g. Posteriormente, el precipitado celular se resuspendió en 100 μ L de solución FACS para su lavado y se procedió a una nueva centrifugación, para resuspenderlo en 100 μ L de una dilución 1:400 de anticuerpo secundario anti-conejo IgG ligado a Alexa Fluor Plus 555 (A32732, Thermo Scientific®) en solución de bloqueo. Se incubó 1 hora a 4°C y luego se centrifugó una última vez. Tras eliminar el sobrenadante, las células se montaron en un portaobjetos recubierto con gelatina para promover la adherencia de los linfocitos T, al cual se añadió una gota de medio de montaje Prolong™ Gold con 4',6-diamino-2-fenilindol (DAPI, Life Technologies) como medio de montaje y para marcar los núcleos.

Resultados

En los tres métodos de selección: con amortiguador ACK-adhesión celular, con Ficoll y con microesferas magnéticas (*kit*), se comprobó la presencia de linfocitos T utilizando inmunotinción con anti-CD3 (Figura 1).

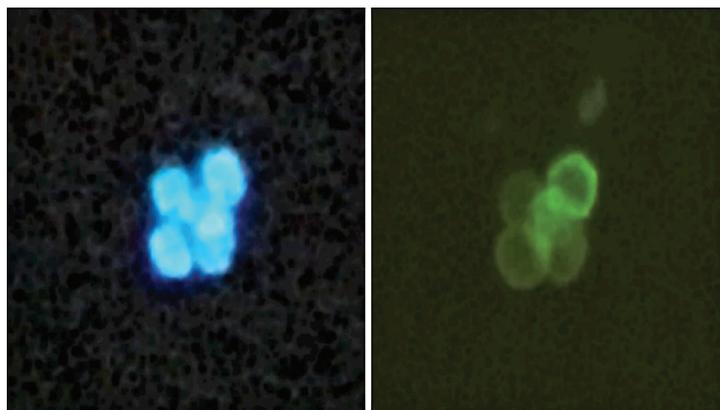


Figura 1. Inmunofluorescencia de una suspensión de linfocitos T purificados a partir de bazo de ratón. En color azul se observa los núcleos teñidos con DAPI (4',6-diamino-2-fenilindol), y en color verde se detecta la presencia del receptor CD3 (40X).

Se muestra el porcentaje de pureza, porcentaje de viabilidad y porcentaje de recuperación respecto a los valores teóricos esperados para bazos de ratón (Figura 2). Los tres métodos de aislamiento y selección de linfocitos T, evidenciaron un alto porcentaje de viabilidad celular

(95%). Además, se observó un mayor grado de pureza (90%) con el método de aislamiento que utiliza microesferas magnéticas. El método que emplea la solución amortiguadora ACK y selección con anti-CD3, obtuvo el mayor porcentaje de recuperación (70%) de linfocitos T.

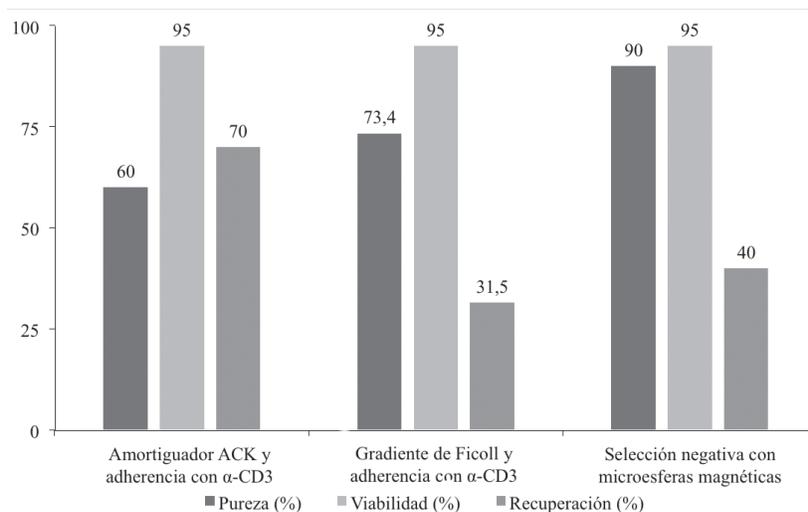


Figura 2. Parámetros para la evaluación del aislamiento y selección de linfocitos T de bazo de ratón por tres métodos: aislamiento con amortiguador de amonio-cloruro-potasio (ACK) y selección positiva con anti-CD3 (método 1), aislamiento con Ficoll y selección positiva con anti-CD3 (método 2) y aislamiento y selección negativa con microesferas magnéticas (*kit* comercial, método 3). Cabe resaltar el alto porcentaje de viabilidad obtenido con los tres métodos.

Discusión

La implementación de *kits* comerciales de selección de linfocitos T es una alternativa efectiva para obtener poblaciones purificadas de este tipo celular. Sin embargo, dado su alto costo económico, es relevante evaluar la relación efectiva de su implementación, comparando con métodos más básicos que podrían ser igualmente efectivos y de menor costo.

Cabe mencionar, que muchos de los reportes de grupos de investigación que trabajan con linfocitos T de cultivo primario los obtienen de sangre periférica [15], [16], esto por cuanto facilita la obtención de la muestra, ya sea en seres humanos o animales, y en este último caso, evita el sacrificio de los individuos que son objeto de estudio [17]. Sin embargo, debido a la necesidad de contar con una cantidad considerable de células murinas para aplicaciones subsecuentes, la extracción del bazo representa la opción más conveniente, dado que se conoce que posee zonas enriquecidas con linfocitos T [18] y que es de relativamente fácil acceso. Una vez obtenido el bazo, la utilización de la técnica adecuada de aislamiento, permite obtener la fracción de células mononucleadas enriquecida en linfocitos con menor cantidad de eritrocitos y células polimorfonucleadas.

Haciendo un análisis puntual de los resultados presentados, como primera impresión se observa que el método 2 tuvo el porcentaje de recuperación más bajo de los tres evaluados; el método 3 (*kit* comercial) fue el más selectivo para recuperar células CD3 de alta pureza (90% de las células recuperadas); y el método 1 logró mayor porcentaje de recuperación (70%) que el *kit* comercial (40%), pero fue el método menos selectivo: sólo 60% de las células recuperadas son CD3 (30% menos que el *kit* comercial).

Sin embargo, al comparar en términos relativos la recuperación para cada uno de los tres métodos, se puede determinar que el método 1 y el método 3 obtuvieron un rendimiento similar en cuanto a la cantidad final de linfocitos T viables recuperados. Esto es debido a que para comparar los tres métodos, es necesario evaluar la pureza y viabilidad obtenidas a partir del porcentaje de linfocitos T recuperados del órgano. Es decir, tomando en cuenta la proporción de células recuperadas que son linfocitos T viables al final de la selección, en ambos casos se obtuvo un rendimiento similar.

En cuanto a la pureza evaluada en los cultivos, el método 1 de aislamiento, además de utilizar el amortiguador ACK para eliminar los eritrocitos, implica la adhesión de varios tipos celulares, entre los que se puede encontrar células del sistema inmune como *natural killer* (NK), monocitos y linfocitos B [19]. Estos tipos celulares también forman parte de la fracción blanca que se aísla con el Ficoll (método 2) [2], [20]. Es posible que, dado que los leucocitos polimorfonucleares son células adherentes [21], también sean separadas de la fracción en suspensión por adhesión con el método 1. En este sentido, el método 1 implica dos pasos independientes de separación de las fracciones celulares contaminantes (eritrocitos, polimorfonucleares y mononucleares adherentes) de la fracción de linfocitos T, mientras que el método 2 separa todas las fracciones en un solo paso en un gradiente de densidad generado con el Ficoll. Esto puede provocar que a la hora de separar la fracción de linfocitos del gradiente de Ficoll, se arrastren células contaminantes que afecten la pureza de la fracción de linfocitos T, principalmente por la presencia de células mononucleares [2] que se separan en el gradiente bajo las mismas características de los linfocitos T. Así, dado que la fracción recuperada del método 1 tras la adhesión a la placa de cultivo posee menos tipos celulares, es probable que la purificación en la placa de anti-CD3 sea más eficiente en comparación con el método de separación por Ficoll.

Una característica que llama la atención es la alta viabilidad de la porción de linfocitos T en los tres métodos. Esta viabilidad pudo ser mantenida hasta 72 horas post-cultivo (tiempo máximo de los ensayos) con la activación inespecífica de los activadores para proliferación linfocitaria, PMA y ionomicina (datos no mostrados). Es bien conocido que uno de los requisitos para mantener la viabilidad y proliferación de los linfocitos T en cultivo es su activación [22]. En el caso del *kit*, la viabilidad de 95% determinada por conteo celular con azul tripán, corresponde a células no activadas pues no se utilizan activadores químicos ni anticuerpos hasta el cultivo. Sin embargo, el corto tiempo que implica la selección y cultivo de los linfocitos, puede favorecer la alta viabilidad (dado que en el cultivo las células se exponen a los activadores químicos). Cabe destacar que si bien el cultivo se mantuvo por 72 horas máximo, es posible que su viabilidad se mantenga por más tiempo, para lo que sería relevante realizar una curva de crecimiento con diferentes métodos de activación, a tiempos aún mayores a 72 horas para determinar el tiempo máximo de cultivo que se puede alcanzar, así como su pico de proliferación.

La principal ventaja encontrada con el uso del *kit*, fue la facilidad y rapidez en el aislamiento de los linfocitos T. Esto permitió, obtener cultivos frescos de manera expedita, lo cual representa una ventaja cuando el cultivo requiere obtenerse de manera continua. Sin embargo, su uso dependerá de las posibilidades económicas de cada laboratorio. Además, cabe destacar que en términos generales, la utilización del *kit* permite obtener una población de linfocitos no activados por el método de selección, por lo que pueden ser estimulados por la vía que sea más conveniente para cada investigación. Este aspecto representa una ventaja sobre los otros dos protocolos aquí planteados.

Así, se observa que la utilización del método de aislamiento por ACK (método 1) puede representar una opción viable, menos costosa y comparable en la obtención de linfocitos T viables, en relación con el *kit* de microesferas magnéticas (método 3). Sin embargo, en términos de rapidez y facilidad del aislamiento, el *kit* representa la mejor opción. Dependerá del enfoque del estudio, así como los recursos del laboratorio la utilización de uno u otro método para la obtención de linfocitos T murinos de bazo.



Conclusiones

El enfoque del estudio con linfocitos T determina las variables a tomar en cuenta a la hora de seleccionar un método de aislamiento de cultivo primario. El aislamiento de linfocitos T con el amortiguador ACK-adhesión de celular y selección por anti-CD3, es un método de bajo costo que presentó una mayor eficiencia de recuperación de linfocitos T viables en comparación a la obtenida por el *kit* de selección negativa de linfocitos T con microesferas magnéticas, aunque de menor pureza. La utilización necesaria del *kit* depende de las condiciones del estudio, pero en los casos donde se pueda prescindir de su uso, el método aquí presentado es una opción de fácil implementación para obtener linfocitos T viables activados para subsecuentes aplicaciones.

Recomendaciones

Como se mencionó anteriormente, el objetivo del estudio determinará el tipo de aislamiento de linfocitos T requerido, sin embargo, la utilización del *kit* permite obtener células en su estado nativo, lo cual presenta una ventaja pues se puede dirigir el tipo de activación específica que se requiera.

Adicionalmente, se podría utilizar el anticuerpo anti-CD28 en conjunto con el anticuerpo anti-CD3, dado que su función es complementaria tanto para la selección por adherencia, como para la detección de linfocitos T mediante inmunofluorescencia.

Agradecimientos

Agradecemos a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del TEC por el financiamiento de este proyecto (VIE CF 1510076) y al Centro Nacional de Innovaciones Biotecnológicas por el aporte y el apoyo brindado.

Referencias

- [1] S. Abbas, A. Lichtman, and A. Pillai, *Cellular and molecular immunology*, 9th ed. Elsevier, 2017.
- [2] K. Murphy, *Janeway's Immunobiology*, 8th ed. United States of America: Garland Science, 2011.
- [3] C. Lamers, R. Van de Griend, E. Braakman, C. Ronteltap, J. Bénard, G. Stotter, J. Gratama, and R. L. H. Bolhuis, "LARGE-SCALE EXPANSION OF HUMAN T LYMPHOCYTES FOR," *Int. J. Cancer*, vol. 979, pp. 973–979, 1992.
- [4] M. L. Zandvliet, E. Van Liempt, I. Jedema, S. Kruithof, M. G. D. Kester, H. Guchelaar, J. H. F. Falkenburg, and P. Meij, "Simultaneous Isolation of CD8 + and CD4 + T Cells Specific for Multiple Viruses for Broad Antiviral Immune Reconstitution After Allogeneic Stem Cell Transplantation," *J. Immunother.*, vol. 34, no. 3, pp. 307–319, 2011.
- [5] P. Sourav, S. Girdhari, and G. Lal, "Role of gamma-delta ($\gamma\delta$) T cells in autoimmunity," *J. Leukoc. Biol.*, vol. 97, no. February, pp. 259–271, 2015.
- [6] W. A. Comrie and M. J. Lenardo, *Molecular Classification of Primary Immunodeficiencies of T Lymphocytes*, 1st ed., vol. 138. Elsevier Inc., 2018.
- [7] A. J. Kleinman, R. Sivanandham, I. Pandrea, C. A. Chougnet, and C. Apetrei, "Regulatory T Cells As Potential Targets for Hiv Cure Research," *Front. Immunol.*, vol. 9, no. April, pp. 1–16, 2018.
- [8] H. Kahlert, "Production of T-Cell Lines," in *Methods in Molecular Medicine: Allergy Methods and Protocols*, no. 1, M. G. Jones and P. L. Lympamy, Eds. Totowa, N.J.: Humana Press, 2008, pp. 31–41.
- [9] Y. K. Chae, A. Arya, W. Iams, M. R. Cruz, S. Chandra, J. Choi, and F. Giles, "Current landscape and future of dual anti- CTLA4 and PD-1 / PD-L1 blockade immunotherapy in cancer ; lessons learned from clinical trials with melanoma and non- small cell lung cancer (NSCLC)," *J. Immunother. Cancer*, vol. 6, no. 39, p. 27, 2018.
- [10] N. M. Ratnam, R. . Mark, and A. J. Giles, "Immunotherapy in CNS cancers: the role of immune cell trafficking," *Oxford Univ. Press*, 2018.

- [11] M. Rodríguez-Zúñiga, F. Cortez-Franco, and F. Quijano-Gomero, "Leucemia / linfoma de células T del adulto . Revisión," *Actas Dermo-Sifilográficas*, pp. 1–9, 2018.
- [12] B. Shang, Y. Liu, S. Jiang, and Y. Liu, "Prognostic value of tumor- infiltrating FoxP3 + regulatory T cells in cancers : a systematic review and meta-analysis," *Nat. Publ. Gr.*, vol. 15179, no. 5, pp. 1–9, 2015.
- [13] C. Pelegri, M. Rodriguez-palmer, M. Paz, J. Comas, M. Caste, and A. Franch, "METHODS Comparison of four lymphocyte isolation methods applied to rodent T cell subpopulations and B cells," *J. Immunol. Methods*, vol. 187, pp. 265–271, 1995.
- [14] A. M. Thornton, "Fractionation of T and B Cells Using," *Curr. Protoc. Immunol.*, vol. 55, pp. 1–11, 2003.
- [15] C. T. Lefort and M. Kim, "Human T Lymphocyte Isolation , Culture and Analysis of Migration In Vitro," *J. Vis. Exp.*, vol. 40, pp. 2–5, 2017.
- [16] M. Raulf-Heimsoth, *T Cell — Primary Culture from Peripheral Blood*. Totowa, N.J.: Humana Press, 2008.
- [17] U. C. Nygaard and M. Løvik, "Blood and spleen lymphocytes as targets for immunotoxic effects in the rat — a comparison," *Toxicology*, vol. 174, pp. 153–161, 2002.
- [18] R. E. Mebius and G. Kraal, "STRUCTURE AND FUNCTION OF THE SPLEEN," *Nat. Publ. Gr.*, vol. 5, no. August, pp. 606–616, 2005.
- [19] N. Delirez, E. Shojaeefar, P. Parvin, and B. Asadi, "Comparison The Effects of Two Monocyte Isolation Methods , Plastic Adherence and Magnetic Activated Cell Sorting Methods , on Phagocytic Activity of Generated Dendritic Cells," *Cell J.*, vol. 15, no. 3, pp. 218–223, 2013.
- [20] A. Boyum, "Isolation of Lymphocytes , Granulocytes and Macrophages," *Scand. J. Immunol.*, vol. 5, no. 5, pp. 9–15, 1976.
- [21] T. Tanigawa, Y. Kotake, M. Itanigawa, and L. A. Reinke, "Mutual Contact of Adherent Polymorphonuclear Leukocytes Inhibits Their Generation of Superoxide," *Free Radic. Res.*, vol. 5762, no. March, pp. 361–373, 2016.
- [22] S. Hashimoto, Y. Takahashi, Y. Tomita, T. Hayama, S. Sawada, T. Horie, C. C. Mccombs, and J. P. Michalski, "Mechanism of Calcium Ionophore and Phorbol Ester-Induced T-cell Activation Accessory Cell Requirement for T-cell Activation," *Scand. J. Immunol.*, vol. 33, pp. 393–403, 1991.

Factibilidad técnica del uso de escorias de cobre como reemplazo de arena en morteros de pega de muros de albañilería

Technical feasibility of the use of copper slag as sand replacement in mortars of masonry walls

Mauricio Pradena-Miquel¹, Patricio Cendoya-Hernández², Andrés Borkowsky-Opazo³

Fecha de recepción: 20 de junio de 2018

Fecha de aprobación: 5 de setiembre de 2018

Pradena-Miquel, M. Factibilidad técnica del uso de escorias de cobre como reemplazo de arena en morteros de pega de muros de albañilería. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-2. Abril-Junio 2019. Pág 100-111.

DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v32i2.4360>

- 1 Prof. Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción, Chile. Correo electrónico: mpradena@udec.cl
- 2 Prof. Asociado. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción, Chile. Correo electrónico: pcendoya@udec.cl
- 3 Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción, Chile. Correo electrónico: aborkowsky@udec.cl



Palabras clave

Morteros; Escorias de cobre; Muros de albañilería; Sustentabilidad.

Resumen

Chile es uno de los mayores generadores de escorias de fundición de cobre (EFC) a nivel mundial con alrededor de 50 millones de toneladas acumuladas. Debido a que las EFC poseen características fisicoquímicas similares a las materias primas del cemento, resulta atractivo utilizar la EFC para la producción de morteros de pega sustentables para su uso en muros de albañilería. De esta manera el objetivo del presente artículo es estudiar la factibilidad técnica de morteros de pega fabricados con un árido fino obtenido a partir de la combinación de arena y granalla de EFC para su utilización en muros de albañilería confinada. Esto se realiza comparando en laboratorio sus propiedades y características con respecto a un mortero patrón (sin EFC). Se analizan propiedades del mortero de pega, tales como la consistencia, densidad, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y resistencia a la adherencia; además de su influencia en la resistencia a la compresión y al corte de muros de albañilería confinada. Los resultados muestran que la incorporación de la EFC en morteros de pega para muros de albañilería tiene una influencia positiva, ya que se incrementan significativamente las resistencias de adherencia (20,2%), resistencia a la compresión (18,1%) y resistencia al corte (12%). De esta manera, se concluye que para las condiciones analizadas, utilizar de morteros de pega con EFC en muros de albañilería confinada es la técnicamente factible.

Keywords

Mortars; Copper slags; Masonry walls; Sustainability.

Abstract

Chile is one of the largest generators of copper slags (CS) worldwide with around 50 million tons accumulated. As the CS have similar physicochemical characteristics to the raw materials of cement, their application in the production of sustainable mortars for use in masonry walls is very attractive. The objective of the present article is to study the technical feasibility of the use of CS as sand replacement in cement mortars of masonry walls. For that, their properties and characteristics are compared in laboratory with a standard mortar (without CS). Different properties of the cement mortar are analyzed, such as consistency, density, flexural and compressive strength, and adhesive strength. Moreover, its influence on the compressive and shear strength of confined masonry elements is also analyzed. The results show that the incorporation of CS in masonry mortars has a positive influence, increasing the adhesive strength (20.2%), compressive strength (18.1%) and shear strength (12%). Therefore, for the conditions analyzed, the use of cement mortars with CS in confined masonry walls is technically feasible.

Introducción

Chile al ser es uno de los mayores productores de cobre a nivel mundial genera grandes volúmenes de residuos, desechos y subproductos, entre los que se encuentran las escorias de fundición de cobre (EFC), las cuales constituyen uno de los principales desechos sólidos en las plantas pirometalúrgicas de la industria del cobre. Se calcula que por cada tonelada de cobre producido se generan alrededor de 2.2 toneladas de escorias, y tan solo en la división El Teniente de Codelco, se producen cerca de 700.000 toneladas de escoria al año. Se estima que

Chile posee un volumen histórico acumulado de aproximadamente 50 millones de toneladas [1], las que son catalogadas como pasivos ambientales que son potencialmente contaminantes si no son bien manejados. Además, los volúmenes vertidos ocupan grandes extensiones de superficies que muchas veces restan terreno cultivable y producen contaminación visual del paisaje. Es por ello que surge la necesidad de encontrar usos alternativos a las escorias, de modo de reutilizar y dar un valor agregado a lo que se genera como subproducto de las fundiciones de cobre.

Por otra parte, se conoce que las escorias poseen en su composición química óxidos de silicio, aluminio, hierro y calcio, los que se encuentran de igual manera en la estructura química del cemento, por lo que la interacción entre ambos compuestos es viable químicamente. Además, al ser procesadas adquieren características similares a la de los áridos finos con forma, granulometría y textura definidas, las cuales permiten que puedan ser utilizadas como reemplazo parcial o total del agregado fino presente en morteros y hormigones. Por todo lo anterior resulta atractiva la utilización de EFC para la producción de morteros sustentables.

Diversos investigadores [1–7] han estudiado el comportamiento y el efecto de incluir EFC como agregado en morteros y hormigones. Moura y Coutinho [2] investigaron la resistencia a la compresión y flexotracción de hormigones con porcentajes de reemplazo del árido fino del 30%, 40% y 50% para distintas razones Agua/Cemento (A/C). Los resultados indicaron que el hormigón con un porcentaje de reemplazo del 40% de EFC, incrementa la resistencia a la flexotracción en un 10% con respecto al mortero de referencia, además el peso específico se ve incrementado en el orden de un 10% con respecto al hormigón de referencia cuando utiliza un 50% de EFC como reemplazo. Hwang y Laiw [3] evaluaron la resistencia a la compresión desarrollada en morteros y hormigones con contenidos distintos de EFC como agregado fino para diferentes relaciones A/C. Las resistencias de las mezclas con porcentajes del 20 – 80% de reemplazo de EFC fueron superiores a las muestras de referencia. Li [4] y Zong [5] también reportaron que hormigones con contenidos de EFC como reemplazo parcial del árido fino, poseen propiedades mecánicas similares a los que contienen áridos convencionales. Al-Jabri [6] confeccionó mezclas de hormigón con distintas proporciones de EFC como reemplazo parcial y total del agregado fino. Los resultados muestran aumentos de densidad y trabajabilidad con respecto a hormigones de referencia, y aumento de las resistencias a compresión y flexotracción para algunos porcentajes de reemplazos. Cares [7] fabricó hormigones con EFC como reemplazo parcial del árido fino en distintos porcentajes (25, 40 y 50%) y distintas razones A/C, analizando su comportamiento a través de la resistencia a compresión y flexotracción. Los resultados indican que la adición de EFC mejora significativamente las resistencias de estos, con respecto a los morteros de referencia, obteniendo el mayor desempeño para el 40% de reemplazo [1].

El objetivo del presente artículo es estudiar la factibilidad técnica de morteros de pega fabricados con un árido fino obtenido a partir de la combinación de arena Bío-Bío y granalla de EFC en proporción del 40% de reemplazo, para su utilización en muros de albañilería confinada.

Materiales y métodos

Materiales

Para la confección del mortero se utilizaron dos áridos finos, la arena Bío-Bío y la granalla de EFC. Esta última posee una textura lisa y poco porosa, forma granular, cubica y angulosa, y con granulometría entre 0.3 y 2.5 mm (figura 1 y 2). Las propiedades físicas más importantes de los áridos finos se resumen en el cuadro 1.

Un análisis granulométrico de los áridos finos disponibles, indicó que estos no cumplen con la banda granulométrica de la NCh163 Of. 79 [8], específicamente en la última fracción de la banda por falta de porcentaje de finos. En el caso de la EFC en los tamices N°30 y N°50 y de la arena Bío-Bío en los tamices N°50 y N°100, respectivamente. Sin embargo, este último se considera aceptable debido a que los porcentajes son muy cercanos a los límites y el material posee un uso masivo en la zona y un buen comportamiento en hormigones y morteros fabricados.



