

Volume 4, Issue 1

May 2017

ISSN: 1390-9266

LAJC

LATIN-AMERICAN JOURNAL OF COMPUTING

FACULTAD DE INGENIERÍA DE SISTEMAS
QUITO - ECUADOR

Editor in Chief:

PhD. Jenny Torres, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

<http://lajc.epn.edu.ec/>



ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL



LATIN AMERICAN JOURNAL OF COMPUTING LAJC

Vol IV, Issue 1, May 2017

ISSN: 1390-9266

e-ISSN: 1390-9134

Published by:
Escuela Politécnica Nacional
Facultad de Ingeniería de Sistemas

Quito – Ecuador

LATIN AMERICAN JOURNAL OF COMPUTING – LAJC

Published by:

Escuela Politécnica Nacional
Facultad de Ingeniería de Sistemas
Ecuador

Editorial Committee:

Dra. Jenny Torres, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
Dr. Edison Loza, Université Grenoble Alpes, France
Dr. Alex Buitrago, Universidad Externado de Colombia, Colombia

Editor in Chief:

Dra. Jenny Torres, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Section Editors:

Ing. Hernán Ordoñez, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Mailing Address:

Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería de Sistemas
Ladrón de Guevara E11-253, La Floresta
Quito-Ecuador, Apartado Postal: 17-01-2759

Web Address:

<http://lajc.epn.edu.ec>

E-mail:

lajc@epn.edu.ec

Frecuency:

2 issues per year

Circulation:

350

EDITORIAL

Knowledge generation has made us different from other species.

Two of the essential questions in the academy are: what do we consider as knowledge? And how to legitimize this knowledge? Even when there are multiple definitions of knowledge, most of them integrate three fundamental elements: (1) the subject, (2) the object and (3) their relationship (Karl Popper, Theodor W. Adorno, Max Horkheimer). The subject is the one who knows the object and the object what is known. The relation between object and subject determines the form in which the subject knows or believes to know the object. Such knowledge can be constructed or reflected. In the scientific world, the focus goes to the way the knowledge is constructed and how it is used. The true act of knowing something occurs when it is applied in a concrete empirical reality.

The generation of scientific knowledge is a social and historical processes in which new individual ideas must be converted into foundations that can be validated and used by the scientific community. Thus, the generation of knowledge is part of a virtuous circle of accumulation of foundations and concepts that have built up the science. As Newton's said: "being on the shoulders of giants". In other words, to reach a higher level of knowledge requires of previous scientific contributions.

The ability to generate knowledge has made us different from the rest of the species. The progress of mankind starts, in the first instance, from learning and applying what was learned. This allows to design new methods, techniques and tools that are the means to achieve unthinkable things. Both the means and the knowledge generated must be valid. The validity is obtained through: (1) Objectivity (Max Weber), (2) Neutrality (Max Weber) and (3) Demonstration (Max Weber).

Technology is one of these means, which allows human beings to see the world in new ways and has discovered that every time one learns, the understanding of the environment becomes more evident. Nowadays, technology is considered essential for the development, growth and validation of knowledge. Some authors speak of the hegemony of techno-science and consider it as legitimate knowledge for the construction of the valid meaning of the real.

Information and communication technologies (ICTs) are present in everything we see and perceive. We are immersed in a digital age where even communications are, predominantly, digital. Today, ICTs use concepts that, not long ago, were part of the future such: artificial intelligence, fractals, analysis of feelings, etc.

The articles published in this issue are exhaustive in extracting key concepts, authors and theories that support novel and interesting discussions and conclusions. As a member of the editorial board of this magazine, I am pleased to say that these articles have renovated my curiosity to investigate further. Most of the proposed tools in this issue are useful not only in the proposed demonstrations of each paper but also in other environments such as business.

The article by Ivan Jacho Sánchez, Lorena Arboleda Castro, Olga Paola Cedeño-Fuentes, Eduardo Samaniego-Mena and Pavel Novoa-Hernández presents a mathematical-computational solution that proposes the automation of the process of creation of work groups of students in universities. The proposal attempts to solve conflicts among the objectives of students and teachers in projects. This solution could also be used in the formation of business workgroups that seek the logic associated with achievements under while preserving the priorities of the organization.

The article written by Juan Carlos Pisco Vanegas, Abraham Adalberto Bayas Zamora, Rodolfo Najarro Quintero, Amilkar Yudier Puris Cáceres and Pavel Novoa Hernández deals with the problem of planning the labour force in companies using the simile of the colonies of ants. The method proposed in this article is interesting and is based on the observation of the intrinsic functions of ants as part of a complex system. The method was validated with simulations.

The paper by Gandhi Mora, José Lucio Naranjo and Luis Bravo Moncayo proposes a technique that seeks the optimization of absorption coefficients for acoustic numerical simulation. The article integrates concepts associated with mathematical modelling, computational simulations and acoustic characterization of materials. The article by Gabriela Santiago and Jose Aguilar reviews the literature related to acoustic science and intelligent environments, as a preliminary step for the conception of a middleware for the acoustic self-management of intelligent environments. These two articles are very interesting for the industry, for the generation of innovative products linked to the acoustic filters and because of the constant development that has had the home automation over the last years.

Organizations are increasingly dependent on digital expression. Facts and evidence can be stored and retrieved when required using data repositories ranging from office files to large data warehouses. The challenge for organizations is to know how to use data to find new opportunities, mitigate risks and anticipate threats. That is to transform the data into useful information. In this sense, the article by Sergio Castillo Páez, Miguel Flores, Giovanni Herrera presents the results of an exploratory functional analysis to identify atypical data and build a supervised classification model based on the risk classification of savings and credits, which are under the control of the Superintendence of Banks of Ecuador. For the development of this article they used statistical techniques linked to alternative processes of data processing to obtain an interesting procedure with a high potential for generalization.

The process of transforming data into knowledge is a complex and generally non-standardized process. Organizations can apply methodologies to organize data, perform measurements, apply statistics, and discover patterns. However, the key challenge is how to take advantage of what was learned at the right time with opportunity and force.

Finally, I would like to reiterate our thanks to the team of reviewers who have done an exceptional work to enrich the quality of the articles that are part of this issue. We hope that the papers published would be of great utility and interest for our readers.

Dos de las preguntas esenciales en el mundo científico son: ¿Qué consideramos como conocimiento? y ¿Cómo legitimar dicho conocimiento? Existen múltiples definiciones del conocimiento que integran tres elementos fundamentales (1) el sujeto, (2) el objeto y (3) la relación (Karl Popper¹; Theodor W. Adorno; Max Horkheimer²). El sujeto es quién conoce el objeto y el objeto lo que es conocido. Y la relación entre objeto y sujeto determina la forma en que el sujeto conoce o cree conocer el objeto. Dicho conocimiento puede ser construido o reflejado. En el mundo científico el interés en la forma en que el conocimiento es construido es

¹ Objective Knowledge: An Evolutionary Approach, 1972.

² Dialéctica de la ilustración, 2007.

tán importante como las formas de aplicación del mismo. Así, el verdadero acto de conocimiento se produce cuando se aplica en una realidad empírica concreta.

Ahora bien, la construcción del conocimiento científico es considerada como una construcción social e histórica en la cual la generación de ideas aunque individual debe ser transformada en fundamentos que pueden ser validados y luego utilizados por la comunidad científica. Es decir la generación de conocimiento hace parte de un círculo virtuoso de acumulación de fundamentos y conceptos que han edificado la ciencia de ahí la frase célebre de Newton³ “estar subido a hombros de gigantes”. Es decir que para dar un salto o alcanzar un nivel superior se requiere de los aportes de los científicos precedentes.

La capacidad de generar conocimiento nos ha hecho diferentes al resto de las especies. El progreso de la humanidad parte en primera instancia de aprender y aplicar lo aprendido con lo cual se diseñan métodos, técnicas y herramientas que a su vez son el medio para lograr cosas impensables. Tanto los medios como los conocimientos generados deben tener validez. La validez se obtiene a través de: (1) Objetividad (Max Weber⁴), (2) La neutralidad (Max Weber⁵) y la (3) Demostración (Max Weber⁶).

La tecnología es una de dicho medios, con la cual el ser humano ha sido capaz de ver el mundo de diferentes maneras y ha descubierto que cada vez que se aprende, la complejidad de entender el entorno se hace más evidente. En la actualidad, la tecnología es considerada esencial para el desarrollo, crecimiento y validación del conocimiento, algunos autores hablan de una hegemonía de la techno-ciencia y la enmarcan como parte de los saberes legítimos para la construcción del sentido válido de lo real.

Las tecnologías de la información y de las comunicaciones se encuentran presentes en todo lo que vemos y percibimos. Estamos inmersos en lo digital, las comunicaciones en general son digitales. La televisión y la radio basadas en la tecnología IP, los teléfonos inteligentes que soportan las videoconferencias, la tele presencia, los portales de noticias en general entre otros.

Además las tecnologías de la información y de la comunicación utilizan conceptos que hasta hace un tiempo eran parte del futuro lejano como la inteligencia artificial, los fractales, el análisis de sentimientos entre otros para seguir avanzando en el desarrollo.

Los artículos publicados en el éste número son exhaustivos en la extracción de conceptos, autores y teorías clave que soportan las discusiones y conclusiones novedosas e interesantes. Como miembro del equipo editoria de la revista, me siento complacido que al leer los artículos tenga la curiosidad de investigar aún más. Las herramientas propuestas en este número son aportes útiles no solamente en las demostraciones propuestas sino además en otros entornos como los empresariales.

El artículo de Iván Jacho Sánchez, Lorena Arboleda Castro, Olga Paola Cedeño-Fuentes, Eduardo Samaniego-Mena y Pavel Novoa-Hernández presenta una solución matemático-computacional que propone la automatización del proceso de creación de grupos de trabajo de estudiantes en el ámbito universitario. La problemática propuesta intenta solucionar el conflicto que se presenta en la diversidad de objetivos de los estudiantes y de los profesores para lograr encaminar un proyecto específico. Éste tipo de soluciones podría ser clave en la conformación de grupos de trabajo empresariales que busquen un lógica asociada al logro y su vez se encuentren enmarcados en una visión general de la organización.

³ Carta que Isaac Newton envió a Robert Hooke el 5 de febrero de 1675.

⁴ La objetividad cognoscitiva de la ciencia social y de la política social”, de 1904.

⁵ Ensayos sobre metodología sociológica de 1917

⁶ Sociología de la ciencia de 1973

El artículo de Juan Carlos Pisco Vanegas, Abraham Adalberto Bayas Zamora, Rodolfo Najarro Quintero, Amilkar Yudier Puris Cáceres y Pavel Novoa Hernández propone un método para tratar el problema de la planificación de la fuerza de trabajo en empresas utilizando el símil de las colonias de hormigas. El método propuesto en éste artículo es interesante y se enmarca en la observación de las funciones intrínsecas de las hormigas con parte de un sistema complejo. El método fue validado con simulaciones computacionales.

El artículo de Gandhi Mora, José Lucio Naranjo y Luis Bravo Moncayo propone una técnica que busca la optimización de coeficientes de absorción para simulación numérica acústica. El artículo integra conceptos asociados a la modelización matemática, la simulación computacional y la caracterización acústica de materiales. El artículo de Gabriela Santiago y Jose Aguilar hace una revisión de la literatura relacionada con la ciencia acústica y los ambientes inteligentes, como paso previo para la concepción de un middleware (medio de gestión) para la autogestión acústica de los ambientes inteligentes. Estos dos últimos artículos son muy interesantes para la industria, en particular en la generación de productos innovadores vinculados a los filtros acústicos y al desarrollo constante que ha tenido la domótica.

Las organizaciones dependen cada vez de la expresión digital. Los hechos y las evidencias pueden ser almacenadas y recuperadas en el momento que se requiera utilizando repositorios de datos que incluyen desde archivos de ofimática hasta las grandes bodegas de datos. El reto para las organizaciones es saber aprovechar los datos, encontrar oportunidades, mitigar riesgos y anticiparse a las amenazas. Es decir transformar los datos en información útil. En éste sentido, el artículo de Sergio Castillo Páez, Miguel Flores, Giovanni Herrera presenta los resultados de un análisis funcional exploratorio, identificación de datos atípicos y la construcción de modelos de clasificación supervisada en base a la clasificación del riesgo de las cooperativas de ahorro y crédito, sujetas al control de la Superintendencia de Bancos del Ecuador. Para el desarrollo de éste artículo se utilizaron técnicas estadísticas vinculadas a procesos alternativos de tratamiento de datos para obtener un procedimiento interesante con un alto potencial de generalización.

El proceso de transformación de datos en conocimiento es un proceso complejo y en general no estandarizado. Las organizaciones pueden aplicar metodologías para organizar los datos, realizar mediciones, aplicar estadísticas, descubrir patrones. Sin embargo, el reto real es el cómo aprovechar lo obtenido en el momento adecuado con oportunidad y contundencia.

Finalmente, quiero reiterar nuestros agradecimientos al equipo de revisores que han realizado un trabajo excepcional para enriquecer la calidad de los artículos que hacen parte del presente número. Esperamos que los artículos publicados sean de gran utilidad y agrado para nuestros lectores.

Alex Fernando BUITRAGO HURTADO
Universidad Externado de Colombia
Editorial Board LAJC

Latin American Journal of Computing – LAJC

Reviewers

We are most grateful to the following individuals for their time and commitment to review manuscripts for Latin American Journal of Computing – LAJC.

Aguiar Pontes Josafá, PhD. Tokyo Institute of Technology, Japan
Aguilar José, PhD. Universidad de los Andes, Venezuela
Anchundia Carlos, MSc. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
Andrade Roberto, MSc. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
Barriga Jhonattan, MSc. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
Benalcázar Marco, PhD. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
Brandão Diego, PhD. Universidade Federal Fluminense, Brasil
Buitrago Alex, PhD. Universidad Externado de Colombia, Colombia
Calle Tania, MSc. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
Carrera Iván, MSc. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
Carrión Gordón Lucía, MSc. University of Technology Sidney, Australia
Duarte Ferreira Vera Lúcia, PhD. Universidade Federal do Pampa, Brasil
Flores Pamela, PhD. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
Flores Denys, MSc. University of Warwick, England
Fuertes Díaz Walter, PhD. Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, Ecuador
García Olaya Angel, PhD. Universidad Carlos III de Madrid, España
Hallo María, MSc. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
Hernández Myriam, PhD. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
Herrera Juan, MSc. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
Intriago Monserrate, MSc. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
Loza Aguirre Edison, PhD. Université de Grenoble, France
Lucio José Francisco, PhD. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
Luján Mora Sergio, PhD. Universidad de Alicante, España
Magreñán Ángel Alberto, PhD. Universidad Internacional La Rioja, España
Meliá Beigbeder Santiago, PhD. Universidad de Alicante, España
Navarrete Rosa, MSc. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
Paz Arias Henry, MSc. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
Pérez María, PhD. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
Pousa Federico, PhD. Universidad de Buenos Aires, Argentina
Qazi Farrukh, University of Warwick, England
Ramíó Jorge, PhD. Universidad Politécnica de Madrid, España
Riofrío Diego, MSc. Universidad Politécnica de Madrid, España
Roa Marin Henry, MSc. The University of Queensland, Australia
Sánchez Gordón Sandra, MSc. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
Suntaxi Gabriela, MSc. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
Torres Olmedo Jenny, PhD. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
Torres Olmedo Jeaneth, MSc. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
Yacchirema Diana, MSc. Universitat Politècnica de València, España
Zambrano Patricio, MSc. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

TABLE OF CONTENTS

Un Enfoque Evolutivo Multi-Objetivo al Problema de la Construcción de Grupos de Estudiantes Universitarios

An Evolutionary Multi-Objective Approach to the Problem of Building College Student Groups

Iván Jacho-Sánchez, Lorena Arboleda-Castro, Olga P. Cedeño-Fuentes, Eduardo Samaniego-Mena, Pavel Novoa-Hernández.....11-18

Análisis de Datos Funcionales Aplicado al Riesgo Financiero: Un Caso de Estudio en Cooperativas de Ahorro y Crédito Ecuatorianas

Functional Data Analysis Applied to Financial Risk: A Case Study in Ecuadorian Credit Unions

Sergio Castillo-Páez, Miguel Flores, Giovanni Herrera-Enríquez.....19-25

La Ciencia Acústica en los Ambientes Inteligentes

Acoustic Science in Intelligent Environments

Gabriela Santiago, Jose Aguilar.....27-36

Optimización de Coeficientes de Absorción para Simulación Numérica Acústica

Optimization of Absorption Coefficients for Numerical Acoustic Simulation

Gandhi Mora Guevara, José Lucio Naranjo y Luis Bravo Moncayo37-49

Optimización con Colonia de Hormigas para la Planificación Óptima de la Fuerza de Trabajo

Optimization with Ant Colony for Optimal Planning of the Work Force

Juan C. Pisco-Vanegas, Abraham A. Bayas-Zamora, Rodolfo Najarro Quintero, Amilkar Y. Puris Cáceres, Pavel Novoa-Hernández.....51-57

Un Enfoque Evolutivo Multi-Objetivo al Problema de la Construcción de Grupos de Estudiantes Universitarios

An Evolutionary Multi-Objective Approach to the Problem of Building College Student Groups

Iván Jacho-Sánchez, Lorena Arboleda-Castro, Olga P. Cedeño-Fuentes, Eduardo Samaniego-Mena, Pavel Novoa-Hernández

Resumen— En el ámbito educativo, la creación de grupos de trabajo de estudiantes es un proceso común que frecuentemente es desarrollado por el docente de manera intuitiva. Sin embargo, desarrollar dicho proceso de forma óptima es en realidad una tarea compleja, sobre todo por la presencia de varios estudiantes y criterios. En particular, estos criterios suelen estar en conflicto dado que son reflejo de los intereses educativos del docente y, por otro lado, de las preferencias individuales de cada estudiante. En este sentido, el presente trabajo tiene por objetivo proponer una solución matemático-computacional que automatice eficientemente, en términos de tiempo de cómputo y calidad de las soluciones, el proceso de creación de grupos de trabajo de estudiantes en el ámbito universitario. Los resultados obtenidos en dos escenarios reales en la Universidad Técnica Estatal de Quevedo indican que la propuesta constituye una alternativa eficaz al modelo tradicional.

Palabras Clave— Creación de grupos, optimización multi-objetivo evolutiva, meta-heurísticas

Abstract— The creation of working groups of students in education is a common process that is often developed by the teacher intuitively. However, such a process is actually a complex task since various students and criteria must be taken into account. In general, these criteria are often in conflict because they are a reflection of the educational interests of teachers and on the other hand, the individual preferences of students. In this sense, this paper has as general goal: to propose a mathematical-computational solution that efficiently automatizes, in terms of computational time and solution quality, the creation of working groups of college students. The results obtained from two real

Article history:

Received 18 January 2017

Accepted 11 May 2017

Los autores I. Jacho-Sánchez (ijacho@uteq.edu.ec), L. Castro-Arboleda (larboleda@uteq.edu.ec) y O.P. Cedeño-Fuentes (ocedeno@uteq.edu.ec) son docentes de la Facultad de Ciencias Empresariales de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo - Los Ríos, Ecuador.

E. Samaniego-Mena (esamaniego@uteq.edu.ec) y P. Novoa-Hernández (pnovoa@uteq.edu.ec) son docentes de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo - Los Ríos, Ecuador.

P. Novoa-Hernández es también Profesor Invitado de la Universidad Estatal de Milagro, Milagro - Guayas, Ecuador.

scenarios of the Universidad Técnica Estatal de Quevedo indicate that the proposal is an effective alternative to the traditional model.

Index Terms— Group building, evolutionary multi-objective optimization, metaheuristics.

I. INTRODUCCIÓN

UNA de las competencias más valiosas en el ámbito de la Educación del Siglo XXI [1] es el trabajo en grupo (también conocido como aprendizaje cooperativo). Un aspecto importante dentro de dicha competencia es el proceso de creación de los grupos. En la práctica, esta tarea puede ser desarrollada o bien por el profesor, quien se guiaría por objetivos educativos, o bien por los estudiantes, quienes buscarían aprovechar sus preferencias personales (ej. amistad y compañerismo). En el primer enfoque, donde la creación de los grupos es controlada por el profesor, el objetivo principal es potenciar el aprendizaje de los miembros de cada grupo mediante asociaciones estratégicas entre sus miembros. En particular estas asociaciones buscarían homogenizar el aprendizaje a partir de la presencia de estudiantes con diferentes niveles de conocimiento en un mismo grupo. Como beneficio adicional, el docente podría tener en cuenta también la diversidad de género, de raza, de nivel económico, entre otros, con el objetivo de superar posibles marginalizaciones. En cambio, el segundo enfoque al ser controlado por los estudiantes estaría centrado en la afinidad de sus miembros. Lo cual pudiera estar propenso a la presencia de grupos no deseables desde el punto de vista educativo. Por ejemplo, grupos elitistas de estudiantes muy sobresalientes, o grupos de un solo género o condición social. De manera que el principal reto aquí es lograr un balance adecuado entre ambos enfoques de manera que se cumplan efectivamente los objetivos de cada parte.

Assumiendo que este balance puede ser logrado, queda aún por resolver una dificultad: cómo lidiar con un número alto de estudiantes (ej. más de 30). Desde el punto de vista combinatorio, resulta complejo asignar óptimamente estudiantes a grupos teniendo en cuenta todos los objetivos

trazados. Esta problemática ha sido abordada en algunas investigaciones previas. Véase por ejemplo [2], donde el problema fue modelado sin tener en cuenta las preferencias de los estudiantes. Sin embargo, hasta donde se conoce no existen estudios que consideren las preferencias de los estudiantes y los objetivos del docente al mismo tiempo.

Por tales motivos la presente investigación tiene por objetivo desarrollar un modelo matemático-computacional que automatice eficientemente el proceso de creación de grupos de trabajo de estudiantes en el ámbito universitario. En esencia, dicho proceso se ha modelizado como un problema de optimización discreto multi-objetivo. Dada la complejidad computacional presente en dicho modelo (véase [2]) se ha aplicado un algoritmo evolutivo que permite obtener múltiples soluciones de calidad en un tiempo relativamente corto. De esta forma se podrá contar con varias alternativas de solución de alta calidad.

II. TRABAJOS RELACIONADOS

Aunque en la literatura existen algunos trabajos importantes relacionados con el tema (véase por ejemplo [3], [4]), hasta donde se conoce estos están enfocados a establecer solamente directrices sobre cómo formar los grupos, o los beneficios de emplear este recurso educativo. Esto es, no se deja claro de qué forma se debe realizar esta tarea.

Por otro lado, existen trabajos que automatizan procesos de creación de grupos en el contexto de: la educación superior [5], [6], el desarrollo de software [7], [8], y los deportes [9]. En todos estos trabajos se aplican técnicas computacionales que resuelven eficientemente problemas complejos de creación de grupos [10]. Sin embargo, es importante notar que, aunque estas investigaciones constituyen propuestas novedosas, en ninguna se aborda directamente el problema de la creación de grupos de estudiantes universitarios.

De manera que, resulta de interés conocer cómo aprovechar los avances actuales de las tecnologías de la información y la comunicación (TICs) para automatizar este proceso.

III. EL PROBLEMA DE LA CONSTRUCCIÓN DE GRUPOS

En esencia, el problema que se desea resolver queda descrito como sigue:

Sean conocidos por cada estudiante de una unidad de aprendizaje su nivel de conocimiento en la unidad, su condición socio-económica, su vinculación laboral, su sexo, y preferencias individuales, crear “e” grupos de “m” estudiantes de manera que se maximicen:

1. la heterogeneidad (diversidad en cuanto a su nivel de conocimiento, condición socio-económica, vinculación laboral, sexo);
2. la presencia de estudiantes con capacidad de liderazgo en el grupo; y
3. el nivel de preferencia individual de los integrantes por pertenecer.

La descripción anterior puede ser transformada en un modelo matemático conducente a un problema de optimización multi-objetivo como se describirá en los

siguientes apartados. Es importante hacer notar que el modelo propuesto es una extensión del propuesto en nuestra investigación previa [2], sin embargo en el del actual trabajo se han tenido en cuenta la preferencia de los estudiantes con lo que se logra un acercamiento mucho mayor a la realidad.