Figura 1. Granalla de EFC.

Cuadro 1. Propiedades físicas de la EFC y la arena Bío-Bío.

Constantes Físicas	Arena	EFC	Unidad
Densidad aparente suelta seca	1530	2050	Kg/m ³
Densidad aparente compacta seca	1610	2200	Kg/m ³
Densidad real seca	2700	3800	Kg/m ³
Absorción	1.6	0.15	%
Porcentaje de huecos compactados	43.33	46.05	%
Fino con lavado bajo malla 200 A.S.T.M	0.1	0.2	%
Módulo de finura	2.82	3.28	-
Impurezas orgánicas según A.S.T.M	No contiene	No contiene	-

Al combinar estos áridos en proporciones en volumen de 40% EFC y 60% arena, la curva granulométrica se ajusta de mejor manera que la de la EFC o arena por sí sola, ya que se le agrega un porcentaje de finos en el tamiz N°30 y N°100, como se muestra en la figura 2. Además el porcentaje de reemplazo 40% tiene antecedentes de buen comportamiento y desempeño en hormigones [1], y es justamente este porcentaje de reemplazo el utilizado en este estudio.

La granulometría del árido combinado logra ser la ideal de los áridos estudiados, por lo que su utilización se considera aceptable y adecuada para la confección de morteros de pega, tomando en consideración que es mejor que la de la arena Biobío.

Dosificación

Se utilizaron los fundamentos establecidos en el Manual del Mortero del Instituto Chileno del Cemento y el Hormigón de Chile [9], respecto a la proporción por peso y a la corrección por humedad. Se confeccionaron dos coladas de mortero, uno llamado Mortero Patrón (MP) con 0% de EFC y otro Mortero con Escoria (ME) con 40% de EFC, ambos con razón A/C igual a 0.6 y relación c/a igual a 1:3. En el cuadro 2 se presenta un resumen de la dosificación empleada en la fabricación de las coladas de mortero.

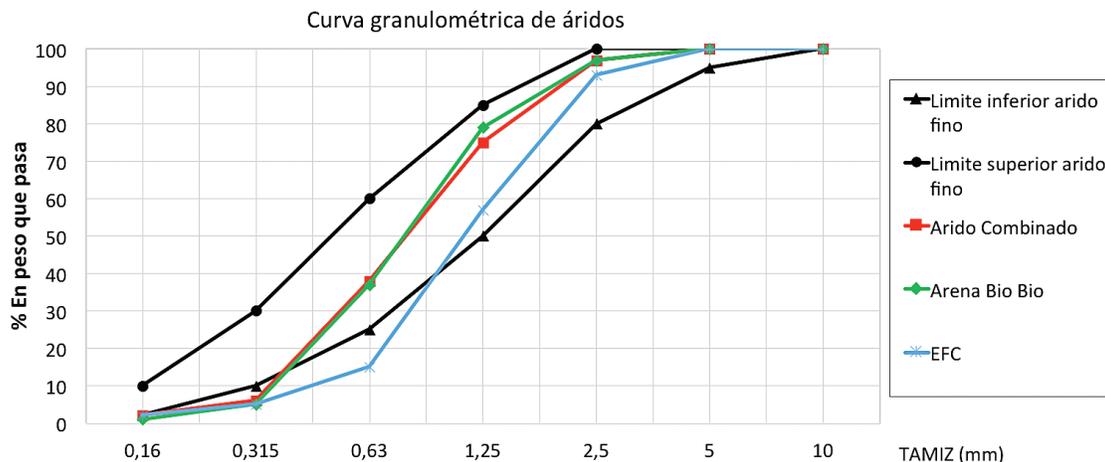


Figura 2. Curva granulométrica de los áridos finos utilizados.

Cuadro 2. Dosificación en peso de coladas de mortero [1].

Material	0% EFC		40% EFC	
	Peso (kg)	Volumen (l/m ³)	Peso (kg)	Volumen (l/m ³)
Cemento	475	169	475	169
Agua	285	285	285	285
Aire	-	30	-	30
EFC	0	0	784,3	206,4
Arena	1393,1	516	835,9	309,6
Total	2153,1	1000	2380,1	1000

Metodología

Para lograr el objetivo es necesario caracterizar experimentalmente el comportamiento mecánico de morteros de pega MP y ME. Para esto se realizaron ensayos normativos de consistencia, densidad, flexión y compresión para medir las propiedades del mortero de pega. Además de ensayos de resistencia de adherencia, resistencia básica a la compresión y al corte para evaluar la influencia de MP y ME en las capacidades resistentes de muros de albañilería. En todos los casos se realizaron al menos las repeticiones mínimas requeridas por norma para cada tipo de ensayo. De esta manera, para cada colada de mortero (MP y ME) se

confeccionaron 9 probetas RILEM (3 para ser ensayadas a los 7 días y 6 para ser ensayadas a los 28 días) con tal de evaluar sus resistencias mecánicas y densidad, 6 probetas de adherencia para evaluar la resistencia de adherencia, 5 prismas de albañilería para evaluar la resistencia básica a la compresión, y por último se confeccionaron 5 muretes de albañilería para evaluar la resistencia básica al corte. Cabe destacar además que para todas las probetas confeccionadas se evaluó la consistencia del mortero.

- *Ensayo flexión y compresión:* Siguiendo las indicaciones de NCh 158 Of. 67 [10], se aplica la carga vertical en el centro de la probeta RILEM (4x4x16 cm) a una velocidad constante, luego los trozos son ensayados a la compresión a una velocidad constante. Las probetas una vez confeccionadas son sumergidas en un recipiente saturado con cal, hasta el día del ensayo (7 o 28).
- *Ensayo de adherencia a cizalle:* Siguiendo las indicaciones de NCh 167 Of. 2001 [11], se aplica la carga vertical a una velocidad constante de modo de someter la junta del mortero a un esfuerzo de corte, producto del desnivel provocado por los refrentados confeccionados en las caras de apoyo (mezcla yeso-cemento proporción 1:1 en peso) (figura 3). En el proceso de curado las probetas se mantienen 7 días cubiertas con polietileno para posteriormente mantenerse en las condiciones ambientales de laboratorio hasta el día 28 del ensayo.



Figura 3. Esquema del ensayo de adherencia a cizalle.

- *Ensayo de prismas de albañilería:* Siguiendo las indicaciones de NCh 1928 Of. 2003 [12], se aplica la carga vertical a una velocidad uniforme. Se refrentaron sus extremos con una pasta de yeso de 3,5 mm (figura 4). En el proceso de curado las probetas se mantienen 14 días cubiertas con polietileno para posteriormente mantenerse en las condiciones ambientales de laboratorio hasta el día 28 del ensayo.
- *Ensayo de muretes de albañilería:* Siguiendo las indicaciones de NCh 2123 Of. 2003 [13], se aplica la carga vertical en forma diagonal a una velocidad uniforme mediante unos cabezales de apoyo. Se refrentaron sus vértices de apoyo con una pasta de yeso-cemento en proporción 1:1 en peso de 4 mm (figura 5). En el curado las probetas se mantienen 14 días cubiertas con polietileno para posteriormente mantenerse en las

condiciones ambientales hasta el día 28 del ensayo.



Figura 4. Esquema del ensayo de prismas de albañilería.

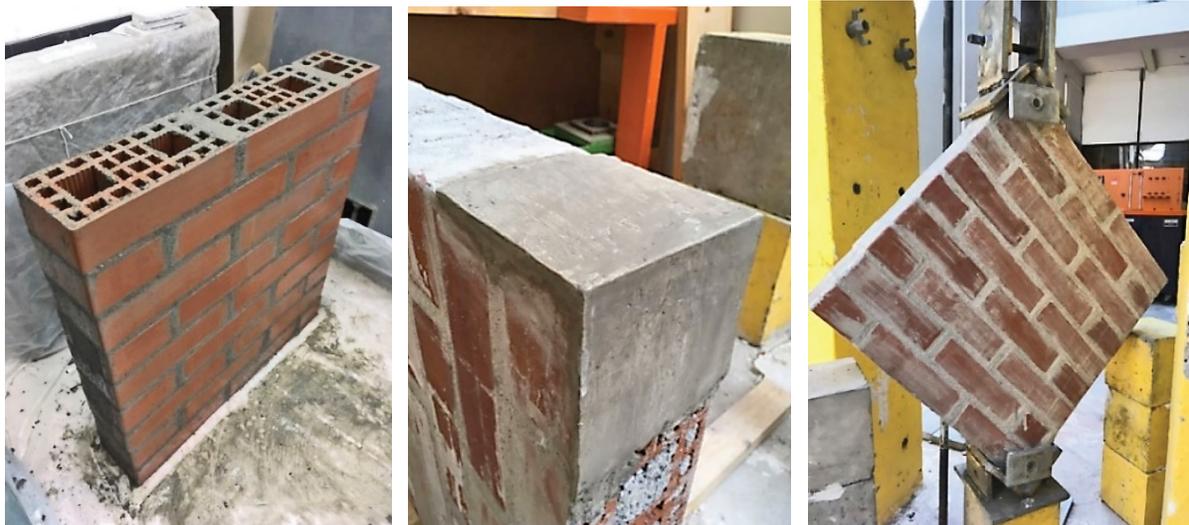


Figura 5. Esquema del ensayo de muretes de albañilería.

Resultados

Consistencia: En el mortero en estado fresco se mide la consistencia a través del cono reducido según lo indicado en la NCh 2257 Of. 96 [14]. Los valores medios de cada colada se grafican en la figura 6 donde se observa un incremento de la consistencia del mortero con EFC respecto al mortero patrón, debido a que esta se ve influenciada por la textura lisa y poco porosa, la baja absorción y la forma granular-cúbica que poseen las EFC.

Densidad: En el mortero endurecido se mide la densidad media de acuerdo con la NCh 158 Of. 67. Los valores obtenidos se presentan gráficamente en la figura 7. Se observa que la

sustitución de arena por EFC genera un incremento en la densidad, alcanzando un 10,2% de incremento. Esto se atribuye al alto peso específico que presentan las EFC (40% mayor al de la arena Bío-Bío), produciendo un aumento en la densidad media del mortero.

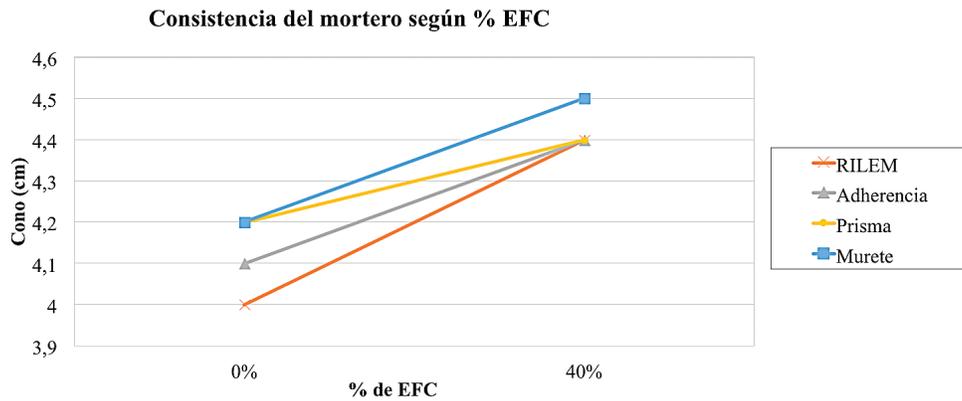


Figura 6. Variación de la consistencia por probetas, en función del contenido de EFC.

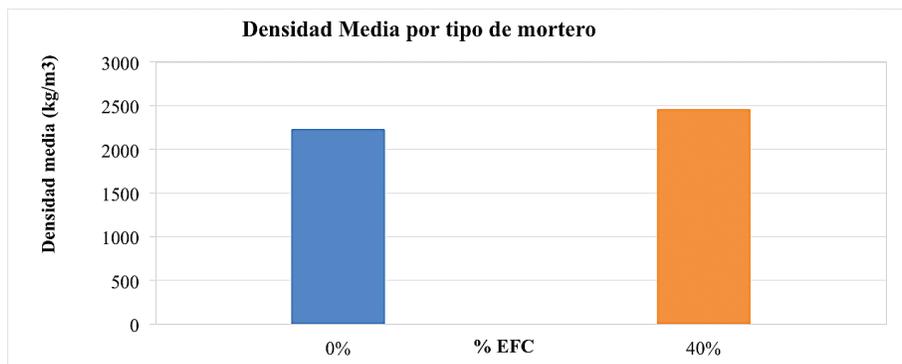


Figura 7. Variación de la densidad en función del contenido de EFC.

Resistencia a la flexión: En el mortero endurecido se mide la resistencia a flexión de acuerdo con la NCh 158 Of. 67. Los valores medios de las coladas de mortero se grafican en la figura 8.

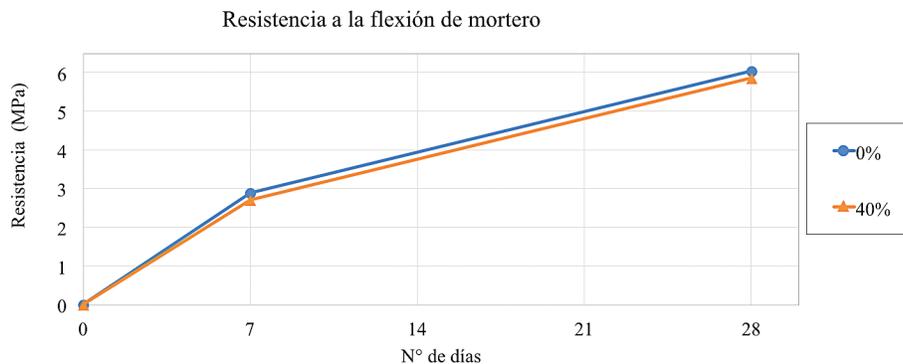


Figura 8. Resistencia a la flexión en función del contenido de EFC.

Se observa que el mortero con 40% de EFC posee una leve disminución de resistencia a la flexión con respecto al mortero patrón para los 7 y 28 días, ya que existe una variación del 7% y 3% respectivamente. Esta disminución se considera despreciable ya que está dentro de los márgenes de errores experimentales. Se concluye entonces que la adición de EFC mantiene la resistencia a flexión en morteros de pega para un porcentaje de reemplazo del 40%.

Resistencia a la compresión: En el mortero endurecido se mide la resistencia a compresión de acuerdo con la NCh 158 Of. 67. Los valores medios de mortero se grafican en la figura 9.

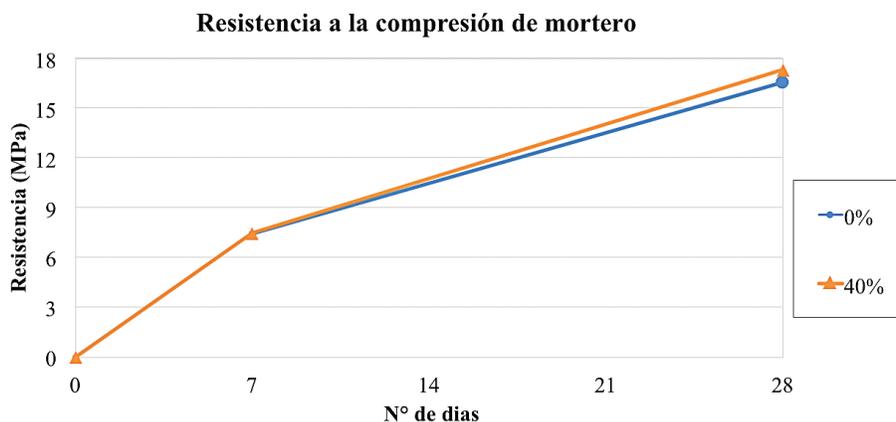


Figura 9. Resistencia a la compresión en función del contenido de EFC.

Se observa que el mortero con 40% de EFC posee un leve incremento de resistencia a la compresión con respecto al mortero patrón para los 7 y 28 días, ya que existe una variación del 0,3% y 4% respectivamente. Este incremento se considera despreciable ya que está dentro de los márgenes de errores experimentales. Se concluye entonces que la adición de EFC mantiene la resistencia a compresión en morteros de pega para un porcentaje de reemplazo del 40%.

Resistencia de adherencia a cizalle: En el mortero endurecido se mide la resistencia de adherencia de acuerdo con la NCh 167 Of. 2001. Los valores medios de las probetas se grafican en la figura 10. Se puede destacar que el mortero con 40% de EFC tiene un incremento de resistencia del 20,2% con respecto al mortero patrón, por lo que la EFC influye significativamente en la resistencia de adherencia del mortero de pega.

Resistencia básica a la compresión: en el mortero endurecido se mide la resistencia básica de compresión de acuerdo con la NCh 1928 Of. 2003. Los valores medios de los prismas ensayados se grafican en la figura 11. De acuerdo con los resultados observados se puede destacar que el mortero con 40% de EFC tiene un incremento de resistencia del 18,1% con respecto al mortero patrón, por lo que la EFC influye significativamente en la resistencia básica a la compresión de prismas de albañilería.

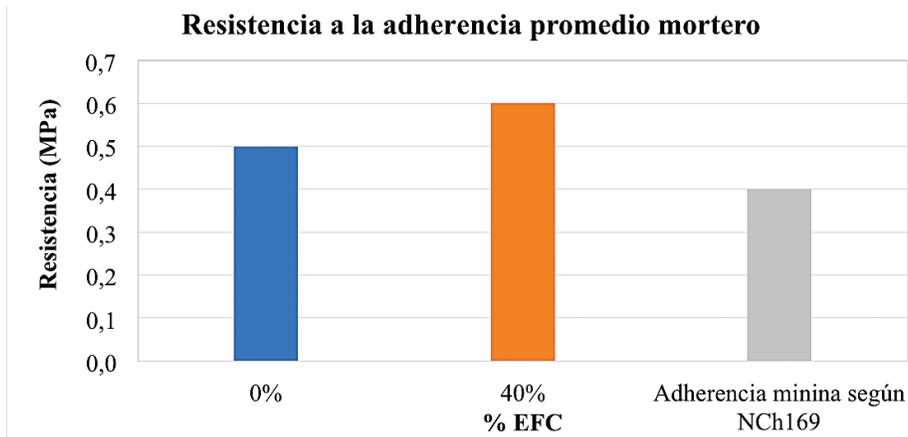


Figura 10. Resistencia a la adherencia en función del contenido de EFC.

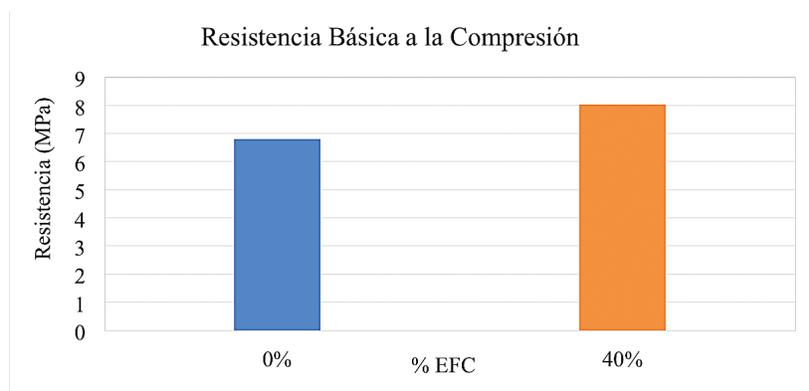


Figura 11. Resistencia básica a la compresión en función del contenido de EFC.

Resistencia básica de corte: En el mortero endurecido se mide la resistencia básica de corte de acuerdo con NCh 2123 Of. 2003. Los valores medios de los muretes ensayados se grafican en la figura 12. Se destaca que el mortero con 40% de EFC tiene un incremento de resistencia del 12% con respecto al mortero patrón, por lo que la EFC influye significativamente en la resistencia básica al corte de los muretes de albañilería.

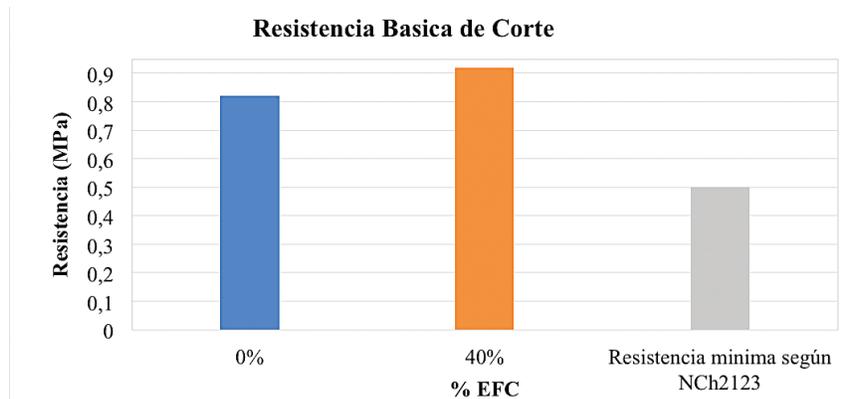


Figura 12. Resistencia básica al corte en función del contenido de EFC.

Modos de falla muretes de albañilería: Para los muretes confeccionados con mortero ME se tiene como mecanismo de falla predominante la tracción diagonal, que se caracteriza por tener un patrón de agrietamiento diagonal de forma monolítica. Sin embargo para los muretes confeccionados con mortero MP se produjeron dos fallas combinadas de adherencia y tracción diagonal (figura 13) en los muretes que soportaron la menor carga de compresión diagonal. Esto debido a que el mortero patrón tiene menor resistencia a la adherencia.



Figura 13. Modos de falla observados, falla por tracción diagonal (Izq.) y falla combinada (Der.).

Conclusiones y recomendaciones

Dentro de las principales conclusiones obtenidas en el marco de la presente investigación, se destacan:

1. La incorporación de EFC mejora la granulometría de la mezcla debido al aumento del contenido de finos.
2. Se observa un leve incremento de la consistencia de los morteros que contienen EFC respecto al mortero patrón. Esto se atribuye a la forma, textura y absorción de las EFC.
3. En el mortero endurecido se observa que la sustitución de arena por el 40% de EFC genera un incremento sustancial en la densidad del mortero, alcanzando un 10,2% de incremento. Lo anterior se atribuye al alto peso específico que presenta la escoria, la cual

genera un aumento de la densidad media.

4. Las resistencias a flexión y compresión de los morteros de pega se mantienen invariables para un porcentaje de reemplazo del 40% de EFC, debido a que los porcentajes de variación de las resistencias entre MP y ME son despreciables.
5. La resistencia a la adherencia, básica a la compresión y básica al corte aumentaron significativamente con la adición de la EFC, respecto al mortero patrón. Esto se atribuye principalmente a la similitud de su composición química con el cemento, logrando un mayor poder cementante en la mezcla.
6. Es factible la utilización de morteros de pega con EFC en muros de albañilería confinada (40% de reemplazo, [1]), ya que el uso de la EFC influye significativamente en las propiedades mecánicas de estos. Por lo que, la EFC es una buena alternativa para ser utilizada como árido fino de morteros de pega sustentables.
7. Se recomienda evaluar morteros con distintos porcentajes de reemplazo de EFC y en otras aplicaciones, debido a los buenos resultados obtenidos en la presente investigación.

Referencias

- [1] Cendoya, P. "Efecto en la resistencia de las escorias de fundición de cobre como agregado fino en el comportamiento resistente del hormigón". Revista Chilena de Ingeniería. Vol. 17 N°1, pp. 85-94, 2009.
- [2] W. Moura and D. Coutinho. "Influence of copper slag admixture in concrete in durability properties". Ambiente Construido. Porto Alegre. Vol. 4 N° 2, pp. 41-56, April 2004.
- [3] Hwang CL, Laiw JC. "Properties of concrete using copper slag as a substitute for fine aggregate". Proceedings of the 3rd international conference on fly ash, silica fume, slag, and natural pozzolans in concrete, SP-114-82, pp. 1677-1695, 1989.
- [4] Li F. "Test research on copper slag, concrete". Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), Vol. 127 N° 5, pp. 59-62, 1999.
- [5] Zong L. "The replacement of granulated copper slag for sand concrete". Journal of Qingdao Institute of Architecture and Engineering, Vol. 24 N° 2, pp. 20-22, 2003.
- [6] K. Al-Jabri, R. Taha and M. Al-Ghassani. "Use of copper slag and cement by-pass dust as cementitious materials". Cement Concrete Aggr, Vol. 24 N° 1, pp. 7-12, 2002.
- [7] L. Cares. "Análisis teórico-experimental de la resistencia a la flexotracción de hormigones con escoria de fundición de cobre". Tesis para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Concepción. Chile, 2007.
- [8] NCh 163 Of. 79. "Aridos para morteros y hormigones – Requisitos generales". Instituto Nacional de Normalización. Chile.
- [9] H. Zabaleta y J. Egaña. "Manual del mortero". Instituto del Cemento y del Hormigón en Chile. Chile, 1988.
- [10] NCh 158 Of. 67. "Cementos – Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento". Instituto Nacional de Normalización. Chile.
- [11] NCh 167 Of. 2001. "Construcción – Ladrillos cerámicos – Ensayos". Instituto Nacional de Normalización. Chile.
- [12] NCh 1928 Of. 2003. "Albañilería armada – Requisitos para el diseño y cálculo". Instituto Nacional de Normalización. Chile.
- [13] NCh 2123 Of. 2003. "Albañilería Confinada: Requisitos de diseño y cálculo". Instituto Nacional de Normalización. Chile.
- [14] NCh 2257/1 Of. 96. "Morteros – Determinación de la consistencia – Parte 1: Método del extendido en la mesa de sacudidas". Instituto Nacional de Normalización. Chile.

Estimación de Demanda de Tránsito: modelos clásico, basado en circuitos y basado en actividades. (Revisión Literaria)

Estimation of Traffic Demand: classic, tour-based and activity-based models. (Review)

María Estefanía Coto-Solano¹

Fecha de recepción: 31 de julio de 2018

Fecha de aprobación: 11 de octubre de 2018

Coto-Solano, M . Estimación de Demanda de Tránsito: modelos clásico, basado en circuitos y basado en actividades. (Revisión Literaria). *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-2. Abril-Junio 2019. Pág 112-121.

DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v32i2.4353>

1 Estudiante. Licenciatura en Ingeniería en Construcción, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica. Correo electrónico: escoso4594@yahoo.com



Palabras clave

Modelos de transporte; planificación de transporte; proyecciones de tránsito; demanda de tránsito; modelo de cuatro pasos; modelo clásico; modelo basado en circuitos; modelo basado en actividades.

Resumen

Los modelos de transportes son representaciones de las redes de tránsito mediante la aplicación de procedimientos matemáticos y conceptos teóricos. El nivel de detalle que se incluya en la modelación determinará la precisión y el realismo del comportamiento de movilidad de la población a obtener. Los desarrolladores de estimaciones de tránsito deberán definir previamente el alcance, precisión deseada y recursos humanos y económicos con que cuentan para escoger un modelo.

Las mejoras a los modelos de transporte han quedado relegadas al ámbito teórico de la investigación científica. Es necesaria la proyección de estas a los profesionales en el campo para su aplicación práctica. En este artículo se presenta una revisión bibliográfica de tres modelos de transportes frecuentemente utilizados en el mundo de modo que, quienes se encargan de estimar demanda de tránsito, puedan contar con una valoración de sus beneficios y limitaciones.

Keywords

Transportation models; transportation planning; traffic forecasting; traffic demand; four-step model; classic model; tour-based model; activity-based model.

Abstract

Transportation models are representations of traffic networks through the application of mathematical methods and theoretical concepts. The level of detail included in these models determines the precision and realism with which behavior of people's mobility is calculated. To choose a model, traffic estimation developers shall define previously the scope, precision needed and human and economic resources available.

Improvements in transportation models have been the reserve of theory. It is necessary to expand this knowledge to field professionals for its practical application. In this article, a review of three transportation models widely used in the world is presented. This is intended so that those in charge of demand estimation can benefit from the review of the advantages and limitations of frequently used transportation models.

Introducción

La inversión en infraestructura de tránsito es uno de los principales retos a los que se enfrentan los entes gubernamentales. Para cubrirla, se invierten importantes partidas del presupuesto público, se generan endeudamientos o bien, contratos de concesión de largo plazo, en aras de mejorar la competitividad de una región y la calidad de vida de sus habitantes. Debido al impacto que causan sobre las finanzas públicas y el usuario, las inversiones en obra pública deben estar fundamentadas en estudios técnicos confiables y exactos. Respecto a las obras destinadas a transportes, las proyecciones de demanda a distintos horizontes temporales son, las que definirán la necesidad de ejecutarlas. Estas proyecciones deben ser capaces de

integrar aspectos tan diversos como el comportamiento de los usuarios, sus características y considerar la variabilidad de éstas a través del tiempo.

Diferentes modelos son utilizados alrededor del mundo para abordar el cálculo de la demanda de tránsito. Se tratarán en este trabajo tres modelos de transporte: modelo tradicional de cuatro pasos, modelo basado en circuitos (*tour-based*) y el modelo basado en actividades (*activity-based*). Además del modelo clásico ampliamente utilizado y los modernos en creciente popularidad [1], cabe mencionar que se han desarrollado modelos híbridos, propios para una región, basados en simulación como el 4S en Australia [2] o el sistema SimMobility en Singapur [3].

La finalidad de este trabajo es exponer conocimiento generado de la investigación y procedimientos que no son utilizados comúnmente en Costa Rica, como herramientas para futuros estudios de demanda de tránsito. La mejora continua en el área de ingeniería de transportes permitirá obtener datos con mejor exactitud y aportar a la toma de decisiones informadas.

Modelos de transportes

Los modelos son representaciones simplificadas, físicas o abstractas, de determinados comportamientos que se buscan estudiar. Para el caso en cuestión se utilizan modelos matemáticos, basados en ecuaciones y conceptos teóricos, que buscan imitar los sistemas de transportes observados en la realidad [4].

Además, los modelos pueden ser agregados o desagregados según el nivel de detalle de la información con que se trabaje. Esto es, que un modelo desagregado contiene información desglosada por individuo mientras un modelo agregado la agrupa en categorías. Una segunda categorización corresponde a la naturaleza estadística de los datos. Un modelo será determinístico si se conocen con exactitud las variables para ejecutar la proyección de tránsito y, se le llama modelo estocástico si la información es inexacta o incompleta y deberá contemplar errores probabilísticos [5].

La accesibilidad a sistemas informáticos más económicos y de mejor desempeño ha facilitado la automatización de los modelos de transporte, sin embargo, modelos tradicionales como el de cuatro pasos siguen siendo ampliamente utilizados al no necesitar recursos especializados.

Para escoger un modelo se deben tener en cuenta las condiciones particulares de la región donde se aplica. A modo general, la escogencia dependerá del nivel de precisión y detalle deseado, la posibilidad de recolectar en campo los datos necesarios, la capacidad técnica del personal que procesará e interpretará la información y el acceso a uso de sistemas computacionales complejos.

Cada modelo tiene sus propias limitaciones y ventajas a considerar al realizar una escogencia. A continuación, se detalla cómo se desarrolla cada uno de los tres modelos principales y en qué supuestos se basan.

Basado en viajes

El modelo basado en viajes se conoce también como el modelo clásico de transportes de cuatro pasos. Permite estimar la demanda de tránsito total en una red a la vez que facilita analizar la demanda agrupada por ruta, propósito del viaje o modo de transporte utilizado. El objetivo de este modelo es estimar la demanda basándose en los atributos que generan demanda y las características del sistema de transporte que aporta la oferta [5].

El modelo de cuatro pasos ha sido el más utilizado en el mundo para la planificación en transportes desde los años 1950 [6]. Consta de cuatro etapas bien definidas y esquematizadas ampliamente en la literatura [7]. La tradición y facilidad de su adopción ha impulsado a las agencias de transporte a utilizar este modelo clásico y alejar la transición a nuevas técnicas. Es el que implica menores costos económicos en cuanto a necesidades computacionales

El diferenciador principal de este modelo respecto a otros es su unidad de medida: el viaje. Un viaje se refiere al traslado realizado por una persona para dirigirse de un origen a un destino. Por ende, el número de viajes generados o atraídos que mide el modelo corresponde al número de personas que realizan dichos viajes. Se presentan los pasos que conforman el mencionado modelo clásico secuencial de cuatro pasos:

Generación de tránsito

La finalidad de la etapa de generación de tránsito es la estimación del número de viajes generados en una zona de origen y atraídos hacia una zona de destino. Para ello, se parte de variables socioeconómicas relacionadas entre sí por medio de ecuaciones matemáticas que caracterizan la movilidad del área [8]. De esta manera, es posible que el modelo sea útil para pronósticos futuros conforme se actualicen los datos de las variables en el tiempo.

Aquellas variables relativas a las características de la población y su capacidad de realizar viajes se asocian con la producción mientras, las que describen la cobertura en usos de suelo y tipo de actividades se relacionan con la atracción de viajes.

Para encontrar las ecuaciones que describen la tendencia y correlación de las variables, los dos métodos de análisis matemático utilizados más frecuentemente son la regresión lineal [9] y la clasificación cruzada [4] y [10].

Distribución de tránsito

La etapa de distribución de tránsito se enfoca en obtener el número de viajes que cada región atrae, y distribuirlos entre las zonas que los pudieron haber originado. Para que el modelo funcione equilibradamente, todos los viajes producidos deben tener un destino que los atraiga. Para sistematizar estas relaciones se utiliza una matriz, la cual consta de un arreglo del número de viajes para cada par origen-destino en el área de estudio.

Utilizando mapas de uso de suelo, las regiones con mayores áreas destinadas a actividades atractivas (Ar_j) de viajes asumirán un mayor porcentaje de los viajes producidos. Conociendo el número de viajes (P_i) producidos en una zona i , es posible distribuirlos a distintos destinos (A_j) según (1) [4]:

$$A_j = \frac{Ar_j}{\sum Ar_j} * \sum_i P_i \quad (1)$$

El número de viajes (T_{ij}) entre cada par se calcula a partir de una analogía a la Ley de la Gravedad de Newton. Éste establece que la distancia o los costos actúan como un factor de fricción sobre los viajes. El factor de fricción ($f(c_{ij})$) es una función decreciente, que incluye una constante α , para considerar el efecto esperado de que, a mayor distancia o costo de un destino, menos atractivo es [4]. Así, es el número de viajes entre cada par origen-destino (2):

$$T_{ij} = \alpha * P_i * A_j * f(c_{ij}) \quad (2)$$

Reparto modal

Según el NCHRP [10], con el método Quick-Response System (QRS, por sus siglas en inglés), es posible establecer un modelo para el reparto modal del número de viajes (T_{ijm}) similar al modelo de gravedad utilizado en la etapa de distribución de tránsito. Esta ecuación (3) representa las restricciones de utilizar un modo de transporte con la inclusión de una variable de impedancia. La variable de impedancia (I) considera todos los posibles costos asociados con un determinado modo (m) en unidades de tiempo. Una constante b se incluye para especificar el propósito del viaje, generalmente de un valor aproximado de 2.

$$T_{ijm} = P_i * \frac{A_j * I_{ijm}^b}{\sum_j \sum_m I_{ijm}^b} \quad (3)$$

Las matrices origen-destino construidas en la etapa de distribución de tránsito son actualizadas a matrices origen-destino por modo, para profundizar la comprensión de quiénes son los usuarios de una ruta.

Asignación de tráfico

La meta de la etapa final de asignación de tráfico es determinar el número de viajes en cada vía de la red. Se asume como premisa básica que los usuarios preferirán una ruta que les ofreciera los menores costos. Muchas variables pueden influenciar al usuario a escoger una determinada ruta: tiempo, distancia, costo, congestión, dificultad de maniobras requeridas, señalización y otros riesgos. Se recomienda utilizar un promedio ponderado del valor que representan estas variables para caracterizar la ruta. Sin embargo, el tiempo y los costos en combustible son las más utilizadas [4].

Construir un árbol para identificar las rutas conectadas a la red es una técnica popular. Cada ruta representa una rama a la cual se le asigna un valor de costo. De esta forma, para analizar el costo total de transitar determinada ruta, se suman los costos de cada trayecto. Según la premisa mencionada al inicio de este apartado, al trayecto con menores costos será asignado un mayor peso de viajes.

Basado en circuitos

Recientemente, existe debate entre los investigadores en transportes sobre las deficiencias del modelo tradicional de cuatro pasos ante su imposibilidad para solucionar o incorporar determinados aspectos. Como se mencionó anteriormente, la medida fundamental del modelo tradicional es en viajes individuales que ocurren en un momento único del día. El modelo basado en circuitos o *trip-based* según su nombre en inglés, fue la primera actualización del modelo clásico en los años 1980 [1]. La unidad de este modelo son los circuitos, los cuales contemplan varios viajes realizados por un mismo usuario que se originan y retornan a un mismo punto, proponiendo que el flujo de tránsito de un sujeto está ligado a lo largo del día.

Al estudiar el circuito que recorre una persona en el día, es más clara la comprensión del tiempo que abarca viajando y los sitios por los que transita. Además, el estudio del comportamiento del usuario es más profundo en el modelo por circuitos, resultando así más apto para la planificación local, a un nivel desagregado, y a largo plazo [11]. En esa línea, el modelo clásico funciona para etapas de planificación donde el nivel de precisión permite que los datos sean agregados y conglomerados en centroides.

Por su unidad de medida, para el modelo por circuitos es necesario recolectar datos más detallados que aquellos recopilados para el modelo de cuatro pasos. Mientras que para el

modelo clásico un abordaje a los conductores en carretera, respondiendo una única vez sobre su origen, destino y propósito puede ser suficiente, el modelo basado en circuitos requiere una trazabilidad de los sujetos de estudio durante un día completo. Para ello, un mecanismo de recolección de datos es mediante encuestas dirigidas a los hogares.

Por ejemplo, la Encuesta Nacional de Hogares en Transportes de Estados Unidos (National Household Travel Survey) envía por correo a domicilio las encuestas a hogares preseleccionados. Los encuestados deben confirmar su participación y comprometerse a responder, por teléfono o Internet, los detalles de los viajes de un día completo, correspondientes a todas las personas que habitan la vivienda [12].

Desarrollar una encuesta con el nivel de detalle como la descrita anteriormente, dirigida a una muestra suficiente, representa uno de los obstáculos para su implementación. En Varsovia, Polonia, han rechazado el uso de Internet para completar encuestas pues al ser un medio impersonal las personas son propensas a mentir, contestar sin comprender las preguntas, reservarse respuestas o dejarlas incompletas. El éxito de desarrollar cualquier modelo de transportes dependerá de la confiabilidad de la encuesta con que se recopilan los datos de comportamiento [13].

La sistematización y agrupación de la cantidad de información recolectada es otra limitante con respecto al tradicional. Según Rossi y Shiftan [14], la complejidad procede de la base de datos donde, para cada segmento del circuito, los sujetos declaran un gran número de variables.

Los autores que han aplicado el modelo basado en circuitos a casos de estudio difieren en la esquematización de este. Sintetizando los pasos propuestos por [1] y [11], comparten el siguiente proceso:

Información socioeconómica

En este primer apartado, al igual que al inicio del modelo de los cuatro pasos, se recopila información socioeconómica relevante de los entrevistados. Ésta debe permitir la agrupación de la muestra por categorías de interés como zona de residencia, grupos etarios, actividad principal, género, tamaño del hogar, tenencia de vehículos, entre otras.

Patrones de viaje diarios

Se refiere al número de circuitos realizados diariamente y su caracterización. La clasificación se da primero al circuito como único, múltiples o bien, un único circuito con un desvío o "subcircuito". Asimismo, si se realiza más de un circuito, se indica la priorización de cada uno. Esto busca aclarar si todos los circuitos se recorren todos los días, como viajes obligatorios, o si fueron viajes opcionales o de excepción realizados únicamente el día de estudio. Finalmente, se debe incluir el número de paradas efectuadas en los circuitos y el detalle de éstas.

Escogencia del destino

Según el nivel de detalle que se requiera para el estudio, el destino puede corresponder a una pregunta abierta que lleva a una base de datos desagregada y compleja. El encuestador puede optar por contar con opciones limitadas para la pregunta según una zonificación de transportes previa. En estas zonificaciones se busca dividir la región de estudio en áreas de menor tamaño con características homogéneas en cuanto a sus características socioeconómicas. Debe contemplarse que, a mayor número de zonas de transporte, mayor será la carga para el sistema computacional que procesará los datos. Para modelos detallados de planificación, se recomienda una zona de transporte por cada 1000 habitantes [13].

Hora del día

Al consultar sobre la hora del día en que se recorren los segmentos del circuito, es conveniente clasificarlos según periodos de similar comportamiento en el flujo de tránsito. Así, se proponen cuatro periodos según las horas pico y horas valle, tanto diurnas como nocturnas. El rango horario variaría acorde a las condiciones particulares de cada región de estudio.

Modo de transporte

Según el alcance del estudio, determinar si se incluyen medios de transporte motorizados y no motorizados y cuáles modos de transporte se contemplan bajo cada categoría. La complejidad en el número de modos escogidos definirá el procedimiento matemático a utilizar.

Un modelo *logit*, similar al expuesto para el modelo clásico, es útil cuando la escogencia para el usuario es binaria: solo hay dos opciones disponibles. Por otra parte, un modelo *nested logit* puede utilizarse cuando la subclasificación a contemplar es mayor [15].

Basado en actividades

Junto con las mejoras que se buscaron implementar en la década de 1970 al modelo de los cuatro pasos, surge el estudio del modelo basado en actividades. Las deficiencias que hubiese también en el modelo por circuitos son cubiertas por este modelo, en el cual se analizan los múltiples patrones diarios de desplazamiento que realiza una persona y no un único circuito [1].

En su definición, el modelo basado en actividades incluye las diferencias en patrones de recorridos derivados de los estilos de vida y la participación en determinadas actividades por parte de la población [16]. La necesidad de realizar actividades es finalmente la razón por la que los sujetos se desplazan en el espacio y el tiempo, por lo tanto, éste busca modelar y predecir dichos comportamientos.

Al igual que el modelo por circuitos expuesto anteriormente, es necesario un registro de actividad de 24 horas para los sujetos de estudio. También, este considera en sus principios que los viajes no suceden independientemente, sino que están interrelacionados [1].

Sin embargo, en el modelo por actividades se contempla la opción de que una persona no viaje para completar su tarea [1]. Es decir, va más allá del modelo de circuitos al proponer que los sujetos pueden realizar más de una actividad en un mismo sitio y que, no necesariamente, toda actividad implica un circuito de viajes. Esta perspectiva describe el comportamiento de las personas realísticamente, con la complejidad inherente a los procesos de decisión personal sobre movilidad.

Para la resolución de los modelos por actividades, se hace uso de programas de simulación, aplicados a las bases de datos de información procedentes de las encuestas de hogares [16]. Poder utilizar los datos de manera desagregada es beneficioso por el nivel de detalle en que es posible observar el comportamiento de los individuos. En el caso de los modelos tradicionales, es inevitable la agrupación de datos en categorías principales, perdiéndose información de interés en el proceso.

Como en el modelo basado en circuitos, una de sus limitaciones radica en que el tiempo de ejecución del programa se verá afectado negativamente según el tamaño de la zona de estudio. Además, el manejo de estos sistemas requerirá la disposición de personal dedicado al seguimiento y mejoramiento del modelo.

Davidson et. al. [17] proponen la siguiente esquematización de pasos análogos al modelo clásico para el desarrollo del modelo basado en actividades.

Patrón de actividades diarias según circuitos

Interrelaciona los diferentes recorridos que ocurren a lo largo del día y la relación de esas actividades con los miembros del hogar. Al reconocer el entorno de las personas y su dependencia a actividades dadas, en determinados horarios y modos de transporte específicos, la demanda de tránsito generada se estima con mayor exactitud que al considerar únicamente estadísticas socioeconómicas como lo hace el modelo tradicional.

Escogencia de área de destino

En este modelo, los destinos se definen como paradas dentro del circuito y no como puntos finales, a diferencia del modelo clásico. Estas paradas se clasifican en primarias y secundarias según el proceso de decisión del usuario. Así, las áreas de destino son descritas por distintas variables que definen su atraktividad y priorización.

Escogencia de destino primario

Énfasis en las variables que determinan la escogencia del destino de la actividad principal del usuario. No es necesario realizar diferenciación entre viajes originados en el hogar o viajes originados en otro sitio ya que se contemplan como parte de un mismo circuito. En el modelo tradicional sí se deben modelar independientemente pues representan diferentes propósitos.

Combinación de modos de transporte

Esta etapa describe los modos de transporte utilizados por el sujeto para cada uno de los circuitos a lo largo del día. El abordaje de modo por circuito mantiene la consistencia probable de utilizar el mismo modo para la ida y el retorno. Asumir un modo distinto para cada viaje provoca la necesidad de generar todas las combinaciones posibles ida-retorno, solicitando aún más capacidad por parte de los sistemas informáticos. Sin embargo, al conservar la desagregación por circuito y no agregarla por día, permite contemplar la probabilidad de que el usuario utilice diferentes modos según sus distintas actividades.

Calendarización

Se refiere a la escogencia del momento del día para iniciar cada circuito y cuánto es su duración. Contar con la calendarización de actividades de un individuo hace posible observar el impacto que pueden provocar distintos sucesos en su rutina. Por ejemplo, ilustra cómo distribuye su tiempo y actividades durante las horas pico diurnas y nocturnas o cómo enfrenta las prohibiciones de circulación vehicular por número de placa.

Micro-simulación de patrones individuales

La etapa final del modelo es equivalente al paso de asignación de viajes en el modelo clásico. Se ejecuta la simulación en el programa computacional escogido que mostrará los resultados de los patrones de actividad en el tiempo y el espacio. Posterior a este paso, es posible incorporar los patrones desagregados de asignación en el mismo *software* para obtener la simulación de redes de tráfico. Para ejecutar una modelación de tránsito con una asignación obtenida del modelo de cuatro pasos, es necesario revisar la compatibilidad temporal de los datos. Esto no ocurre con los modelos modernos ya que, al ser sometidos a simulación desde la etapa de asignación, los datos obtenidos están listos para utilizar en otros procesos.

Conclusión

El modelo tradicional trabaja con datos agrupados y un menor nivel de detalle en las consultas al usuario. Puede hacer uso de otros mecanismos de recolección de datos como entrevistas a vehículos seleccionados en la vía o entrevistas a bordo de los vehículos [18]. La ejecución del modelo puede verse beneficiada con el uso de sistemas informáticos modernos, como VISUM [19], aunque es posible desarrollarlo de manera manual en hojas de cálculo.

El modelo basado en circuitos ha fungido como un modelo intermedio, con mejoras al modelo clásico, probado y utilizado especialmente en países europeos [7]. Representa una mejora conceptual al cambiar el término de viaje independiente por el de circuitos. La base de datos de este modelo requiere el seguimiento del usuario para ubicar las paradas que realiza a lo largo del circuito. Aumentar la información en la base de datos hace más complejo su procesamiento y por ello se hace necesaria la incorporación de *software* y personal calificado.

El modelo aún cuenta con limitaciones para integrar las múltiples variables que caracterizan la movilidad diaria de las personas. Si la precisión deseada implica conocer el comportamiento humano y trazar las actividades que realizan los sujetos de estudio, es conveniente optar por el modelo basado en actividades.

Los modelos basados en actividades son los más ambiciosos ya que su objetivo es sistematizar el comportamiento de cada individuo a lo largo del día para posteriormente poder predecir sobre el mismo. Al igual que los basados en circuitos, requieren como insumo encuestas de 24 horas con gran cantidad de variables. Su procesamiento necesariamente será en *software*, con el tiempo adicional que conlleva el uso de robustas bases de datos [20].

Los desarrolladores de proyectos de transporte, así como específicamente el personal que proponga el modelo de estimación de tránsito, deberán establecer como primer punto cuál es la precisión objetivo del estudio. Utilizar modelos modernos como el basado en actividades será pertinente en tanto el detalle obtenido sea aprovechado por los desarrolladores y sus objetivos no puedan ser alcanzados con modelos más simples.

Si no es posible contar con profesionales dedicados exclusivamente al monitoreo del modelo de tránsito, se recomienda utilizar uno más simple que puedan utilizar profesionales de otras áreas afines, sin ser expertos en transportes. Así, el modelo clásico de cuatro pasos no pierde vigencia en su aplicación a pesar de sus limitaciones conceptuales. De contar con los recursos económicos y conocimientos técnicos para hacer uso de *software* especializado, puede considerarse el uso del modelo basado en circuitos para mejorar la precisión de la estimación.

Para todos los modelos, será una limitación según la región, la posibilidad de recolectar en campo los datos requeridos por un método confiable [13]. Asimismo, deberán validarse los procedimientos del modelo escogido de modo que representen la realidad local, dada su variabilidad en cada sitio.