A. Datos

Se asumirá que se cuenta con los siguientes datos:

n : cantidad de estudiantes de la clase.

m : cantidad máxima de estudiantes que tendrá un grupo.

$e = \lfloor \frac{n}{m} \rfloor$: número de grupos a formar, donde $\lfloor \cdot \rfloor$ representa el operador parte entera.

$h_i \in \{0,1,2\}$: Nivel en conocimiento del estudiante i . Donde:

- 0 corresponde a un nivel bajo,
- 1 corresponde a un nivel medio, y
- 2 corresponde a un nivel bueno.

$c_i \in \{0,1\}$: Nivel económico-social del estudiante i . Donde:

- 0 corresponde a un nivel bajo, y
- 1 corresponde a un nivel aceptable.

$t_i \in \{0,1\}$: Si trabaja o no el estudiante i . Donde:

- 0 no trabaja,
- 1 trabaja.

$s_i \in \{0,1\}$: Sexo del estudiante i . Donde:

- 0 si es femenino, y
- 1 si es masculino.

$l_i \in \{0,1\}$: Competencia de liderazgo del estudiante i . Donde:

- 0 no tiene la competencia,
- 1 tiene la competencia.

$p_{ik} \in \{0,1,2\}$: Preferencia individual del estudiante i por el estudiante k . Donde:

- 0, si a i le resulta irrelevante que k pertenezca o no a su grupo,
- 1, si i siente cierta preferencia por k ,
- 2, si i desea que k forme parte de su grupo.

B. Variables de decisión

Las variables de decisión corresponderán a la asignación de un estudiante a un grupo determinado. Formalmente, se definen como $x_{ij} \in \{0,1\}$, donde:

- 0 significa que el estudiante i no pertenece al grupo j ,
- 1 por el contrario.

C. Restricciones

Las principales restricciones del problema tienen que ver con la estructura del grupo. Formalmente se tendrán en cuenta las siguientes.

- Restricciones funcionales de capacidad del grupo (todos los grupos tienen m integrantes).

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = m \quad \forall j = 1, \dots, e \quad (1)$$

- Restricciones funcionales de pertenencia de los estudiantes (un estudiante pertenece a un solo grupo):

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (2)$$

TABLA I
ESCENARIOS CONSIDERADOS EN LOS EXPERIMENTOS

Características	Escenario 1	Escenario 2
Carrera	Ing. Contabilidad y Auditoría	Ing. Industrial
Unidad de aprendizaje	Inglés III	Inglés II
Número de estudiantes	30	55
Número de integrantes por grupo	5	5
Número de grupo	6	11
Distribución de nivel general de habilidades (Speaking, Writting, Listening)	Alto (10), Medio (13) Bajo (7)	Alto (20), Medio (25),Bajo (10)
Distribución del nivel socio-económico	Alto (14), Bajo (16)	Alto (35), Bajo (20)
Distribución de la vinculación laboral	Sí (17), No (13)	Sí (27), No (28)
Distribución del sexo	Mujeres (26), Hombres (4)	Mujeres (11) Hombres (44)
Distribución de liderazgo	Sí (5) No (25)	Sí (12) No (43)
Tamaño del espacio de búsqueda (número de soluciones a considerar)	$\approx 8.88 \times 10^{19}$	$\approx 1.71 \times 10^{50}$

Fuente: Gavidia et al [2].

- Restricciones de dominio de las variables de decisión:

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad \forall j = 1, \dots, m$$

D. Funciones objetivo

En general se tienen dos grandes objetivos a maximizar: el relacionado con los intereses del docente y el de las preferencias de los estudiantes. En relación al primero, se buscaría maximizar la diversidad (heterogeneidad) de los integrantes de cada grupo, en relación a los criterios siguientes 1) nivel de conocimiento en la unidad de aprendizaje, 2) nivel económico-social, 3) vínculo laboral, y 4) sexo. Para cuantificar la diversidad de cada grupo se empleó el índice de Mueller y Schuessler [11] (D) como sugiere [2]. Este índice es un análogo al estadígrafo de la varianza en variables continuas. Es importante notar que este índice toma valores en el rango $[0, 1]$, donde un valor cercano a 1 indica una diversidad alta, mientras que uno cercano a 0, lo contrario.

Aplicando este índice, se pueden definir cuatro funciones que corresponderán a la heterogeneidad de los grupos en cuanto al grado de conocimiento en la materia (F_1), condición económico-social (F_2), vínculo laboral (F_3), y sexo (F_4):

$$\max_X F_1(X) = \sum_{j=1}^e D(H(X_j)) \tag{3}$$

$$\max_X F_2(X) = \sum_{j=1}^e D(C(X_j)) \tag{4}$$

$$\max_X F_3(X) = \sum_{j=1}^e D(T(X_j)) \tag{5}$$

$$\max_X F_4(X) = \sum_{j=1}^e D(S(X_j)) \tag{6}$$

donde las funciones H , C , T , y S toman como argumento la j -ésima fila (grupo j) de la matriz X , y retornan un vector con

valores correspondiente a los integrantes del grupo j de acuerdo al indicador en cuestión. Esto es, para los integrantes del grupo j , H retorna el nivel de conocimiento en la asignatura, C los niveles económico-sociales, T la vinculación al trabajo, y S los sexos.

El requerimiento que exista un estudiante con capacidad de líder en cada grupo se puede modelar como:

$$\max_X F_5(X) = \sum_{j=1}^e L(X_j) \tag{7}$$

donde $L: \mathbb{B}^m \rightarrow \mathbb{B}$, es una función booleana que toma como argumento al grupo X_j y retorna 0 si no existe un líder en el grupo, y 1 por el contrario.

En relación a las preferencias de los estudiantes, se tiene la siguiente función objetivo:

$$\max_X F_6(X) = \sum_{j=1}^e S(X_j) \tag{9}$$

donde $S: \mathbb{B}^m \rightarrow \mathbb{N}$ es una función que devuelve la suma de todas las preferencias correspondientes a todos los integrantes del grupo X_j .

Dado que una de las mayores complicaciones que posee un problema multi-objetivo es tener que optimizar varias funciones objetivo a la vez, en la presente investigación se consideró llevar todas las funciones definidas en las expresiones (3-7) a una sola, representando así el objetivo del docente:

$$\max_X F_7(X) = \sum_{i=1}^5 F_i \tag{10}$$

De manera que usando una notación el objetivo general del modelo queda definido como:

$$\max_X \{F_6(X), F_7(X)\} \tag{11}$$

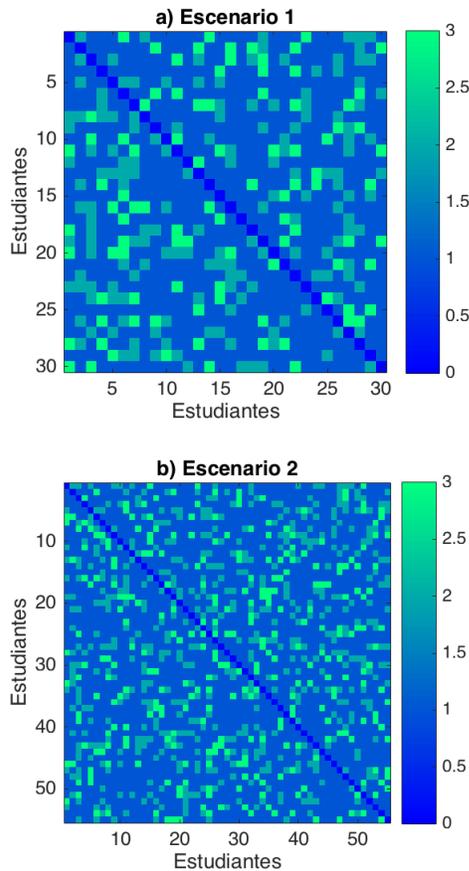


Fig 1. Distribución del nivel de preferencia de los estudiantes en los dos escenarios considerados.

TABLA II
VARIANTES DEL ALGORITMO NSGA-II QUE SE CONSIDERARON EN LOS EXPERIMENTOS.

Variante del algoritmo NSGA-II	Población	Tasa de cruzamiento
NSGAI(5,0.3)	$5 \times n^*$	0.3
NSGAI(5,0.6)	$5 \times n$	0.6
NSGAI(5,0.9)	$5 \times n$	0.9
NSGAI(10,0.3)	$10 \times n$	0.3
NSGAI(10,0.6)	$10 \times n$	0.6
NSGAI(10,0.9)	$10 \times n$	0.9
NSGAI(15,0.3)	$15 \times n$	0.3
NSGAI(15,0.6)	$15 \times n$	0.6
NSGAI(15,0.9)	$15 \times n$	0.9

* n indica la cantidad de estudiantes.

IV. MÉTODO DE SOLUCIÓN APLICADO

Si se analiza con detenimiento las características del modelo anterior, es posible observar que se puede aplicar un enfoque de solución basado en los conceptos de Dominancia de Pareto [12]. Para facilitar el estudio y posterior comparación de los

resultados, se consideró al algoritmo NSGA-II¹ [13] en su versión *elitista controlada*. Esta técnica meta-heurística [14] es un algoritmo genético que emplea la teoría de Dominancia de Pareto. Ambas características le permiten encontrar varias soluciones de alta calidad en un tiempo razonablemente corto². De esta forma, tanto el docente como los estudiantes podrán contar con variantes atractivas de forma rápida.

Aunque otros métodos pueden aplicarse [12], en esta ocasión la elección del NSGA-II se debe a su efectividad en escenarios complejos tales como: Análisis estructural (Método Escenario de Godet) [15], Robótica [16], Planificación [17], Bioinformática [18], [19], Control Automatizado [20], entre otros.

Con la idea de adaptar el NSGA-II al modelo propuesto se hace necesario redefinir los operadores de *inicialización*, *cruzamiento* y *mutación* de este algoritmo. Otro aspecto importante es que codificación (representación) de las soluciones (individuos) resulta más adecuada. En este caso, se representó a cada solución como una permutación de n números enteros en el rango $[1, n]$. Más detalles sobre la implementación de este método puede ser encontrada en la Ayuda del software *Matlab* [21], así como en el Apéndice I del presente trabajo. El lector interesado puede solicitar también el código fuente de la implementación desarrollada a los correos de los autores.

V. RESULTADOS NUMÉRICOS

El objetivo principal del estudio experimental desarrollado es analizar la propuesta en escenarios de aplicación reales. Para ello, se han seleccionado dos escenarios relacionados con las unidades de aprendizaje Inglés que se imparten respectivamente en las carreras Ingeniería en Contabilidad y Auditoría e Ingeniería Industrial, de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (Ecuador). Las principales características de estos escenarios se resumen en la Tabla I. Estos escenarios han sido definidos en la investigación previa [2].

En relación al nivel de preferencias de los estudiantes, en la Fig. 1 se muestran las distribuciones que exhibe este criterio para los dos escenarios considerados en el estudio.

Para analizar convenientemente el método de solución aplicado, se configuraron 9 variantes de NSGA-II atendiendo a la combinación de dos de sus parámetros fundamentales: tamaño de la población (número de soluciones candidatas) y tasa de cruzamiento. Específicamente se valoraron las combinaciones que se muestran en la Tabla II.

Para evaluar la calidad de las soluciones encontradas por las distintas variantes del algoritmo, se eligió como medida de convergencia el *promedio de la distancia mínima al frente de Pareto* [22]:

$$I_s = \frac{1}{\mu} \sum_{i=1}^{\mu} \min_{v \in S_{OP}} (\|F(v) - F(y_i)\|_2) \quad (10)$$

¹ Siglas en inglés de Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm.

² Por definición, las meta-heurísticas sacrifican calidad a favor de una disminución del tiempo de cómputo.

donde, μ es el tamaño de la población (número de soluciones candidatas en el algoritmo), S_{OP} es el conjunto óptimo de Pareto del problema, y y_i es la i -ésima solución del conjunto de Pareto obtenido por la variante s del algoritmo. El objetivo de esta medida es promediar la menor distancia euclidiana de las soluciones obtenidas por la configuración s y el frente óptimo $F(v)$. De manera que un valor bajo de esta medida implica un buen nivel de convergencia del algoritmo hacia al mejor frente de Pareto conocido del problema.

En general se realizaron 20 ejecuciones por cada par escenario y variante del algoritmo. Los experimentos fueron implementados sobre la tecnología Matlab 2015 [21].

En la Fig. 2 se muestran los resultados obtenidos por las variantes del algoritmo NSGA-II sobre los dos escenarios considerados. Nótese que estas 9 variantes corresponden a la interacción de los valores de los parámetros tamaño de la población (eje x) y la tasa de cruzamiento (eje y).

En la Fig. 3 se ha graficado los frentes de Pareto óptimo, el de la mejor variante, y el de la peor variante del algoritmo NSGA-II. Finalmente, con el objetivo de ejemplificar la estructura de una solución obtenida por el método de solución aplicado, en la Tabla III se muestra la quinta (5ta) solución de acuerdo al Frente de Pareto alcanzado por la variante NSGA-II(10, 0.3). La distribución que siguen los criterios considerados para esta 5ta solución, se muestra de manera gráfica en la Fig. 4.

VI. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en el apartado anterior se puede apreciar que los parámetros: tamaño de la población y tasa de cruzamiento, poseen una clara influencia en el rendimiento del algoritmo NSGA-II. Particularmente se observa que la mejor variante corresponde a la NSGA-II(10,0.3). Algo que se identifica mejor en el gráfico del Escenario 2 (Fig. 2). Dicha variante posee por tanto una distancia menor hacia el Frente de Pareto óptimo del problema, en comparación con el resto (véase la Fig. 3). Nótese que estos frentes de Pareto son representaciones gráficas de los dos objetivos del modelo, donde en el eje de las x se tiene a la función objetivo que corresponde a los criterios del profesor, y en el de las y al criterio de los estudiantes. En estos gráficos se observa también que no siempre la mejor variante aporta soluciones exactas con respecto al Frente óptimo, véase por ejemplo lo que sucede en el escenario 2 (Fig. 3), donde existen dos soluciones que están fuera del frente óptimo.

Otro aspecto importante que brinda este tipo de gráfico es que, a través del mismo, el decisor (en este caso el docente) puede elegir la solución que mejor represente sus intereses, siendo todas óptimas según el criterio de Pareto. Por ejemplo, un tipo de solución que resulta siempre atractiva es la que se encuentra en equilibrio en relación con los objetivos del modelo (ej. F_6, F_7). Ese es el caso de la quinta solución en el gráfico del Escenario 1 (Fig. 3).

Para comprobar cuán interesante puede resultar esta solución, a través de la Tabla III y la Fig. 4 se muestra su estructura interna. Por ejemplo, véase que en la Tabla III indica la asignación de los estudiantes a los grupos, mientras que en la Fig. 4 los valores de los 6 criterios considerados por

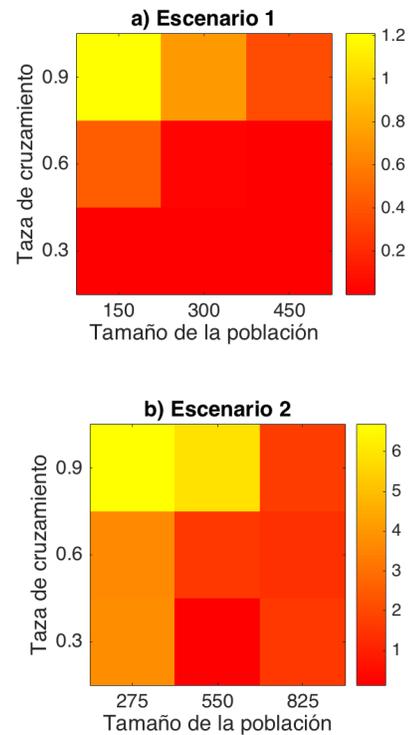


Fig 2. Resultados en términos de la distancia mínima al Frente de Pareto óptimo, obtenidos por las 9 variantes del algoritmo en los escenarios 1 y 2.

cada estudiante. Según los resultados de la Fig. 4 se aprecia que la solución logra un equilibrio adecuado entre los intereses del docente y el de los estudiantes.

Sin embargo, es también posible notar que la solución no es del todo óptima en algunos criterios. Por ejemplo, véase el criterio liderazgo en el que al grupo 3 se le han asignado dos estudiantes con aptitud de líderes, cuando grupos como el 2 y el 4 no tienen ninguno así.

Por la anterior se concluye que el objetivo de la investigación se ha alcanzado de manera efectiva. Más específicamente, el enfoque propuesto resulta efectivo para automatizar el proceso de creación de grupos de trabajo en estudiantes universitarios.

No obstante, los resultados obtenidos hasta aquí, se considera que estos pueden ser mejorados. Los trabajos futuros estarán orientados a: incluir el enfoque propuesto en una aplicación informática que facilite al docente no solo la gestión de la información involucrada, sino también la toma de decisiones en este proceso; y se considerarán otros criterios para la asignación de los estudiantes, por ejemplo, el estilo de aprendizaje. Asimismo, sería importante ampliar los experimentos con la ayuda de la herramienta DynOptLab [23].

REFERENCIAS

- [1] UNESCO and J. Delors, *La educación encierra un tesoro: informe a la UNESCO de la Comisión Internacional sobre la educación para el siglo XXI, presidida por Jacques Delors*. Correo de la UNESCO, 1997.
- [2] M. H. Gavidia, G. C. Galarza, M. M. Robalino, D. C. Chabla, and P. Novoa-Hernández, 'Creación automática de equipos de estudiantes universitarios: una experiencia desde la asignatura Inglés', *Cienc.*

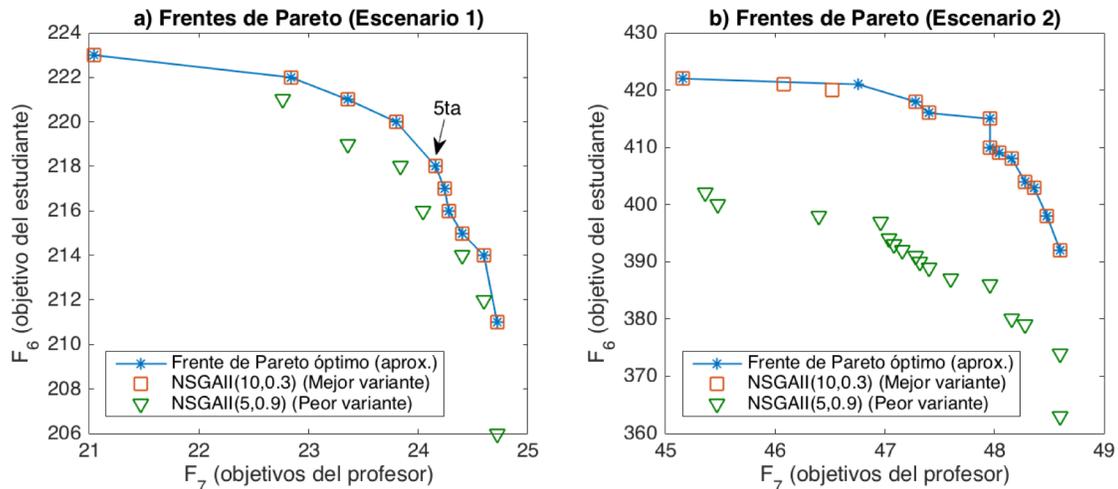


Fig 3. Ejemplo de solución obtenida por la variante NSGA-II(10,0.3) en el Escenario 1. La solución corresponde a la 5ta según el Frente de Pareto (véase Fig. 3).

TABLA III.
QUINTA (5TA) SOLUCIÓN DE ACUERDO AL FRENTE DE PARETO ALCANZADO POR LA VARIANTE NSGA-II(10,0.3).

Grupo	Miembros (Estudiantes)				
1	Est. 23	Est. 9	Est. 4	Est. 26	Est. 1
2	Est. 15	Est. 18	Est. 6	Est. 27	Est. 2
3	Est. 7	Est. 11	Est. 21	Est. 28	Est. 13
4	Est. 12	Est. 22	Est. 16	Est. 3	Est. 19
5	Est. 10	Est. 29	Est. 25	Est. 5	Est. 24
6	Est. 30	Est. 17	Est. 8	Est. 14	Est. 20

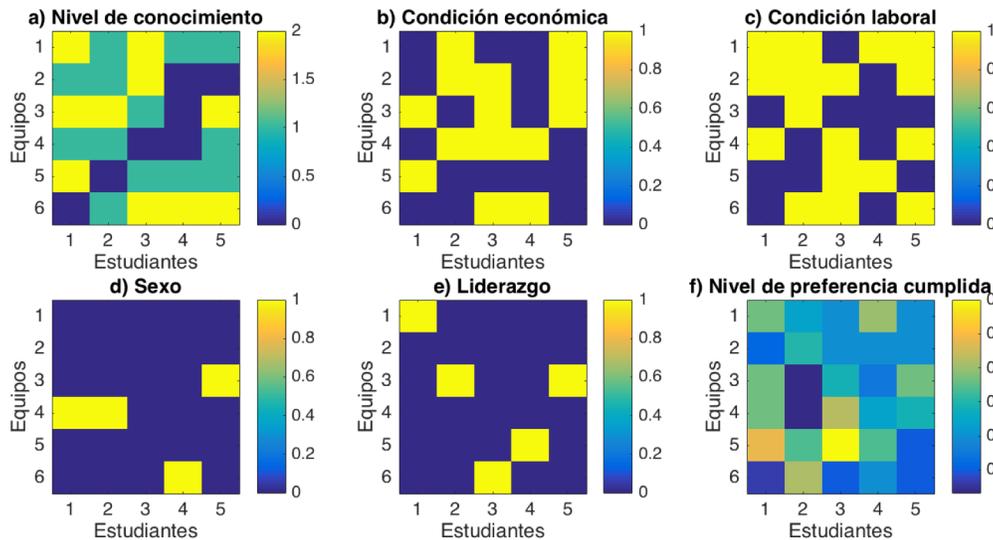


Fig 4. Distribución de los criterios de acuerdo a la 5ta solución obtenida por la variante NSGA-II(10,0.3) en el Escenario 1 (véase Fig. 3).

[3] P. E. Glinz, 'Un acercamiento al trabajo colaborativo', *Rev. Iberoam. Educ.*, vol. 35, no. 2, pp. 1-13, 2005.

[4] R. L. L. Hughes and S. K. K. Jones, 'Developing and assessing college student teamwork skills', *New Dir. Institutional Res.*, vol. 2011, no. 149, pp. 53-64, 2011.

[5] P. Novoa-Hernández, M. A. Novoa-Hernández, and Y. Rivero-Peña, 'Propuesta de técnicas evolutivas para la confección automática de tribunales de trabajos de diploma', *Rev. Cuba. Ciencias Informáticas*, vol. 7, no. 4, pp. 90-99, 2013.