Referencias

- [1] M. Omer, H. Kim, K. Sasaki y K. Nishii, «A Tour-based Travel Demand Model Using Person Trip Data and Its Application to Advanced Policies,» *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 14, n° 2, pp. 221-230, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-010-0221-6>
- [2] P. Davidson, «A new approach to transport modelling - the Stochastic Segmented Slice Simulation (4S) model and its recent applications,» de *Australasian Transport Research Forum 2011 Proceedings*, Adelaide, Australia, 2011.
- [3] O. Petrik, M. Adnan, K. Basak y M. Ben-Akiva, «Uncertainty analysis of an activity-based microsimulation model for Singapore,» *Future Generation Computer Systems*, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.04.078>

- [4] J. d. D. Ortúzar y L. G. Willumsen, *Modelling Transport*, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd., 2011.
- [5] K. C. Sinha y S. Labi, *Transportation Decision Making*, New Jersey, EEUU: John Wiley & Sons Inc., 2007.
- [6] D. Krasic y L. Novacko, «The Impact of Public Transportat Network Accessibility on Trip Generation Model,» *Traffic & Transportation*, vol. 27, pp. 165-172, 2015.
- [7] E. J. Miller, M. J. Roorda y J. A. Carrasco, «A Tour-Based Model of Travel Mode Choice,» de *10th International Conference of Travel Behaviour Research*, Lucerna, Suiza, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11116-004-7962-3>
- [8] Ministerio de Obras Públicas y Transportes, «Plan Nacional de Transportes de Costa Rica 2011-2035,» San José, Costa Rica, 2011.
- [9] S. Ponnuswamy y D. Johnson, «Travel Demand Forecasting,» de *Urban Transportation: Planning, Operation and Management*, McGraw-Hill Professional, 2012.
- [10] National Cooperative Highway Research Program, «Travel Demand Forecasting: Parameters and Techniques,» National Academy of Sciences, 2012.
- [11] N. Ferdous, C. Bhat, L. Vana, D. Schmitt, J. Bowman, M. Bradley y R. Pendyala, «Comparison of Four-Step Versus Tour-Based Models in Predicting Travel Behavior Before and After Transportation System Changes,» Ohio Department of Transportation, Ohio, EEUU, 2011. DOI: <https://doi.org/10.3141/2303-06>
- [12] Westat, «2017 NHTS Data User Guide,» Federal Highway Administration, Washington, EEUU, 2018. Disponible: <https://nhts.ornl.gov/>
- [13] J. Chmielewski, Interviewee, *Travel Demand Model Case Study: Warsaw*. [Entrevista]. 5 March 2018.
- [14] T. F. Rossi y Y. Shiftan, «Tour Based Travel Demand Modelling in the US,» *IFAC Transportation Systems*, pp. 381-386, 1997.
- [15] M. Ben-Akiva, *Travel Demand Modeling*, Massachusetts Institute of Technology, 2008. Disponible: <https://ocw.mit.edu/courses/civil-and-environmental-engineering>
- [16] M. G. McNally y C. R. Rindt, «The Activity-Based Approach,» Institute of Transportation Studies, University of California, California, EEUU, 2007.
- [17] W. Davidson, R. Donnelly, P. Vovsha, J. Freedman, S. Ruegg, J. Hicks, J. Castiglione y R. Picado, «Synthesis of first practices and operational research approaches in activity-based travel demand modeling,» *Transportation Research*, vol. 41, pp. 464-488, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2006.09.003>
- [18] M. Kutz, «Travel Demand Forecasting for Urban Transportation Planning,» de *Handbook of Transportation Engineering*, McGraw-Hill Education, 2011.
- [19] H. Frey, U. Leth, A. Mayerthaler y T. Brezina, «Predicted Congestions Never Occur. On the Gap Between Transport Modelling and Human Behaviour,» *Transport Problems*, vol. 6, n° 1, 2011. Disponible: <http://transportproblems.polsl.pl/>
- [20] J. L. Bowman y M. E. Ben-Akiva, «Activity-based disaggregate travel demand model system with activity schedules,» *Transportation Research*, vol. 35, pp. 1-28, 2000.

Utilización de un dispositivo electrónico de última generación para la determinación experimental del coeficiente de convección de una placa plana de aluminio

Use of last generation electronic device for the experimental computation of the convection coefficient over a flat aluminum plate

Luis Diego Ramírez-González¹, Luis Parras-Anguaita²,
Carlos del Pino-Peñas³

Fecha de recepción: 21 de junio de 2018

Fecha de aprobación: 13 de setiembre de 2018

Ramírez-González, L D; Parras-Anguaita, L; Pino-Peñas, C. Utilización de un dispositivo electrónico de última generación para la determinación experimental del coeficiente de convección de una placa plana de aluminio. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-2. Abril-Junio 2019. Pág 122-133.

DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v32i2.4354>

- 1 Estudiante Ing. Electromecánica con énfasis en Mantenimiento Industrial, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: lramirez@ieee.org
- 2 PhD. Mecánica de fluidos. Profesor contratado Doctor e investigador, Universidad de Málaga (UMA), España. Correo electrónico: lparras@uma.es
- 3 PhD. en Mecánica de fluidos. Profesor titular contratado doctor, investigador, Subdirector de Posgrado e Investigación Universidad de Málaga (UMA), España. Correo electrónico: cpino@uma.es



Palabras clave

Dispositivo electrónico de última generación; transferencia de calor; coeficiente de convección.

Resumen

Este artículo considera la comprobación de funcionamiento de una matriz de sensores capaces de medir la temperatura, de un dispositivo diseñado y creado por el departamento de ingeniería electrónica de la Universidad de Málaga, España. Para las pruebas se utiliza un chorro de aire a una temperatura menor al ambiente, que impacta una placa plana de aluminio ubicada sobre dichos sensores. Modificando la relación adimensional entre la altura y el diámetro de salida del chorro (H/D) y con un adecuado procesamiento de datos mediante el uso de Matlab se encuentran diferentes curvas características. Además, se determina el coeficiente de convección mediante la relación entre la pendiente de la gráfica resultante de la evolución temporal de la temperatura y las propiedades físicas del aluminio.

El objetivo principal del trabajo es la comprobación de la funcionalidad del dispositivo electrónico creado por la Universidad, el cual se realiza con éxito. Además, se utilizan técnicas de visualización para comprobar el comportamiento del chorro de aire fresco al impactar la placa. Tanto el dispositivo, como la utilización de chorros de aire tienen amplias funcionalidades en la industria (refrigeración, calefacción, procesos de secado, limpieza, entre otros) y algunas más específicas para el dispositivo como la medición a tiempo real de temperaturas bidimensionales en zonas de difícil acceso.

Keywords

Last generation electronic device; heat transfer; convection coefficient.

Abstract

This article deals with a jet of air at a lower temperature than the environment, which discharges onto a flat aluminum plate located over a matrix of sensors that measures the temperature in the area of impact. Subsequently, characteristic curves are found for each height and diameter ratio of the jet (H/D), through data processing. The coefficient of convection is determined using the relationship between the slope of the graph together with the result from the temporal evolution of the temperature.

The main objective of the work is the verification of the functionality of the advanced electronic device, which is carried out successfully. Also, and using visualization techniques the behavior of the jet is analyzed. Both the electronic device and the use of air jets have great interest in the industry (refrigeration, heating, drying processes, cleaning among others). In the case of the advance electronic device it is possible to provide data regarding real-time temperature measurement in areas of difficult access.

Introducción

El impacto de chorros de diferentes fluidos, principalmente de agua o aire, tiene gran importancia en aplicaciones industriales, normalmente se utilizan chorros turbulentos debido a su capacidad calorífica. Sin embargo, en casos específicos se llegan a utilizar flujos en régimen laminar [1]. Se tienen diferentes ejemplos de chorros impactando sobre diferentes superficies. Hay aplicaciones en las que chorros impactan a gran escala sobre el suelo como los utilizados en el avión VTOL [2]. También hay unos a menor escala como los utilizados en la obtención de la fuerza cortante que sufre el tejido vascular en el estudio de la aterogénesis [3]. La utilización de chorros laminares está limitada para aspectos más específicos, ya que la relación H/D (H distancia entre la superficie de impacto y el chorro, D el diámetro de salida del chorro) debe oscilar en valores bajos, por lo que montajes grandes o de alta velocidad normalmente no lo permiten [4].

Los primeros experimentos realizados en este tema datan de 1964, en el cual se hace un estudio para chorros laminares y turbulentos, los resultados son vigentes aún para nuestros experimentos. Estos primeros estudios se limitaron para un chorro perpendicular a la placa y sin variaciones de temperatura, posteriormente se realizaron más estudios para diferentes ángulos de impacto.

En el experimento realizado en la Universidad de Málaga (UMA) se recrea una experiencia similar a la mencionada anteriormente, un chorro de aire fresco que impacta perpendicularmente sobre una placa de aluminio que se encuentra a mayor temperatura. Se analiza este caso con un gradiente de temperatura con respecto a la ambiental por su interés industrial. Para la medición de la temperatura se utiliza un dispositivo electrónico diseñado y ensamblado en la Escuela de Ingenierías Industriales de la UMA que permite calcular cuantitativamente el cambio de temperatura que se produce a lo largo de la placa.

Según los desarrolladores del dispositivo (departamento de Ingeniería Electrónica de la UMA), este permite mediciones altamente precisas sin ser intrusivo y con una filosofía de tecnología electrónica que aumenta la lectura de múltiples sensores con un canal de datos minimizados. Además, es una solución para condiciones de medición complicadas, tal y como lo mencionan los creadores de la placa, por ejemplo, medir la temperatura de un asiento en un vehículo cuando hay una persona sentada, entre otros casos [5]. Existen otros tipos de placas para la medición de temperatura en arreglos similares a la utilizada en el experimento. Sin embargo, la electrónica utilizada hace de este dispositivo la mejor opción, ya que las otras placas similares para 64 sensores utilizan 128 cables y hacen la toma de datos en aproximadamente un minuto [6], mientras que el dispositivo utilizado tiene un arreglo de sensores que lo hace ser muy eficiente, utiliza pocos cables (3 cables de datos, 3 de alimentación) y la toma de datos se realiza en un tiempo del orden de milisegundos, todo esto a un coste bajo [5]. Cabe mencionar que el objetivo de este artículo es la comprobación del funcionamiento de la placa, más allá que su desarrollo, esta etapa estuvo a cargo del departamento de Ingeniería Electrónica de la UMA.

La forma de visualización más utilizada en experimentos con aire se basa en las partículas trazadoras de la técnica PIV (Particle Image Velocimetry), que está diseñada para determinar el campo instantáneo de velocidades en el plano del fluido. En este experimento la introducción de partículas visibles se realizó con un burbujeador de aceite dando lugar a una emulsión de aceite y aire fresco con un tamaño de sus partículas del orden de un micrómetro y con una densidad similar a la del aire. Estos dos aspectos hacen que la técnica sea no intrusiva, aspecto a considerar cuando se esté realizando mediciones con cualquier técnica de visualización. Si bien es cierto que el objetivo principal del PIV no es la observación cualitativa, al hacer incidir un plano láser sobre el fluido con las pequeñas partículas de aceite permite la visualización de las mismas, y así comprobar que para los parámetros utilizados (relaciones H/D, la temperatura

de salida y de la placa, caudal, presión del ambiente) el fluido es laminar, inestable o turbulento antes y después del impacto [1].

Siendo capaces de realizar mediciones de temperatura a lo largo de la placa en tiempo real se puede realizar el estudio de la transferencia de calor que ocurre cuando la superficie sufre el impacto del chorro. La termodinámica reconoce como métodos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. En el caso de radiación (método en el cual se da la transferencia de calor desde el Sol hasta la Tierra), las partículas transfieren el calor a otras antes de chocar. Estos mecanismos de transferencia son más eficientes en ambientes vacíos y con pocos obstáculos. Por este motivo, en algunos casos se puede obviar su aporte ya que es insignificante, ingenierilmente, con respecto a la transferencia por convección o conducción [8].

La convección, estrictamente hablando, es un transporte de energía por el movimiento en el medio. En ingeniería se suele asociar el término a la transferencia de calor que se da entre un fluido en movimiento y un cuerpo sólido. Existen dos tipos de convección, forzada y natural. La primera se refiere a un flujo que se destina para este fin, ya sea mediante un sistema de bombeo o impulsión, gravedad o procesos externos, mientras que la segunda se da por diferencias de densidades. Como se comentaba anteriormente, los flujos más utilizados en ingeniería para la transferencia de calor son turbulentos. En este régimen la convección forzada se suele aprovechar porque utilizan números de Reynolds elevados. No obstante, los fluidos laminares también son funcionales, según sea la aplicación [9].

Para casos de fluidos laminares principalmente (también pasa con flujos turbulentos, pero en menor medida), se da la condición de no deslizamiento mediante la cual el fluido se adhiere a una superficie no porosa, como una placa de aluminio y se convierte en una película sobre el sólido. Se dice que en fluidos turbulentos se da en menor medida por la recirculación del fluido. En la figura 1, Cengel ejemplifica el perfil de velocidades, los tamaños de las películas y las direcciones del fluido. En el experimento de este artículo se utilizó un fluido laminar, lo que corresponde a la primera parte del diagrama presentado en la figura 1. Se puede observar que la velocidad en la zona cercana a la placa es cero y en las zonas más alejadas es más alta, mientras que en fluidos turbulentos las velocidades lineales son menores, pero las capas más cercanas a la placa tienen más velocidad que en el caso laminar.

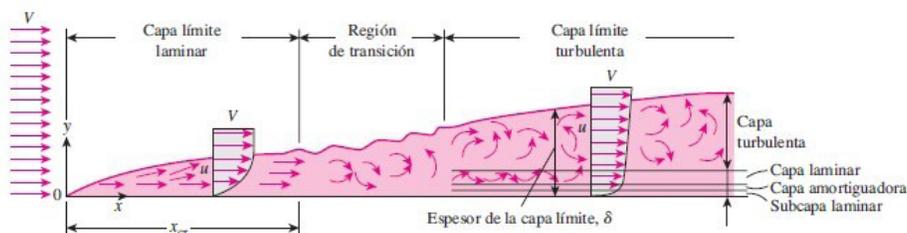


Figura 1. Desarrollo de la capa límite en una placa plana. [9]

La medición del efecto de película en muchos casos se convierte en una tarea complicada, por lo que obtener valores de coeficientes de convección es una tarea difícil. Se han obtenido rangos o valores típicos, como los presentados en el libro de Transferencia de Calor [9] para casos genéricos en donde se habla de un sólido impermeable y un gas o un líquido mediante convección libre o forzada. Para la combinación de convección libre, gas-sólido, se da un rango de [2-25] W/m² K, para convección libre, líquido-sólido el rango es de [50-1000] W/m²

K, para convección forzada, gas-sólido, se da un rango de $[2-250]$ W/m² K, para convección forzada, líquido-sólido el rango es de $[50-2000]$ W/m² K. El caso del experimento corresponde a convección forzada, en una interacción de gas-sólido.

En caso de no existir el efecto película, o que no tenga una aparición significativa, las mediciones deben de considerarse con una fricción cero. En este caso tanto la capa superior como inferior en un fluido laminar tienen la misma velocidad [10]. Esto quiere decir que, para el experimento realizado en este artículo, en caso de que no se haga presente el efecto de la viscosidad, los contornos de velocidad deben ser concéntricos y la temperatura aumenta desde el centro de la placa hasta que llegue a equipararse con la temperatura ambiente.

Materiales y métodos

El montaje experimental se realiza en la Universidad de Málaga, España. Se utilizó un cilindro de metacrilato con un diámetro de 400 mm, y 1000 mm de alto esto con el fin de aislar y proteger de perturbaciones al chorro de aire, ya que éste puede verse influenciado por las corrientes de aire del laboratorio. Dentro del cilindro se ha colocado una mesa de elevación para la placa, con la finalidad de que el aire frío baje, se desplace por la parte inferior del cilindro y no interfiera con las mediciones del dispositivo. En la figura 2 se puede observar una fotografía del montaje experimental.



Figura 2. Montaje experimental.

En la parte superior del cilindro se coloca una tapa por donde se introduce el aire frío a una temperatura (T_1) menor a la ambiental dentro del cilindro (T_2). Para la inyección del fluido es necesario utilizar un compresor. Desde la salida del tanque de almacenamiento hasta el conducto de salida, la línea neumática debe pasar por un proceso de secado y enfriamiento. Es importante colocar el enfriador luego del secado porque al retirarle humedad la temperatura del fluido disminuye.

El tubo de salida tiene un diámetro interior de 6.87 mm y se utiliza un micrómetro de la marca Mitutoyo, el cual se presenta en la figura 3 (en conjunto con el soporte del tubo), para garantizar una relación H/D bastante precisa, ya que se puede modificar el valor de H con una tolerancia de la centésima de milímetro. La zona de impacto es una superficie cuadrada de 140 x140 mm², el diámetro del círculo circunscrito en el área de impacto es 20 veces mayor que el diámetro de salida del chorro, por lo que su relación es suficientemente grande para realizar el estudio deseado.



Figura 3. Micrómetro marca Mitutoyo. [9]

En el montaje se debe asegurar la perpendicularidad del chorro con respecto a la placa, además el nivelado de la placa. Para este fin, se utilizó la ayuda de un nivel digital de $\pm 0.1^\circ$ de precisión y $\pm 0.2^\circ$ de exactitud.

Para comprobar que el montaje permite flujos laminares se utiliza la ayuda de un láser continuo verde de 532 nm con una potencia máxima de 2 W. El láser se hace pasar por un juego de lentes para abrir en un plano bidimensional, el cual debe incidir con el centro del tubo en la salida del chorro y se hacen observaciones cualitativas, en las cuales fue necesario la utilización de un burbujeador de aceite, el cual puede generar tanto humo que crea una mezcla homogénea sin cambiar la densidad del aire. Además, las partículas no son tóxicas por lo que no requiere equipo de seguridad. El burbujeador se presenta en la figura 4, en donde se puede observar el aceite vegetal, sin estar burbujeadando, un tubo de PVC en el recipiente cerrado, la entrada y salida de aire con sus respectivas válvulas. La producción de burbujeo es estrictamente proporcional a la cantidad de aire inyectado, además es un productor de partículas continuo lo que facilita las visualizaciones.



Figura 4. Burbujeador de aceite.

El montaje del dispositivo de medición se puede observar en la figura 5. Como se pretende medir la temperatura y con la idea de aislarlo aún más del entorno se coloca corcho blanco en su perímetro. El cableado de alimentación y datos sale por un orificio ubicado en cilindro. Fuera del cilindro se tiene un ordenador para la recolección de datos de la placa de sensores que son traducidos por una placa Nexys 3, además una fuente de alimentación de ± 5 V.

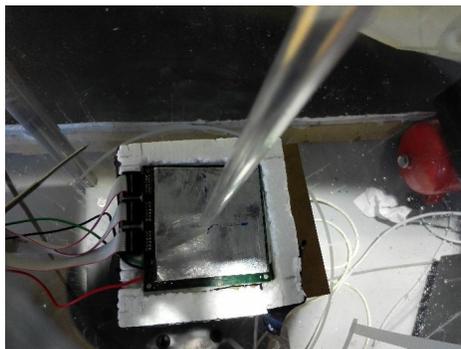


Figura 5. Montaje del dispositivo de medición.

Con el fin de tener una diferencia de temperaturas entre el chorro y la ambiental se utiliza un termostato de inmersión JP Selecta, además de un secador de aire ya que el dispositivo no tiene protección contra la humedad. Se llegan a diferencias de temperatura de 4 K.

El siguiente paso antes de realizar las mediciones es ajustar el cero del micrómetro Mitutoyo en el punto de contacto con la placa, el cual debe ser en el centro de la matriz de 8x8 sensores de medición, no en el centro geométrico, porque se tendrían valores desplazados y los programas de procesamiento de datos no tendrían resultados reales. A partir de este cero se hacen las mediciones de H. En la figura 6 se presentan los dos esquemas del montaje, con la especificación de las cotas correspondientes a H y D.

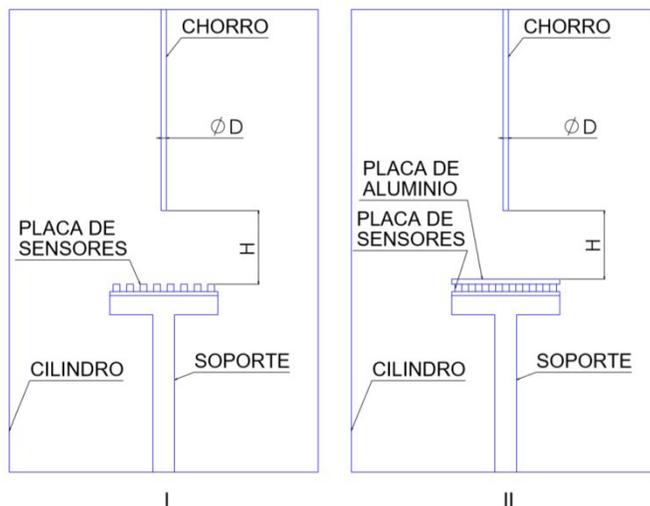


Figura 6. Esquema del montaje sin placa de aluminio (I), con placa de aluminio (II).

Resultados

Los resultados de las visualizaciones se pueden observar en la figura 7, los cuales se obtuvieron con cámaras de alta velocidad y con la introducción de una emulsión de aceite y aire fresco, para las relaciones de H/D límites ($H/D=1$, $H/D=5$), se puede observar que ambos flujos están en régimen laminar después del impacto para la configuración del montaje II (Figura 6). En el caso $H/D=1$ se observa más concentración de aire en la placa ya que la distancia de impacto es menor, mientras que en para $H/D=5$ la visualización del impacto muestra una mayor dispersión al abrirse el chorro antes del impacto. También se observan eventuales patrones de turbulencia a medida que nos alejamos de la zona de impacto, especialmente para $H/D=5$.

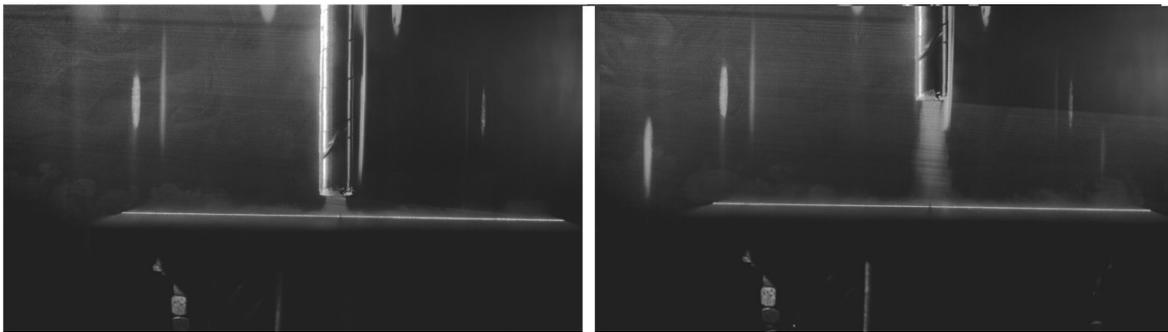


Figura 7. Visualizaciones del comportamiento del chorro a $H/D=1$ y $H/D=5$.

Las primeras mediciones se realizaron sin la placa de aluminio, con el fin de obtener la simetría en las mediciones de temperatura desde el punto de impacto (similares a anillos concéntricos) y comprobar la funcionalidad de la placa. En la figura 8 se muestran los anillos concéntricos de temperatura para relaciones de $H/D= 1,2,3,4,5$ y un $\Delta T=4K$. La información brindada por la placa de datos, gracias al uso de Labview se registra en un archivo de texto que después es procesado y graficado con la utilización de Matlab.

Debido al diseño de la placa, el efecto película no es visible, ya que los sensores están por encima de la placa. En los casos donde el chorro está más cerca de la placa las temperaturas frías están más concentradas en el centro. Sin embargo, se observa en la figura 8 que la diferencia entre gráficas es muy pequeña. Estos datos corresponden al montaje I de la figura 6.

Cuando se hacen las mismas mediciones para las mismas relaciones de H/D , pero agregando la placa de aluminio sobre los sensores (montaje tipo II de la figura 6), el efecto película aparece y hace que las dianas se vean invertidas, estando la parte más caliente en centro y las más frías en los extremos. Las velocidades en las zonas de impacto son casi cero, por lo tanto, la transferencia de calor por convección en esas zonas es muy baja y se obtienen los patrones que se muestran en la figura 9. Para esta figura, al igual que en la figura 8, el procesado y graficado de los datos se hizo gracias a Matlab, el cual se inicia con un archivo de texto que es generado por Labview, definido por los creadores de la placa.

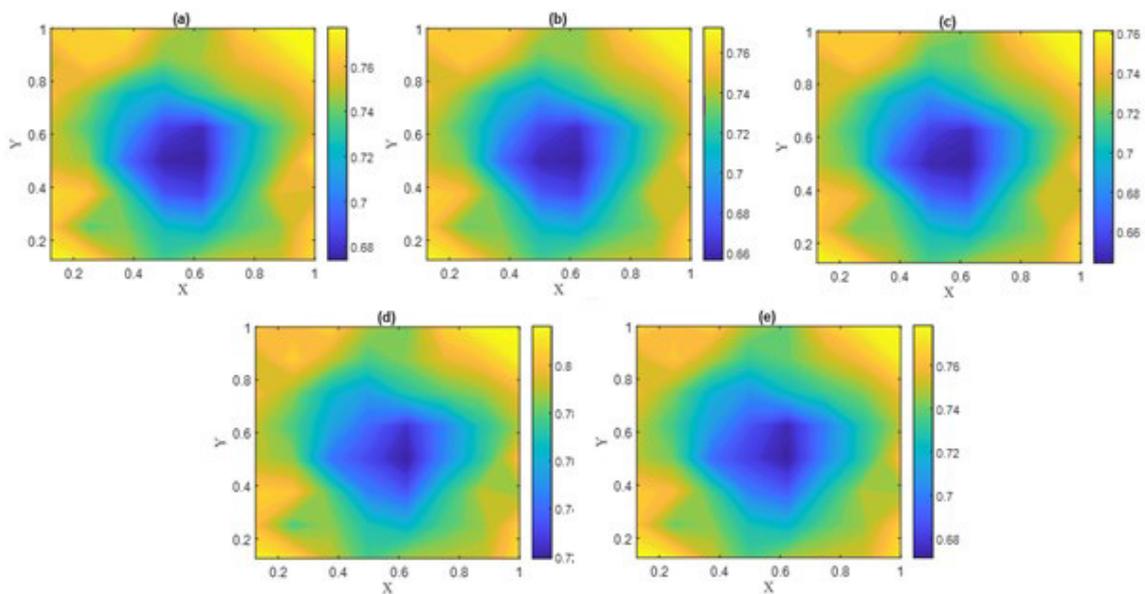


Figura 8. Anillos concéntricos de temperatura para un $\Delta T=4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $H/D=1$ (a), $H/D=2$ (b), $H/D=3$ (c), $H/D=4$ (d), $H/D=5$ (e). En la configuración I. [Fuente propia. Matlab 2018]

Para cada relación de H/D , se obtiene una curva característica de temperatura promedio entre temperatura inicial en función de un tiempo característico t_0 , este se conoce con la siguiente fórmula:

$$epc_p \frac{d\bar{T}}{dt} = h (\bar{T} - T_2)$$

Además, teniendo en cuenta que

$$\theta = \frac{\bar{T} - T_1}{T_2 - T_1} \quad ; \quad \theta_0 = \frac{T_{t=0} - T_1}{T_2 - T_1}$$

y despejando matemáticamente h se obtiene:

$$h = epc_p m$$

donde m es la pendiente de la siguiente ecuación:

$$\ln \frac{\theta}{\theta_0} = m \cdot T + a$$

Este valor de m se encuentra con la línea de mejor ajuste para cada uno de los datos tomados experimentalmente que corresponden a la evolución temporal de la temperatura.

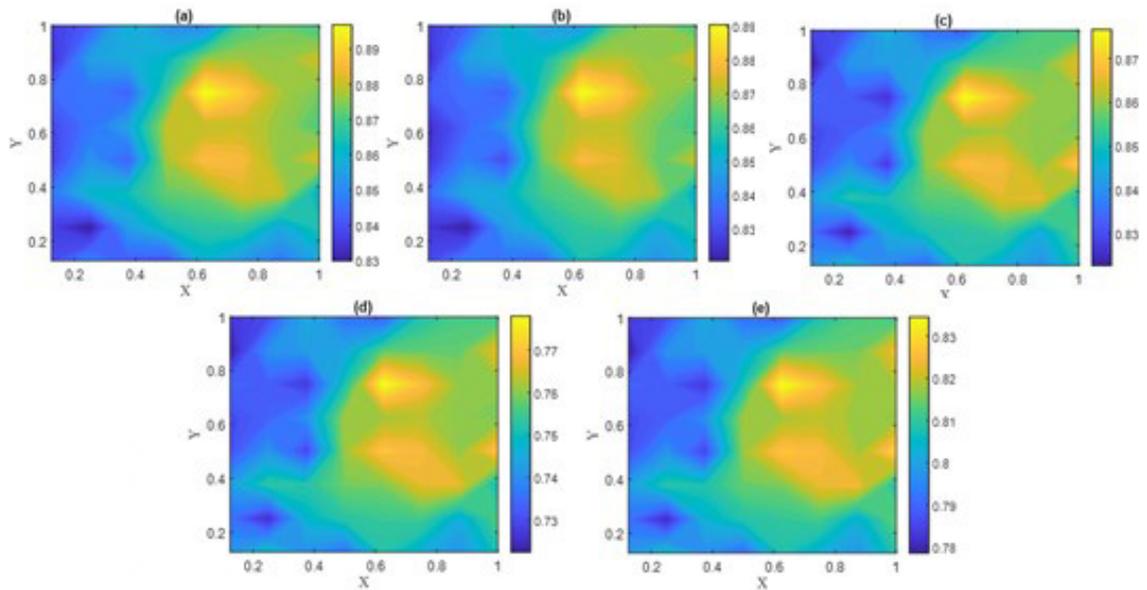


Figura 9. Anillos de temperatura para un $\Delta T=4K$, $H/D=1$ (a), $H/D=2$ (b), $H/D=3$ (c), $H/D=4$ (d), $H/D=5$ (e). En la configuración II. [Fuente propia. Matlab 2018]

En la figura 10 se presentan las líneas de mejor ajuste (las líneas continuas) y los valores experimentales (diferentes formas). La dispersión entre los datos para una misma relación H/D es mínima lo que da certeza de la precisión en las mediciones, garantizando la bondad de los datos experimentales.

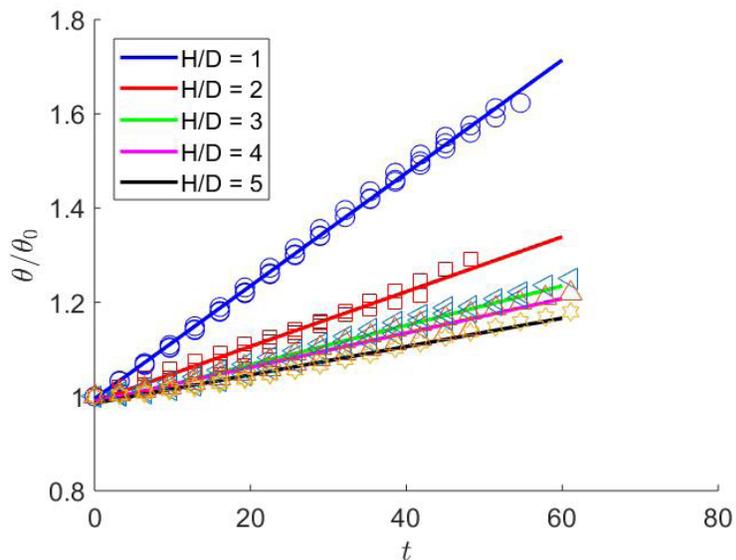


Figura 10. Relaciones de en función del tiempo adimensional t para las diferentes relaciones de H/D . [Fuente propia. Matlab 2018]

Tomando los valores de densidad del aluminio laminado y el calor específico del aluminio del libro de Transferencia de Calor, tabla A-2 [9] se calculan los valores de h para cada experimento, se obtiene un valor promedio por relación de H/D . El resultado se muestra en la figura 11.

Según la teoría los valores de h , para relaciones de gas-sólido en convección forzada no podían pasar de $250 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ y no podía ser menor a $2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, los valores obtenidos en el modelo experimental rondan un rango de 60 a $220 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, por lo que se considera exitoso, tanto el experimento como el funcionamiento del dispositivo electrónico.

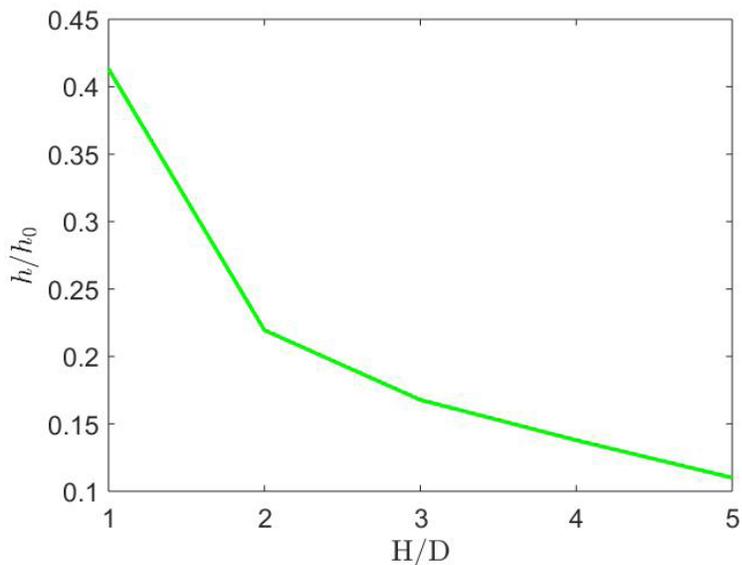


Figura 11. Valores de h/h_0 contra relaciones de H/D . [Fuente propia. Matlab 2018]

Conclusiones y recomendaciones futuras

Se ha montado un experimento para ensayar una placa de sensores de temperatura mediante una metodología electrónica de última generación, la cual dio resultados satisfactorios ya que se han encontrado valores de coeficiente de convección forzada en un rango de $[60 \text{ a } 220] \text{ W/m}^2 \text{ K}$, el cual está dentro de lo aceptado por la literatura. Además, las mediciones del dispositivo sin la placa de aluminio concuerdan con lo esperado y descrito en la teoría. Para relaciones mayores a $H/D=5$ los resultados no presentan variaciones significativas, de $H/D=1$ a $H/D=2$ es donde se produce la mayor disminución de h , probablemente asociado a un cambio de régimen en la zona de impacto. Las desviaciones entre los resultados para un mismo H/D permiten afirmar que los resultados son precisos y repetibles. Se estima oportuno relacionar en futuros trabajos los patrones de las visualizaciones (y el régimen laminar o turbulento del flujo) con el coeficiente h calculado, así como aumentar el rango de diferencia de temperaturas a valores superiores a 4K .

Agradecimientos

Se agradece profundamente a Sergio Pinazo y Alexandro Díaz por la ayuda brindada en el montaje experimental, a Raquel Fernández, José Hidalgo, Jorge Romero, José Martín y Francisco Ríos por permitir la utilización del dispositivo electrónico de medición. A la Universidad de Málaga (UMA) y al Tecnológico de Costa Rica (TEC) por la ayuda recibida para la estancia de movilidad, las instalaciones y los medios facilitados.

Referencias

- [1] P. G. Castillo, Estudio experimental del impacto sobre una superficie plana de un chorro frío, Málaga, España: Universidad de Málaga, 2011.
- [2] J. M. Bergthorson, K. Sone, T. W. Mattner, P. E. Dimotakis, D. G. Goodwin y D. I. Meiron, Impinging laminar jets as moderate Reynolds numbers and separation distances, Pasadena, California 91125, USA: California Institute of Technology, 2005.
- [3] J.-J. Shu y G. Wilks, Heat Transfer in the Flow of a Cold, Axisymmetric Vertical Liquid Jet Against a Hot, Horizontal Plate, Singapore: School of Mechanical and Aerospace Engineering, 1996.
- [4] J. Baonga, H. Louahila-Gualous y M. Imbert, Experimental study of the hydrodynamic and a heat transfer of free liquid jet impinging a flat circular heated disk, Belfort, France: Femto ST, 2005.
- [5] J. A. Higalgo Lopez, J. Romero Sanchez, R. Fernandez Ramos, J. Mantín Canales y J. Ríos Gómez, A low-cost, high-accuracy temperature sensor array, Málaga, Spain: Departamento de Electrónica, Universidad de Málaga, 2018.
- [6] Liu, Chang, Cascioli, Heusch y McCarthy, Design and development of a thermal imaging system based on a temperature sensor array for temperature measurements of enclosed surfaces and its use at the body-seat interface, California, USA: Measurement, 2017.
- [7] R. Bardera Mora, Aplicación del PIV a la medida del coeficiente de resistencia aerodinámica, Madrid, España: Facultad de Ciencias Físicas, 2005.
- [8] J. G. Marroquín, Determinación experimental de coeficientes de transferencia de calor para convección libre y forzada, Nuevo Leon: Nicolas de los Garza, 1998.
- [9] Y. A. Cengel, Transferencia de Calor, México DF: McGraw-Hill, 2004.
- [10] J. Coberan y R. Royo, «Mecánica de Fluidos,» Universidad Politécnica de Valencia, 16 Junio 2006. [En línea]. Available: <http://www.upv.es/ul/U0296621.pdf>. [Último acceso: 1 Junio 2018].

Economía Ambiental como elemento para el Desarrollo de la Asociación de Productores Lácteos LLAFRAK

Environmental Economy as an element for the Development of the Association of Dairy Producers LLAFRAK

Marcela Fernández-Rodríguez¹, Javier Gómez-Jara²

Fecha de recepción: 18 de julio de 2018

Fecha de aprobación: 1 de octubre de 2018

Fernández-Rodríguez, M; Gómez-Jara, J. Economía Ambiental como elemento para el Desarrollo de la Asociación de Productores Lácteos LLAFRAK. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-2. Abril-Junio 2019. Pág 134-145.

DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v32i2.4355>

1 Escuela de Ciencias Naturales y Exactas, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional San Carlos, Costa Rica. Correo electrónico: mfernandez@tec.ac.cr

2 Ingeniería en Gestión Ambiental, Universidad Técnica Nacional, Sede San Carlos, Costa Rica. Correo electrónico: jgomezj@utn.ac.cr



Palabras Claves

Economía ambiental; externalidades; pequeñas agroindustrias; desarrollo empresarial.

Resumen

En la Región Huetar Norte de Costa Rica, existen gran cantidad de pequeñas agroindustrias conformadas por uno o varios socios que aportan recursos, pero que inician con poco conocimiento sobre temas de buenas prácticas en procesos de transformación o de gestión administrativa que incluya el tema económico desde la perspectiva ambiental.

La asociación de productores LLAFRAK es una pequeña planta procesadora de lácteos, ubicada en Juanilama de Pocosal, donde 10 socios entregan su producción lechera para elaborar queso, yogurt y natilla. Actualmente han desarrollado algunas mejoras en sus procesos, pero aún cuentan con muchas carencias por falta de recursos.

Este artículo pretende, a través de un análisis de la situación actual de esta pequeña empresa, determinar las externalidades positivas y negativas que definirán las potencialidades para el desarrollo de la empresa dentro del contexto socio-económico de la región.

Una vez realizado el análisis respectivo se concluye que la empresa tiene gran potencial de desarrollo, ya que sus externalidades negativas pueden ser resueltas en el mediano plazo, generando fortalezas que les permitirá iniciar un proceso de mejora continua y de expansión a nivel regional, nacional e internacional.

Keywords

Environmental economics; externalities; small agro-industries; business development.

Abstract

In the North Region of Costa Rica, there is a large number of small agro-industries composed by one or more partners that provide with resources, but begin with little knowledge on good practices in transformation processes or administrative management that includes the economic issue from the environmental perspective.

The producer association LLAFRAK is a small dairy processing plant, located in Juanilama de Pocosal, where 10 partners deliver their dairy production to produce cheese, yogurt and sour cream. Currently, they have developed some improvements in their processes, however they still have many shortages by the lack of resources.

This research article, through an analysis of the current situation of this small business, to determine the positive and negative externalities that will define the potential for the development of the company within the socio-economic context of the region.

After the corresponding analysis it is concluded that the company has great potential for growth, since its negative externalities can be solved in medium term, generating strengths that will allow them to initiate a process of continuous improvement and expansion at regional, national and international level.

Introducción

En Costa Rica las micro, pequeñas y medianas empresas (MIPYMES) agroindustriales son fuentes de empleo local que permiten el desarrollo y el emprendimiento, ya que según datos del MEIC al 2016, representan el 93,3% del total de empresas a nivel nacional [1].

Específicamente, en la Región Huetar Norte (RHN), el sector empresarial está conformado en un alto porcentaje (83%) por MIPYMES, de las cuales un 23% son empresas agroindustriales y además cuenta con un número importante de organizaciones de apoyo a distintos grupos [2]. Por ejemplo, la Agencia para el Desarrollo de la RHN ha impulsado la estrategia Zona Económica Especial (ZEE) que ha fijado como meta “convertir a la región en un polo de desarrollo, que atraiga inversiones con alta dosis de tecnología, que exporte productos con valor agregado y que tenga un clima de inversión suficientemente retador para competir con otras zonas de la región” [3].

Estas empresas inician con procesos sencillos, muchas veces artesanales y requieren de apoyo para que poco a poco desarrollen las habilidades que les permita insertarse en un mercado globalizado y de una alta competencia [4]. Generalmente inician con una idea y muchas ganas de trabajar, pero en general carecen de conocimientos en ramas de trabajo complementarias a su actividad, como por ejemplo: los conocimientos económicos para poder definir precios y presupuestos, los conocimientos ambientales para definir cómo impactar lo menos posible la naturaleza, los conocimientos legales para registrar marcas o derechos de autor, y el conocimiento técnico para obtener un código de barras o empaquetar los productos, entre otros [5].

Un ejemplo claro de una pequeña agroindustria es la Asociación Procesadora de Lácteos LLAFRACK (ver logo de los productos en la figura 1), que se localiza en Pocosol, distrito No.13 del cantón de San Carlos, RHN del país. Actualmente tiene una planta procesadora de 300 m² y brinda trabajo directo a 5 personas. Entre sus productos podemos encontrar quesos, yogurt y natilla, los cuales son distribuidos por un empleado en el cantón de San Carlos.

En la RHN, la producción pecuaria es una actividad muy importante. San Carlos junto con los cantones de Pérez Zeledón y Sarapiquí agrupan el 21,2% de las fincas con esta actividad [6].

Cuando se analiza el mercado lácteo, es precisamente la marca Dos Pinos, la que predomina en casi todos los productos [7]. Las demás empresas procesadoras son pequeñas agroindustrias, las cuales se caracterizan por carecer de una adecuada comercialización de sus productos, de buenas prácticas en sus procesos y de encadenamientos productivos que les permita crecer y competir en el mercado. De acuerdo a datos recopilados en el informe elaborado por Barrientos, el problema de la calidad en la producción se debe a que, una gran cantidad de productores de leche, queso y natilla no tienen una infraestructura ni equipos adecuados para una producción higiénica que cumpla con la normativa del Ministerio de Salud y así poder competir dentro del sector lácteo [8].

Por tal motivo, en este artículo se ha seleccionado la empresa LLAFRACK para determinar cuáles son, según los conceptos de la economía ambiental, las externalidades positivas que son consideradas como pilares o fortalezas de la empresa y cuáles son las externalidades negativas, que la empresa debe trabajar para resolver y convertir estas deficiencias o debilidades en factores positivos que den mayor empoderamiento, capacidad de acción y desarrollo económico. Con ello se pretende dar valor agregado al trabajo que la asociación realiza y mejorar y/o encauzar los esfuerzos con el fin de lograr una mayor eficiencia en sus procesos.

Fundamento Teórico

La economía ambiental se puede definir como: “Una disciplina económica que habitualmente estudia el problema de las externalidades y la asignación intergeneracional óptima de los recursos agotables” [9]. Hoy en día la incorporación de la economía ambiental es fundamental para lograr el desarrollo sostenible de una empresa, región o país.

Para integrar el concepto de economía ambiental a un proyecto es necesario conocer las generalidades de la región en la que se encuentra y las características de la actividad económica que se realiza. La empresa LLAFRAK es una pequeña asociación procesadora de lácteos que se localiza en Pocosol, distrito No.13 del cantón de San Carlos, Región Huertar Norte (RHN) del país.

La propuesta estratégica definida por el Ministerio de Planificación (MIDEPLAN) en el Plan de Desarrollo de la RHN 2030 [10] integra una serie de factores derivados de todo un estudio endógeno y exógeno. Dos elementos importantes extraídos de esta propuesta y vinculantes con este proyecto son:

- Mejorar la conectividad entre cantones y los servicios básicos que permitan la generación de agronegocios, turismo y la diversificación de la estructura productiva, encadenamientos verticales y horizontales; desarrollar investigación básica y aplicada, transferencia de conocimientos, asistencia técnica, atracción de inversiones, la promoción de unidades productivas, ya sean individuales o formas asociativas, sistemas de comercialización y una mayor presencia de la banca para el desarrollo y otros fondos estatales.
- Se requiere el fortalecimiento del turismo (de naturaleza, investigación, agroturismo, ecoturismo y aventura) para profundizarlo en el sector sur y ampliarlo en el sector norte y en general en toda la región, pues existen recursos y atractivos poco explotados.

La actividad pecuaria contribuye al desarrollo económico y social de la RHN generando empleo y una mejor distribución de la riqueza. Según Muñoz & Zamora y de acuerdo a los datos de la Cámara de Productores de Leche, durante el 2011 la participación de la actividad lechera dentro del sector pecuario fue de un 40,95%, generando un valor agregado cercano a 144 mil millones de colones que representa un 11,1% de todo el valor agregado agropecuario. La producción láctea asciende a 518.466 kilogramos de leche por día, de los cuales el 88% es para leche fluida y un 12% es leche utilizada para la producción de queso. La producción de leche regional representa el 55% de la producción nacional, siendo la Cooperativa Dos Pinos la que más aporta con un 83% del total regional [7].

Según Barrientos, el consumo per cápita de leche en Costa Rica en promedio es de 188,51 kg/año, siendo uno de los más altos de América Latina, nivel que se alcanza gracias a la autosuficiencia del país en la producción de leche, lo que permite un desarrollo sostenido en el consumo, en el comercio y en la agroindustria del sector [8].

En Costa Rica instituciones públicas como el Ministerio de Economía, Industria y Comercio (MEIC), la Promotora de Comercio Exterior (PROCOMER), el Centro Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos de la Universidad de Costa Rica (CITA), el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), Consejo Nacional de la Producción (CNP), Instituto de Desarrollo Rural (INDER) entre otros, tratan de impulsar este sector agrícola y agroindustrial a través de sus programas, gracias a la Ley de fortalecimiento de las pequeñas y medianas empresas, Ley No. 8262 del 2 de mayo del 2002,

Según Barrientos y Chaves, “El fortalecimiento de la competitividad regional más el aprovechamiento de los recursos productivos de la zona, podría permitir ampliar la oferta productiva del país y con ello aprovechar el potencial exportador de la zona” [2].

Una manera de lograr ese mayor aprovechamiento de los recursos productivos, en una región de vocación agrícola, es apoyando la agroindustria ya que le permite a la población tener acceso a una mayor diversidad de productos de calidad e inocuidad para su comodidad y el disfrute. La incorporación de valor agregado redundante en mayores ganancias para los productores y transformadores de la materia prima. Además, juega un papel central en la generación de empleo, caracterizado por una marcada presencia de mujeres en su fuerza de trabajo [11].

Económicamente el sector agroindustrial genera importantes encadenamientos productivos necesarios para el desarrollo de una región, pero si analizamos las agroindustrias desde el punto de vista ambiental, según el Banco Interamericano de Desarrollo en su proyecto: Mejora en la competitividad territorial y empresarial de la RHN [12], se debe considerar que:

El sector agrícola es una fuente generadora de impactos ambientales debido al excesivo uso de fertilizantes y plaguicidas, que provocan en muchos casos contaminación del agua, suelo y aire, además de inconvenientes en la salud de las personas. Otros problemas asociados son la alteración del paisaje y la pérdida de la biodiversidad, debió a la expansión de la frontera agrícola que se da en zonas cercanas a las áreas protegidas.

El sector industrial es un fuerte demandante del recurso energético e hídrico, y al utilizar el medio ambiente como receptor de sus descargas contaminantes (residuos sólidos, vertidos y escorrentía agrícola) constituye una de las fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero y contribuye al deterioro del ambiente.

Por último, el sector pecuario, la actividad ganadera es la más importante fuente de metano (gas de efecto invernadero) en Costa Rica, además provoca erosión del suelo, alteración del paisaje, a través de construcciones monótonas, elevados volúmenes de excrementos que generan problemas de filtración de nitrógeno y fósforo (eutrofización).

Específicamente, en la industria láctea, sus procesos generan residuos sólidos, líquidos y gaseosos, de estos tres residuos los que se generan en mayor cantidad son los líquidos. Por ejemplo, en el proceso de elaboración de quesos se estima que por cada kilogramo de queso producido se generan 9 kg de suero, este suero tiene como sus principales componentes: lactosa, proteínas solubles, grasa butírica, sales minerales y una cantidad bastante alta de vitaminas del complejo B [13]. De acuerdo a la bibliografía consultada los componentes que conforman el lactosuero varían de acuerdo a cada país y a la raza bovina que se utilice. Se estima que este suero tiene un DBO que varía entre 40 000 a 50 000 mg/L y un DQO entre 2 000 a 3 000 mg/L, valores que son altos y requieren de procesos de tratamiento elaborados para poder verterlos en cualquier cuerpo receptor; el lactosuero además de producirse en gran cantidad es rico en nutrientes y es fácilmente consumible por bovinos y porcinos [14].

Si quisiéramos involucrar el concepto de desarrollo sostenible en la actividad de industria láctea no se debe considerar el lactosuero como un residuo, sino como un subproducto que puede ser utilizado en otra actividad y le genera un valor agregado a la elaboración de los productos. Además de utilizarse como suplemento alimenticio, se puede deshidratar para generar pastillas con el mismo valor alimenticio que el suero, pero en lugar de bebida los animales los hacen lamido, y una última alternativa de uso es utilizarlo para generación de energía convirtiéndolo en biogás.