- [6] P. Novoa-Hernández, 'Optimización evolutiva multi-objetivo en la planificación de controles a clase en la educación superior cubana', *Comput. y Sist.*, vol. 19, no. 2, pp. 321–335, 2015.
- [7] K. Escalera Fariñas, A. L. Infante Abreu, M. André Ampuero, and A. Rosete Suárez, 'Uso de estrategias de paralelización en algoritmos metaheurísticos para la conformación de equipos de software', *Rev. Cuba. Ciencias Informáticas*, vol. 8, no. 3, pp. 90–99, 2014.
- [8] Y. Rivero Peña, P. Novoa-Hernández, Y. Fernández Ochoa, P. Novoa Hernández, and Y. Fernández Ochoa, 'La optimización evolutiva multi objetivo en la confección de equipos de desarrollo de software : una forma de lograr la calidad en el producto final', *Enfoque UTE*, vol. 29, no. 1, pp. 35–44, 2015.
- [9] F. Ahmed, A. Jindal, and K. Deb, *Cricket team selection using evolutionary multi-objective optimization*, vol. 7077 LNCS, no. PART 2. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.
- [10] I. Wegener, *Complexity Theory: Exploring the Limits of Efficient Algorithms*. Springer Berlin Heidelberg, 2004.
- [11] J. H. Mueller, K. F. Schuessler, and H. L. Costner, *Statistical Reasoning in Sociology*. Houghton Mifflin, 1977.
- [12] D. A. Van Veldhuizen and G. B. Lamont, 'Multiobjective Evolutionary Algorithms: Analyzing the state of the art', *Evol. Comput.*, vol. 2, no. 1, pp. 125–147, 2002.
- [13] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, 'A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II', *Evol. Comput. IEEE Trans.*, vol. 6, no. 2, pp. 182–197, Apr. 2002.
- [14] I. Boussaïd, J. Lepagnot, and P. Siarry, 'A survey on optimization metaheuristics', *Inf. Sci. (N.Y.)*, vol. 237, pp. 82–117, 2013.
- [15] P. J. Villacorta, A. D. Masegosa, D. Castellanos, P. Novoa, and D. A. Pelta, 'Sensitivity analysis in the scenario method: A multi-objective approach', in *International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, ISDA*, 2011, pp. 867–872.
- [16] R. Saravanan, S. Ramabalan, N. G. R. Ebenezer, and C. Dharmaraja, 'Evolutionary multi criteria design optimization of robot grippers', *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 9, no. 1, pp. 159–172, 2009.
- [17] M. Saadatesh, A. Mansourian, and M. Taleai, 'Evacuation planning using multiobjective evolutionary optimization approach', *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 198, no. 1, pp. 305–314, 2009.
- [18] C. Zambrano-Vega, M. Cárdenas-Zea, and R. Aguirre-Pérez, 'Un enfoque Multi-Objetivo a la optimización del Alineamiento Múltiple de Secuencias (MSA)', *Lat. Am. J. Comput.*, vol. 3, no. 1, pp. 43–51, 2016.
- [19] S.-Y. Shin, I.-H. Lee, D. Kim, and B.-T. Zhang, 'Multiobjective Evolutionary Optimization of DNA Sequences for Reliable DNA Computing', *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 9, no. 2, pp. 143–158, Apr. 2005.
- [20] P. Woźniak, 'Preferences in multi-objective evolutionary optimisation of electric motor speed control with hardware in the loop', *Appl. Soft Comput.*, vol. 11, no. 1, pp. 49–55, 2011.
- [21] MATLAB, *version 8.5.0 (R2015b)*. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2015.
- [22] E. Talbi, *Metaheuristics: from design to implementation*, vol. 2009. John Wiley & Sons, 2009.
- [23] P. Novoa-Hernández, C. C. Corona, and D. A. Pelta, 'A software tool for assisting experimentation in dynamic environments', *Appl. Comput. Intell. Soft Comput.*, vol. 2015, p. 5, 2015.



Lorena Arboleda-Castro. Es Máster en Finanzas y Proyectos Corporativos por la Universidad de Guayaquil (Ecuador, 2011). Se graduó de Economista con Mención en Gestión Empresarial, por la Universidad Politécnica del Litoral (Ecuador, 2009). Actualmente, es Docente de la Facultad de Ciencias Empresariales, Universidad Estatal de Quevedo, Quevedo, Los Ríos, Ecuador (2011-actualidad).



(2010-2017).

Olga P. Cedeño-Fuentes. Es Máster en Gestión Empresarial por la Universidad Estatal de Quevedo (Ecuador, 2010). En 2007 se graduó de Ingeniera en Gestión Empresarial en la Universidad Estatal de Quevedo (Ecuador, 2007). Trabajó como Docente de la Facultad de Ciencias Empresariales, Universidad Estatal de Quevedo, Quevedo, Los Ríos, Ecuador



Eduardo Samaniego-Mena. Es Máster en Conectividad y Redes de Ordenadores por la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (2015). Se graduó de Ingeniero en Sistemas en la misma institución en el 2010 y trabaja en esta desde 2013 como docente. Además, fue profesor de la Universidad Técnica de Babahoyo (2012-2014). Es autor y coautor de publicaciones en revistas regionales y Scopus. Sus intereses investigativos incluyen Soft Computing, problemas de optimización, análisis inteligente de datos, minería de datos, entre otros.



Pavel Novoa-Hernández. Actualmente trabaja como Profesor Agregado de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Los Ríos, Ecuador, y como Profesor Invitado en la Universidad Estatal de Milagro. Es Ingeniero Informático por la Universidad de Holguín (Cuba) desde el 2007. Obtuvo el título de Master en Ciencias de la Computación e Inteligencia

Artificial por la Universidad Central de Las Villas (Cuba), en el 2010. En el 2013 obtuvo el grado de Doctor (Ph.D) en Tecnologías de la Información y la Comunicación por la Universidad de Granada (España). Ha sido Profesor Auxiliar en la Universidad de Holguín en el período 2007-2015. Sus intereses investigativos, relacionados con la Soft Computing, incluyen: problemas dinámicos de optimización, metaheurísticas, problemas de optimización multi-objetivo, entre otros.



Iván Jacho-Sánchez. Es Máster en Tributación y Finanzas, Universidad de Guayaquil (Ecuador, 2014), y Economista por la Universidad de Guayaquil (Ecuador, 2007). Actualmente es Docente de la Facultad de Ciencias Empresariales, Universidad Estatal de Quevedo, Quevedo, Los Ríos, Ecuador (2010-actualidad).

APÉNDICES

Apéndice 1. Algoritmo NSGA-II versión elitista controlada

Algoritmo NSGA-II (variante elitista controlada)

```

1:  $P \leftarrow \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_\mu\}$  Generar aleatoriamente  $\mu$  individuos (población inicial)
2: Evaluar en la función objetivo, los individuos de  $P$ 
3:  $R \leftarrow \{R_1, R_2, \dots\}$  Determinar los conjuntos Pareto a partir de los rangos (posición) de  $P$ 
4: Calcular la distancia de separación de los individuos por cada conjunto  $R_i$ 
5:  $F_{mejor} \leftarrow$  conjunto de Pareto de  $P$ , esto es,  $R_1$ 
6:  $G \leftarrow 0$  contador del número de generaciones (iteraciones)
7: mientras  $G \leq G_{max}$  y  $F_{mejor}$  no es el deseado hacer
8:      $Q \leftarrow$  generarHijos( $P$ ) mediante Selección, Cruzamiento y Mutación
9:     Evaluar en la función objetivo a los individuos de  $Q$ 
10:     $Q \leftarrow Q \cup P$ 
11:     $P \leftarrow \emptyset$ 
12:     $R \leftarrow \{R_1, R_2, \dots\}$  Determinar los conjuntos Pareto a partir de los rangos (posición) de  $Q$ 
13:     $F_{mejor} \leftarrow$  Conjunto de Pareto de  $Q$ 
14:    por cada conjunto de Pareto  $R_i \in R$  hacer
15:        Calcular la distancia de separación de los individuos de  $R_i$ 
16:        si  $\|P\| + \|R_i\| \geq \mu$  entonces
17:            Añadir a  $P$ , los  $m - \|P\|$  individuos de  $R_i$  más diferentes (según distancia)
18:            salir del ciclo
19:        si no
20:             $P \leftarrow P \cup R_i$ 
21:     $G \leftarrow G + 1$ 
22: retornar  $F_{mejor}$ 

```

Análisis de Datos Funcionales Aplicado al Riesgo Financiero: un Caso de Estudio en Cooperativas de Ahorro y Crédito Ecuatorianas

Functional Data Analysis Applied to Financial Risk: a Case Study in Ecuadorian Credit Unions

Sergio Castillo-Páez, Miguel Flores, Giovanni Herrera-Enríquez

Resumen—Existe una gran variedad de herramientas estadísticas desarrolladas para la toma de decisiones en el contexto empresarial. El análisis de datos funcionales es una rama de estudio de creciente importancia en los últimos años, y en el presente trabajo se proponen algunas de sus técnicas aplicadas en el contexto del análisis de riesgo financiero. Específicamente, se presentan resultados de análisis funcional exploratorio, identificación de datos atípicos y la construcción de modelos de clasificación supervisada en base a la clasificación del riesgo de las cooperativas de ahorro y crédito, sujetas al control de la Superintendencia de Bancos del Ecuador, tomando como variables funcionales al índice de morosidad y el margen neto de utilidad, en el período julio 2011 a diciembre 2012.

Palabras clave—Datos Funcionales, riesgo financiero, clasificación supervisada.

Abstract—There is a wide variety of statistical tools developed for making decisions in the business context. The analysis of functional data is a area of study of growing importance in the last years. In the present paper some of its applied techniques are proposed to make analysis of financial risk. Specifically, results from exploratory functional analysis, identification of atypical data and the construction of supervised classification models based on the risk classification of credit unions, subject to the control of the Superintendency of Banks of Ecuador, taking as functional variables the NPL ratio and the net profit margin in the period July 2011 to December 2012.

Index Terms—Functional Data, financial risk, supervised classification.

I. INTRODUCCIÓN

Las diferentes crisis que en la última década han afectado al sistema financiero mundial, se deben en gran medida a errores secuenciales o sistemáticos que no fueron

advertidos en los procesos de control, sumado entre otros factores, a la proliferación de instrumentos sofisticados, como los derivados financieros que superaron la capacidad de las instituciones [10], para advertir cambios que provocarían el colapso económico, no solo de grandes corporaciones como LehmanBrothers, sino también de países, siendo el caso más relevante la Eurozona [20].

Una de las actividades vitales de las instituciones financieras, es el control del riesgos financieros, siendo el riesgo de crédito probablemente el de mayor importancia al que se enfrentan las instituciones financieras [4, p. 16]. El riesgo puede entenderse como la probabilidad de enfrentar pérdidas, sin embargo, según [10], propone entender el riesgo como la probabilidad de observar rendimientos distintos a los que se tienen proyectados. Al ser una probabilidad, la gestión del riesgo se vuelve una necesidad ineludible, en toda institución financiera.

Así, el análisis del riesgo financiero es un tema de actualidad y está ocupando el desarrollo de la actividad científica, la misma que mantiene como premisa, que el adecuado funcionamiento del sistema financiero depende de la confianza de los agentes, en un grado mayor que en otros sectores de la economía [20]. Es importante considerar, que a más de las variables relacionadas directamente con el riesgo financiero, la rentabilidad de las empresas en este sector, depende de los niveles de estrés macroeconómico y financiero [9], por lo que es necesario incorporar aspectos regulatorios que protejan su buen desempeño.

Dentro de este contexto, la medición y gestión de riesgos, son actividades de primordial importancia para las instituciones financieras a nivel mundial, así como para los organismos de supervisión [8]. Por tal motivo, son variadas las técnicas y herramientas disponibles para realizar una adecuada gestión y control de los distintos tipos de riesgo financiero: de mercado, operativo, crediticio, legal, entre otros [4]. Algunas de estas técnicas combinan información financiera con métodos matemáticos y estadísticos, como el análisis discriminante [1], redes neuronales [21], series de tiempo, árboles de decisión, entre otros [17].

Usualmente, la información financiera está compuesta por distintas variables medidas a lo largo del tiempo. Sin embargo,

Article history:

Received 15 March 2017

Accepted 11 May 2017

S. Castillo-Páez is a professor at the Departamento de Ciencias Exactas of the Universidad de las Fuerzas Armadas del Ecuador ESPE, Sangolquí, Pichincha, Ecuador (e-mail: sacastillo@espe.edu.ec)

M. Flores, is a professor at the Departamento de Matemática, Escuela Politécnica Nacional, 17012759 Ecuador (e-mail: miguel.flores@epn.edu.ec)

G. Herrera-Enríquez is a professor at the Departamento de Ciencias Económicas, Administrativas y de Comercio of the Universidad de las Fuerzas Armadas del Ecuador ESPE, Sangolquí, Pichincha, Ecuador (e-mail: gpherrera@espe.edu.ec)

estas series de tiempo se suelen analizar con herramientas estadísticas basadas en ciertos supuestos (p.e. estacionariedad, periodicidad, etc., en las series temporales) que no necesariamente reflejan la volatilidad propia de este tipo de variables [3]. Por otro lado, si esta información se expresa como funciones definidas sobre un dominio temporal continuo, entonces se vuelve necesario contar con técnicas apropiadas para su estudio. El análisis de datos funcionales (FDA), es una especialidad estadística en desarrollo, con el objetivo de construir herramientas en las cuales las variables de estudio corresponden a funciones definidas sobre un dominio real [13]. Sus aplicaciones abarcan un amplio espectro, desde el estudio en el uso de suelos [2], medicina [16], entre otros. Las bondades de estos métodos, han sido aplicados también en el contexto económico y financiero, por ejemplo, en el análisis del comportamiento del índice de bienes perecibles [14], sin embargo su aplicación en el contexto del análisis del riesgo financiero no ha sido estudiado de forma exhaustiva.

El presente trabajo, se presenta una aproximación inicial del análisis de datos funcionales para estudiar ciertos ratios financieros de las cooperativas de ahorro y crédito del Ecuador. Si bien existen numerosas herramientas para el análisis de riesgo financiero (que se mencionaron anteriormente), el principal objetivo es aplicar herramientas básicas del análisis funcional en este contexto para verificar su utilidad potencial y la consistencia teórica y práctica de los resultados obtenidos a partir de su aplicación.

Este documento está dividido en los siguientes apartados: En la sección 2 se detallan algunas definiciones del análisis de datos funcionales, y se describen de manera general el conjunto de datos utilizados. Con esta información, se realiza un estudio de datos funcionales cuyos resultados se exponen en la sección 3. En este apartado se realiza la representación funcional de los índices financieros, haciendo énfasis en el análisis exploratorio y la identificación de curvas atípicas y bandas de confianza. Luego en la sección 4 se presentan algunos modelos de clasificación supervisada, usando al índice de morosidad y al margen de utilidad como variables clasificadoras. Las conclusiones obtenidas se presentan en la sección 5.

II. DEFINICIONES Y DATOS UTILIZADOS

Tomando en cuenta que el alcance del presente trabajo es un estudio exploratorio más que exhaustivo de los métodos de la FDA, se recurrirán a ciertas nociones y definiciones básicas las cuales pueden consultarse de forma detallada en los libros de Ramsay y Silverman [14] y Ramsay y Silverman [15]. El libro de Ferraty y Vieu [7] es otra referencia importante que incorpora enfoques no paramétricos, así como el uso de otras herramientas teóricas como Semi-normas y probabilidades de bola pequeña que nos permiten hacer frente a normas o espacios métricos.

Variable Funcional Sea \mathcal{X} una variable aleatoria se dice que es funcional si toma valores en el espacio funcional \mathcal{E} , el cual puede ser normado o seminormado. Por lo general, los datos funcionales están discretizados en un conjunto de puntos $\{t_j\}$, $j = 1, \dots, d$, con $d > 0$, no necesariamente equidistantes, Por simplicidad, utilizaremos la notación $\mathcal{X} = \mathcal{X}(t)$.

Un conjunto de datos funcionales $\{x_1, \dots, x_n\}$ es la observación de n variables funcionales $\mathcal{X}_1, \dots, \mathcal{X}_n$ idénticamente distribuidas

Al trabajar con datos funcionales, el paso inicial es determinar el espacio funcional (con su métrica respectiva) en el cual se van a representar los datos. Un espacio funcional comúnmente utilizado es el espacio \mathbb{R}^n conjuntamente con su métrica euclídea habitual. Cuando el área entre curvas puede proporcionar información relevante acerca del comportamiento de los datos, es usual recurrir al espacio funcional \mathcal{L}_2 (el espacio de Hilbert de todas las funciones integrables cuadradas sobre un cierto intervalo). Para esto, suponiendo un dominio $T = [a, b] \subset \mathbb{R}$ se define:

$$\mathcal{L}^2 = \left\{ \mathcal{X} : T \Rightarrow \mathbb{R}, \text{ tal que } \int_T \mathcal{X}^2(t) dt < \infty \right\}.$$

Asimismo, en ciertos casos los datos pueden requerir algún tipo de transformación, mediante su representación en una base funcional específica. Un conjunto de funciones conocidas e independientes $\{\phi_k\}_{k \in \mathbb{N}}$ es una base de un espacio funcional \mathcal{E} , si cualquier función (dato funcional) $\mathcal{X} \in \mathcal{E}$ puede aproximarse por una combinación lineal finita tal que:

$$\mathcal{X}(t) \approx \sum_{k=1}^K c_k \phi_k(t), \quad (1)$$

donde c_k son constantes. Las bases funcionales más utilizadas son la base Natural, B spline y la base de Fourier.

Posteriormente, se recurre al análisis exploratorio funcional en el cual se calculan varios estimadores, los cuales dependen de la métrica (o distancia) d definida sobre el espacio funcional \mathcal{E} . De manera general, los estimadores funcionales media, mediana y varianza se definen respectivamente como:

$$\bar{X} = \arg \min_{\mathcal{X} \in \mathcal{E}} \sum_{i=1}^n d(x_i, \mathcal{X})^2, \quad (2)$$

$$Med = \arg \min_{\mathcal{X} \in \mathcal{E}} \sum_{i=1}^n d(x_i, \mathcal{X}), \quad (3)$$

$$Var(X) = \sum_{i=1}^n d(x_i, \bar{X})^2. \quad (4)$$

Otro concepto importante en el análisis de datos funcionales es la **profundidad**, la cual mide cuan profundo o central es un punto en relación a un conjunto de puntos. Existen distintas medidas de profundidad: Mediana, Moda, o basada en proyecciones aleatorias. A manera de ejemplo, se presenta la **profundidad modal (PM)** de un conjunto $\{x_1, \dots, x_n\}$, la cual se define como:

$$PM = \max_i g(x_i), i = 1, \dots, n \quad (5)$$

donde:

$$g(x) = \sum_{j=1}^n K \left(\frac{\|x - x_j\|}{h} \right)$$

siendo K una función kernel y h el ancho de banda, el cual se obtiene mediante técnicas de validación cruzada. Existen diferentes tipos de kernel $K(\cdot)$, sin embargo el más usado es el **Gaussiano**: $K(u) = \frac{1}{\sqrt{2}} \exp(-\frac{u^2}{2})$. De manera general,

PM puede ser entendida como una medida de la cantidad de curvas que se encuentran dentro del vecindario de un dato funcional x_i determinado, y por tanto, el punto más profundo será aquel máximo de la función $g(\cdot)$ sobre la muestra. En contraposición, un dato funcional se puede considerar atípico si este minimiza un criterio de profundidad seleccionado.

Posteriormente, y dependiendo de la finalidad del estudio, se pueden utilizar distintas técnicas como la regresión funcional, los modelos de clasificación, entre otras. Por ejemplo, supongamos que se tiene una muestra $(\mathcal{X}, Y) \in \mathcal{E} \times \mathcal{G}$, tal que $\mathcal{G} = \{1, \dots, G\}$, donde cada dato funcional x_i pertenece exclusivamente a un grupo g_i de los G posibles grupos. Los **modelos de clasificación supervisada** intentan estimar la probabilidad a posteriori de pertenencia a los grupos:

$$p_g(x) = P(Y = g | \mathcal{X} = x) = \mathbb{E}(1_{Y=g} | \mathcal{X} = x).$$

La regla de clasificación asignará una nueva observación al grupo que maximice la probabilidad anterior:

$$\hat{Y}(x) = \arg \max_{g \in \mathcal{G}} \hat{p}_g(x)$$

Luego, los modelos de clasificación suelen recurrir a métodos de regresión funcional con variables respuestas binarias, como las regresiones NP (tipo kernel), KNN (k- vecinos cercanos), y GLM (Generalized Linear Model), para construir las reglas de clasificación.

En el presente documento se pretende brindar un panorama general de algunas de las técnicas presentadas anteriormente, restringidas al espacio de las funciones \mathcal{L}_2 . Los resultados son obtenidos a través del software estadístico *R* [12] y sus paquetes, tales como el paquete *fd.usc* [6].

II-A. Ratios financieros de las Cooperativas de Ahorro y Crédito del Ecuador

Las Cooperativas de Ahorro y Crédito (COAC) del Ecuador, se han consolidado como un segmento importante dentro del sistema financiero, en especial a partir de 1999-2000, período en el cual el país se vio sometido a fuertes devaluaciones, congelamiento de depósitos y el proceso de dolarización de la economía. Esta coyuntura influyó fuertemente en los clientes, quienes desplazaron sus movimientos financieros de los bancos hacia las COAC. Por tal razón, ya desde 1984, se establecieron ciertas normativas bajo las cuales las COAC que cumplan ciertos requisitos (en especial relacionados al monto de sus activos) pasaban bajo control directo de la Superintendencia de Bancos y Seguros (SBS). Esto implicaba ser sometidas a rigurosos análisis financieros por parte de auditores externos, con mecanismos de control similares a los aplicados en la banca tradicional [11]. Uno de los resultados de este control, era otorgar una calificación o score de riesgo, la cual establece una clasificación de cada COAC en función de sus niveles operativos y características contables y financieras.

De la información reportada por las COAC a la SBS, esta última construye distintos indicadores y variables para realizar sus reportes y análisis. Entre estas se incluyen el estudio de dos índices financieros: *morosidad* (medido como el porcentaje del saldo de créditos en mora respecto a la cartera total de créditos [19]; y, el *margen neto de utilidad* (representado como

Cuadro I
CUADRO DE AGRUPACIÓN POR CALIFICACIÓN DE RIESGO

Grupo	Calificación	Características de agrupación
1	AA-, A+, A, A-	No presenta problemas significativos
2	BBB+, BBB, BBB-	Presenta problemas menores
3	B+, B, B-, BB+, BB-	Tiene varios problemas significativos

porcentaje de ganancia o pérdida respecto al total de ingresos). En este trabajo, se analiza desde el punto de vista del análisis funcional el comportamiento de estos ratios (que denominaremos *morosidad* y *utilidad* respectivamente), con el objetivo de construir un modelo de clasificación supervisada para cada índice, y luego comparar sus resultados para determinar cuál de ellos asocia de mejor manera la calificación de riesgo a cada COAC.

Con este fin, se han tomado los datos mensuales de estos dos ratios para todas las 38 cooperativas que se encontraban bajo el control de la SBS durante el período de julio 2011 a diciembre 2012, y la calificación de riesgo asociada a cada una de ellas al final de dicho período [18]. Debido al número limitado de cooperativas, se ha procedido a agrupar estas calificaciones de riesgo en tres grupos, de acuerdo con el número (o el nivel de la probabilidad de ocurrencia) de problemas significativos en la gestión de las COAC detectadas por los analistas. Este agrupamiento se presenta en la tabla I.

El esquema de trabajo a seguir en este documento se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Realizar la representación funcional de las variables de estudio (y sus derivadas).
2. Cálculo de estadísticos funcionales globales y por grupo de riesgo.
3. Construcción de un modelo de clasificación supervisada, en base a la agrupación por clasificación de riesgo.

III. ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS FUNCIONALES

III-A. Representación funcional

Desde el punto de vista funcional, se disponen de dos variables funcionales: *morosidad* y *utilidad*, y en cada una de las cuales se tienen $n = 38$ curvas (correspondientes a cada COAC) con $d = 18$ puntos de discretización equidistantes (uno por cada registro mensual). Por otra parte, las curvas de morosidad tienen un rango definido en $T = [0, 1]$ (pues se trata de un porcentaje, tal como se reporte en los boletines de [19]), mientras que el rango de los datos funcionales de la segunda variable puede tomar tanto valores positivos como negativos, pues el margen neto de utilidad puede corresponder tanto a la ganancia como a la pérdida neta del ejercicio mensual. El conjunto total de variables en la Figura 1, en el cual las curvas de color negro corresponde al grupo 1 ($n_1 = 15$ curvas), el rojo al grupo 2 ($n_2 = 10$ curvas) y el verde al grupo 3 ($n_3 = 13$ curvas).

En esta figura se puede verificar que para la morosidad, las curvas con posiciones muy altas pertenecen en su mayoría al grupo 3 (color verde) y a medida que la curva se encuentra a menor altura, su probabilidad de pertenecer a un grupo con menor nivel de riesgo aumenta. Este comportamiento no ocurre respecto a las curvas de utilidad, en el cual se observa

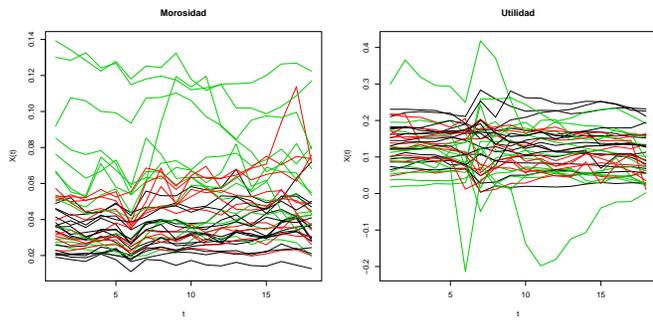


Figura 1. Representación funcional de las curvas muestrales de las variables morosidad y utilidad

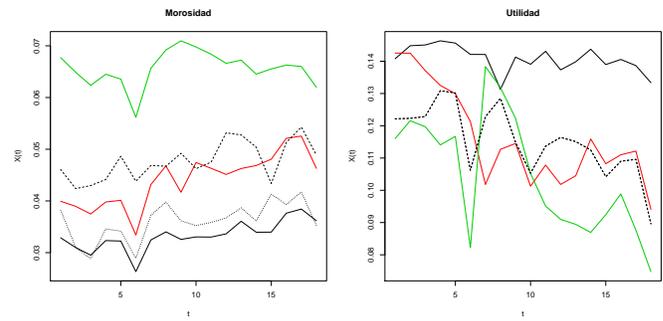


Figura 3. Curvas medias para los grupos 1, 2 y 3 (en líneas continuas negras, roja y verde respectivamente), y curvas (COAC) media y mediana global (en líneas negra discontinua y de puntos respectivamente) para las variables morosidad y utilidad

Cuadro II
CURVA (COAC) MEDIA POR GRUPO DE RIESGO PARA MOROSIDAD Y UTILIDAD

Grupo	Morosidad	Utilidad
1	Alianza del Valle	CACPE Pastaza
2	Codesarrollo	San José
3	9 de Octubre	Cotocollao

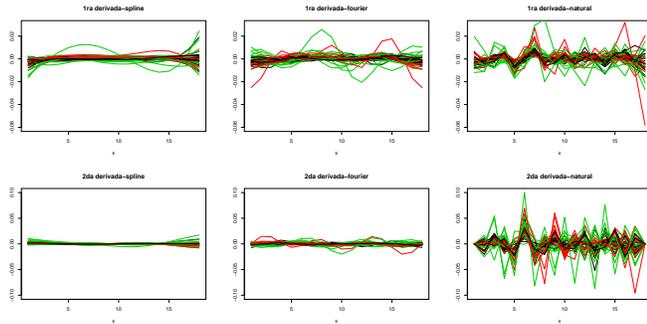


Figura 2. Primera y segunda derivada de la morosidad funcional, representada en bases B-spline, Fourier y Natural

que todos los grupos se distribuyen al azar dentro del rango observado.

El siguiente paso es seleccionar el espacio funcional adecuado sobre el cual se representarán los datos. En el presente estudio, se ha considerado trabajar en el espacio funcional de \mathcal{L}_2 , pues el área entre curvas puede dar indicios que permitan su posterior clasificación de riesgo. También es necesario verificar si los datos requieren de alguna transformación funcional que permita discriminar mejor los grupos. Para esto se comparan la primera y segunda derivada de la representación en bases de los datos (dada por Eq. 1). Se consideraron tres bases funcionales: B-spline, Fourier y Natural. En la figura 2 se muestran los resultados para morosidad, en la cual se verifica que estas bases no permiten una mejor representación de los diferentes grupos, a diferencia de los datos originales. Este comportamiento también se presentó para la variable utilidad.

III-B. Análisis exploratorio funcional

Para analizar los principales descriptivos, se han tomado los datos originales de cada variable y no su representación en bases, para evitar que los efectos de estas aproximaciones afecten los resultados. En primer lugar, se calculan las curvas medias (dadas por Eq. 2) de cada grupo para cada variable funcional, usando utilizando la métrica establecida para el espacio funcional \mathcal{L}_2 . Además, utilizando los criterios de minimización basados en dicha distancia, es factible determinar que curva (COAC) se aproxima más a la media y a la mediana global (usando Eq. 3) de cada variable. Los resultados obtenidos se observan en la Figura 3.

Para el caso de la morosidad, se verifica que las medias de cada grupo presentan una tendencia ascendente, es decir que conforme aumenta el nivel de riesgo, la media funcional de la morosidad toma valores más altos. Asimismo, es importante indicar que la curva media global corresponde a la COAC Andalucía (línea negra discontinua), mientras que la mediana global es de la COAC Oscus (línea negra de puntos), ambas pertenecientes al grupo 1.

Por otra parte, observando el comportamiento de las curvas medias de utilidad de cada grupo se puede verificar que conforme sube el riesgo, las medias tienden a tomar valores más bajos, aunque este comportamiento es más errático en comparación con la morosidad, en especial respecto a la media del grupo 3 (línea verde). Otro aspecto interesante, es que para esta variable, las curvas medias y mediana globales coinciden, y corresponden a la COAC Riobamba (línea negra discontinua), ubicada también en el primer grupo.

Este análisis se aplicó también para obtener las curvas media y mediana dentro de cada grupo. Las curvas (COAC) medias resultantes se presentan en la Tabla II. Respecto a las medianas funcionales, estas coinciden con la curva media para todos los agrupamientos, con excepción del grupo 3 de la variable utilidad, en la cual la curva mediana corresponde a la COAC Santa Ana.

El siguiente paso fue la detección de curvas (COAC) atípicas, para lo cual es necesario utilizar una medida de profundidad. En nuestro caso, utilizamos la profundidad modal definida en la Eq. 5. De manera intuitiva, una curva con PM mínima se puede considerar atípica, pues es la que tiene la menor cantidad de datos dentro de sus vecindarios. Revisando los resultados que se presentan en la figura 4, se identificó que la curva atípica tanto para la morosidad como para la utilidad corresponde a la misma cooperativa, COAC COOPAD.

El siguiente paso en el análisis exploratorio funcional es

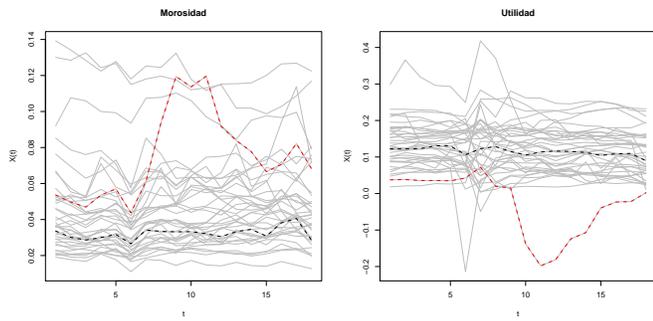


Figura 4. Curva atípica (en línea roja discontinua) y curva mediana global (en línea negra discontinua) para las variables morosidad y utilidad

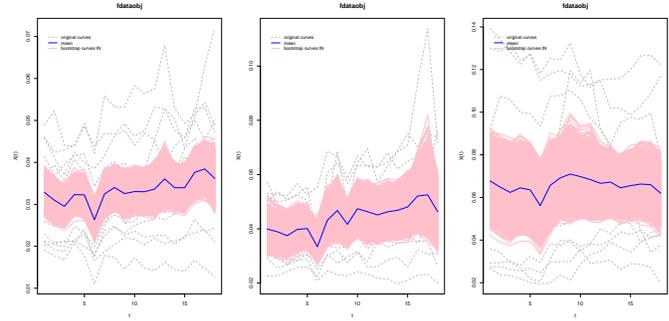


Figura 6. Bandas de confianza al 95 % para la media funcional de morosidad por grupo de riesgo.

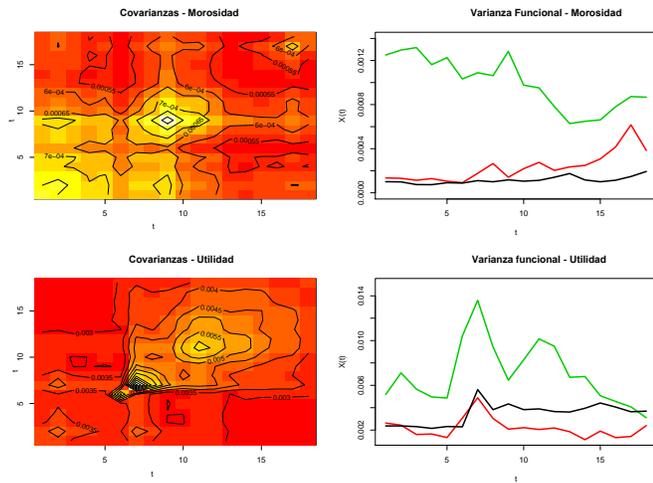


Figura 5. Matriz de Covarianza temporal (izquierda) y varianzas por grupo (derecha) para morosidad y utilidad.

verificar el comportamiento de la dispersión de los datos, en base a la Eq. 4., los cuales se muestran en la figura 5. Para esto, se calcularon la matriz de covarianza temporal (izquierda) y la varianza funcional de cada grupo (derecha) tanto para la morosidad como para la utilidad (primera y segunda fila respectivamente). Respecto a la covarianza de la morosidad, se verifica que la morosidad tiene menor variabilidad entre primeros los datos temporales (meses) y luego esta aumenta para los últimos meses. Esto no sucede con la utilidad, donde se verifica que la covariabilidad es alta en la mayoría de casos. Respecto a las varianzas funcionales por grupo, en ambas variables se observa que la variabilidad del grupo 3 es mayor frente a los otros grupos, aunque este comportamiento es más evidente para la morosidad.

Finalmente, para analizar la variabilidad de los estimadores funcionales calculados, se suele recurrir a la construcción de bandas de confianza Bootstrap. A manera de ejemplo, en la figura 6 se presentan las bandas de confianza al 95 % para la media funcional de cada uno de los tres grupos de la variable morosidad.

Cuadro III
TABLAS DE CONFUSIÓN DE LOS MODELOS DE CLASIFICACIÓN SUPERVISADA NP, KNN Y GLM

Método	Grupos	Morosidad			Utilidad		
		1	2	3	1	2	3
NP	1	14	7	4	13	9	13
	2	1	2	2	0	0	0
	3	0	1	7	2	1	0
KNN	1	15	5	1	15	4	3
	2	0	5	1	0	6	2
	3	0	0	11	0	0	8
GLM	1	11	4	2	11	4	2
	2	2	4	1	1	5	2
	3	2	2	10	3	1	9

IV. MODELOS DE CLASIFICACIÓN SUPERVISADA FUNCIONAL

Los modelos de clasificación supervisada permiten identificar grupos de características homogéneas en base a la información de una muestra, en la cual estos grupos se encuentran plenamente identificados. En nuestro ejemplo, los grupos corresponden a los presentados en la Tabla I.

Desde la perspectiva funcional, para construir los modelos de clasificación supervisada, se tomaron varios métodos de clasificación: NP (tipo kernel), KNN (k- vecinos cercanos), y GLM (Generalized Linear Model). Cada método se aplicó con la variable funcional morosidad y luego con la variable utilidad, utilizando la métrica anterior. Para comparar los resultados de cada modelo, se construyó la tabla de confusión III, donde se muestran la frecuencia de conteo f_{ij} de clasificación (correcta o erróneamente) al momento de asignar a un grupo fila i una curva que pertenece verdaderamente al grupo columna j .

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede establecer que el mejor método de clasificación es el método KNN y el menos eficiente es el NP. Analizando los resultados por grupos, se puede verificar que el grupo 1 es el que presenta menos errores de asignación, mientras que las curvas que corresponden al grupo 2 tienen mayor probabilidad de ser asignadas al grupo 1. En general, el grupo 3 es el que se clasifica incorrectamente con mayor frecuencia. Asimismo, se observa que la clasificación resulta mejor utilizando la variable morosidad con todos los modelos utilizados, lo cual refleja un mejor poder predictivo de dicho ratio frente a la utilidad.

Todos estos resultados son consistentes con los obtenidos

anteriormente en el análisis exploratorio, en el cual el grupo 3 presentaba un comportamiento más disperso en comparación con el resto de grupos, en especial con la variable utilidad.

V. CONCLUSIÓN

Luego de realizar los procesos de análisis funcional, se puede concluir que la variable que mejor permite clasificar las COAC de acuerdo a los niveles de riesgo, es la morosidad en contraste con el margen de utilidad. Esto debido no solamente al comportamiento funcional de esta variable, sino también a que esta variable tiene mayor relación con las diferentes medidas de riesgo financiero que el margen de utilidad.

Al respecto, se evidenció que a mayor valor del ratio de morosidad de una COAC, le correspondía un grupo con mayor nivel de riesgo. Por otra parte, los cálculos relacionados a las curvas medias, profundidad y dispersión indicaban en casi todos los casos que los grupos presentaban mejores características discriminantes con dicho índice que con la variable utilidad. Igualmente, se observó que de manera general, el comportamiento de los grupos con menor riesgo es muy similar entre sí, mientras que el grupo con mayor nivel de riesgo también presenta un comportamiento más disperso, lo que influyó en los resultados de los modelos de clasificación.

Si bien estas conclusiones son usuales en el análisis financiero, lo relevante de estos resultados se basan en que fueron obtenidos mediante el uso de herramientas de FDA en este contexto, lo cual da una medida de su posible congruencia con los resultados proporcionados por otras técnicas con fines similares, además de ser consistentes con los enfoques teóricos de la gestión de riesgos financieros.

Asimismo, y considerando que el alcance del presente trabajo consiste en una aproximación de algunas de las técnicas básicas del análisis funcional, a futuro se puede plantear extender y aplicar otras herramientas, como la regresión funcional, que permitiría obtener mayores y más interesantes conclusiones sobre este conjunto de datos. Por ejemplo, para mejorar el nivel predictivo de los modelos de clasificación se podría levantar más datos de las COAC en distintos períodos, para verificar si es factible realizar predicciones apropiadas, tomando el conjunto de datos actual como muestra de entrenamiento. Sin embargo, no fue factible conseguir más datos, debido a que luego del período de análisis, las cooperativas dejaron de pertenecer a la SBS debido a cambios en la normativa legal.

Finalmente, y a la vista de los resultados obtenidos, se espera que el presente trabajo motive a los distintos académicos, analistas, instituciones financieras y organismos de control, para aplicar estos métodos estadísticos, de manera complementaria con las herramientas existentes en el ámbito financiero.

AGRADECIMIENTOS

El primer y el tercer autor desean agradecer a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por el apoyo brindado para el presente trabajo. De igual manera, el segundo autor agradece a la Escuela Politécnica Nacional por su valioso aporte en la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Altman, E. I. (1968). Financial ratios, discriminant analysis and the prediction of corporate bankrupt. *The Journal of Finance*, 589-609.
- [2] Cardot, H.; Faivre, R.; Goulard, M., and Vialard (2001). Functional approaches for predicting land use with the temporal evolution of coarse resolution remote sensing data. *Journal of Applied Statistics*, 1185-1199.
- [3] Jón Danielsson (2002); The emperor has no clothes: Limits to risk modelling. *Journal of Banking & Finance*, Vol. 26, Issue 7, 1273-1296
- [4] De Lara Haro, A. (2005). Medición y control de riesgos financieros. Editorial Limusa.
- [5] Elizondo, A., and Altman, E.I. (2003). Medición integral del riesgo de crédito. Editorial Limusa.
- [6] Febrero-Bande, M., and Oviedo de la Fuente, M. (2012). Statistical Computing in Functional Data Analysis: The R Package fda.usc. *Journal of Statistical Software*.
- [7] Ferraty F, Vieu P. (2006). *Nonparametric Functional Data Analysis*. Springer-Verlag, New York.
- [8] García, M. L. S., and García, M. J. S. (2010). Modelos para medir el riesgo de crédito de la banca. *Cuadernos de Administración*, 295-319.
- [9] Hippler, W., and Hassan, K. (2015). The impact of macroeconomic and financial stress on the U.S financial sector. *Journal of Financial Stability*, 61-80.
- [10] Lizaraburu, E., Berggrun, L., and Quispe, J. (2012). Gestión de riesgos financieros. Experiencia en un banco latinoamericano. *Estudios Gerenciales*, 96-103.
- [11] Miño Grijalva, W. (2013). *Historia del Cooperativismo en Ecuador*. Quito: Editogran S.A.
- [12] R Development Core Team. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, (2008). <http://www.R-project.org>.
- [13] Ramsay, J. O., and Dalzell, C. J. (1991). Some Tools for Functional Data Analysis. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 539-572.
- [14] Ramsay, J. O., and Silverman, B. W. (2002). *Applied Functional Data Analysis: Methods and Case Studies*. Springer-Verlag.
- [15] Ramsay, J., and Silverman, B. (2006). *Functional Data Analysis*. Springer-Verlag.
- [16] Ratcliffe, S. J., Leader, L., and Heller, G. Z. (2002). Functional data analysis with application to periodically stimulated foetal heart rate data. I: Functional regression. *Statistics in Medicine*, 1103-1114.
- [17] Ravi Kumar, P., and Ravi, V. (2007). Bankruptcy prediction in banks and firms via statistical and intelligent techniques A review. *European Journal of Operational Research*, 128.
- [18] Superintendencia de Bancos del Ecuador. (2013). Calificación de Riesgo de Instituciones Financieras. Recuperado en Diciembre de 2013, de http://www.sbs.gob.ec/practg/sbs_index?vp_art_id=836&vp_tip=2
- [19] Superintendencia de Bancos del Ecuador. (2013). Boletines Financieros mensuales de las Cooperativas de ahorro y crédito del Ecuador, de http://www.superbancos.gob.ec/practg/sbs_index?vp_art_id=488&vp_tip=2&vp_busr=41#2
- [20] Silva, W., Kimura, H., and Amorin-Sobreiro, V. (2016). An Analysis of the literature on systemic financial risk: a survey. *Journal of Financial Stability*, DOI:10.1016/j.jfs.2016.12.004.
- [21] Tam, K. (1991). Neural Network Models and the Prediction of Bank Bankruptcy. *Omega*, 429-445.

Sergio Castillo-Páez, is a mathematical engineer graduated from the National Polytechnic School in 2002. He also studied finance in the Simon Bolivar Andean University, and is currently studying his PhD in Statistics at the University of Vigo, Spain. He is a professor at ESPE - University of the Armed Forces in Ecuador.



His current lines of research are related to geostatistics and analysis of multivariate data.



Miguel Flores is a professor at the National Polytechnic School and a researcher at the Center for Modeling Mathematics at the National Polytechnic School in Quito, Ecuador. He is a BSc. in Statistical Computing Engineer from the Polytechnic School of the Coast. In 2006 he received an MSc. in Operations Research from the National Polytechnic School, and in 2013 received a MSc. in Technical Statistics from the University of A Corua. He is currently a doctoral student at the University of A Corua in the area of Statistics and Operations Research. He has over 15 years professional experience in various areas of Statistics, Computing and Optimization, multivariate data analysis, econometric, Market Research, Quality Control, definition and construction of systems indicators, development of applications and optimization modeling. ORCID ID: 0000-0002-7742-1247



Giovanni Herrera-Enrriquez is a professor at ESPE - University of the Armed Forces in Ecuador. He is a Ph.D in Economics and Business from the University of Santiago de Compostela(Spain) and he has a Master degree in economics and business management by FLACSO. His current lines of research are related to models for decision making, natural disaster risk management, multicriteria hierarchical analysis and market research.

La Ciencia Acústica en los Ambientes Inteligentes

Acoustic Science in Intelligent Environments

Gabriela Santiago, José Aguilar

Resumen—En este artículo se presenta una revisión de trabajos previos relacionados con la ciencia acústica y los ambientes inteligentes para, en primer lugar, establecer un vínculo entre estas áreas. Se describen trabajos que combinan física, psicoacústica y neurociencia, y que a su vez incluyen en sus sistemas objetos sonoros y gestión acústica automatizada. La investigación busca mostrar cómo se han creado entornos inmersivos desde el sonido, y también describir los elementos que componen dichos sistemas. Esta descripción permite establecer el marco de referencia para la concepción de un middleware reflexivo (medio de gestión) para la autogestión acústica de los ambientes inteligentes, con el objetivo de incluir más elementos de audio en estos espacios, y así mejorar y extender las capacidades y los beneficios que ofrecen estos entornos inteligentes.

Palabras clave—Ambientes inteligentes, gestión acústica automatizada, neurociencia, objetos sonoros, psicoacústica.

Abstract—In this article is presented a revision of previous works related to acoustic science and intelligent environments, to establish a connection between these areas. The described works combine physics, psychoacoustics and neuroscience, including also sound objects and automatic acoustic management. The research's goal is to show how these immersive environments are created with the sound as the main element to take into account, and other elements that are part of these systems. This description allows establishing the reference framework to create a reflective middleware for the acoustic self-management in intelligent environments, to make possible the inclusion of more audio elements in these spaces, in order to improve and extend the capabilities and benefits offered by the intelligent environments.

Index terms—intelligent environments, Automatic acoustic management, neuroscience, sound objects, psychoacoustics.

I. INTRODUCCIÓN

LA ciencia acústica, dedicada al estudio del comportamiento de las ondas sonoras (generación,

Article history:

Received 15 March 2017

Accepted 11 May 2017

Gabriela Santiago (gabrielas@ula.ve) es parte de CEMISID, Dpto. Computación Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, 5101.

Jose Aguilar (aguilar}@ula.ve) es parte de CEMISID, Dpto.

Computación Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, 5101 y de la Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

radiación, propagación, confinamiento), está presente en todas las situaciones de la cotidianidad. El sonido no se limita a su condición de fenómeno físico; su estudio permite ir más allá de la sensación producto de la audición, donde se decodifican las señales acústicas.

Todos los procesos que intervienen, desde la generación de una onda acústica hasta el llamado *análisis auditivo* [1], constan de una amplia terminología que a menudo se tergiversa en otras disciplinas, y que es importante aclarar para explotar todo lo relacionado a ella.

El análisis auditivo es uno de los aspectos trascendentales a considerar en este trabajo. La razón es que es uno de los temas más desarrollados dentro de lo ya trabajado sobre sonido en Ambientes Inteligentes (AmI). Además, es un punto de partida para el desarrollo de un middleware para la autogestión acústica en los AmI.

Las aplicaciones del estudio acústico se han expandido con gran velocidad en los últimos años, y su integración con otras áreas de investigación se hace cada vez más común. Por ejemplo, en los estudios ambientales y ecológicos se plantea la acústica como el área que ayudará al desarrollo sostenible, a través de la introducción de elementos tecnológicos y de construcción adecuados para minimizar la contaminación acústica, [2]. En la salud, la acústica se está incluyendo en los mecanismos de diagnóstico, a través de la nanotecnología [3].

Particularmente, en su vínculo con el campo de los AmI, se da una suerte de armonía con los espacios conscientes de la presencia humana, ya que posibilitan monitorear su comportamiento y satisfacer sus necesidades [4]. La razón de lo anterior, es que el fenómeno acústico es utilizado como estímulo perceptible y como factor comunicacional. Normalmente, el análisis acústico se ha basado en la interpretación de la voz. Ahora bien, este trabajo busca expandir esa noción, y establecer un estudio completo del escenario sonoro de un AmI, que permitirá la especificación de un middleware para la auto-gestión sonora.

En ese sentido, este trabajo tiene como objetivo revisar los trabajos previos que vinculan la ciencia acústica y los AmI desde tres dimensiones: la gestión acústica automatizada en un AmI, el papel de los objetos sonoros y el sonido en un AmI, con la finalidad de establecer las premisas que deben guiar la concepción de un middleware reflexivo para la autogestión acústica en los AmIs.

Así, este trabajo se organiza de la siguiente manera. Primeramente, en este trabajo se establece el marco teórico de

base para comprender la relación entre la ciencia acústica en AmI, introduciendo conceptos de física acústica, procesamiento auditivo humano, y AmI. Luego, se presentan los trabajos más relevantes en las tres dimensiones señaladas en el párrafo anterior. A partir del análisis de lo hecho hasta ahora en esos tres ámbitos, en la siguiente sección se presenta una reflexión sobre lo que se debe considerar para el diseño de un medio de gestión acústico para AmI. En particular, se plantea una primera aproximación arquitectónica basada en los paradigmas de computación autónoma y sistemas multiagentes (SMA).