Otros aspectos ambientales a tomar en consideración son: generación de residuos líquidos producto de la limpieza y desinfección del equipo de producción, emisiones de vapor y gases refrigerantes, residuos sólidos, envases de productos, consumo eléctrico, consumo de componentes químicos, ruido de los equipos de refrigeración, residuos del mantenimiento de los equipos, aceites, filtros entre otros.

Sin embargo, como ya se mencionó es innegable la importancia socioeconómica que representa estos tres sectores por separado o integrados por medio de la agroindustria. Por

tanto, es muy importante el diseño y rediseño de modelos productivos encaminados a la mejora de los procesos involucrados en las diferentes cadenas de producción y que además sean responsables con el ambiente [15]. Las instituciones públicas deben implementar medidas con el fin de disminuir los impactos ambientales producto de la agroindustria. Para ello es necesario que se brinden capacitaciones técnicas y se inviertan recursos en nuevas tecnologías más eficientes y menos contaminantes.

El uso de fuentes de energías renovables es una alternativa tecnológica para disminuir los costes ambientales. Desde 1993, CENSOLAR planteó la necesidad de utilizar los sistemas solares de captación de energía para diferentes usos en la industria, los sectores productivos y las zonas residenciales [16]. En el 2015, Portilla [17] indicó que el potencial previsto anual de energía fotovoltaica en Costa Rica es de 576 747 MW, el cual se traduce en 656 195 GWh/año y del cual solo se aprovecha el 0,0014%, suficiente para justificar el uso de paneles solares fotovoltaicos en todo el país, como método de mitigación pues el Instituto Nacional de Transferencia de Tecnologías Agropecuarias (INTA) desde 2011, expuso a la industria cárnica y lechera costarricense explorar opciones para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por unidad de producto, puesto que la ganadería es responsable del 18% de las emisiones mundiales de GEI [18].



Figura 1. Logo productos Asociación de productores de lácteos LLAFRAK.

Esta pequeña empresa procesadora de lácteos está ubicada en Juanilama de Pocosal, muy cerca de la Reserva Ecológica Juanilama. Empezó como una actividad familiar en el año 2010, hoy cuenta con 10 socios y recibe leche de 25 productores de la comunidad. Actualmente tienen una planta procesadora de 300 m² y brinda trabajo directo a 5 personas. Entre sus productos podemos encontrar quesos, yogurt y natilla, los cuales son distribuidos por un empleado en el cantón de San Carlos.

Antes del año 2015, esta empresa utilizaba una caldera para calentar el agua que utilizaban en el proceso de pasteurización. Con esta práctica consumían una gran cantidad de leña y provocaban contaminación ambiental, daños a la salud de los empleados y contaminación en los procesos de manufactura disminuyendo la inocuidad de los productos.

Actualmente, gracias al apoyo del MAG y del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), LLAFRAK cuenta con un sistema solar térmico forzado, híbrido con sistema auxiliar de gas LP. Los equipos instalados están compuestos por un sistema de paneles solares térmicos para el calentamiento de agua, conectados a un tanque acumulador con capacidad para 302,40 L de agua y acoplados a un sistema eléctrico auxiliar. Con esto la situación se tornó más sostenible

y mejoró significativamente el aspecto de salubridad de la planta. Se pasó de un sistema ineficiente y altamente contaminante, por Kg de leña producía 1,7 kg de CO₂ a un sistema eficiente donde solamente se producen 0,234 Kg de CO₂ por KWh cuando se utiliza el gas LP. Con respecto al ahorro en el consumo eléctrico para el proceso de calentar el agua al instalar el sistema térmico, este ronda el 82% [16]

En este trabajo no se pretende abordar todos los temas de desarrollo que requiere una Pyme, pero si busca analizar y unificar el concepto de economía ambiental dentro de una pequeña empresa para que adquieran herramientas que potencien un desarrollo de forma sostenible.



Figura 2. Antiguo sistema de calentamiento (caldera) vrs nuevo sistema fotovoltaico.

Metodología

Se realizó un análisis inicial de la empresa LLAFRAK mediante una visita de inspección para conocer sobre el manejo de variables de afectación ambiental y su forma de mitigación. Se realizaron entrevistas a la administradora de la empresa y a uno de sus socios fundadores, además se tomaron fotografías de la planta y de los sistemas de vertido de aguas residuales y de suministro energético. De esta manera se integran los aspectos de la economía ambiental como elementos de evaluación y valoración que permitan encaminar acciones hacia un mayor desarrollo sostenible.

Resultados y Discusión

Al visitar a la empresa e inspeccionar la planta procesadora de lácteos, se determinaron algunos hallazgos que de forma general se pueden considerar como externalidades positivas y negativas de la empresa LLAFRAK. Ver cuadro 1.

Cuadro 1. Externalidades positivas y negativas encontradas en la empresa LLAFRAK.

Externalidades positivas	Externalidades negativas
Uso adecuado de energías renovables en el proceso de pasteurizado	Inadecuado manejo de residuos líquidos
Uso adecuado del residuo de lactosuero para alimentación pecuaria	Inadecuado manejo de residuos sólidos
Generación de ingresos para 25 familias de la zona	Uso excesivo de agua potable sin ningún sistema de ahorro

Para definir las externalidades positivas se consideraron las siguientes condiciones de la empresa. LLAFRAK se encuentra en una comunidad con pocas fuentes de empleo por lo que, a pesar de ser pequeña, beneficia a más de 25 familias vecinas. Está liderada por una mujer, que cambió sus labores de ama de casa para ser empresaria y líder comunal. Entre sus socios encontramos al director de la Escuela de Juanilama y el presidente de la Asociación Administradora del Acueducto Rural, por lo que todos los aspectos que se mejoren ambientalmente pueden ser replicados en otras instituciones o asociaciones, alcanzando así un mayor beneficio social.

Dentro de sus procesos realizan algunas buenas prácticas como uso de cloro y jabón biodegradable para realizar sus lavados (como el mostrado en el figura 3). Cuentan con tres tipos de fuentes de energía: energía eléctrica para las actividades de la planta, excepto el calentamiento de agua que es realizado mediante un sistema mixto de paneles solares y gas LP (figura 2).



Figura 3. Jabón biodegradable utilizado para los lavados.

Se genera lactosuero como residuo del proceso de elaboración de quesos. El lactosuero es utilizado para la alimentación pecuaria, este lactosuero es almacenado y donado a los asociados; cuando existe excedente es vendido a personas de la zona.

El actual mercado meta de la empresa es muy reducido, pero si se trabajan las externalidades negativas la empresa podría expandirse y alcanzar mercados más exigentes. Para ello deben implementar mejoras e iniciar el proceso de certificación de sus procesos de manufactura y de la parte ambiental.

La determinación de las externalidades negativas, se basaron en los siguientes hallazgos:



Figura 4. Trampa artesanal de grasas.

- El agua residual es conducida hacia un sistema de separación de grasas realizado de forma artesanal, la grasa cada cierto tiempo es recolectada y tratada como residuo sólido y el agua ingresa a un sistema de drenajes de aproximadamente 15m a 17m de longitud, este sistema de drenajes se construyó con un back hoe y se utilizaron como medio de soporte para las bacterias llantas.
- Residuos sólidos. La actividad genera poco residuo sólido, dentro de los residuos que se identificaron se encuentran: cartón, envases, grasa, sobrante de bolsas plásticas y bolsas plásticas. Parte de los residuos se envían para reciclaje al centro de acopio de la zona o a la escuela de la localidad, y otros residuos son quemados. Como la empresa cuenta con una ruta establecida, solicitan a los consumidores que laven y guarden sus envases de yogurt y natilla, los cuales son recogidos, llevados a la planta procesadora para ser lavados y reutilizados.
- Uso del agua. El agua para los procesos es abastecida por el acueducto rural, pero no cuentan con ningún sistema de bajo consumo.

Recomendaciones

Se propone que la empresa LLAFRAK defina un plan de mitigación para la correcta gestión ambiental que considere los siguientes elementos:

Gestión del agua residual

El manejo del agua residual es inadecuado, el sistema de separación de grasas es deficiente. Según lo indicado por los encargados, la longitud del sistema no permite un adecuado proceso de infiltración del agua al subsuelo y se dan fallas o fugas de agua superficial que afectan las propiedades vecinas.

Un sistema de tratamiento de drenajes trabaja por medio de piedra graduada, esta piedra se coloca de forma ordenada dentro de una zanja, la cual recibe las aguas residuales. La piedra

permite que las baterías se fijen y una vez fijada, digieren la materia orgánica presente dentro del agua residual depurándola y el resto de trabajo lo termina de realizar el subsuelo. La empresa utiliza llanta como medio de soporte dentro del drenaje, si bien el desecho de llanta es superior a la piedra depurando agua residual [19], para realizarlo se requiere un proceso que hace que el costo de usar este desecho no compita con el costo de usar piedra.

El sistema utilizado como trampa de grasas (ver figura 4) no es adecuada. Es necesario diseñar una que retenga y evite obstrucciones, la longitud de los drenajes no es la correcta y el tipo de drenaje que se utiliza no permite la depuración de las aguas residuales.

De acuerdo a lo indicado por los miembros de la asociación y realizando consultas en la Aresep, se estima que la industria consume en agua aproximadamente 100m³ por mes [20].

Para el manejo de aguas residuales se recomienda las siguientes mejoras:

1. Construcción de una trampa de grasas o compra de un equipo similar para la separación de las grasas proveniente de las aguas de lavado.
2. Realizar mejoras al sistema de drenajes por medio de la adición de piedra al sistema existente e incluso se puede incorporar un pozo de absorción para el manejo de caudales altos.

El sistema de lavado con agua no es eficiente, se utiliza una manguera sin boquillas ahorradoras de agua. Lo óptimo es usar un sistema de hidrolavado, el cual ahorra una cantidad importante de agua y es más eficiente en los procesos de limpieza. Se puede utilizar agua de lluvia para labores de limpieza que no afecten la inocuidad o en su lugar clorarla.

Para poder mejorar el manejo de aguas residuales se requiere la realización de los siguientes pasos en el orden indicado:

1. Colocar boquillas o sistemas de ahorro de agua en la planta, una vez que se logre disminuir el consumo de agua se procede a diseñar un sistema para el tratamiento de aguas residuales.
2. En necesario realizar un estudio de infiltración de suelos para determinar la capacidad de absorción del suelo y poder diseñar las mejoras al sistema de tratamiento de aguas residuales.
3. Con el caudal de consumo mensual y la capacidad de absorción del suelo, se diseñan: la dimensión de la trampa de grasas y las mejoras o aumento de longitud de los drenajes

Gestión de residuos sólidos

Se deben de realizar algunas pequeñas actividades para mejorar el tratamiento de los residuos sólidos. Lo primero es colocar basureros para su recolección de forma separada, es importante recolectar todos los residuos valorizables y gestionarlos con la entidad respectiva para su reciclaje. Un desecho del que no tienen idea de la forma adecuada de manejarlo son los desechos de las bolsas plásticas con residuos de queso y grasas. Lo primero que se debe hacer con estas bolsas es su limpieza, para separar las grasas del empaque. Es importante revisar si este empaque tiene sello indicativo que permita reciclaje, si esto es así, es sencillo acumularlo y entregarlo a un gestor, si no permite su reciclaje, se debe de tratar como un residuo sólido y disponerlo en un relleno sanitario.

La industria debe evitar la incineración de los residuos plásticos, la materia prima del plástico es el petróleo y su incineración aumenta las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

La empresa no ve como un problema el manejo de las grasas retenidas en la trampa, estas grasas además de ser incómodas de manejar son difíciles de biodegradar y además dentro del sistema de drenajes generan grandes problemas porque no son fácilmente digeridas por



las bacterias de los drenajes. Hay dos posibles usos para lograr el manejo correcto de tal forma que generen un valor agregado al producto. La primera es utilizarla para generación de biodiesel, pero la pequeña cantidad de grasa que se genera no hace rentable la actividad y la espera para obtener un volumen importante puede generar descomposición y mal olor. La segunda alternativa es la generación de abono orgánico, se hace de la siguiente forma:

1. Mezcle la grasa con aserrín para evitar malos olores.
2. A la mezcla añada caballaza, ceniza, o un poco de tierra.
3. Deje bajo techo y mezcle regularmente hasta que la mezcla se convierta en humus.

Otra alternativa es que vendan o regalen esta grasa a una persona que produzca abono orgánico y no la traten como un residuo.

Mejoras empresariales

Se puede dar un mayor valor agregado a los productos tratando de innovar con nuevos sabores en algunos de los productos como el yogurt, incrementar las variedades de queso o crear nuevos productos, esto con el fin de diferenciarse y lograr así un mejor posicionamiento en el mercado.

Además de reutilizar algunos de sus envases, podrían utilizar aquellos que sean amigables con el ambiente.

Buscar certificaciones ambientales como Bandera Azul que son de bajo costo y sencillas de realizar. Es importante que se inscriban como una Pyme ante el MEIC para que gocen de capacitaciones, exoneraciones, aperturas de mercado nacional e internacional y espacios en ferias.

Si la empresa logra realizar las mejoras ambientales identificadas, se considera que esta idea de negocio puede crear espacios para el turismo rural sostenible que incluya: recorrido por las instalaciones, explicación de los procesos productivos, uso de energías amigables con el entorno y degustación de productos, entre otros. De esta manera, podría calificar para la certificación de Esencial Costa Rica.

Conclusiones

La asociación de procesadores de lácteos LLAFRAK es un ejemplo de emprendimiento para la comunidad de Juanilama, presenta externalidades positivas que les permite seguir avanzando y proyectarse aún más en la RHN.

En cuanto a las externalidades negativas, estas se derivan de impactos ambientales que pueden ser solucionados a corto plazo con fondos propios o mediante solicitudes de apoyo a instituciones como el MAG o el INDER.

Una vez solventadas sus externalidades negativas, la empresa puede iniciar un proceso de certificación e innovación de sus productos con el fin de aumentar su competitividad, expandiendo el mercado a nivel nacional o internacional.

Siguiendo la estrategia de desarrollo MIDEPLAN 2030, es deseable que la empresa integre a sus actividades el turismo rural sostenible, ecoturismo y turismo educativo nacional y extranjero. Deben encadenar sus actividades con la Reserva Ecológica Juanilama, para que la comunidad logre un mayor desarrollo local de la mano con el turismo.

Referencias

- [1] MEIC, «Estado de Situación de las PYME en Costa Rica 2016,» MEIC, San José, 2017.
- [2] O. Barrientos y G. Chaves, «Región Huetar Norte: Oferta Exportadora actual y oferta potencial de productos agropecuarios alternativos,» PROCOMER, San José, 2008.
- [3] A. C. Camacho, «Zona norte: ¿en qué se puede invertir?,» El Financiero, 21 Octubre 2012.
- [4] M. Cascante, «Estudio sobre la Agroindustria Rural,» IICA, San José, 2009.
- [5] M. Gómez, «COMPETITIVIDAD DE LAS PyMES: ¿CÓMO PUEDEN LAS PEQUEÑAS Y MEDIANAS EMPRESAS DE COSTA RICA COMPETIR EN EL MERCADO LOCAL E INTERNACIONAL?,» ECONOMÍA Y SOCIEDAD, vol. 19, pp. 127-143, 2002.
- [6] INEC, «VI Censo Nacional Agropecuario,» INEC, San José, 2014.
- [7] J. Muñoz y K. Zamora, «Caracterización del sector lácteo en Costa Rica,» MEIC, San José, 2013.
- [8] O. Barrientos, «Cadenas productiva de la leche: Políticas y Acciones,» MAG, San José, 2010.
- [9] M. B. Bravo y S. Bravo, «LA ECONOMÍA AMBIENTAL Y ECOLÓGICA RELACIONADA CON EL DESARROLLO ECONÓMICO Y LA GESTIÓN DE CALIDAD AMBIENTAL,» DELOS: Desarrollo Local Sostenible, 2016.
- [10] MIDEPLAN, «Región Huetar Norte Plan de Desarrollo 2030,» MIDEPLAN, San José, 2014.
- [11] T. d. J. Guzmán, M. Fernández, J. Villalobos, I. Monreal, M. Rivero y A. González, «Nueva oferta educativa como respuesta al desarrollo del país: Ingeniería Agroindustrial,» Tecnología en Marcha, pp. 47-59, 2016.
- [12] Banco Interamericano de Desarrollo, «Mejora en la competitividad territorial y empresarial de la RHN: Análisis social y ambiental.,» BID, San José, 2010.
- [13] M. d. J. González, «ASPECTOS MEDIO AMBIENTALES ASOCIADOS A LOS PROCESOS DE LA INDUSTRIA LÁCTEA,» Mundo Pecuário, vol. VIII, pp. 16-32, 2012.
- [14] O. Arango y L. Sanches, «Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea en sistemas anaerobios tipo UASB,» Facultad de Ciencias Agropecuarias, vol. 7, pp. 24-31, 2009.
- [15] J. Arias, C. Calvo, N. Chaves, M. Granados, J. Rojas, L. Uribe y R. WingChing, «Uso de indicadores para determinar la sostenibilidad de tres proyectos productivos de universidades en Costa Rica,» Cuadernos de Investigación UNED, pp. 203-212, 2012.
- [16] T. d. J. Guzmán, F. Araya, J. Obando, M. Rivero y G. Castro, «Uso de tecnología solar en actividades agropecuarias de la Región Huetar Norte de Costa Rica,» TEC, San Carlos, 2016.
- [17] R. Portilla, «Plan de promoción y desarrollo de fuentes renovables no convencionales. 2015-2018,» ICE, San José, 2015.
- [18] Intituto Nacional de Tecnologías Agropecuarias, «Ganadería y efecto invernadero: mejor producción, menos contaminación.,» San José, 2011.
- [19] K. Vindas, «Evaluación de medios de soporte biológico para filtros anaerobios de flujo ascendente,» Tesis, San José, 2001.
- [20] ARESEP, «Autoridad Reguladora de Servicios Públicos,» [En línea]. Available: www.aresp.go.cr. [Último acceso: 02 octubre 2017].

Optimización de Recursos mediante la Simulación de Eventos Discretos

Optimization of Resources through Simulation of Discrete Events

Erik Orozco-Crespo¹, Neyfe Sablón-Cossio², Ramiro Saraguro-Piarpuezán³, Dalila Hermoso⁴, Yadamys Rodríguez-Sánchez⁵

Fecha de recepción: 21 de junio de 2018

Fecha de aprobación: 19 de setiembre de 2018

Orozco-Crespo, E; Sablón-Cossio, N; Saraguro-Piarpuezán, R; Hermoso, D; Rodríguez-Sánchez, Y. Optimización de Recursos mediante la Simulación de Eventos Discretos. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-2. Abril-Junio 2019. Pág 146-164.

DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v32i2.4356>

- 1 Carrera de Ingeniería Industrial. Investigador del Grupo de Producción y Servicios. Universidad Técnica del Norte, Ecuador. Correo electrónico: eorozco@utn.edu.ec
- 2 Instituto de Posgrado. Coordinadora del Grupo de Producción y Servicios. Universidad Técnica de Manabí, Ecuador. Correo electrónico: nsablón@utn.edu.ec
- 3 Carrera de Ingeniería Industrial. Universidad Técnica del Norte, Ecuador. Correo electrónico: rsaraguro@utn.edu.ec
- 4 Carrera de Ingeniería Industrial. Universidad Técnica del Norte, Ecuador. Correo electrónico: dhermoso@utn.edu.ec
- 5 Carrera de Ingeniería Industrial. Investigadora del Grupo de Producción y Servicios. Universidad de Matanzas, Cuba. Correo electrónico: yadamy.sanchez@umcc.cu



Palabras clave

Optimización; simulación de eventos discretos; asignación de recursos.

Resumen

Gran parte del éxito de una organización se concentra en la toma de decisiones en su función de operaciones. Administrar adecuadamente los recursos que intervienen en sus procesos de transformación, se convierte en un verdadero reto en aras de elevar la efectividad. Ante lo cual, aparece la optimización, basada en la simulación de eventos discretos, como herramienta de gran potencial en los sistemas productivos o de servicios, no sólo por los ahorros que implica su uso en cuanto a tiempo y costo, sino también por su potencial para minimizar errores en la toma de decisiones. En correspondencia con lo anterior, el presente trabajo se propuso demostrar (Objetivo) las fortalezas de estas herramientas como soporte a la toma de decisiones, que optimicen la asignación de hombres y máquinas en procesos productivos con cierto nivel de complejidad y que garanticen el mínimo costo total, el cumplimiento de los planes de producción y un buen desempeño del sistema. Para ello, se aplicaron los softwares FlexSim, como simulador de eventos discretos, de conjunto con sus herramientas Experfit y Experimenter; y el IBM SPSS Statistics para otros análisis estadísticos. Los resultados son presentados con la aplicación a un caso de estudio relacionado con una empresa productora de medias y perteneciente al sector textil en la provincia Imbabura, Ecuador; al lograr asignar los recursos disponibles por cada una de las subsecciones y secciones de trabajo pertenecientes al punto limitante del proceso productivo y ajustadas a las cantidades determinadas en el Plan Maestro de Producción. Lo anterior, garantizando un mínimo de costo total en el cumplimiento de dicho plan y un buen desempeño de las principales métricas en la operación.

Keywords

Optimization; simulation of discrete events; resource allocation.

Abstract

Much of the success of an organization is focused on making decisions in its function of operations. Managing appropriately the resources that intervene in their processes of transformation, becomes a real challenge in order to increase effectiveness. For this, Optimization, based on the simulation of discrete events, appears as a tool with great potential in the productive or service systems, not only for the savings implied by their use in terms of time and cost, but also for its potential to minimize errors in making of decisions. In correspondence with the above, the present work set out to demonstrate (Objective) the strengths of these tools as support for decision-making, which optimize the assignment of men and machines in productive processes with a certain level of complexity and that guarantee the minimum total cost, the fulfillment of the production plans and a good performance of the system. FlexSim software was applied as simulator of discrete events, together with its Experfit and Experimenter tools. The IBM SPSS software was applied for other statistical analyzes. The results are presented with the application to a case study related to a company producing socks and belonging to the textile sector of Imbabura province, Ecuador. The men and machines assignment is made by each of the sections and subsections that make up the limiting point of the production process, adjusted to the amounts determined in the Master Production Schedule for each type of socks, ensuring minimal total cost and good performance of the principal metrics in that operation.

Introducción

La toma de decisiones en el diseño de productos y procesos avanza notablemente en las últimas décadas debido a los avances en el área de la informática, las nuevas formas de producción (tecnología 3D) y la elaboración de materiales alternativos. Específicamente, la simulación de estos sistemas recibe considerables avances a partir del desarrollo de lenguajes de programación y software comerciales, que permiten que sea una de las técnicas más empleadas en la Investigación de Operaciones y Ciencias de la Administración.

Una de las áreas de aplicación más amplias de la simulación son los sistemas de producción, entre otras razones, porque la simulación demuestra ser útil en la estimación de un nuevo diseño del sistema [1]. Se constituye en una herramienta importante de análisis dinámico para apoyar las decisiones de programación, secuenciación, cargas de trabajo, planeación de la capacidad y predicción de los tiempos de entrega, a diferencia de muchas otras, no considera los tiempos de ciclo como constantes [2]. A este entorno se relaciona el presente caso de estudio, perteneciente al sector textil de la provincia Imbabura en el Ecuador. Esta fábrica productora de medias o calcetines, produce para este mercado desde hace más de 20 años y es considerada la segunda más grande del país en cuanto a su capacidad de producción. Su proceso productivo se clasificó como un sistema de flujo en lotes, que oscilan entre los medianos y grandes según la nomenclatura de productos. Las órdenes de los clientes se satisfacen desde los inventarios siendo un sistema *make to stock* [3].

Este sistema se compone de cinco operaciones: formado, cosido, virado, planchado y etiquetado. De ellas, el formado o tejido de la media resultó ser la operación punto fundamental y cuello de botella. Está compuesta por 212 máquinas automatizadas que agregan el mayor valor al producto y laboran bajo condiciones de alta continuidad, con un régimen laboral de 24 horas al día, de lunes a sábado y en dos turnos de trabajo durante el día y la noche. Las marcas de estas máquinas son Lonati, Sangiacomo y Conti y están agrupadas en cinco secciones en correspondencia con tres generadores de aire comprimido. Este layout permite, como principal objetivo, no producir grandes variaciones en el factor de potencia durante la semana, disminuyendo así los gastos por concepto de energía, y a su vez, el costo de producción. A la par, la asignación de la cantidad de ellas a emplear durante la semana de trabajo se realiza de acuerdo a las cantidades determinadas en el Plan Maestro de Producción y según el surtido de medias que se van a producir. En cuanto se refiere al talento humano, este es asignado por subsecciones y se compone de enebradores y viradores. Entre otras actividades, los primeros se dedican a atender los paros de las máquinas y los segundos a virar las medias y manipularlas hasta el área de producción en proceso.