II. MARCO CONCEPTUAL

Conceptos derivados de la acústica, como la física acústica y el procesamiento auditivo humano, son definidos en esta sección, para establecer su vinculación con el área de AmI. Estas definiciones permiten entender el proceso físico del sonido y su comportamiento en espacios cerrados (aplicables a AmI), la percepción sonora en los usuarios de dichos espacios, y el procesamiento cerebral involucrado.

A. Física Acústica

La perturbación en las moléculas de un medio material, producto de un estímulo externo que genere movimiento, es lo que origina una onda acústica. El comportamiento de una onda está condicionado no solo por sus características propias, sino también por las condiciones del espacio donde se propaga. Algunas de las definiciones más importantes referidas a esto son las siguientes [5]:

- Campo sonoro: Es la distribución de la presión sonora en el tiempo y el espacio. Es llamado *campo sonoro libre* cuando no existen obstáculos para las ondas; *campo sonoro difuso* cuando en un punto dado es igualmente probable cualquier dirección instantánea de la onda; y *campo sonoro reverberante* es la parte del espacio sonoro compuesto únicamente por las reflexiones de las ondas sonoras en las diversas superficies que limitan el espacio.
- Modo normal: Cualquiera de las frecuencias en las que un sistema puede oscilar, sin excitación, hasta agotar la energía previamente acumulada. Se conoce como *modo normal axial* al modo correspondiente a dos ondas que se desplazan en sentidos opuestos según una dirección paralela a uno de los ejes de un recinto rectangular; el *modo normal tangencial* es el correspondiente a cuatro ondas que se desplazan en sentidos opuestos según direcciones paralelas a una de las caras de un recinto rectangular; el modo opuesto al axial y al tangencial es el *modo normal oblicuo*.
- Reflexión: Es el fenómeno por el cual una onda acústica cambia de sentido al llegar a una pared rígida, retornando al ambiente acústico del cual provenía. La *reflexión especular* se da cuando el ángulo de la onda incidente es igual al ángulo de la onda reflejada. Las *reflexiones tempranas* son los frentes de onda que llegan después del sonido directo y antes que se forme la cola reverberante..
- Reverberación: Es la persistencia del sonido en un ambiente cerrado o semi-cerrado, aún después de

TABLA I
COEFICIENTES DE ABSORCIÓN DE MATERIALES COMUNES

Hz	125	250	500	1000	2000	4000	NRC
Vidrio	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02	0.04
Alfombra	0.09	0.08	0.21	0.27	0.27	0.37	0.21
Madera	0.04	0.24	0.24	0.88	0.53	0.70	0.55
Ladrillo	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02
Mármol	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02
Piedra	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.02
Fibra	0.20	0.35	0.65	0.85	0.85	0.75	0.67

interrumpida la fuente, y se debe a la acumulación de energía sonora por las reflexiones. La *reverberación tardía* la integran las reflexiones que llegan después de las primeras reflexiones, y tienen mayor densidad y menor nivel sonoro que éstas. El *tiempo de reverberación* es el tiempo que tarda un sonido en bajar 60dB desde el valor que tenía al interrumpirse la fuente que lo producía.

- Coeficiente de reflexión: Es el cociente entre las amplitudes de la presión acústica reflejada e incidente en un objeto. El *coeficiente de scattering* es la razón entre la energía reflejada en direcciones no especulares respecto a la energía reflejada total. El *coeficiente de difusión* es la medición de la porción de energía que no es absorbida ni reflejada en forma especular desde la superficie bajo prueba para varios ángulos de incidencia. El *coeficiente de absorción sonora* es el cociente entre la energía sonora que es absorbida por una superficie y la que incide sobre ella. En la Tabla I se muestran los coeficientes de absorción de los materiales más comúnmente utilizados para la construcción y acondicionamiento de espacios cerrados.

Otros términos importantes a diferenciar son [5]: *difracción*, referido al cambio que se produce en la propagación de una onda en presencia de un obstáculo; *rarefacción*, que es la reducción de la densidad de las moléculas del medio material en el que viaja una onda sonora; y *refracción*, que es el fenómeno por el cual una onda es desviada al pasar de un medio material a otro.

Cuando la onda acústica alcanza el sistema auditivo periférico es cuando realmente se empieza a denominar *sonido*, es decir, cuando la perturbación es procesada. Esto pasa a ser estudiado por la psicoacústica.

B. Procesamiento Auditivo Humano

1) Psicoacústica

Es una rama de la psicofísica que estudia la reacción del cerebro en términos psicológicos ante un estímulo acústico, cuyas cualidades son analizadas y transformadas en acciones físicas y mentales. Su estudio va desde el sistema auditivo periférico hasta la percepción de la sonoridad [6]. Las definiciones más destacables del área son las siguientes [1]:

- Nivel de presión sonora: Es una expresión logarítmica utilizada para manejar el rango de presiones sonoras existentes, y aproximarlas a la respuesta del oído. En su límite inferior se acerca al umbral de la audición, y en su límite superior al umbral del dolor. En la Fig. 1

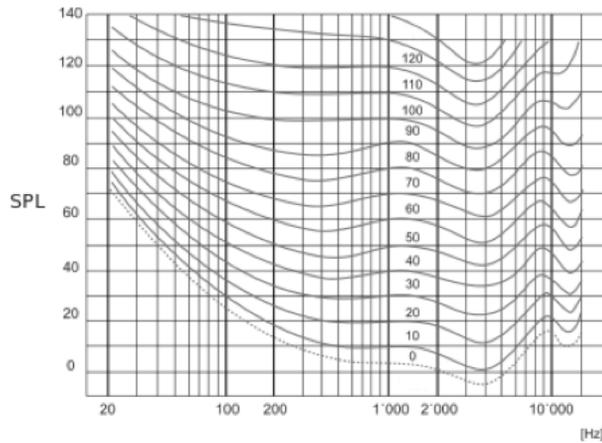


Fig. 1. Curvas isofónicas de Fletcher & Munson (1933) [7]

se muestran las curvas isofónicas de los niveles de presión sonora de acuerdo a las frecuencias. Estas curvas indican el punto mayor de nivel soportado por el oído humano; en este límite, los sonidos que se encuentren por encima de la primera curva superan el umbral del dolor, y los sonidos que se encuentren por debajo de la última curva resultarán inaudibles.

- Umbrales psicológicos: Son los niveles mínimos en los que un determinado estímulo puede provocar una reacción observable. El *umbral absoluto* es la mínima intensidad de un estímulo para que se perciba un sonido. El *umbral diferencial* es la mínima intensidad en que un estímulo debe exceder a otro para reconocerlo como un sonido diferente.
- Enmascaramiento: Es una propiedad del sistema auditivo periférico, no del sonido como fenómeno físico. Es el proceso que provoca un aumento del umbral de la audición para una señal enmascarada, y la cantidad de dicho aumento es expresada en dB. Un sonido es capaz de enmascarar a otro y hacerlo imperceptible, debido al cambio en la curva del umbral; es mayor hacia las frecuencias más altas, porque los fenómenos no lineales del oído hacen que los todos de gran amplitud se distorsionen.
- Bandas críticas: Es un comportamiento del sistema auditivo que simula la actividad de filtros auditivos. Al detectar una señal particular en medio de muchas otras, el oído utiliza un filtro de focalización que hace que ésta se incremente significativamente, mientras se atenúan el resto de las señales.
- Sonoridad: Es un rasgo de la sensación auditiva que permite ubicar los sonidos en una escala que va desde el total silencio hasta el máximo nivel de escucha, como correlato perceptual de la intensidad física. Sus valores numéricos corresponden al estímulo físico, no a la valoración de la intensidad de la sensación.
- Ambiencia: Sensación auditiva por la cual es posible tener una idea de las características de un ambiente, como la dimensión.

Muchas sensaciones psicoacústicas podrían ser consideradas defectos de la audición, por la cantidad de información que es descartada.

2) Neurociencia Cognitiva de la Audición

Es el estudio de las capacidades cognitivas con bases neurológicas, profundizando en la estructura y funcionalidad cerebral, a partir de los estímulos percibidos a través del sentido del oído [7]. Los principales procesos que se llevan a cabo son [8]:

- Reconocimiento auditivo: Aunque suelen entremezclarse las zonas del cerebro involucradas en el proceso auditivo, dependiendo del atributo perceptivo al cual se atienda, existe una separación por sistemas para el reconocimiento auditivo de sonidos *ambientales*, *musicales* y del *habla*. Estos procesamientos difieren entre sí si se comparan aspectos como la variación tonal, pero en la estructura temporal cerebral se genera un proceso similar cuando se realiza el reconocimiento.
- Sistemas de codificación: Las funciones básicas del sistema auditivo son la detección de los sonidos, la determinación de su localización, y el reconocimiento de su identidad y significado. La codificación de las sensaciones sonoras es realizada por dos sistemas complejos: el sistema *rítmico-melódico*, de relaciones sónicas altas, usada para la determinación del oído musical; y el sistema *fonético de códigos*, estructura del lenguaje hablado, relacionado con rasgos semánticos, abstrayendo el timbre y la altura tonal, lo que hace que difiera en los diversos idiomas.

A lo largo de toda la cadena sensorial se mantiene una alta precisión en la información acústica, pero su estabilización depende del proceso encargado de combinar la identidad propia con las interacciones recíprocas en el dominio del tiempo y el espacio.

Las propiedades acústicas complejas se dan en el área auditiva primaria cerebral y en algunas estructuras cerebrales previas. Por ejemplo, el procesamiento temporal se da en la corteza auditiva primaria y en las redes corticales adyacentes, y el procesamiento espectral en la vía ascendente.

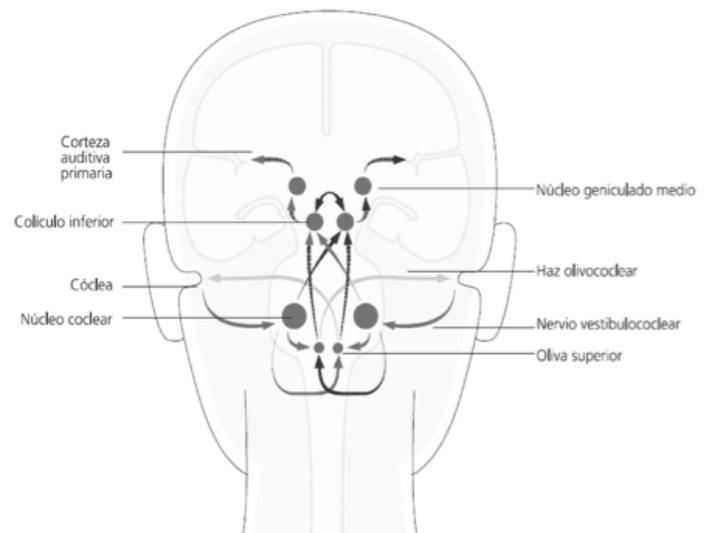


Fig. 2. Representación esquemática de la vía auditiva [7]

La ruta auditiva (Fig. 2) comienza desde la cóclea, va al nervio vestibulococlear, y se dirige al núcleo coclear, allí se determinan las diferencias interaurales de tiempo y de intensidad; luego, el procesamiento sonoro cerebral continúa en la oliva superior (tronco encefálico) para ubicar los sonidos en el espacio; al continuar, se forma el haz olivococlear, que se encarga de la discriminación auditiva; la siguiente estación son los colículos inferiores (también existen los colículos superiores, que están relacionados con el sentido de la vista, y participan en el movimiento de la cabeza para ubicar una fuente sonora en el campo visual). Del núcleo geniculado medio en el tálamo, se realiza la proyección del procesamiento auditivo hacia la corteza auditiva primaria en la parte superior del giro temporal. Es en esta zona, una de las que tiene más pliegues en el cerebro humano, donde finaliza el camino que recorre para la transducción del sonido.

C. AmI

La inteligencia artificial es la ciencia que emula los procesos propios de la inteligencia humana como la percepción, el razonamiento y el aprendizaje [9]. Por otro lado, los Ambientes Inteligentes son aquellos espacios que utilizan tecnología computacional para controlar su funcionamiento de forma automática, para así optimizar la experiencia del usuario, el consumo de recursos, la seguridad y la eficiencia del trabajo, entre otras cosas [10]. En particular, en un AmI existen muchos objetos con capacidades inteligentes, que actúan entre sí para alcanzar esos objetivos globales del ambiente. A continuación, presentamos algunos conceptos de base que vinculan a la inteligencia artificial con los AmI:

- Agentes: Objetos que pueden percibir su ambiente a través de sensores, y actuar sobre éste mediante elementos ejecutores. Sus comportamientos dependen en gran medida de lo que perciben. El diseño de un agente consiste en especificar las acciones que un agente podría ejecutar en respuesta a alguna percepción particular [9]. Existen varias definiciones sobre agentes en la literatura. En [11] establecen que los agentes que toman decisiones basadas en sus objetivos, se denominan agentes racionales. También definen a los agentes inteligentes, a aquellos agentes que toman decisiones basadas en sus conocimientos y tienen la capacidad de aprender.
- Sistemas multiagentes: Sistemas computacionales compuestos a nivel micro por entidades (agentes) que tienen un comportamiento autónomo y proactivo, pero que a su vez interactúan entre ellos y con el ambiente, resultando su funcionamiento en un

comportamiento de sistema observable a nivel macro [11].

- Middleware: Software de conectividad que consiste en un conjunto de servicios que permiten la interacción entre muchos procesos (e.g. agentes), que se ejecutan en distintas máquinas, a través de una red. Los mismos ocultan la heterogeneidad del entorno computacional [12].

III. ESTADO DE ARTE

Para la revisión de la acústica en AmI, se ha hecho una división de su estudio en tres dimensiones, para agrupar a los trabajos que se han desarrollado, y a sus contribuciones. La primera dimensión presenta trabajos relacionados con la gestión acústica automatizada. La segunda dimensión presenta trabajos sobre objetos sonoros, los cuales se dedican a la especificación de agentes que consideren al sonido. Finalmente, la última dimensión sobre AmI y sonido, presenta proyectos dedicados a espacios interactivos que combinan principios de inteligencia artificial con el sonido.

A. Gestión Acústica Automatizada en AmI

En [9] se propone la Fig. 3, la cual describe los elementos de base de todo AmI para la gestión del sonido. En particular, el aspecto sonoro aparece en los sensores que permiten detectar las señales acústicas, los cuales se unen a los sensores de imagen, temperatura, movimiento, distancia, entre otros, a fin de tener una visión completa del contexto.

Por otro lado, Navarro [13] describe el proyecto japonés llamado *RoomRender* (Fig. 4), que plantea el diseño de una habitación inteligente partiendo de tres nociones fundamentales: la *interfaz*, como instancia de mediación y comunicación entre el usuario y el sistema, el *conocimiento*, de modo que pueda convertirse en un sistema capaz de actualizar un conjunto de variables dentro del conjunto de actividades que se desarrollen en ese espacio, y por último, el *motor de inferencia*, que permita establecer interpretaciones para adelantarse a las preferencias del usuario. Esto puede llevarse a efecto gracias a un sistema de sensibilidad inteligente, que consiste en la detección acústica e interpretación de la voz, teniendo como propiedades la anticipación, la adaptabilidad y la invisibilidad. De acuerdo al análisis de la frecuencia de un sonido, proponen la identificación de las emociones del usuario usando el tono de la voz, así, el sistema se adaptará a la necesidad identificada, y cambiará la atmósfera del lugar.

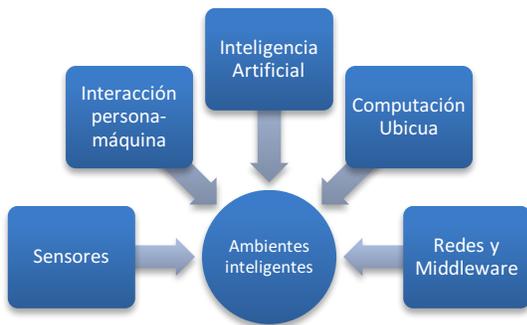


Fig. 3. Interacción de disciplinas en AmI. [9]



Fig. 4. RoomRender. [14]

En el tema AmI para dar asistencia a personas que la requieran, destaca el trabajo [15], donde se plantea el desarrollo de sensores de audio, que se ubiquen en todos los espacios por los que se desplaza la persona que requiere asistencia.

Dichos sensores primero analizarán el espacio (Fig. 5), para determinar el sonido natural del ambiente en estado de reposo, y así poder luego identificar los cambios sonoros que se produzcan, para entonces tomar una decisión de la acción que se llevará a cabo. En detalle, en la figura 5 se observa el método de registro, que inicia con los micrófonos que reciben la señal para analizarla, luego detectan las diferentes señales de audio que se hayan adquirido, y se separa entre sonidos aleatorios y voz humana. Una vez clasificados mediante modelos acústicos, fonéticos y de lenguaje, se define el formato final de la señal de audio que quedará grabada en los archivos.

Con esto, se pueden identificar situaciones de riesgo usando el sonido. Lo comparan con factores visuales, físicos y cognitivos, resultando poco eficientes estos últimos en AmI. Además, demuestran que el canal sonoro puede ser un área prometedora, al otorgar seguridad, confort y asistencia.

Por otro lado, aunque el reconocimiento del lenguaje ya se ha estudiado en muchos campos de investigación, lo interesante es el reconocimiento no solo del habla, sino de

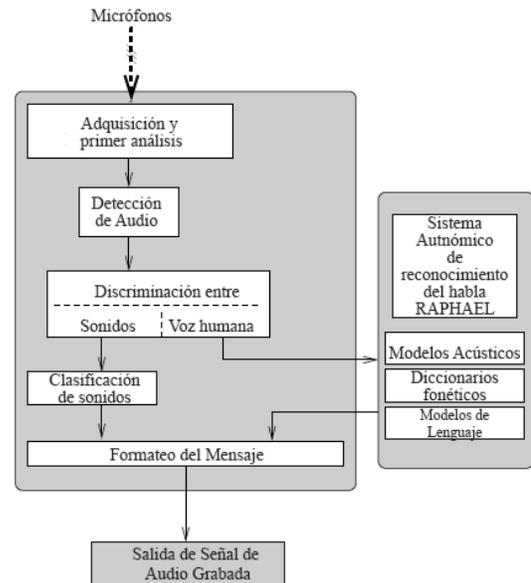


Fig. 5. Organización del sistema de registro de la señal acústica. [15]

sonidos independientes, e incluso de música. Los sonidos que no pertenecen al habla son identificados por direccionalidad. En [15] proponen un esquema para la identificación de sonidos que no son del habla para AmI, basado en la cancelación de ruido: del mismo modo en que se identifica una señal de ruido para duplicar su fase y cancelarla, mediante modelos acústicos, fonéticos y de lenguaje, se identifican los sonidos del habla para atenuarlos en la mayor posibilidad, para así prestar especial atención a los detalles sonoros aleatorios, como golpes y quejidos.

Todos los análisis anteriores son realizados en tiempo real, para diferenciar los sonidos de la cotidianidad de los sonidos que puedan representar situaciones de riesgo o cuidado.

B. Objetos Sonoros

Los objetos sonoros son agentes que se accionan y reaccionan a partir de estímulos sonoros. En [16] se han especificado agentes sonoros para la resolución de problemas, los cuales a través del reconocimiento de señales, principalmente del lenguaje natural, son capaces de interpretar preguntas y dar respuestas.

El sistema recibe información sonora (Fig. 6), la analiza para determinar las frecuencias principales, y la procesa (filtra) para descartar información no necesaria. Después, la analiza de nuevo para procesar el idioma en que se recibió dicha señal, para poder determinar la respuesta visual adecuada (con imágenes, textos, u otros medios determinados por un siguiente análisis), para finalmente dar la respuesta mediante la señal de salida. Lo que este proceso significa es que el agente descompone la información recibida para eliminar el elemento humano, y reducirlo a características que puedan ser entendidas por la inteligencia de la máquina.

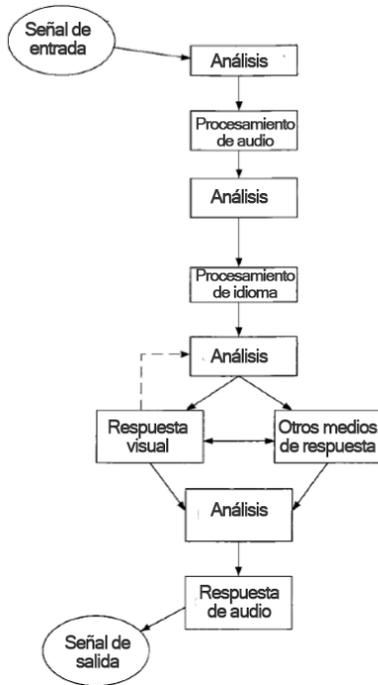


Fig. 6. Diagrama funcional de un agente acústico. [16]

En cuanto a objetos móviles, [17] presenta la localización inteligente de una fuente sonora para entornos dinámicos desde la robótica. La propuesta es la de un robot humanoide, que posee micrófonos móviles no estáticos, que se encargan de identificar sonidos en un entorno ruidoso, cancelar el ruido, atenuar las frecuencias que se alejen del sonido principal, para enfocar su atención en un estímulo específico (mientras se dirige hacia la fuente que lo produce). La implementación de este sistema se realiza gracias a un diseño de correlación de matrices, mediante diagramas de dispersión, que son representaciones gráficas en un sistema de ejes cartesianos en el que se representan puntos del espacio [18]. Estos puntos establecen la trayectoria del robot.

En [19] se plantea la construcción de una escultura sonora interactiva (obra de arte sonora no musical, que permite la participación e interacción del público), vinculando inteligencia artificial, agentes autónomos, atractores y visión artificial. Ese ambiente está constituido por diferentes altavoces que se desplazan de manera autónoma y aleatoria, modulando sus comportamientos en relación a la presencia de los espectadores. El ambiente puede rotar los altavoces en dirección al espectador, para detectarlo, localizarlo y reconocerlo.

De esta manera, ese trabajo explica la autonomía de decisión, desde la percepción del sonido, a los objetos sonoros que interactúan con los participantes que transitan el espacio compartido, extrapolando principios de la programación de agentes autónomos para modelar los altavoces, tal que la presencia del espectador detone nuevas dinámicas, sonidos y comportamientos dialécticos y narrativos en los objetos.

Ellos plantean un sistema de localización del usuario

mediante sensores de ondas acústicas, con el mecanismo clásico de micrófonos dinámicos y de condensador, pero no con la estructura convencional de las válvulas. A partir de allí, construyen los desplazamientos de los agentes basándose en la identificación sonora relacionada a la posición del público (ver Fig. 7), tal que puedan buscar o evadir al usuario, y de acuerdo a eso, modificar su propia direccionalidad. De esta manera, los parlantes perseguirán al usuario de modo autónomo.

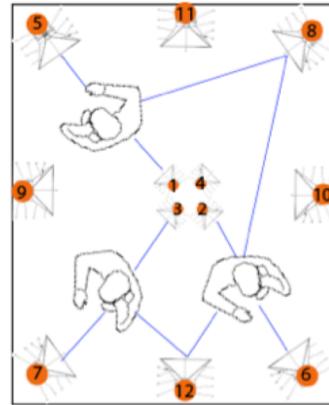


Fig. 7. Sistema de atractores. [19]

C. Aml y Sonido

En [20] se presenta la plataforma *Performance Messa di Voce*, la cual combina la voz y los sonidos que ejecutan vocalistas, que no se expresan en lenguaje hablado ni cantando, sino con la emisión de sonidos abstractos, con el fin de magnificarlos radicalmente en tiempo real en un entorno inteligente, mediante un software de visualización interactiva personalizado llamado *Tmema*.

Los aspectos considerados en ese trabajo son la comunicación abstracta, el lenguaje gráfico y los sistemas de composición musical, mezclados en un contexto sofisticado y virtuoso de narrativa audiovisual. En la Fig. 8 se muestra al vocalista abstracto emitiendo sonidos, mientras el entorno los percibe, tanto por ubicación (las figuras al fondo se posicionan de acuerdo a la posición del ejecutante) como por frecuencia (los círculos tienen diferentes tamaños que corresponden a diferentes frecuencias sonoras).

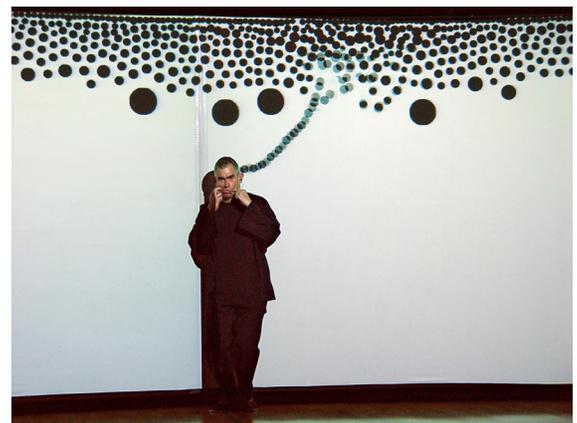


Fig. 8. Vocalista en *Messa di Voce* y resultado gráfico de la ejecución [20]

Usan el software Tmem para transformar cada sonido en un gráfico complejo de alta expresión, incluidos no solo los sonidos ejecutados en vivo, sino también los pregrabados (*playback*). Los gráficos, a su vez, responden a los movimientos de los ejecutantes, creando un ciclo de interacción en un AmI compuesto por sonidos, objetos virtuales y procesamiento en tiempo real. Todos los elementos se integran mediante este software, para lograr el performance en su totalidad.

La intención es mezclar las interacciones sonoras humanas y de la tecnología, en una idea de espontaneidad en las expresiones vocales, usando análisis visual (movimiento) y acústico (ondas sonoras) computarizado.

Por otro lado, un juego llamado Socio-ec(h)o (Fig. 9) fue concebido para AmI [21], y desarrolla el concepto de fluidez aural para el entrenamiento auditivo, y para conectar la percepción auditiva, con narrativas y procesos de personificación, mediante un diseño que combina pantallasónicas informativas y computación ubicua. El entorno responde a las acciones de los jugadores a través de la luz y el sonido, que son gestionados por módulos de inteligencia artificial.



Fig. 9. Socio-ec(h)o. [21]

La respuesta sonora y lumínica del AmI se produce al percibir cambios en los parámetros acústicos de la interacción entre los jugadores, como cambios en la tonalidad y en el nivel

TABLA II
RESPUESTA DE SOCIO-EC(H)O EN PAISAJES E INTENSIDAD SONORA POR NIVELES

Nivel	Paisaje Sonoro	Enfoques de Intensidad
L1	Musical abstracto suave	Solo amplitud
L2	Musical abstracto suave	Ajustes leves de tono y amplitud
L3	Cantos de guijarros	Solo tono (ajuste de amplitud leve)
L4	Sonidos de fuego	Desvanecimiento de paisajes sonoros grabados de intensidad creciente
L5	Sonido de corriente de agua	Ajustes leves de tono y amplitud
L6	Ambiente de bosque	Desvanecimiento de paisajes sonoros grabados de clima calmado a tormenta fuerte

de la voz. Este prototipo de AmI para grupos de juego evalúa los sistemas mediante sensores en pantallas multimodales,

para así comprender la interacción entre grupos y proveer soporte a medida que avanza el juego.

Ellos primero realizan una discusión metodológica para evaluar el diseño de la interacción mediante percepción auditiva, y usando un modelo de retroalimentación sónica, ofrecen resultados que permiten adaptar pantallas auditivas en AmI (ver Tabla II).

Las pantallasónicas funcionan mediante sensores que perciben los sonidos, y a su vez, emiten paisajes sonoros en respuesta.

Schreiraum (Fig. 10) es una instalación urbanista que funciona como plataforma interactiva [22]. Consiste en una cabina hermética, acústicamente aislada, equipada en su interior con sensores acústicos que detectan la actividad sonora dentro de la cabina. Hay una pantalla al frente, donde una imagen de un espacio es proyectada al azar.



Fig. 10. Schreiraum. [22]

Los sonidos que se generen dentro de la cabina son analizados y procesados en tiempo real mediante un sistema de sensores de audio, para que se produzca una respuesta a modo de reverberación con las características acústicas del espacio proyectado en la imagen. El espectador escucha dentro de la cabina cómo sonaría su voz en el lugar de la imagen.

IV. ACÚSTICA EN AMI

A. Análisis de los trabajos previos

Los trabajos presentados en el estado de arte muestran las experiencias positivas en la utilización de objetos sonoros y en la gestión acústica automatizada en AmI. Se ha trabajado previamente con sonido, agentes sonoros y gestión automatizada, pero la vinculación de las tres áreas ha sido escasa. En [23] se presenta una combinación del análisis espectral y la auralización (proceso de simulación de las sensaciones percibidas a través de la audición), pero desde ámbitos de composición para estudios sobre sensibilidad al ruido, alejado de los AmI. Igualmente, en [24] se establece la realidad acústica virtual, y escenarios para simular espacios acústicos, pero en lo referido a pruebas de auriculares y monitores de audio.

La idea de este trabajo es vincular estas áreas con AmI, tomando como referencia lo trabajado también en instalaciones artísticas interactivas, pero aplicado a espacios inteligentes, ya sean de aprendizaje, salud, entre otros, donde se gestionen de forma inteligente los nuevos objetos y

comportamientos en el AmI, desde el audio, para mantener la consistencia y la evolución requerida.

B. Conceptualización

Las infraestructuras computacionales, de comunicación ubicua y las interfaces inteligentes, son las tecnologías clave presentes en AmI [25]. La combinación de esos dispositivos, con mecanismos de gestión del sonido como fenómeno físico para ayudar al análisis de contexto, presenta nuevos retos vinculados al tiempo real, entre otros.

Para introducir la ciencia acústica como elemento significativo de un AmI, es importante establecer los siguientes términos:

- **Percepción sonora artificial:** A partir del análisis de la percepción del sonido desde la perspectiva de los procesos neuro-científicos involucrados en la vía auditiva, es posible diseñar mecanismos para la percepción del sonido en AmI, considerando la altura tonal, la modulación, la frecuencia, la vibración, el timbre, entre otros casos; todos estos, elementos físicamente determinables. Esto es, a partir de un sonido percibido, determinar la acción que se debe llevar a cabo para adaptar el ambiente a condiciones acústicas más favorables.
- **Gestión inteligente del sonido:** Para mejorar los sistemas que recopilan, organizan, refinan, analizan y diseminan el conocimiento, se debe incluir un sistema de adecuación del sonido, que posibilite un proceso de auto-gestión sonora, para la identificación, el análisis en tiempo real, y la interacción con el sonido. Con esto, se mejora el desempeño del sistema como un todo. Se recibe la información acústica, la cual se utiliza para adecuar el ambiente, o para la comunicación entre agentes.
- **Ambiente sonoro inteligente:** Ambiente que contaría con sensores de sensibilidad inteligente de detección acústica, dotado con agentes capaces de ejecutar acciones en tiempo real en respuesta al análisis realizado.
- **Agente sonoro inteligente:** Para cada estímulo acústico percibido, un agente sonoro debe ejecutar una acción interactiva, basado en la evidencia presentada y en el conocimiento previamente adquirido por dicho agente. Además, debe poder realizar el proceso inverso, es decir, no solo percibir sonidos, sino también generarlos.

Estos aspectos contribuyen a maximizar la visión de un futuro donde los ambientes estén conformados de artefactos equipados con sensores, memorias y capacidad de comunicación, que capturen la información del entorno, interactuando y reaccionando [26].

Los elementos sonoros en los AmI jugaran un papel fundamental en la interacción dentro del sistema. Por ejemplo, los reportes de fallas, la detección de un mal funcionamiento, las reacciones a contextos no conocidos o programados, pueden provenir de la emisión acústica, como funciona en muchos contextos humanos. En este caso, el sistema de seguridad propio del AmI podría actuar de acuerdo a la señal que se detecte mediante la gestión inteligente del sonido.

C. Aproximación Arquitectónica

La propuesta de un medio de gestión acústico automatizado para AmI, busca la integración de todos los elementos sonoros del mismo (audibles para el usuario o no), para ayudar a definir las acciones que se llevaran a cabo dentro de ese espacio. La arquitectura del sistema debe ser genérica, considerando lo poco predecible de las fuentes de emisión de la señal acústica, principalmente desde los usuarios del AmI y desde las actividades que allí se realicen. Ya en trabajos previos [27, 28], proponen arquitecturas conscientes del contexto para AmI que consideran esos aspectos no predecibles de estos ambientes.

Los principales elementos que van a interactuar en la gestión acústica automatizada en AmI son los sensores acústicos encargados de recibir la señal, y los parlantes encargados de dar respuesta. En el proceso intermedio, tendrán participación mecanismos encargados de analizar la señal, almacenarlas en una base de datos de acuerdo a patrones sonoros establecidos, separarla en sectores perceptivos de frecuencias sonoras audibles y no audibles para los usuarios, identificar la acción más precisa y pertinente que debe llevarse a cabo (actividad propia de cada agente sonoro en el AmI), remitir la señal a otro agente (de ser necesario), entre otras cosas.

Uno de los posibles agentes sonoros sería uno llamado *smart speaker*, que sea capaz de percibir el sonido del ambiente en que se encuentra en términos de nivel, modulación y calidad acústica circundante, para así dar una respuesta que se adapte a lo percibido. Un ejemplo de este agente sonoro sería su uso en un restaurante: en una mesa, una pareja habla en un nivel equivalente a unos -50dB, superado por el nivel de la música en el lugar. El *smart speaker* podría percibir ese nivel, adaptar el volumen de la música (subir o bajar el volumen), hacer un análisis de las cualidades acústicas del espacio, para mantenerse focalizado en dirección únicamente a las dos personas (mediante un sistema de cancelación del ruido que rodee a las dos personas, realizado con un sistema de identificación de señal y cancelación de fases incorporado a un sobre-techo), entre otras cosas. Así, un local podría tener un ambiente sonoro personalizado, para satisfacer individualmente las exigencias de cada cliente.

D. Ejemplos de Uso del Middleware

Uno de los ámbitos de aplicación de este middleware sería en un Salón de Clase Inteligentes (SaCI) [29], para la reducción de ruido. Si bien, tradicionalmente el tratamiento acústico del espacio no incluye directamente el uso de tecnología avanzada, sino que está más vinculado a la construcción, la arquitectura y el diseño de interiores, sí es válido considerar el uso de tecnologías para la reducción de ruido. En particular, en el contexto de SaCI, el objetivo es permitir la incorporación de agentes sonoros, extendiendo la arquitectura AmICL [10], que propone dos tipos de agentes dentro del SMA, uno para la caracterización de los componentes del software, y otro para la definición de los componentes del hardware en SaCI. Así, AmICL sería extendido, para permitir la autogestión del sonido en el contexto de SaCI.

En específico, para la reducción del ruido se podría usar la

cancelación de fases, utilizando el mismo mecanismo usado en [22], que consiste en la emisión de la misma señal ruidosa dentro del espacio, con parlantes en un sobre techo, lo que permitiría eliminar el exceso de ruido (tanto interno como externo) en un salón de clases, mejorando así la concentración de los estudiantes y de esta manera, facilitando la aprehensión del conocimiento. También el middleware debería considerar la difusión del sonido, mediante sistemas de dispersión inteligente, que amplifiquen el sonido para eliminar el problema del estudiante que no escucha bien en la última fila. Para estudiantes con discapacidad auditiva, es importante la implementación de un sistema de amplificación focalizado (podría funcionar un mecanismo como el del *smart speaker*, pero intraauricular). Estos serían algunas de las cosas que AmCL extendido podría gestionar.

En otro ámbito de aplicación del middleware, se podría considerar la interacción entre los agentes que componen el AmI, los cuales consideren el sonido para la toma de decisión. Por ejemplo, el middleware en una sala de conciertos inteligente, debería permitir la automatización de las acciones de los agentes para el apagado/encendido de las luces. Las orquestas sinfónicas, casi en su mayoría, utilizan por regla el tono de calibración La 440Hz (en algunas normalizaciones se utiliza 432Hz). Las orquestas normalmente afinan en esta frecuencia, poco antes de iniciar el concierto. Los agentes encargados de la iluminación podrían percibir esta señal, y tomarla como una orden para apagar las luces de la sala.

También, el middleware debe considerar el espacio circundante. En algunos lugares no sería bienvenido un animal callejero, bien sea por higiene o por el ruido que pueda generar (un ladrido, un maullido), ocasionando distracción y perturbación en la actividad que se realice adentro. Así, el middleware debería mediante un sensor percibir la presencia del animal, y emitir una señal acústica a modo de barrera infrasonica, que no cause ningún maltrato pero mantenga al animal alejado de la zona.

En espacios de atención médica asistida, el rol de las señales acústicas es fundamental, no solo por la interpretación de la voz de un paciente que solicite voluntariamente ayuda, sino por la identificación de sonidos aleatorios que requieran asistencia, como el sonido de un golpe por alguna caída del paciente. El middleware debe establecer un sistema de identificación que pueda ubicar en tiempo real las señales percibidas, para que el AmI (sus componentes) pueda actuar adecuadamente. Por ejemplo, si un paciente tiene alguna dificultad respiratoria que se evidencia con el sonido de la tos, el middleware de gestión de sonidos del AmI de atención médica asistida podría enviar una señal al agente encargado de gestionar la cama, para elevar la inclinación de la cama donde se encuentra el paciente.

Estos son algunos ejemplos de uso del medio de gestión acústico para AmI que se propone desarrollar en trabajos futuros.

V. CONCLUSIÓN

Los AmI pueden evolucionar, y tener nuevos y significativos avances, si se consideran los aspectos sonoros del mismo y la contribución que el audio puede dar a todos los procesos involucrados, desde el desempeño individual de los

agentes inteligentes, pasando por la comunicación entre diferentes agentes (no solo los sonoros), hasta llegar a la interacción con el usuario.

Aclarando las principales definiciones asociadas al tema de la ciencia acústica en los AmI, y los avances en el área, este artículo propone una aproximación al tema de la generación de servicios acústicos para AmI. El middleware de auto-gestión del sonido en AmI sería el proveedor de esos servicios. Los antecedentes indican que es posible hacer una propuesta de modelos de gestión del sonido, para mejorar los AmI, mediante una arquitectura con capacidad de reacción y adaptación a condiciones sonoras no predecibles.

Las secciones IV.C y IV.D muestran la viabilidad de desarrollar un middleware reflexivo para la autogestión del sonido en un AmI, el cual permita, entre otras cosas, el despliegue de objetos sonoros. La sección IV.C muestra las ideas de base para una primera aproximación a la arquitectura del middleware, y la sección IV.D como ese modelo de middleware sería usado.

Los próximos trabajos presentaran el diseño arquitectónico del middleware de auto-gestión del sonido en AmI. A partir de allí, se empezaran los desarrollos específicos de sus componentes/servicios, así como la especificación de los escenarios de prueba, para mostrar su funcionamiento en diferentes contextos. Entre los aspectos a considerar en las pruebas tenemos, la comunicación entre los diferentes agentes sonoros inteligentes que conforman un SMA, la respuesta e interacción con el usuario, y la actuación de los agentes ante la diversidad de datos sonoros que puedan identificarse en los procesos de análisis y procesamientos realizados en el AmI.

RECONOCIMIENTO

Dr. Jose Aguilar ha sido parcialmente financiado por el Proyecto Prometeo del Ministerio de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación de la República de Ecuador.

REFERENCIAS

- [1] G. Basso (2006) *Percepción auditiva*, 1st ed., UNQ Ed. Buenos Aires, Argentina.
- [2] G. Santiago, "Gestión ambiental y desarrollo sustentable: Contaminación Acústica," Instituto Internacional de Estudios Globales para el Desarrollo Humano, Unión Europea, Informe Técnico, 2016.
- [3] V. R. Singh, "Biomedical acoustic imaging sensors for U-Health care applications," in *International Congress of Acoustics*, 2016, p. 8.
- [4] V. Thai, "A Survey on Ambient Intelligence in Manufacturing Environment," National University of Ireland, Galway, Technical Report, 2006.
- [5] Sociedad Española de Acústica (2012), *Glosario de Términos Acústicos*, 1st ed., SEA, Madrid, España.
- [6] F. Miyara (2004), *Acústica y Sistemas de Sonido*, 3rd ed., UNR Editora, Ed. Rosario, Argentina.
- [7] G. Santiago, "Neurociencia Cognitiva de la Audición aplicada al Diseño Sonoro Audiovisual," *Tesis*, Escuela de Medios Audiovisuales, Universidad de Los Andes, Mérida, 2012.
- [8] I. Peretz, "Music, Perception and Recognition: The Handbook of Cognitive Neuropsychology," *Psychology Press*, Philadelphia, 2001.
- [9] J. Augusto, V. Callaghan, D. Cook, A. Kameas, and I. Satoh (2013), Intelligent Environments: a manifesto, *Human-Centric Computing and Information Sciences*, 3 (12), pp. 18.
- [10] M. Sánchez, J. Aguilar, J. Cordero, P. Valdiviezo, (2015) A Smart Learning Environment based on Cloud Learning, *International Journal of Advanced Information Science and Technology*, 39 (39), pp. 39-52.

- [11] J. Aguilar, A. Ríos Bolívar, F. Hidrobo, M. Cerrada (2013), *Sistemas Multiagentes y sus aplicaciones en Automatización Industrial*. Talleres Gráficos, Universidad de Los Andes.
- [12] Vizcarrondo, J, Aguilar, J., Exposito, E. Subias, A. "ARMISCOM: Autonomic Reflective Middleware for Management Service COMposition". In *Proc 4th Global Information Infrastructure and Networking Symposium IEEE Communication Society*, 2012
- [13] M. Navarro, (2011) "Inteligencia ambiental: entornos inteligentes ante el desafío de los procesos inferenciales," *Eidos: Revista de Filosofía de la Universidad del Norte*, 15, pp. 184-205.
- [14] IT Media (2006), "oomRender, *Intelligent Room System*, [Online]. Available: <http://pinktentacle.com/2006/12/roomrender-renders-rooms-intelligent/>.
- [15] M. Vacher, F. Portet, A. Fleury, and N. Noury, "Development of Audio Sensing Technology for Ambient Assisted Living: Applications and Challenges," in *Digital Advances in Medicine, E-Health, and Communication Technologies*. United States: Medical Information Sciences Reference, 2013, pp. 148-167.
- [16] W. Schott and T. Diep, "Apparatus and method for problem solving using intelligent agents," *Patente US2010/0185566 A1*, 2010.
- [17] K. Nakamura, Nakadai K., Asano F., Hasegawa Y., and H. Tsujino, "Intelligent sound source localization for dynamic environments," In *Proc. International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2009, pp. 664-669.
- [18] Grupo de Petrología Aplicada, "Matriz de correlación y gráficos de dispersión", Universidad de Alicante, Alicante, España, *Informe Técnico*, 2015.
- [19] C. Martínez, "Espacio aural interactivo," Facultad de Bellas Artes, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, *Informe Técnico*, 2014.
- [20] G. Levin and Z. Lieberman (2003), *Messa di Voce, Audiovisual Performance*, [Online]. Available: <http://www.tmema.org/messa/messa.html>.
- [21] M. Droumeva and R. Wakkary, "Understanding Aural Fluency in Auditory Display Design for Ambient Intelligent Environments," In *Proc. 14th International Conference on Auditory Display*, 2008.
- [22] N. Weniger (2013) *Schreiraum, Art Installation*, [Online]. Available: http://www.nicoleweniger.com/projektseite_schreiraum.html.
- [23] E. Accolti, "Generación automática de paisajes sonoros realistas con espectro, distribución de duraciones y categorías semánticas especificados", Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Argentina, *Informe Técnico*, 2015
- [24] F. Tommasini, "Sistema de simulación acústica virtual en tiempo real", *Informe Técnico*, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 2012.
- [25] A. Maña, A. Muñoz, D. Serrano, and F. Sánchez, "Seguridad Dinámica en Ambientes Inteligentes," In *Proc. IX Reunión Española sobre Criptología y Seguridad de la Información*, Barcelona, 2006, pp. 1-13.
- [26] C. Röcker, "Services and Applications for Smart Office Environments," In *Proc International Conference on Computer and Information Technology*, 2010, pp. 387-403.
- [27] T. G. Stavropoulos, D. Vrakas, D. Vlachava, and N. Bassiliades, "BOnSAI: a smart building ontology for ambient intelligence", In *Proc. 2nd International Conference on Web Intelligence, Mining and Semantics*, 2012, pp. 30-41.
- [28] D. Gregor, "Desarrollo de un Servicio Middleware de Ontologías Cooperativas aplicado a Sistemas Embebidos de Transportes Inteligentes", *Tesis Doctoral*, Universidad de Sevilla, Sevilla, 2013.
- [29] P. Valdiviezo, J. Cordero, J. Aguilar, M. Sánchez, "Conceptual Design of a Smart Classroom Based on Multiagent Systems", In *Proc Int. Conf. Artificial Intelligence*, 2015, pp. 471-477.



Gabriela Santiago es Licenciada en Medios Audiovisuales mención Sonido, graduada en 2012 en la Universidad de Los Andes, Mérida Venezuela. Fue pasante en el Laboratorio de Acústica y Electroacústica de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario, Argentina. Realizó estudios de Posgrado en Artes Mediales

en la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina (2014), y en Estudios Ecológicos y Acústica Medioambiental en la Organización de Naciones Unidas (2016). Actualmente es estudiante doctoral e investigadora en el Centro de Microcomputación y Sistemas Distribuidos (CEMISID) en la Universidad de Los Andes. Su área de investigación incluye acústica, neurociencia, artes mediales e inteligencia artificial.



Jose Lisandro Aguilar Castro es Ingeniero de Sistemas graduado en 1987 en la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. Tiene una Maestría en Ciencias de la Computación en 1991 de la Universidad Paul Sabatier-Toulouse-Francia. Doctorado en Ciencias de la Computación en 1995 de

la Universidad Rene Descartes-París-Francia. Además, realizó estudios de post-doctorado en el Departamento de Ciencias de la Computación de la Universidad de Houston (1999-2001), y en el Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes, Toulouse-Francia (2010-2011). Él es investigador del Centro de Microcomputación y Sistemas Distribuidos (CEMISID) de la Universidad de Los Andes, e Investigador Prometeo en la Escuela Politécnica Nacional y en la Universidad Técnica Particular de Loja desde el 2014. Miembro de la Academia de Ciencias de Mérida y del Comité Técnico Internacional de la IEEE-CIS sobre Redes Neuronales Artificiales. Secretario Ejecutivo del Centro Latinoamericano de Estudios en Informática. Entre sus áreas de investigación se encuentran la Inteligencia Artificial, los Ambientes Inteligentes, la Analítica de Datos, la Neurocomputación, entre otros

Optimización de Coeficientes de Absorción para Simulación Numérica Acústica

Optimization of Absorption Coefficients for Numerical Acoustic Simulation

Gandhi Mora Guevara, José Lucio Naranjo, Luis Bravo Moncayo

Resumen—El siguiente trabajo presenta una metodología para optimizar los coeficientes de absorción, considerados convencionalmente como los principales parámetros de entrada de los simuladores acústicos de salas. En primer lugar se hace una presentación de las principales características del simulador acústico utilizado. Después, se detalla el procedimiento que se basa en un enfoque de ascenso de colinas modificado. Este realiza la optimización del valor de los coeficientes en un procedimiento iterativo, que incluye el cálculo de los parámetros de calidad acústica (PCAs) con los resultados de una simulación acústica de una sala real. Los PCAs provenientes de cada simulación son comparados con mediciones experimentales realizadas en la sala, utilizadas como referencia para los ajustes iterativos. Finalmente, los resultados de la última iteración evidencian una reducción substancial del error, mostrando diferencias del 5.83 % con los PCAs medidos en la sala real.

Palabras clave—optimización de coeficientes de absorción, ascenso de colinas modificado, simulación computacional acústica.