A este panorama se dirigió la modelación en Flexsim6 de esta operación, con la finalidad de ajustar la asignación de recursos hombres y máquinas a las cantidades de medias a producir y determinadas en el Plan Maestro de Producción, que garanticen el mínimo costo total y un buen desempeño del sistema. Para tales fines, este modelo toma como base el elaborado por Orozco Crespo & Hermoso Ayala (2017).

Como herramienta descriptiva de la Investigación de Operaciones, demuestra su utilidad en el proceso de análisis y diseño de sistemas complejos ante la necesidad de estudiarlos para aumentar la comprensión de las relaciones entre los diversos componentes, o para predecir el desempeño bajo nuevas condiciones de operación [4].

6 Fabricado por Flexsim Software Products, Inc. y lanzado en su versión 1.0 en febrero de 2003. Fue concebido para ser el más sofisticado paquete 3D de eventos discretos. En este estudio se empleó la versión 7.7.4 del 2016.

Aplicación en la producción de la simulación

En base al objeto de aplicación dentro del sistema de producción se definen las variables, problema a resolver y que simular en base a los contextos específicos. Ejemplo de ello, son sus aplicaciones en:

- La administración de los inventarios de [5, 6], los indicadores y modelos en relación a sus características [7, 8],
- el análisis y validación de las medidas de desempeño en los sistemas de manufactura de [9],
- las aplicaciones de mejoras mediante despliegues Seis Sigma de [10],
- En el método Kanban, como filosofía dentro del sistema de producción asociado al Just in Time [11], con la mayor expresión en la línea de ensamblaje Toyota [12]; donde la aplicación de las líneas de ensamblajes presenta un gran interés [13], .
- La capacidad como variable que limita el proceso de manufactura [14].
- La estimación de la demanda, y como entrada al sistema de producción para las decisiones en otros procesos [15], por ejemplo con la distribución y el inventario [16], con la suma de las decisiones de venta y su relación dentro del sistema de producción [17].
- En el diseño de plantillas, asignación de trabajadores a puestos de trabajo [18], y la secuencia óptima para el ajuste a la demanda [19].
- En localización de instalaciones [20], y su relación entre su distribución y capacidad (almacenes, vehículos, equipos de Mantenimiento, relaciones de clientes).
- En relación a la distribución tanto dentro como fuera del sistema de producción [21, 22].
- Las reglas de programación de la producción [23].
- En las teorías de las restricciones [24], y que ofrecen medidas de rendimiento.

Como herramienta descriptiva de la Investigación de Operaciones, demuestra su utilidad en el proceso de análisis y diseño de sistemas complejos ante la necesidad de estudiarlos para aumentar la comprensión de las relaciones entre los diversos componentes, o para predecir el desempeño bajo nuevas condiciones de operación [4]. En este caso de estudio se aplica la simulación a la asignación de hombres y máquinas en un sistema de producción que garanticen el mínimo costo total, el cumplimiento de los planes de producción y un buen desempeño del sistema.

Materiales y Métodos

Para el desarrollo del modelo se utiliza una aproximación a la metodología de simulación de seis pasos de Harrell [25], y de planificación de la producción de Domínguez [26]. Ambas se funden en un procedimiento que relaciona ambas metodologías (figura 1).

El objetivo de la simulación estuvo dirigido a la optimización, fundamentalmente, para que el modelo permitiera identificar posibles alternativas de solución para la asignación de los recursos hombres por subsección de trabajo y máquinas para la producción de los diferentes tipos de medias, que cumplan satisfactoriamente con el Plan Maestro de Producción (PMP), que garanticen el mínimo costo total y un adecuado uso de estos recursos.

Se definieron las variables de decisión siguientes: cantidad de enebradores y viradores a utilizar (y); cantidades de máquinas para la producción de los diferentes tipos de medias (x). Las combinaciones de estas variables de decisión generaron los posibles escenarios en los que fueron medidas las métricas de desempeño del modelo a partir de sus variables dependientes o de respuesta (cuadro 1).

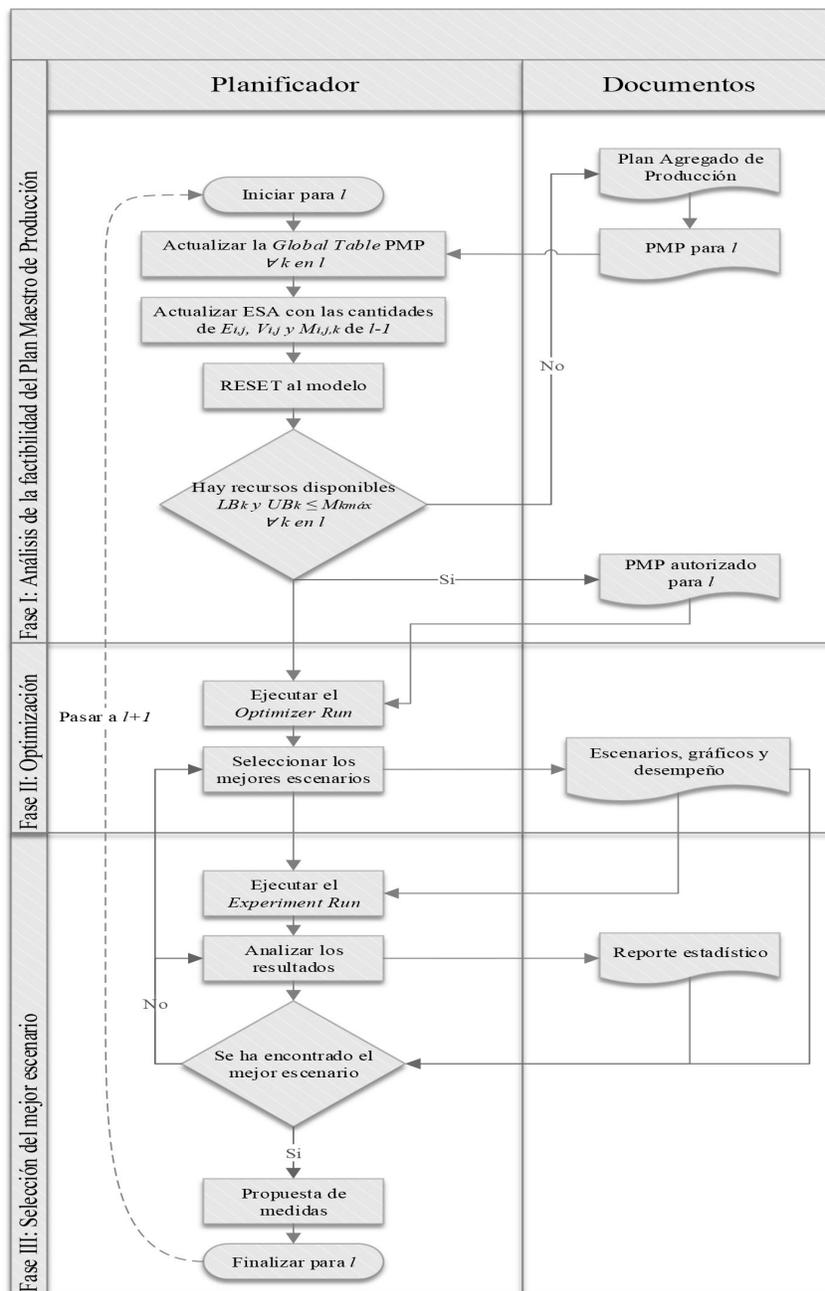


Figura 1. Diagrama de flujo para la lógica del modelo

Cuadro 1. Planteamiento de las variables de respuesta.

Objetivos específicos de la simulación	Variable dependiente	Denominación	UM
Determinar la utilización de los recursos, tanto de los trabajadores como de las máquinas	Promedio del porcentaje de utilización de los enebradores	UE_{ij}	(%)
	Promedio del porcentaje de utilización de los viradores	UV_{ij}	(%)
	Promedio del porcentaje de procesamiento de las máquinas	P_k	(%)
Analizar, de forma general, las causas que afectan el rendimiento en la operación, tanto las relacionadas con la maquinaria, como con la continuidad de desplazamiento de los items.	Promedio general del porcentaje de los paros de las máquinas (breakdowns)	B	(%)
	Promedio general del porcentaje de esperas de las máquinas por los enebradores para atender los paros	WOM	(%)
	Promedio general del porcentaje de esperas de los combiners por los viradores para el virado de la media	WO	(%)
	Promedio general del porcentaje de esperas por los viradores para el transporte al área final de producción en proceso	WT	(%)
Determinar el total de unidades producidas según su tipo	Total de docenas de medias producidas en la semana	Tk	(doc/sem)
	Rendimiento de la operación según el tipo de media	Rk	(doc/min)

Donde:

i: secciones de trabajo (a, b, c, d y e)

j: subsecciones en las que se dividen algunas de las secciones de trabajo (1 y 2)

k: tipo de media (1, 2, 3, ... y 21)

La concepción del modelo siguió la lógica que se muestra en la figura 1 y que consta de un conjunto de fases que se encuentran estrechamente relacionadas con su programación. La primera fase estuvo dirigida al análisis a grosso modo de la factibilidad del PMP, para determinar si existe capacidad suficiente para enfrentar el volumen de producción que plantea el plan para cada uno de los ítems en la semana que se planifica (I). Este proceso sigue una lógica similar a lo planteado en [27] para el proceso de elaboración de este plan y posee como principales insumos al Plan Agregado de Producción y al PMP. De no existir disponibilidad de recursos para enfrentar el volumen de producción que se planifica habrá que hacer ajustes al Plan Agregado de Producción con previa consulta al resto de las áreas de la fábrica o, como última alternativa, reprogramar máquinas para aquellos ítems con déficit de capacidad, lo cual no forma parte del modelo ya que se asumió exceso de capacidad de la fábrica dadas las ventas de los últimos años. En caso contrario se obtiene el PMP autorizado sobre el cual funcionará el modelo y que constituye el insumo fundamental para la siguiente fase.

En la fase de Optimización lo más importante fue el análisis de las soluciones obtenidas por el Optimizer Run y la selección de las soluciones factibles que minimicen los costos totales y que posean altos niveles de cumplimiento del plan de producción. Posterior a este análisis, se exportó dicha selección, además, se salvaron en un documento Word los principales resultados gráficos y en un documento en Excel los resultados de todas las variables de respuesta y de la función objetivo. Todo ello con las opciones Export Selected Scenarios, Export Screenshot y Export as CSV del Optimizer Run.

Estos documentos fueron de gran utilidad para el desarrollo de la siguiente fase destinada a la Selección del mejor escenario. En ella se corrió el Experiment Run para el Escenario de la Semana Anterior (ESA) y los seleccionados en la Fase II para la semana actual. Posteriormente, se analizó el comportamiento de las variables de respuesta a partir de sus valores medios, desviaciones estándar e intervalos de confianza para un 95% de nivel de confianza. Se compararon los escenarios entre sí y respecto a ESA, hasta encontrar el mejor escenario para la semana que se planifica. Posterior a lo cual, se toman las medidas pertinentes referidas a los ajustes de máquinas necesarios, así como, las reubicaciones de los trabajadores en las subsecciones de trabajo de la operación u otras áreas productivas dentro de la fábrica. Como otro resultado de esta fase se obtuvo el reporte estadístico que se generó en el propio Experiment Run/View Results.

Resultados

Definir objetivos, alcance y requerimientos

El alcance del modelo de simulación comprendió la operación de formado de las medias, es decir, desde que el material (conos de hilo) ingresa a la operación, hasta que se almacenan las docenas de medias en las áreas de producción en proceso. Se consideraron 21 tipos de medias como las más representativas en cantidad y frecuencia de producción, de ellas las de algodón y poliéster según las tallas más demandadas y para no incrementar la complejidad en la programación del modelo.

Posterior a lo cual, se toman las medidas pertinentes referidas a los ajustes de máquinas necesarios, así como, las reubicaciones de los trabajadores en las subsecciones de trabajo de la operación u otras áreas productivas dentro de la fábrica. Como otro resultado de esta fase se obtuvo el reporte estadístico que se generó en el propio Experiment Run/View Results.

Recolectar y analizar los datos del sistema

Para el análisis de los paros de las máquinas se consultó a ocho expertos, que posterior a varias rondas, arrojaron como principales causas las que se muestran señaladas en el diagrama Ishikawa. La jerarquización de las causas de mayor incidencia sobre los paros de las máquinas se realizó mediante el vector B, obtenido al aplicar el método Analytic Hierarchy Process (AHP) de Saaty [28], cuadro 2.

Cuadro 2. Cálculo del vector B para la jerarquización de las causas.

Causas de paros en las máquinas		Vector B A*B	Vector C	Vector D
C1	Errores electrónicos	0,10	0,81	8,20
C2	Material de mala calidad	0,25	2,34	9,20
C3	Fallas mecánicas	0,15	1,36	9,10
C4	Desabastecimiento de MP	0,10	0,89	8,61
C5	Falta de planificación de mantenimiento	0,27	2,49	9,10
C6	Ineficiencia en el arreglo del paro	0,05	0,40	8,25
C7	Mala programación de la máquina	0,04	0,36	8,31
C8	Condiciones ambientales	0,03	0,23	8,15

Ordenadas de la manera siguiente:

- C5: Falta de planificación del mantenimiento, predominando el mantenimiento correctivo.
- C2: Material de mala calidad que origina partiduras de los hilos.
- C3: Fallas mecánicas que se deducen del desgaste mecánico de las piezas.
- C1: Errores electrónicos que se traducen en fallas eléctricas y de programación de las máquinas.
- C4: Desabastecimiento de materia prima (conos de hilo) a las máquinas de formado.

Se aceptaron los resultados al obtener una razón de inconsistencia en la opinión de los expertos de 0.06, menor a 0.10 [28]. A excepción de la C5, las cuatro causas restantes fueron estudiadas por separado en cuanto a su repercusión en la utilización de las máquinas para, posteriormente, ser introducidas al modelo de simulación en forma de downtimes.

Adicionalmente, se analizó la defectuosidad en la propia operación (variable DEF), tanto por turno (factor Turno), como por cada sección de trabajo (factor Grupo). Para este análisis se aplicó un ANOVA Tipo II con el procedimiento del Modelo Lineal General Univariante, con la finalidad de evaluar el efecto de conjunto (factor Grupo-Turno) e individual (factor Grupo y factor Turno) que tienen estos factores sobre la variable DEF.

Como resultado de este análisis se obtuvo que el factor Grupo-Turno explicó el 35.3% de la variabilidad total de DEF, mientras que el efecto individual de los factores Grupo y Turno explicaron el 31.6% y el 2.5% de la variabilidad total de la variable DEF. Estos resultados estuvieron acompañados de valores de sigma cercanos a cero, que conllevaron a rechazar la hipótesis nula de considerar como no significativos el efecto de estos factores; y concluir que los grupos de máquinas fueron los que más incidieron en que los valores medios de DEF fueran diferentes (cuadro 3).

Cuadro 3. Resumen del ANOVA Tipo II.

Factor	F	Sig.	Eta al cuadrado parcial	R cuadrado corregida
Factor Grupo-Turno	30.753	0.00	0.365	0.353
Factor Grupo	56.437	0.00	0.322	0.316
Factor Turno	16.664	0.00	0.027	0.025

Se concentraron las mayores diferencias de DEF, medidas por turno y por grupo de máquinas, se realizó un análisis Post-Hoc con los estadísticos T3 de Dunnett y Games-Howell, debido a la inexistencia de homocedasticidad. Estos resultados se resumen en el gráfico de medias marginales de la figura 2.

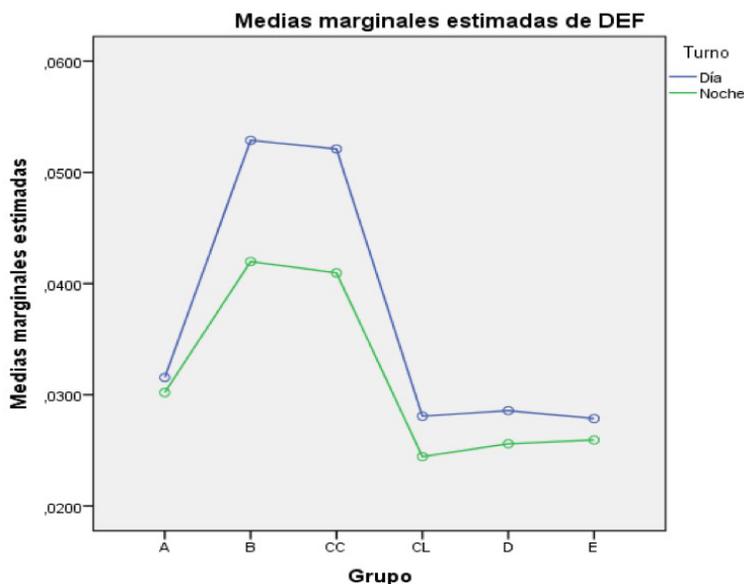


Figura 2. Medias marginales de DEF por grupo y por turno.

Como resultado de esta prueba se concluyó que existió igualdad de medias entre las defectuosidades originadas por los grupos de máquinas b y cc; entre cl, d y e; y que el grupo de máquinas a arrojó defectuosidades diferentes al del resto de los grupos. A partir de lo cual, se decidió entrar al modelo de simulación la defectuosidad promedio medida por secciones de máquinas, sin hacer distinción entre los turnos de trabajo. A la par, se entraron valores de defectuosidad iguales para los grupos de máquinas b y cc; cl, d y e; y diferentes para el grupo de máquinas a.

La recolección de los datos se dividió en dos categorías: estructurales y numéricos. Los primeros definieron los elementos del sistema, tales como: máquinas, cajas para la producción en proceso, los trabajadores y el layout de la fábrica. Los segundos se relacionaron con la toma de datos y análisis estadístico mediante el empleo de la herramienta Experfit, cuyos resultados se muestran en los cuadros 4 y 5.

Cuadro 4. Resumen del *Goodness of Fit* Anderson-Darling para los tiempos de formado de las docenas.

Análisis de Hipótesis						
Operación	Sección	Variable	Modelo	Test Static	Critical Value	Reject
Formado	D y E (Marca LONATI)	Tiempo de formar una docena	Weibull (133.66, 16.45, 8.86)	0.41	2.492	No
	C y A (Marca CONTI); B (Marca SANGIACOMO)	Tiempo de formar una docena	Johnsonbounded (36.74, 79.65, -0.37, 0.76)	0.38	2.492	No
	C (Marca LONATI)	Tiempo de formar una docena	Beta (45.29, 202.57, 7.93, 2.35)	0.39	2.492	No

Resultaron constantes para el modelo: los tiempos de formado de las medias, la velocidad de movimiento de los trabajadores, los tiempos de cargas y descargas de los trabajadores en la manipulación interna de las docenas de medias y los tiempos para el almuerzo, merienda y cambios de turno asociados al régimen laboral, cuadro 5.

Para la construcción del modelo se añadieron: sources, processors, queues, combiners, sinks, task executers y dispatchers, que resultaron en la vista superior de la operación (figura 3); así como, funcionalidades para los breakdowns, task sequences, ruteos y el régimen laboral mediante time tables.



Figura 3. Vista superior del modelo en la operación de formado de la media.

Posterior a la construcción de los elementos básicos anteriores, fueron añadidas funcionalidades que siguieron la lógica del diagrama de flujo de la figura 1 y que comienza con la actualización de datos en la Global Table denominada PMP. Esta Global Table se diseñó para disminuir el rango de búsqueda de soluciones para la cantidad de máquinas totales a asignar para la producción de los distintos tipos de medias y para contribuir con la rapidez en la obtención de los resultados en la optimización (figura 4).

Cuadro 5. Resumen del *Goodness of Fit* Anderson-Darling para los tiempos de paros de las máquinas.

Análisis de Hipótesis							
Operación	Sección	Tipo de Down Time	Time	Modelo	Test Static	Critical Value	Reject
Formado	D y E (Marca LONATI)	Errores de máquina	Up Time	weibull(513.97, 923.12, 1.76)	0.25	2.492	NO
			Down Time	Johnsonbounded(0.33, 10.27, -0.62, 1.61)	0.21	2.492	NO
		Paros que dañan la media	Up Time	Beta(4.37, 43288.86, 1.48, 2.31)	0.25	2.492	NO
			Down Time	Peatsont5(153.94, 2582.13, 14.82)	0.81	2.492	NO
		Paro por rotura de hilos	Up Time	Beta(14.50, 31689.08, 1.55, 1.91)	0.31	2.492	NO
			Down Time	Johnsonbounded(11.38, 14.38, -0.44, 1.08)	0.36	2.492	NO
	Paro por desabastecimiento de M.P.	Up Time	Johnsonbounded(1270.23, 40226.61, -0.92, 1.21)	0.26	2.492	NO	
		Down Time	Weibull(13.04, 170.86, 4.10)	0.32	2.492	NO	
	C y A (Marca CONTI); B (Marca SANGIACOMO)	Errores de máquina	Up Time	Beta(288.14, 1963.70, 1.78, 1.40)	0.16	2.492	NO
			Down Time	Johnsonbounded(4.21, 8.25, -0.58, 1.50)	0.21	2.492	NO
		Paros que dañan la media	Up Time	Johnsonbounded(2354.62, 18940.93, 1.82, 0.88)	0.54	2.492	NO
			Down Time	Johnsonbounded(352.41, 418.23, -0.04, 0.53)	0.68	2.492	NO
		Paro por rotura de hilos	Up Time	Beta(553.39, 7878.21, 0.93, 2.34)	0.18	2.492	NO
			Down Time	Johnsonbounded(3.40, 22.92, -0.14, 1.15)	0.19	2.492	NO
		Paro por desabastecimiento de M.P.	Up Time	Beta(11798.50, 19917.07, 1.40, 1.06)	0.15	2.492	NO
			Down Time	Lognormal2(25.46, 10.18, 0.78)	0.28	2.492	NO
	C (Marca LONATI)	Errores de máquina	Up Time	Beta(46.44, 2990.23, 2.93, 2.84)	0.29	2.492	NO
			Down Time	Beta(3.65, 8.25, 5.05, 3.89)	0.23	2.492	NO
		Paros que dañan la media	Up Time	Weibull(0.00, 15253.32, 1.77)	0.26	2.492	NO
			Down Time	Johnsonbounded(203.97, 300.95, 0.41, 0.55)	0.34	2.492	NO
		Paro por rotura de hilos	Up Time	Weibull(1728.23, 16084.81, 2.00)	0.29	2.492	NO
			Down Time	Beta(10.36, 14.09, 5.69, 2.55)	0.28	2.492	NO
		Paro por desabastecimiento de M.P.	Up Time	Johnsonbounded(1971.59, 37938.52, -0.69, 1.38)	0.23	2.492	NO
			Down Time	Beta(27.45, 146.10, 0.65, 4.82)	0.15	2.492	NO

	Inicio PMP	Capacidad Producción	LB	UB	Mmáx
COL1012	676.00	1887.00	8.00	11.00	27.00
COL0810	1040.00	2383.00	11.00	14.00	30.00
COL0608	443.00	1148.00	4.00	5.00	12.00
COL0406	552.00	1264.00	4.00	6.00	12.00
COL0204	61.00	146.00	1.00	1.00	1.00
COR1012	396.00	870.00	5.00	7.00	11.00
COR0810	146.00	360.00	1.00	2.00	4.00
COR0608	211.00	510.00	2.00	3.00	6.00
COR0204	224.00	540.00	1.00	2.00	4.00
COR0002	98.00	180.00	1.00	1.00	1.00
LAR1012	75.00	316.00	1.00	2.00	5.00
ZAP1012	367.00	846.00	3.00	5.00	14.00
CORPO1012	864.00	2265.00	3.00	4.00	10.00
CORPO0608	387.00	1075.00	1.00	2.00	4.00
MED TEC	8.00	40.00	1.00	1.00	1.00
CORALG1012	3115.00	6944.00	10.00	13.00	35.00
CORALG0810	319.00	666.00	1.00	2.00	3.00
LARPO1012	551.00	1407.00	2.00	4.00	8.00
ZAPPO1012	386.00	960.00	1.00	2.00	4.00
ZAPPO0608	356.00	977.00	1.00	2.00	4.00
MED HOM	419.00	1036.00	5.00	7.00	16.00

Figura 4. Global Table PMP.

La primera columna se introduce manualmente por el planificador de la producción sobre la base del PMP y antes de comenzar la semana de trabajo, medida en docena/semana. La segunda se corresponde con la capacidad de producción máxima efectiva de la operación obtenida en Orozco Crespo and Hermoso Ayala [29] y medida en docena/semana. La tercera y cuarta columnas son límites dentro de los cuales el software buscará la cantidad óptima del número de máquinas a asignar (Lower Bound y Upper Bound). El Lower Bound se calcula como si la operación fuese a funcionar a una eficiencia del 100% y el Upper Bound para una eficiencia del 85%, dadas las características de alta continuidad de la operación. La quinta columna es la cantidad de máquinas que, como máximo, pueden ser empleadas para la producción de un tipo de media y se corresponde con las que actualmente se encuentran programadas para tales fines según el Plan Agregado de Producción. Al dar RESET al modelo, se actualizan automáticamente los valores de Lower Bound y Upper Bound de las columnas tercera y cuarta.