Abstract—The following work presents a methodology to optimize the absorption coefficients, conventionally considered as the main input parameters of room acoustical simulators. In the first place a presentation of the main characteristics of the acoustic simulator is made. Next, the procedure that is based on a modified “hill-climbing” approach is detailed. It performs the optimization of the coefficients value in an iterative procedure, which includes the calculation of the acoustic quality parameters (AQPs) with the results of an acoustic simulation of a real room. The AQPs from each simulation are compared with experimental measurements performed in the room, used as a reference for iterative adjustments. Finally, the results of the last iteration show a substantial reduction of the error, showing differences of 5.83 % with the AQPs measured in the real room.

Index Terms—Optimization of absorption coefficients, modified “hill-climbing”, acoustic computational simulation).

I. INTRODUCCIÓN

Los recientes avances relacionados con las capacidades computacionales de procesamiento y almacenamiento han dado pie a la aparición de nuevas y potentes herramientas

de simulación. Entre estas, los modelos computacionales de propagación de la onda sonora se han convertido en un importante apoyo para acústicos y arquitectos, permitiendo el cálculo de las propiedades sonoras de toda clase de salas, algunas aún en planos, con un adecuado grado de confiabilidad [1].

Las aplicaciones más recientes, a más de simular fenómenos acústicos como reflexión, difusión, atenuación, etc., destacan por permitir la aurilización de ambientes, i.e. la producción de un estímulo sonoro que es capaz de recrear la sensación de inmersión acústica dentro del ambiente simulado [2]. No obstante, las validaciones de precisión para este tipo de aplicaciones no pueden basarse únicamente en impresiones subjetivas de los oyentes. En ese sentido, la norma ISO3382 [3] establece una serie de parámetros de calidad acústica (PCA), tales como T_{30} (tiempo de reverberación), EDT (tiempo de decaimiento temprano), C_{50} (factor de claridad a 50 ms.), D_{80} (definición a 80 ms.), T_s (tiempo central), etc., los cuales pueden ser calculados a partir de mediciones experimentales (para obtener datos de referencia) y también de resultados generados por el simulador (los datos a ser verificados).

Como todo modelo predictivo, los datos de entrada son transformados en variables de salida, las cuales deben guardar una relación coherente con las mediciones experimentales. A pesar de que las técnicas algorítmicas para simulación computacional de acústica de salas (trazado de rayos [4], imágenes virtuales [5], trazado de conos [6], camino libre [2], transición de energía [7], etc.) cuentan con una amplia aceptación [2], [8], estas son naturalmente dependientes de la calidad de sus datos de entrada.

En otras palabras, asumiendo que se cuenta con procedimientos algorítmicos correctamente implementados, el problema de la precisión de los simuladores computacionales acústicos estaría directamente relacionado con los siguientes aspectos: la adecuada representación de la geometría de las superficies de contorno, las propiedades acústicas (coeficientes de absorción por banda de frecuencia) de los materiales y factores ambientales tales como presión atmosférica, humedad y temperatura del recinto en cuestión.

La calidad de la mayoría de los aspectos antes mencionados, puede ser garantizada sin mayores complicaciones con un adecuado levantamiento de información relacionada al lugar donde se pretenda llevar a cabo una validación del simulador. Sin embargo, esto no puede ser aplicado en el caso de los

Article history:

Received 16 February 2017

Accepted 11 May 2017

G. Mora fue estudiante de ingeniería del Departamento de Informática y Ciencias de la Computación de la Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

J. Lucio esta con la Escuela Politécnica Nacional y L. Bravo esta con la Universidad de las Américas.

coeficientes de absorción de cada uno de los materiales, ya que las técnicas para la obtención de dicha información no son de fácil acceso por requerir laboratorios y equipamientos especializados [9]. En ese sentido, las simulaciones toman los coeficientes de absorción que se encuentran en la literatura [10]–[12].

Lo anterior presenta un inconveniente debido a que no es posible afirmar con seguridad que los materiales presentes en la sala son los mismos descritos en la literatura. Incluso en el caso que exista una coincidencia, los materiales de la sala pueden presentar propiedades de absorción acústica diferentes debido a montaje incorrecto, superficies diferentes, desgaste natural por la edad, entre otras [13].

En ese sentido, una alternativa válida es modificar iterativamente los coeficientes tomados de la literatura, de tal forma que los resultados de simulación generen PCAs que se vayan aproximando a aquellos calculados con mediciones experimentales tomadas en la sala real. Estudios recientes plantean el uso de complejos procesos de optimización evolutivos [9], [13].

El presente trabajo es un abordaje de ascenso de colinas modificado, que introduce una implementación más sencilla, basada únicamente en los parámetros T_{30} y EDT , alcanzando desvíos de aproximadamente 5.83 % entre los PCAs medidos y simulados.

A continuación se describe como está organizado este trabajo. En la Sec. II se presentan las principales características del simulador acústico utilizado, explicando el funcionamiento de los modelos que gobiernan la geometría del recinto, fuentes sonoras y receptores acústicos. También se topan asuntos relacionados con el algoritmo híbrido de propagación acústica y los principales resultados que entrega el simulador. En la Sec. III se detalla el funcionamiento del procedimiento de optimización de ascenso de colinas modificado y los datos referenciales para el ajuste. A continuación, en la Sec. IV y V se presentan y se discuten los resultados alcanzados en términos de los valores finales de los parámetros optimizados y de los PCAs (T_{30} y EDT) calculados en la última iteración del proceso.

Finalmente, las conclusiones son presentadas en la Sec. VI.

II. CONSIDERACIONES TEÓRICAS IMPORTANTES

Para garantizar el procedimiento de optimización es necesario tener certeza que los modelos y algoritmos que conforman al simulador acústico funcionen correctamente. En ese sentido, la presente sección hace una revisión de los principios físicos y geométricos que gobiernan los modelos y procedimientos programados en la aplicación computacional de simulación de propagación de la onda acústica.

II-A. Representación de la geometría y superficies de contorno de la sala

La representación de las superficies de contorno y de la geometría de la sala dentro del programa funciona gracias a una estructura de datos que almacena información de varios planos triangulares. Los triángulos, que deben ser diseñados con la ayuda de herramientas CAD a partir de los planos arquitectónicos de la sala real, están posicionados de forma que

configuren un espacio tridimensional cerrado. Cabe señalar que cada uno de los vectores normales a los planos deben estar orientados al interior de la sala, el cual es un requerimiento del algoritmo de reflexión especular. Cada uno de estos elementos está relacionado a un material acústico que posee coeficientes de absorción α y difusión δ en cada banda de octava, los cuales pueden encontrarse en diversas bases de datos [10]–[12].

II-B. Fuentes sonoras y representación de los frentes de onda

Siguiendo los principios de la acústica geométrica [8], la representación de los frentes de onda es abordada mediante la utilización de *rayos acústicos*. Esto es, estructuras de datos que contienen información de una fracción de la onda acústica, con datos de la dirección, tiempo de propagación y también del espectro energético por banda de octava (125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz).

Llevando en consideración que los ensayos experimentales en la sala real se realizaron utilizando una fuente dodecaédrica (con propagación omnidireccional), la simulación computacional busca simular una propagación esférica utilizando 10^5 rayos partiendo del punto central de la fuente sonora, con una distribución direccional que busca la máxima homogeneidad posible basada en la subdivisión geodésica del icosaedro como lo muestra la Fig. 1 [14]. Cada vector director es determinado a partir del punto central de la fuente y el baricentro de cada triángulo geodésico. La ecuación empleada para el cálculo del número de rayos, N_R , viene expresada como sigue:

$$N_R = 2 + 10n^2, \quad (1)$$

donde n son las subdivisiones triangulares del icosaedro.

La potencia acústica de cada uno de los rayos, W_r , producidos por la fuente de sonido está dado por

$$W_r = \frac{W_f}{N_R}, \quad (2)$$

donde W_f es la potencia acústica de la fuente de sonido.

Dado que la respuesta impulsiva puede describir todas las características frecuenciales de un (recinto o sala) sistema lineal invariable en el tiempo [2], [8], [15], la simulación numérica debe procurar simular la emisión de una señal aproximada a un Delta de Dirac desde la fuente sonora. Para esto, la potencia acústica de cada rayo se divide en proporciones iguales para cada una de las bandas de octava consideradas, representando de esta forma un espectro de potencia homogéneo en todas las banda de frecuencias, tal como muestra la Fig. 2.

II-C. Modelado de la propagación de la onda acústica

Cada vez que ocurre una reflexión sobre una superficie de la sala, se producen pérdidas energéticas por banda de octava en el rayo acústico, las cuales están directamente relacionadas a los coeficientes de absorción α y difusión δ del material asignado al triángulo (ver Fig. 3).

La fracción de la energía incidente, E , que será absorbida por superficie alcanzada está dada por $E\alpha$. Otra fracción, $E(1 - \alpha)\delta$, será reflejada de forma difusa (usando un abordaje de transición de energía [16]). $E(1 - \alpha)(1 - \delta)$ es el valor

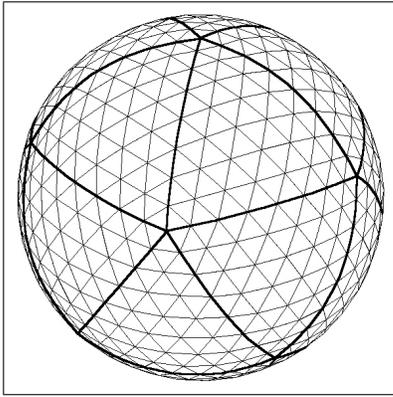


Figura 1. Subdivisión geodésica del icosaedro

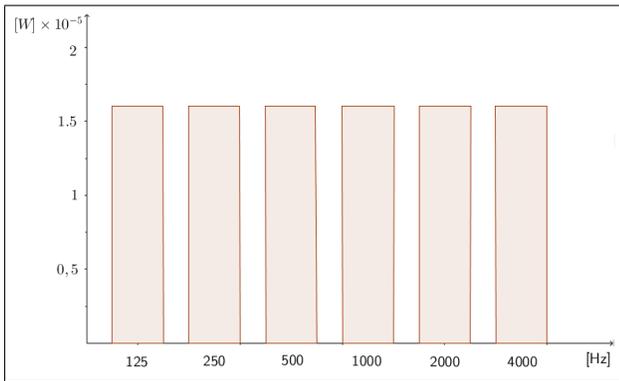


Figura 2. Espectro energético por bandas de octava en el punto de partida

de la energía residual que se refleja de forma especular, en concordancia con la ley de Snell (controlada por una rutina de trazado de rayos [4]).

La determinación de cual superficie triangular será incidida por un rayo requiere de n_t verificaciones, donde n_t es el número de triángulos de la sala. El procedimiento siempre tendrá que verificar todos los triángulos, ya que puede existir más de uno en ruta de intersección y obviamente se debe escoger al triángulo que se encuentre más próximo al punto de partida del rayo. Este tiempo computacional se repetirá por cada uno de los N_R rayos emitidos. El procedimiento se torna más complejo cuando se toma en consideración que cada

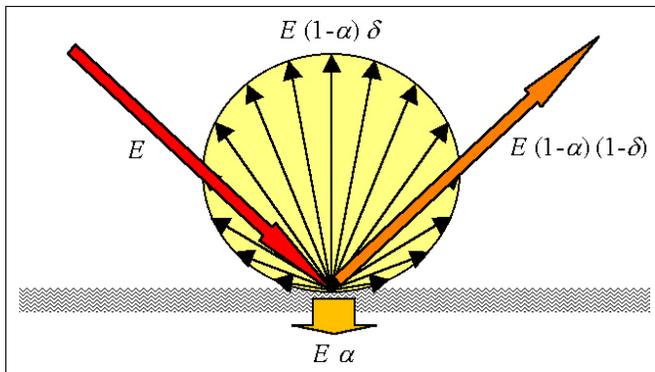


Figura 3. Reflexión acústica

rayo se reflejará varias veces por las superficies de contorno. Asumiendo que cada rayo se refleje en promedio n_x veces, el tiempo computacional para el trazado de rayos será de $O(n_t N_R n_x)$.

Por tal motivo, se tomó un procedimiento de renderización gráfica 3D [17], el cual encierra el ambiente en un gran cubo y agrupa a los triángulos de acuerdo a su posición dentro del cubo (identificada con 8 subdivisiones iguales del cubo original). Si algún triángulo no está completamente encerrado por alguno de los 8 cubos pequeños, el triángulo es cortado por un procedimiento geométrico de intersección de planos y (de ser el caso) sus componentes resultantes son nuevamente triangulados. Cada subcubo puede nuevamente dividirse en 8 partes, de forma que la definición de la posición de los triángulos se vuelva cada vez más precisa. Al final, con tres subdivisiones del cubo original se obtiene un esquema de premapeo de los triángulos, asociándose de esta manera a un árbol octal de búsqueda (ver Fig. 4) y permitiendo una reducción del tiempo computacional a aproximadamente $O(8 \log_8(n_t) N_R n_x)$.

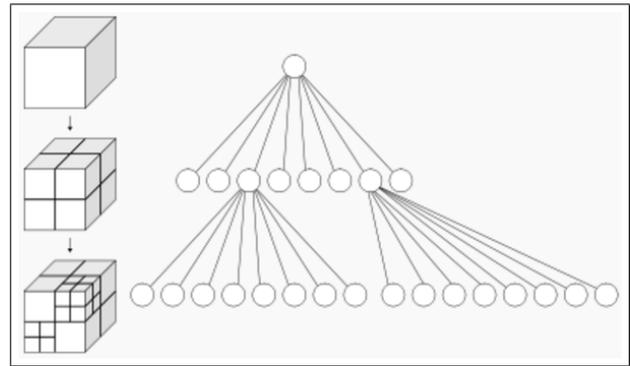


Figura 4. Árbol octal asociado a una subdivisión cúbica del espacio simulado.

II-D. Receptores

Eventualmente, varios rayos acústicos alcanzarán al receptor (ver Fig. 5) portando información sobre la energía residual que aún posean (ver Fig. 6), la dirección de incidencia y el tiempo de propagación.

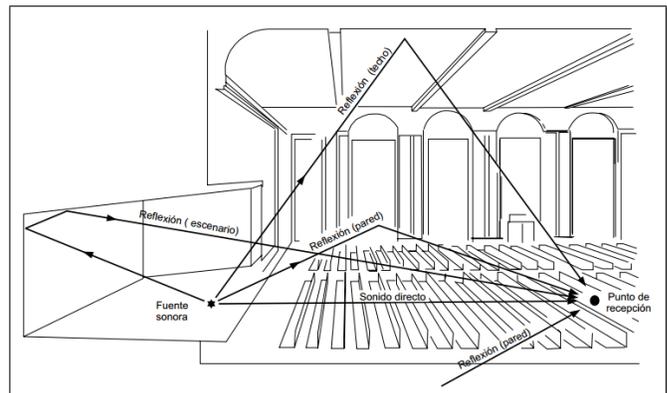


Figura 5. Rayos acústicos que parten de la fuente sonora y alcanzando en su trayectoria a un receptor acústico [18]

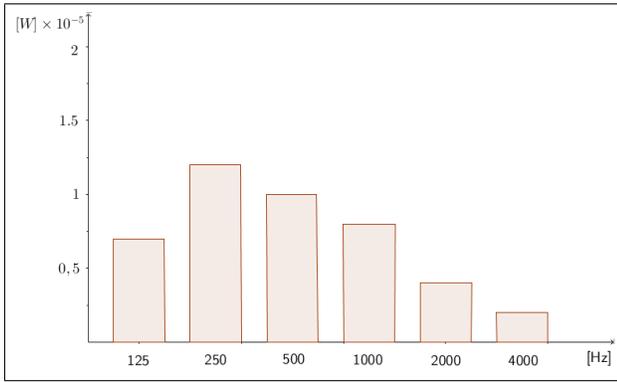


Figura 6. Espectro sonoro residual por banda de octava de un rayo acústico al momento de incidir sobre un receptor

La Figura 7 ilustra la estructura típica del histograma de presión cuadrática de un receptor posicionado en un punto arbitrario de una sala excitada por un impulso. Se puede observar el sonido directo, las primeras reflexiones y las reflexiones tardías, constituyendo estas últimas la denominada cola reverberante de la sala.

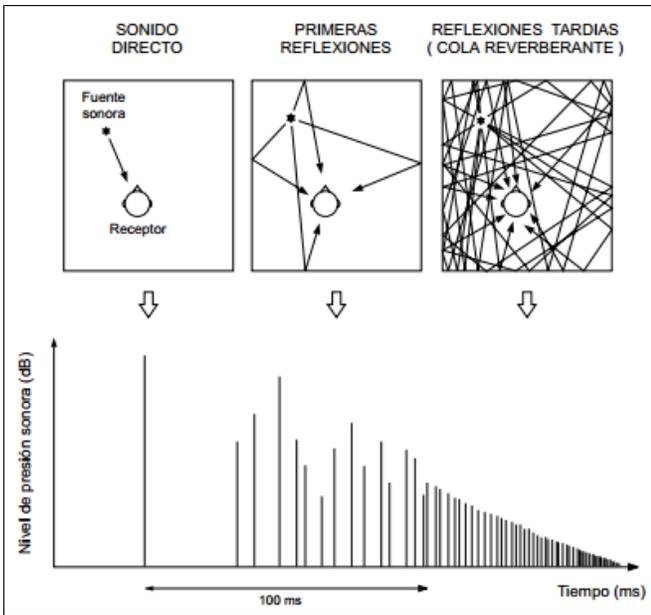


Figura 7. Histograma energético acústico asociado a: a) sonido directo; b) primeras reflexiones y c) cola reverberante [18]

No existe un criterio preciso para la definición de la frontera exacta entre las primeras reflexiones y la cola reverberante. Sin embargo, esta puede estar entre los 50 – 80 ms. Las primeras reflexiones contribuyen para reforzar el sonido directo, aumentando su audibilidad, facilitando la inteligibilidad de la palabra y la claridad musical [19]. Las reflexiones tardías son responsables por la sensación de reverberación propiamente dicha y de envolvimiento del oyente [20].

En este punto es importante considerar la medida de energía transportada en una onda acústica. Dicha medida es la intensidad sonora y esta dada por

$$I = \frac{W_f Q}{A}, \quad (3)$$

donde Q es el factor de directividad de la fuente ($Q = 1$ para fuentes omnidireccionales), A es el área de influencia (en el caso de propagación esférica, $A = 4\pi r_f^2$, donde r_f es la distancia entre el centro de la fuente y el frente de onda).

La intensidad también puede ser expresada en términos de presión sonora y velocidad de partícula, de la siguiente forma:

$$I = pv, \quad (4)$$

donde p es la presión sonora, v es la velocidad de partícula.

Ya que se está tratando con un simulador basado en los principios de acústica geométrica [8], se asume que todos los frentes de onda son ondas planas. Esto quiere decir que la presión sonora y el componente longitudinal de la velocidad de partícula están relacionados por:

$$p = v\rho_0 c, \quad (5)$$

donde ρ_0 es la masa específica del aire y c es la velocidad del sonido. Esto permite expresar la Ec. 4 como

$$I = \frac{p^2}{\rho_0 c}. \quad (6)$$

Igualando las Ecs. 3 y 6 y despejando la presión cuadrática obtenemos la Eq. 7, que permite encontrar la presión cuadrática en función de la potencia de la fuente, masa específica del aire ρ_0 , la velocidad del sonido c y el área A .

$$p^2 = \frac{W_f Q \rho_0 c}{A}. \quad (7)$$

Esta expresión es ajustada para la discretización computacional de los frentes de onda (rayos acústicos) quedando de la siguiente manera

$$p_i^2 = \frac{W_{ri} \rho_0 c}{A_R}, \quad (8)$$

donde p_i^2 es el aporte de presión cuadrática del i -ésimo rayo, W_{ri} es la potencia acústica residual del rayo en cuestión al momento de incidir sobre el receptor y A_R es el área de incidencia del receptor acústico (micrófono).

Una vez definida la expresión matemática, se debe considerar aspectos geométricos y físicos de la recepción. En ese sentido, se sabe que en el mundo físico varios frentes de onda acústicos incidirán sobre la superficie de los micrófonos o receptores, la cual es pequeña con respecto al resto de la sala. Por otro lado, en el modelo computacional, los receptores tienen una superficie de mayores proporciones para facilitar la eventual incidencia de los rayos acústicos, los cuales se dispersan a medida que se alejan de la fuente sonora. El algoritmo de recepción usado para este trabajo considera una placa circular. Este disco de recepción gira alrededor de su centro, de manera que el rayo acústico es siempre ortogonal a la misma, como puede observarse en la Fig. 8.

Para este caso, la intensidad en el receptor, I_R , en un instante dado t es:

$$I_R = \sum_{i=0}^l \frac{W_{ri}}{\pi r_{dr}^2}, \quad (9)$$

donde l es la cantidad de rayos incidentes en el instante t , W_{ri} es la potencia del i -ésimo rayo, πr_{dr}^2 es el área del disco de recepción con radio geométrico r_{dr} .

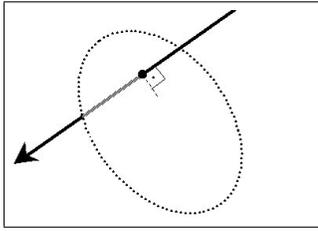


Figura 8. Rayo acústico ortogonal al disco de recepción que rota con eje en su propio centro.

II-E. Curva de Decaimiento Energético

La curva de decaimiento energético (*EDC*, del inglés *Energy Decay Curve*) representa la disminución de la energía sonora en una sala. Esta se obtiene mediante un promedio de varios experimentos de medición. Cada uno de estos consiste en emitir un ruido blanco en régimen permanente en una sala sin ruido de fondo hasta que el campo sonoro alcance una distribución espacio temporal estacionaria. Una vez en este estado, se apaga la fuente sonora y se registra el tiempo de decaimiento. La *EDC* se determina al promediar todos los experimentos de medición. En ese sentido, la *EDC* está representada por $\bar{e}(t, x)$, donde t es el tiempo, x es la posición del receptor y la barra indica que se trata del promedio energético de experimentos realizados.

Schroeder [21] demostró que la curva de decaimiento energético medio, para una posición del receptor, puede ser obtenida matemáticamente por la integración inversa de la respuesta impulsiva cuadrática de la sala, *QIR- Quadratic Impulse Response*, quedando de la siguiente manera

$$EDC_p(t) = \bar{e}(t, x) = C \int_t^\infty p^2(\tau) d\tau, \quad (10)$$

donde C es una constante relacionada con la potencia de la fuente y $p^2(\tau)$ es una *QIR* de la sala, expresada como presión cuadrática. De ese modo, un número teóricamente infinito de ensayos de decaimiento a partir de la supresión de la fuente sonora puede ser substituido por un único test impulsivo de una sala [20]. Este descubrimiento es aprovechado por los simuladores acústicos, siendo para estos posible calcular la *EDC* ya que el resultado de la simulación numérica entrega la respuesta impulsiva cuadrática.

II-F. Tiempos de Reverberación y Decaimiento Inicial

La reverberación es un fenómeno sonoro que depende directamente de la geometría del recinto y de la capacidad absorbente acústica de los materiales de las superficies de contorno de la sala. Se produce por la reflexión de los distintos frentes de onda y produce una ligera permanencia del sonido una vez que la fuente original ha dejado de emitirlo. Por tal motivo, este fenómeno es uno de los primeros indicadores de una correcta o incorrecta simulación numérica, validando preliminarmente los coeficientes de absorción de los materiales de la sala, la geometría del recinto y hasta los algoritmos de simulación de la propagación de la onda.

El grado de absorción del sonido de un material cualquiera se representa mediante el coeficiente de absorción, α (anteriormente ilustrado en la Fig. 3). Se define como una razón

dada por

$$\alpha = \frac{E_a}{E}, \quad (11)$$

donde E_a es la energía absorbida por el material y E es la energía incidente sobre el mismo.

La absorción de un material, Abs , se obtiene como resultado de multiplicar su coeficiente de absorción, α , por su superficie, S . Como un recinto está constituido por distintas superficies recubiertas de materiales diversos, se define la absorción total, Abs_t , como la suma de todas y cada una de las absorciones individuales, de la siguiente manera

$$Abs_t = \sum_{i=1}^s \alpha_i S_i, \quad (12)$$

donde s es el número de superficies.