Scenarios	Performance Measures	Experiment Run	Optimizer Design	Optimize
Variables				
Scenarios				
	Variable	ESA		
SCL ENEBRADOR	Nr TEs in Team /D Enebrador CL	1.00		
SC VIRADOR	Nr TEs in Team /D Virador C	3.00		
SA ENEBRADOR	Nr TEs in Team /D Enebrador A	3.00		
SA VIRADOR	Nr TEs in Team /D Virador A	3.00		
SB ENEBRADOR	Nr TEs in Team /D Enebrador B	2.00		
SB1 VIRADOR	Nr TEs in Team /D Virador B1	1.00		
SB2 VIRADOR	Nr TEs in Team /D Virador B2	1.00		
MAQS COL 1012 E1	Nr Objects in COL_1012_E1	3.00		
MAQS COL 1012 E2	Nr Objects in COL_1012_E2	11.00		
MAQS COL 1012 D2	Nr Objects in COL_1012_D2	3.00		
MAQS COL 0810 E1	Nr Objects in COL_0810_E1	10.00		
MAQS COL 0810 E2	Nr Objects in COL_0810_E2	6.00		
MAQS COL 0810 D1	Nr Objects in COL_0810_D1	1.00		

Figura 5. Escenario de la Semana Anterior (resumido).

Seguidamente, se actualizan las cantidades de recursos que realmente fueron empleados en ESA, es decir, los valores que tomaron las variables de decisión en la anterior semana y que pudieron resultar de procesos de optimización anteriores o de decisiones ajustadas por parte de operaciones. Esto se realiza en el Experimenter/Scenarios en la columna ESA (figura 7). Esto permitió comparar entre sí a los nuevos escenarios y a su vez compararlos con ESA al correr el Experiment Run. Además, de detectar los ajustes de máquinas necesarios, así como, las reubicaciones de los trabajadores en las subsecciones de trabajo de la operación u otras parejas productivas dentro de la fábrica.

Dentro del Experimenter, específicamente en el Star of Experiment, se programó otra funcionalidad que tuvo como principal fin el de seleccionar los valores totales de máquinas calculados en la Global Table PMP, tanto para el Lower como para Upper Bound, que se subdividen por cada una de las subsecciones de trabajo, sobre la base de la proporción real en la fábrica (figura 4) y establecerlos como el Lower y Upper Bound de estas variables en el Optimizer Design (figura 5). Al comenzar el proceso de experimentación estos valores se establecen automáticamente en las celdas anteriormente señaladas.

Fueron programadas disímiles variables en el Performance Measures, algunas dirigidas a determinar: los costos de almacenamiento, de materias primas y materiales, de ajuste de los equipos, de salario, de consumo de energía y otros costos que conformarán la función objetivo. Se añadió, otra variable dirigida a evaluar el cumplimiento del plan de producción y que formó parte de una de las restricciones del modelo. Se obvia la programación de las mismas en aras de ganar en brevedad.

La cantidad de trabajadores en el Lower Bound se definió como uno para todas las subsecciones de trabajo y en el Upper Bound se determinó en [30], y que se corresponde con la cantidad óptima de trabajadores a distribuir por las diferentes subsecciones para lograr la capacidad máxima efectiva de producción. Se planteó como restricción al modelo que el cumplimiento del plan de producción CP (%), es decir, que las cantidades entradas en la Global Table PMP como Inicio del PMP (docena/semana), se cumplan por encima del 95%, según los objetivos de la fábrica. Este valor dio la posibilidad de visualizar como soluciones factibles a todas aquellas que cumplieron con dicha restricción, aun cuando la selección de los mejores escenarios siempre estuvo asociada a las soluciones que arrojaron los costos totales mínimos y los mayores valores de CP. Se definió como función objetivo la que sigue:

Minimizar

$$CT_e = CF_e + CA_e + CL_e$$

Donde:

CT_e : costo total de la alternativa o escenario e (\$/semana).

CF_e : costos asociados a la fabricación (\$/semana) y que incluyó los gastos por concepto de materias primas y materiales ($CMPM_e$), salario de los trabajadores (CS_e), consumo de energía de las máquinas (CE_e) y otros costos fijos como fueron los de depreciación de la maquinaria (CO_e).

CA_e : costos aproximado para la producción en proceso (\$/semana).

CL_e : costo de ajuste de las máquinas (\$/semana).

El Optimizer Run se corrió para 442 800 segundos, es decir, una semana de trabajo acorde con el régimen laboral y para un máximo de 100 soluciones a ser evaluadas.

Resultados del análisis de la factibilidad del PMP

En los resultados fueron seleccionadas la última semana del mes de mayo y la siguiente primera del mes de junio de 2017, que fueron consideradas como ESA (I-1) y como semana que se planifica (I), respectivamente. Las cantidades correspondientes al PMP para ambas semanas se muestran en el cuadro 6.

Esta selección respondió, por un lado, a que ambas semanas pertenecen a meses diferentes planificados en el Plan Agregado de Producción, y por otro, a la disminución de las cantidades de docenas a producir para todos los ítems. Esta última razón infirió desde un inicio la disminución de recursos totales a emplear para el cumplimiento del plan.

De análisis de factibilidad del PMP se obtuvo que las cantidades a producir en I son menores que la capacidad máxima efectiva de la operación para cada uno de los tipos de ítems (figura 6). A lo anterior se añadió que las cantidades de máquinas determinadas en el Lower y Upper Bound fueron menores o iguales a la cantidad máxima de máquinas que están programadas según el Plan Agregado de Producción. Dados estos resultados se obtuvo un Plan Maestro factible y que constituyó el insumo principal para el resto de los análisis.

Cuadro 6. Cantidades planificadas en el PMP

k	Inicio del PMP (docenas)	
	I-1 (ESA)	I
1	1089	676
2	1352	1040
3	483	443
4	721	552
5	100	61
6	566	396
7	194	146
8	259	211
9	327	224
10	96	98
11	198	75
12	514	367
13	1095	864
14	684	387
15	21	8
16	4164	3115
17	393	319
18	997	551
19	620	386
20	587	356
21	453	419

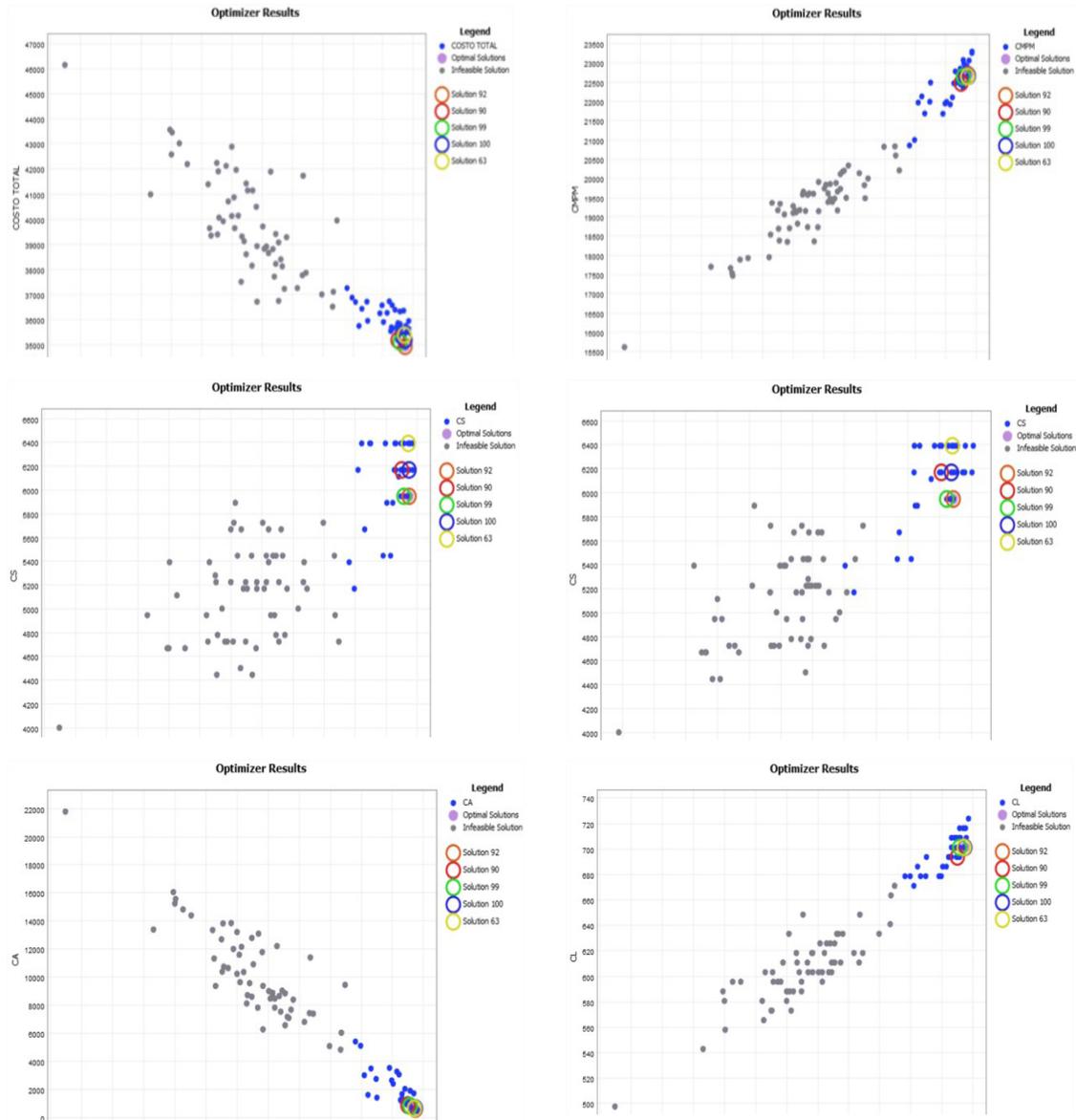


Figura 6. Resultados gráficos del Optimizer Run.

Resultados de la optimización

El comportamiento de los costos, el cumplimiento del plan y el rendimiento de los escenarios que fueron evaluados por el Experimenter se describen en la figura 12. Se seleccionaron las soluciones 92, 90, 99, 100 y la 63 porque minimizaron el CT y garantizaron valores de CP por encima del 95% (cuadro 7).

Cuadro 7. Resumen de los resultados de costos para los escenarios seleccionados.

Solución	CT (\$)	CP (%)	CMPM (\$)	CS (\$)	CE (\$)	CO (\$)	CA (\$)	CL (\$)	R (doc/min)
ESA	44372.54	98.76	29949.96	5946.58	3738.66	2330.5	1434.184	972.66	2.00
92	34941.52	99.48	22680.56	5946.58	2689.98	2330.50	592.68	701.22	1.52
99	35114.73	99.14	22636.64	5946.58	2689.98	2330.50	809.81	701.22	1.51
90	35192.44	99.00	22471.44	6168.88	2659.94	2330.50	868.00	693.68	1.50
100	35192.55	99.48	22642.92	6168.88	2689.98	2330.50	659.05	701.22	1.52
63	35394.92	99.43	22640.54	6391.18	2689.98	2330.50	641.50	701.22	1.52

Estas soluciones disminuyeron sus costos respecto a ESA, lo cual se debió a la disminución de las cantidades a producir. Entre ellas obtuvieron similares resultados en cuanto a CMPM, CE y CO ya que produjeron similares cantidades de docenas en el período por lo que gastaron de similar manera en materias primas y materiales, emplearon aproximadamente la misma cantidad de equipos y depreciaron lo mismo. Además, obtuvieron niveles de CP por encima del 99% y similares niveles de rendimiento.

Los costos que determinaron la diferencia fueron el CS y el CA. Las soluciones 92 y 99 emplearon menor cantidad de trabajadores para poder cumplir con el plan, mientras que la solución 63 fue la que necesitó mayor cantidad de estos. Estas diferencias no repercutieron considerablemente en el rendimiento de la operación. La solución 92 resultó ser la de menor costo de almacenamiento ya que logró equilibrar mejor los costos de inventario y de pérdida de ventas producto del exceso o déficit de los mismos, respectivamente; no siendo el caso de las soluciones 90 y 99 que obtuvieron los peores resultados en este sentido debido a sus más bajos niveles de cumplimiento del plan de producción. Sobresalieron como mejores candidatas las soluciones que siguen:

- La solución 92 con un mínimo CT de \$ 34941.52 y con el mayor nivel de CP de 99.48%.
- La solución 90 como tercera mejor respecto a CT. Aun cuando esta solución obtuvo el menor valor de CP con un 99%, resultó ser la de menor CL de todas las soluciones; y, por ende, fue la que garantizó mayor facilidad de trabajo, es decir, menos ajustes de máquinas respecto a ESA.
- La solución 100 como tercera mejor respecto a CT y con igual nivel de CP que la solución 92.

Quedaron descartadas las soluciones 99 porque en cuanto a CT resultó ser similar a la solución 92 pero con menor valor de CP; y la solución 63 debido a que fue la de peor resultado en cuanto a CT, influenciado por tener mayor CS.

Las soluciones seleccionadas indicaron la misma cantidad de trabajadores totales respecto a ESA, a partir de lo que se infirió una disminución en la utilización de estos recursos si se tiene en cuenta que disminuyeron las cantidades declaradas en los PMP de una semana a otra. La cantidad de enebradores fue la misma para todas las combinaciones de (i,j), mientras que los viradores variaron para (d,1) y (c,1). Además, disminuyeron las cantidades totales de equipos a emplear respecto a ESA, lo cual es lógico al disminuir las cantidades a producir. En tal sentido sobresalieron $M_{e,2,1}$, $M_{c,2,12}$, $M_{a,2,16}$ y $M_{b,1,18}$.

En este paso se obtuvieron los valores de las principales métricas de desempeño de la operación y relacionadas con el empleo de los recursos, tanto para los enebradores y viradores (UE_{ij} y UV_{ij}), como para las máquinas (P_k) (figura 7).

Respecto a ESA y de forma general, disminuyó la utilización de los trabajadores al emplear la misma cantidad de estos para producir un menor volumen de producción, salvo para (d,1) en la solución 92 que empleó un trabajador menos por lo que mejora el nivel de utilización.

Entre ellas las soluciones se comportaron de forma similar en valores medios y mostraron buena estabilidad al poseer desviaciones estándares que no superaron el 2% de variabilidad. Se destacaron con peores resultados las utilidades de los enebradores en (e,2) y (c,1) y de los viradores en (e,1) y en (d,1). Las secciones a y b fueron las que mejor emplearon a sus trabajadores con valores cercanos o superiores al 80% de utilización. La utilización de las máquinas mejoró respecto a ESA y entre ellas se comportaron de forma similar en valores medios y de desviación estándar, con valores por encima del 85% de utilización.



Figura 7. Ejemplos gráficos de la utilización de los recursos.

De las soluciones analizadas, sobresalió con relativos mejores resultados la solución 92 con un promedio de utilización de los enebradores y viradores de un 73.25% y un 73.45%, respectivamente. Además, con una utilización de las máquinas de un 86.84%, determinada por un 4.70% (5.78 horas) de breakdowns (variable B) y un 8.46% (10.41 horas) de espera por los enebradores para atender dichos breakdowns (variable WOM). Otras causas que afectaron el rendimiento; y por ende, la continuidad de los ítems, fueron las esperas por los viradores, ya fuere para el virado de las medias (variable WO), como para la transportación de las docenas a lo largo de toda la operación (variable WT), con un 5.42% (6.67 horas) y un 5.94% (7.31 horas), respectivamente. A lo anterior se añade que, para esta solución (92) se cumplió el plan de producción por encima del 95% y se alcanzó el 100% en la mayor parte de los casos.

Las disminuciones de la cantidad a producir de una semana a otra condicionaron las medidas a tomar en la asignación de los recursos. Para pasar de ESA (I-1) a la semana analizada (I) se sugirieron las medidas siguientes: Implementar la solución 92 por haber alcanzado menor CT y mayores CP y R. Además, logró mejores resultados en la utilización de los recursos hombres y máquinas.

1. Mantener la misma cantidad de trabajadores respecto a ESA, tanto de enebradores como de viradores, con la excepción de reubicar a un virador de $(d, 1)$ en $(c, 1)$.
2. Controlar la utilización de los trabajadores en aquellas subsecciones con peores resultados (enebradores en $(e, 2)$ y $(c, 1)$ y viradores en $(e, 1)$ y $(d, 1)$), los cuales, de ser viable, pueden colaborar en el trabajo con las subsecciones a y b o con otras áreas de la fábrica.

Disminuir las cantidades de máquinas destinadas a las producciones de los diferentes tipos de ítems, es decir, conservarlas transitoriamente y de acuerdo a los resultados obtenidos en el cuadro 7.

Conclusiones

En este trabajo se integra la optimización, basada en la simulación de eventos discretos, con la asignación de recursos hombres y máquinas en los sistemas productivos, lo que demuestra el potencial de estas herramientas en la toma de decisiones. Al aplicar la lógica del modelo, de conjunto con sus funcionalidades programadas, se evidencia la determinación de un Plan Maestro de Producción factible y ajustado a los recursos existentes en la operación cuello de botella, el cual se ejecuta a un costo total mínimo, con altos niveles de cumplimiento del plan y con un buen aprovechamiento de los factores de producción disponibles. Además, dicha lógica permite identificar los mejores escenarios en los que deben ser asignados los trabajadores por cada una de las secciones y subsecciones de trabajo y las máquinas por cada tipo de ítem a producir. Dentro de estos escenarios colabora en detectar aquel o aquellos que garantizan el mejor desempeño del sistema y cuáles son las causas que mayormente influyen en la pérdida del rendimiento en la operación.

Al procesar la información, se selecciona la solución 92 como mejor alternativa en la que se deben organizar los recursos para la semana que se planifica. Esta solución propone un costo total mínimo de \$ 34941.52, un cumplimiento del plan al 99.48% y un rendimiento de 1.52 docenas/minuto. Acompañados de utilidades del 73.25%, 73.45% y del 86.84% para los enebradores, viradores y máquinas, respectivamente. A partir de este estudio, el modelo puede ser enriquecido a partir de considerar la interacción de la operación cuello de botella con el resto de las operaciones, cuyas aleatoriedades pueden afectar la continuidad del trabajo y del flujo a lo largo del proceso productivo. Se añaden, posibles análisis acordes a la realidad actual de la industria textil de la zona y donde la subcontratación de ciertas operaciones se ha convertido en una alternativa para minimizar los costos totales de producción y para enfrentar las fluctuaciones en la demanda.

Referencias

- [1] D. Singh, "You can use simulation to make the correct decisions," *Industrial Engineering*, vol. 23, pp. 39-42, 1991.
- [2] R. Roy and S. Grinstead, "The role of simulation in manufacturing and how to use it effectively," in *Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation in Manufacturing: 24-26 June 1986, Chicago, USA, 1986*, pp. 151-156.
- [3] R. Schroeder, *Administración de operaciones. Conceptos y casos contemporáneos*. México DF: Editorial McGraw Hill, 2011.
- [4] A. M. Law and D. W. Kelton, "Simulation modeling and analysis," 2000.
- [5] C. A. Goodsell and T. J. V. Kley, "Inventory management simulations at Cat Logistics," presented at the *Proceedings of the 32nd conference on Winter simulation, Orlando, Florida, 2000*.
- [6] J. García-Laguna, L. A. San-José, L. E. Cárdenas-Barrón, and J. Sicilia, "The integrality of the lot size in the basic EOQ and EPQ models: Applications to other production-inventory models," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 216, pp. 1660-1672, 2010/05/01/ 2010.
- [7] L. E. Cardenas-Barron, N. R. Smith, J. L. Martinez-Flores, and M. Rodriguez Salvador, "Modelling lead time effects on joint inventory and price optimisation," *International Journal of Logistics Economics and Globalisation*, vol. 2, pp. 270-291, 2010.



- [8] L. A. San-José, J. Sicilia, and J. García-Laguna, "Optimal lot size for a production–inventory system with partial backlogging and mixture of dispatching policies," *International Journal of Production Economics*, vol. 155, pp. 194-203, 2014/09/01/ 2014.
- [9] J. O’Kane, "Simulating production performance: cross case analysis and policy implications," *Industrial Management & Data Systems*, vol. 104, pp. 309-321, 2004.
- [10] R. Mahanti and J. Antony, "Confluence of six sigma, simulation and software development," *Managerial Auditing Journal*, vol. 20, pp. 739-762, 2005.
- [11] I. H. Yavuz and A. Satir, "A kanban-based simulation study of a mixed model just-in-time manufacturing line," *International Journal of Production Research*, vol. 33, pp. 1027-1048, 1995/04/01 1995.
- [12] Y. Sugimori, K. Kusunoki, F. Cho, and S. Uchikawa, "Toyota production system and Kanban system Materialization of just-in-time and respect-for-human system," *International Journal of Production Research*, vol. 15, pp. 553-564, 1977/01/01 1977.
- [13] M. E. A. Boudella, E. Sahin, and Y. Dallery, "Kitting optimisation in Just-in-Time mixed-model assembly lines: assigning parts to pickers in a hybrid robot–operator kitting system," *International Journal of Production Research*, pp. 1-20, 2018.
- [14] L. Maleki, S. H. R. Pasandideh, S. T. A. Niaki, and L. E. Cárdenas-Barrón, "Determining the prices of remanufactured products, capacity of internal workstations and the contracting strategy within queuing framework," *Applied Soft Computing*, vol. 54, pp. 313-321, 2017/05/01/ 2017.
- [15] V. V. Kalashnikov, R. C. Herrera Maldonado, J.-F. Camacho-Vallejo, and N. I. Kalashnykova, "A heuristic algorithm solving bilevel toll optimization problems," *The International Journal of Logistics Management*, vol. 27, pp. 31-51, 2016.
- [16] J. SICILIA, J. FEBLES-ACOSTA, and M. GONZÁLEZ-DE LA ROSA, "DETERMINISTIC INVENTORY SYSTEMS WITH POWER DEMAND PATTERN," *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, vol. 29, p. 1250025, 2012.
- [17] A. K. Bhunia, A. A. Shaikh, and L. E. Cárdenas-Barrón, "A partially integrated production-inventory model with interval valued inventory costs, variable demand and flexible reliability," *Applied Soft Computing*, vol. 55, pp. 491-502, 2017/06/01/ 2017.
- [18] E. Müller, J. Tolujew, and F. Kienzle, "Push-Kanban – a kanban-based production control concept for job shops," *Production Planning & Control*, vol. 25, pp. 401-413, 2014/04/01 2014.
- [19] P. L. Gonzalez-R, M. Calle, and J. L. Andrade-Pineda, "Job shop management of products under internal lifespan and external due date," *International Journal of Production Research*, pp. 1-18, 2018.
- [20] M.-S. Casas-Ramírez, J.-F. Camacho-Vallejo, and I.-A. Martínez-Salazar, "Approximating solutions to a bilevel capacitated facility location problem with customer’s patronization toward a list of preferences," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 319, pp. 369-386, 2018.
- [21] J. F. Camacho Vallejo and R. Muñoz Sánchez, "A path based algorithm for solve the hazardous materials transportation bilevel problem," in *Applied Mechanics and Materials*, 2013, pp. 1082-1088.
- [22] M. R. Montoya, M. B. B. Loranca, R. G. Velázquez, J. L. M. Flores, H. B. Santos, A. S. Flores, et al., "A Solution Proposal for the Capacitated P-Median Problem with Tabu Search," 2016.
- [23] B. Beemsterboer, M. Land, R. Teunter, and J. Bokhorst, "Reprint of "Integrating make-to-order and make-to-stock in job shop control"," *International Journal of Production Economics*, vol. 194, pp. 3-12, 2017/12/01/ 2017.
- [24] M. Thüerer, M. Stevenson, C. Silva, and T. Qu, "Drum-buffer-rope and workload control in High-variety flow and job shops with bottlenecks: An assessment by simulation," *International Journal of Production Economics*, vol. 188, pp. 116-127, 2017/06/01/ 2017.
- [25] Harrell, "Simulation Using ProModel: McGraw-Hill Education.," 2011.
- [26] J. A. Domínguez Machuca, J. Alvarez Gill, A. Domínguez Machuca, S. García González, and A. Ruíz Jímenes, *Dirección de Operaciones. Aspectos Estratégicos en la producción y los servicios. España: McGraw_Gill*, 1995.
- [27] L. J. Krajewski, L. P. Ritzman, and M. K. Malhotra, "Administración de operaciones. Procesos y cadena de suministro," ed: México: Pearson Educación, 2008.
- [28] T. L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw Hill 1981.
- [29] E. Orozco Crespo and D. D. Hermoso Ayala, "Optimización del proceso de producción de medias corta logo en la fábrica Gardenia," 2017-01-24 2017.
- [30] E. Orozco Crespo and D. D. Hermoso Ayala, "Optimización del proceso de producción de medias corta logo en la fábrica Gardenia," 2017-01-24 2017.