Partiendo de esta expresión, es posible definir el coeficiente medio de absorción como

$$\bar{\alpha} = \frac{Abs_t}{S_t}, \quad (13)$$

donde S_t es la superficie total del recinto, la cual se obtiene al sumar la superficie de cada una de las superficies de contorno del ambiente considerado (paredes, techo y suelo).

Con estos elementos, es posible aplicar la fórmula de Sabine para estimar el tiempo de reverberación, TR . Esta fórmula proporciona una aproximación del tiempo en segundos en el cual un sonido decae 60 dB dentro de una sala. Esta es aceptada como referencia a nivel internacional por su sencillez de cálculo [22] y está dada por

$$TR = \frac{0,161V}{\bar{\alpha}S_t}, \quad (14)$$

donde V es el volumen de la sala. Es decir, cuanto mayor sea la absorción y la superficie de incidencia, menor será TR y cuanto mayor volumen tenga la sala, mayor será TR .

Según se observa, el TR calculado a cada frecuencia de interés mediante la fórmula de Sabine, no tiene en cuenta la ubicación de receptor, es decir, es único para cada recinto. Por otra parte, es preciso comentar que, a pesar de la utilización universal de esta fórmula, su validez se circunscribe al caso de recintos con las siguientes características [8], [18]:

- Decaimiento energético exponencial asociado a un campo sonoro perfectamente difuso.
- Geometría regular de la sala.
- Coeficiente de absorción medio inferior a 0,4.

Estas limitaciones resaltan la importancia de contar con *Parámetros de Calidad Acústica* (PCA) basados en una formulación matemática bien establecida. La norma 3, plantea tales parámetros formulados a partir de la respuesta impulsiva cuadrática (QIR), captada por cada receptor posicionado en un determinado punto de la sala. Algunos de estos PCAs se basan en la Curva de Decaimiento, como los dos siguientes:

II-F1. Tiempo de Decaimiento Inicial, EDT (Early Decay Time): M. Abad Sorbet [22] resalta la importancia psicoacústica que tiene el decaimiento inicial de la sala, a partir de experimentos subjetivos. El parámetro de calidad acústica que registra este decaimiento inicial es el *EDT*, el cual está definido como el tiempo correspondiente a los primeros 10 dB

de atenuación en la $\bar{e}(t, x)$, multiplicado por seis (en referencia a los 60 dB de Sabine).

II-F2. Tiempo de Reverberación T_{30} : A diferencia del TR obtenido con la fórmula de Sabine, este parámetro no es único para cada recinto. El T_{30} puede ser calculado a partir de la Curva de Decaimiento Energético, obtenida a su vez de la respuesta impulsiva cuadrática captada por un receptor. Este parámetro está definido como el tiempo de decaimiento de 60 dB. En mediciones, la norma ISO 3382 [3] establece que se debe tomar el decaimiento entre 5 dB y 35 dB. Ese resultado es multiplicado por dos, generando entonces el T_{30} .

En el caso en que exista una perfecta difusión sonora producida por una geometría regular de la sala y por una distribución homogénea y uniforme de los materiales utilizados como revestimientos, el decaimiento de la energía sonora seguirá una evolución exponencial, la cual se convertirá en una línea recta al pasar a escala semilogarítmica. En tal caso, el valor del EDT , T_{30} y TR coincidirán. Sin embargo, este es un caso ideal. En la práctica, como consecuencia de una falta de difusión perfecta, la curva de decaimiento energético puede presentar, en distintos puntos de la sala, una doble pendiente. Por lo que ambos valores diferirán su grado, como lo indica la Fig. 9.

Como la curva de decaimiento energético medio no es exactamente lineal, es muy común que el T_{30} y el EDT no coincidan. Es más, el EDT está más relacionado con la impresión subjetiva de viveza o reverberancia percibida. Por otro lado, el TR mide la reverberación real objetiva. Esto significa que, en todos aquellos puntos de una sala con un EDT significativamente menor que el TR , la sala resultará, a nivel subjetivo, más apagada [18]. Esto quiere decir que los puntos de la sala con valores de EDT menores presentan una mayor concentración de las reflexiones y en consecuencia, una mayor absorción respecto al resto de posiciones de la sala [22].

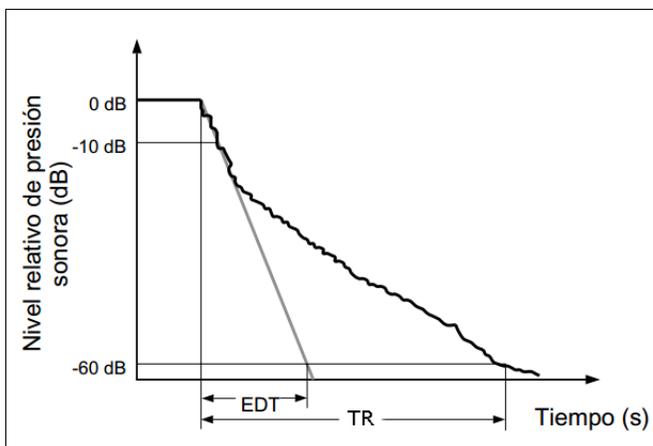


Figura 9. Comparación EDT y TR

III. METODOLOGÍA

Como en la mayoría de casos la sala en análisis que no poseerá las características habilitantes que requiere la ecuación 14, la corrección de los coeficientes de absorción se basa en un proceso de optimización formulado a partir de la reducción

simultánea del error buscando un punto de equilibrio entre dos parámetros de calidad acústica (calculados con datos modelados y medidos). Los parámetros reales fueron calculados con datos captados por cada uno de los receptores distribuidos en la sala en cuestión.

III-A. Escenario experimental y configuración de la simulación computacional

El procedimiento de optimización toma como referencia mediciones experimentales realizadas por investigadores del Laboratorio de Instrumentación en Dinámica, Acústica y Vibraciones (LIDAV) de la Universidad del Estado de Rio de Janeiro (UERJ) en el Teatro del Colegio Anchieta, fundado el 12 de abril de 1886 en la ciudad de Nova Friburgo, Brasil (ver Fig. 10).



Figura 10. Interiores del Teatro Anchieta

Una fuente dodecaédrica (omnidireccional) fue ubicada en el centro del escenario mientras que seis micrófonos fueron colocados en diferentes posiciones del auditorio. Con esto se hizo el levantamiento de la respuesta impulsiva en cada uno de los seis receptores y se calcularon los siguientes PCAs: EDT , T_{30} , D_{50} , D_{80} , C_{50} , C_{80} y T_s .

Utilizando como base los planos arquitectónicos digitales, se realizó el levantamiento del modelo 3D en una herramienta CAD a un archivo DXF (Drawing eXchange Format), el cual fue posteriormente exportado al software de simulación.

El número de planos y el porcentaje de área que estos ocupan en el modelo 3D se detallan en la Tab. I.

Los coeficientes de absorción fueron escogidos en función de la similitud existente entre las superficies de contorno observadas en el teatro y la descripción de los materiales presente en la base de datos de coeficientes de absorción.

Una fuente sonora (también omnidireccional) y seis receptores fueron posicionados en el modelo computacional en las mismas ubicaciones utilizadas para las mediciones experimentales, como puede verse en la Fig. 12.

Los parámetros humedad, presión y temperatura ingresados al software de simulación corresponden a los promedios que se registran para la ciudad de Nova Friburgo en el período cuando se realizaron las mediciones experimentales. Estos

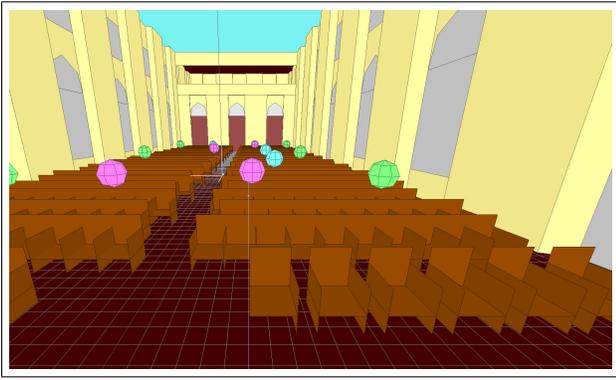


Figura 11. Simulación de los Interiores del Teatro Anchieta

Tabla I
NÚMERO DE PLANOS Y PORCENTAJE DE ÁREA DE LA SALA POR CADA MATERIAL

	Nro. Planos	% Área
Telas	24	11,52
Ventana	62	5,25
Tapicería	25	1,44
Telón	2	0,59
Sillas mdr.	1296	19,9
Puerta mdr.	3	0,53
Suelo mdr.	12	18,63
Pared	43	9,63
Manpostería	271	32,38

valores, junto con el área y volumen de la sala y la cantidad de triángulos para representar las superficies de contorno de la sala son presentados en la Tab. III.

Tabla II
COEFICIENTES DE ABSORCIÓN POR BANDA DE OCTAVA DE LOS MATERIALES DE LAS SUPERFICIES DE CONTORNO

Nombre	125	250	500	1000	2000	4000
Telas	0,03	0,12	0,15	0,27	0,37	0,42
Ventana	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Tapicería	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
Telón	0,05	0,12	0,35	0,45	0,38	0,36
Sillas mdr.	0,14	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14
Puerta mdr.	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10
Suelo mdr.	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
Pared	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03
Manpostería	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04

Tabla III
PARÁMETROS INICIALES DE SIMULACIÓN DEL TEATRO ANCHIETA

Temperatura = 25°C
Humedad = 75 %
Presión = 0,92 atm
Volumen = 5057,63 m ³
Área = 3453,82 m ²
No. triángulos = 4104
Velocidad del sonido = 346,40 m/s

III-B. Punto de Equilibrio (PE) y Ajuste de Coeficientes

Los resultados de la primera simulación computacional presentaron desvíos de aproximadamente 56 % en los parámetros EDT y T_{30} comparados con los datos medidos. Considerando que las rutinas computacionales para simulación de la propagación de la onda acústica ya han sido validadas con éxito [23], es posible asumir que la fuente de error en la representación del comportamiento reverberante de la sala real se centra principalmente en los coeficientes de absorción de los materiales de las superficies de contorno.

Dado que estos parámetros describen diferentes características del decaimiento de la sala, se partió de la premisa que una minimización simultánea y homogénea del error de modelado en ambos parámetros, en cada uno de los receptores, permitirá reducir la imprecisión del modelo computacional. En ese sentido, se determinó, en cada uno de los seis receptores, el error relativo por banda de frecuencia con los datos reales de EDT y T_{30} , de la manera convencional

$$Re_{T_{30}[b][r]} = \frac{T_{30}real_{[b][r]} - T_{30}sim_{[b][r]}}{T_{30}real_{[b][r]}}, \quad (15)$$

$$Re_{EDT[b][r]} = \frac{EDTreal_{[b][r]} - EDTsim_{[b][r]}}{EDTreal_{[b][r]}}, \quad (16)$$

donde, $Re_{T_{30}[b][r]}$ y $Re_{EDT[b][r]}$ son respectivamente el error relativo de los parámetros T_{30} y EDT modelados en la banda de octava b correspondiente al receptor r .

Los resultados modelados de un valor inferior a los medidos constituyen un indicador de que la sala modelada no es tan reverberante como la sala real. El inverso en este caso también es verdadero. Por lo tanto un aumento o disminución de los coeficientes de absorción, permitiría, respectivamente disminuir o aumentar la reverberación de la sala en una banda dada de frecuencia. La presencia de seis receptores obliga que este ajuste por banda de frecuencia sea realizado en función de la necesidad promediada de todos. En este punto, es importante recordar que la sala en cuestión no posee ninguna de las tres características ideales (ver Sección II-F) que permitiría que los PCAs, EDT y T_{30} , coincidan. Con esto en consideración, se pudo prever que un proceso de optimización o ajuste iterativo cerca del punto de convergencia, llegaría eventualmente a una circunstancia donde el aumento o disminución de la absorción de los materiales haría que los resultados mejoren para un parámetro, pero empeoren para el otro, tal y como lo ilustra la Fig. 13.

Este caso puede describirse como un problema de optimización de ascenso de colinas [24] pero sin oxígeno en la cima. Dado que no se puede alcanzar completamente el objetivo, la solución óptima consiste en llegar a un punto de equilibrio, i.e. el lugar más alto donde aún sea posible respirar.

El ímpetu de la corrección es otro punto importante a considerarse. Al inicio, es de esperarse que la corrección sea brusca, pero cerca del punto de convergencia, es necesario implementar un factor de atenuación para evitar oscilaciones. En ese sentido, se consideró un concepto similar al que cumple la temperatura en el método de ajuste de Temple Simulado [24]. Al inicio el factor de corrección será dado por el valor del



Figura 12. Posición de los receptores acústicos (en verde) y la fuente sonora (en rojo)

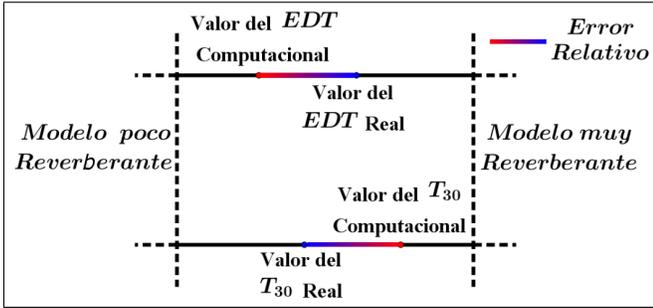


Figura 13. Error relativo en los parámetros EDT y T_{30} donde el extremo rojo representa el valor simulado y el extremo azul representa el valor real.

error relativo promedio en los parámetros de calidad acústica por banda de frecuencia dado por la Eq. 17.

$$\overline{Re}[b] = \frac{1}{o} \sum_{r=0}^o Re_{T_{30}[b][r]} + Re_{EDT[b][r]}, \quad (17)$$

donde, o es el número de receptores considerados. Con este valor, el coeficiente de absorción en la banda de octava b del material m en la k -ésima iteración estaría dado por

$$\alpha_k[m][b] = \alpha_{k-1}[m][b] + \alpha_{k-1}[m][b] \cdot \overline{Re}[b]. \quad (18)$$

A medida que el procedimiento avanza, el error relativo irá disminuyendo al igual que factor de corrección. Si se detecta alguna oscilación (es decir, la corrección de la k -ésima iteración produce el mismo resultado registrado en la iteración $k-2$), el valor de corrección se define como la diferencia entre los resultados de las iteraciones $k-2$ y $k-1$, como indica la Eq. 19

$$\alpha_k[m][b] = \alpha_{k-1}[m][b] + \frac{\alpha_{k-2}[m][b] - \alpha_{k-1}[m][b]}{2}. \quad (19)$$

El valor mínimo de corrección fue establecido en 0,01, ya que ningún material (en las bases de datos de coeficientes de absorción consultadas) registraba una tercera cifra decimal.

Cuando el valor de corrección en los coeficientes de absorción alcanza niveles inferiores a este valor mínimo en todas las bandas de frecuencia consideradas, se considera que el procedimiento iterativo alcanzó el punto de equilibrio.

Para monitorear la convergencia del procedimiento, la Eq. 20 permite identificar la variación del tiempo de reverberación T_R obtenido con la fórmula de Sabine. En las interacciones finales, la variación ΔT_R deberá tender a cero debido a que las variaciones de los coeficientes será sutil debido a la naturaleza del procedimiento,

$$\Delta T_{R_k} = T_{R_k} - T_{R_{k-1}}. \quad (20)$$

Finalmente, para conocer el porcentaje de cambio real P_{cr} que se produce en los coeficientes se debe considerar el área que cada material ocupa en la sala. Para esto se aplica una compensación de la siguiente manera

$$P_{cr} = P_c A_{mt}, \quad (21)$$

donde P_c es porcentaje de cambio en los coeficientes de absorción de una iteración con respecto a la anterior y A_{mt} es el porcentaje de área de la sala que ocupa cada material.

III-C. Parámetro de calidad acústico usados para validación

El proceso de validación final toma un PCA que no fue considerado para el ajuste de coeficientes. Este parámetro es el Tiempo central, T_s .

III-C1. Tiempo central T_s : El Tiempo central es usado para describir el balance entre la parte temprana y tardía de la respuesta impulsiva. Está definido por la Eq. 22 y permite conocer donde se encuentra el "centro de gravedad" de la función

$$T_s = \frac{\int_0^{\infty} tp^2(t)dt}{\int_0^{\infty} p^2(t)dt}. \quad (22)$$

En términos prácticos, el T_s sirve para medir el grado de nitidez del sonido. Un valor bajo corresponde a un sonido claro, mientras que un valor alto indica dominio del sonido tardío en consecuencia de la energía reverberante [25].

IV. RESULTADOS

Aplicando el procedimiento descrito en la Sección III-B, se alcanzaron resultados que evidencian una reducción de las diferencias existentes entre los parámetros calculados con datos medidos y con datos modelados computacionalmente. En las Tablas IV y V se muestra la evolución del error relativo promedio calculado con la Ec. 17 a lo largo de las nueve iteraciones que requirió el procedimiento para converger. Esta evolución muestra una minimización secuencial del error relativo promedio. Nótese que el ajuste realizado para la última iteración, no modificó los valores de los errores relativos encontrados en la penúltima iteración, evidenciándose la convergencia del procedimiento, con un error promedio de 0,00 %.

Tabla IV

ERRORES RELATIVOS PROMEDIO POR BANDA DE OCTAVA (bf) ENTRE LOS PCAS (EDT Y T_{30}) SIMULADOS Y MEDIDOS POR CADA ITERACIÓN (PARTE 1)

bf [Hz]	Ite. 0	Ite. 1	Ite. 2	Ite. 3	Ite. 4
125	0,21	-0,15	0,00	0,00	0,00
250	-0,40	0,45	-0,15	0,07	-0,06
500	-0,68	0,65	-0,07	0,04	0,04
1000	-0,73	0,38	0,10	0,01	0,01
2000	-0,68	0,12	0,12	0,11	0,10
4000	-0,60	-0,13	-0,08	-0,07	-0,06
Promedio	-0,48	0,22	-0,01	0,03	0,01

Tabla V

ERRORES RELATIVOS PROMEDIO POR BANDA DE OCTAVA (bf) ENTRE LOS PCAS (EDT Y T_{30}) SIMULADOS Y MEDIDOS POR CADA ITERACIÓN (PARTE 2)

bf [Hz]	Ite. 5	Ite. 6	Ite. 7	Ite. 8
125	0,00	0,00	0,00	0,00
250	-0,06	0,07	-0,06	-0,06
500	0,04	0,04	0,04	0,04
1000	0,01	0,01	0,01	0,01
2000	0,10	0,09	0,09	0,09
4000	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05
Promedio	0,01	0,03	0,00	0,00

La Tabla VI ilustra el proceso de ajuste, tomando como ejemplo el material de tipo *Telas* (aplicado a 24 superficies de contorno de la sala). Los valores de los coeficientes de absorción iniciales (en la primera iteración del proceso de optimización) son mostrados en la segunda columna. En la tercera columna se muestran los nuevos valores luego de aplicar la Ec. 18.

El comportamiento del proceso de optimización cuando se encuentra cerca del punto de convergencia se ilustra en la Tab. VII, tomando como ejemplo el material de tipo *Telón* (aplicado a 2 superficies de contorno de la sala). Aquí se detecta una oscilación en la banda de 250 Hz. Esto es, el ajuste que se produce en el coeficiente al aplicar la Ec. 18 para la iteración 6 (cuarta columna de la tabla), genera el mismo valor que se tenía en la iteración 4 (detallada en la segunda columna de la tabla). Por tal motivo, es aplicada la Ec. 19 obteniendo como resultado los valores que se encuentran en la quinta columna de la tabla.

Tabla VI

APLICACIÓN DE LA EC. 18 PARA OPTIMIZACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE ABSORCIÓN DEL MATERIAL *Cortinas*, EN LA ITERACIÓN $k = 1$

bf [Hz]	α_{k-1}	α_k	P_c [%]
125	0,03	0,04	33,33
250	0,12	0,07	41,67
500	0,15	0,05	66,67
1000	0,27	0,07	74,07
2000	0,37	0,12	67,57
4000	0,42	0,17	59,52
Promedio			57,14

Tabla VII

APLICACIÓN DE LA EC. 19 EN LA BANDA DE 250 HZ PARA OPTIMIZACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE ABSORCIÓN DEL MATERIAL *Telón*, EN LA ITERACIÓN $k = 6$.

f (Hz)	α_{k-2}	α_{k-1}	α_{kt}	α_k	Dif. [%]
125	0,06	0,06	0,06	0,06	0,00
250	0,09	0,10	0,09	0,10	0,00
500	0,17	0,18	0,19	0,19	5,56
1000	0,19	0,19	0,19	0,19	0,00
2000	0,15	0,17	0,19	0,19	11,76
4000	0,11	0,10	0,09	0,09	10,00
Promedio					4,55

Para conocer cual es el *porcentaje de cambio real* se aplicó la Ec. 21 y los resultados se pueden observar en la Fig. 14. Naturalmente, los materiales que experimentaron el mayor porcentaje de cambio fueron justamente aquellos que cubren superficies mas grandes dentro de la sala.

Dado que este proceso de optimización se basó en diferencias existentes entre los PCA (generados con datos medidos y simulados), a continuación se presentan los errores relativos que se calcularon al inicio y al final del ajuste. Los resultados que se presentan en la Fig. 15, muestran la mejoría obtenida considerando el parámetro T_{30} . Por ejemplo, en la banda de 1 kHz el error relativo presentaba desvíos del 36 % y al final se alcanza un desvío de apenas el 1 %, representando una disminución de 35 puntos porcentuales.

En la Figura 16 se considera el parámetro EDT . Aquí se puede verificar un comportamiento similar al que se obtuvo con el parámetro T_{30} . Considerando la misma banda de frecuencia (1 kHz), el procedimiento evidencia una reducción de 34 puntos porcentuales en el error relativo promedio.

Tomando en cuenta el T_s (el centroide de la respuesta impulsiva de la sala captada en cada receptor), un parámetro que no fue considerado para definir los ajustes aplicados en el procedimiento de optimización, también se evidencian mejoras importantes ilustradas en la Fig.17.

La Figura 18 muestra los valores calculados para el parámetro EDT para el receptor R_1 . Aquí se puede observar la evidente diferencia que existe entre los resultados de la simulación 1 y la simulación 9. Además es notable como el parámetro calculado en esta última simulación tiene un desvío del 5.5 % al dato real en todas las bandas de octava consideradas.

De forma análoga, la Fig. 19 presenta el parámetro T_{30} calculado con datos provenientes de la simulación 1, simulación 9 y las mediciones experimentales para el receptor R_2 . Nuevamente, los resultados de la simulación final se acercan

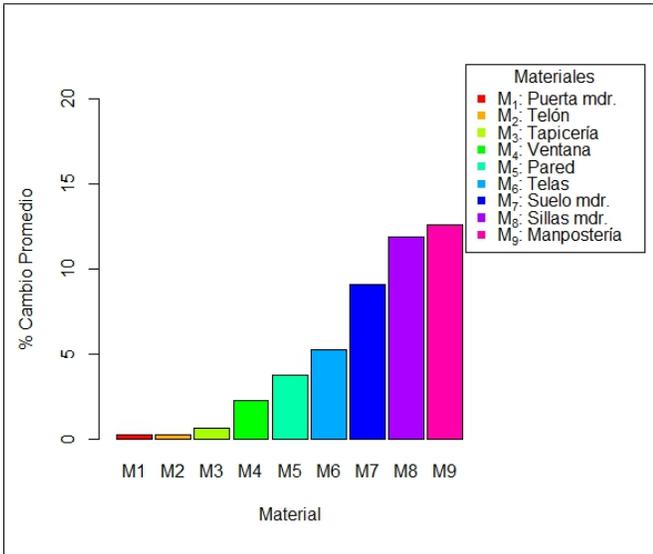


Figura 14. Porcentaje de cambio real de cada material

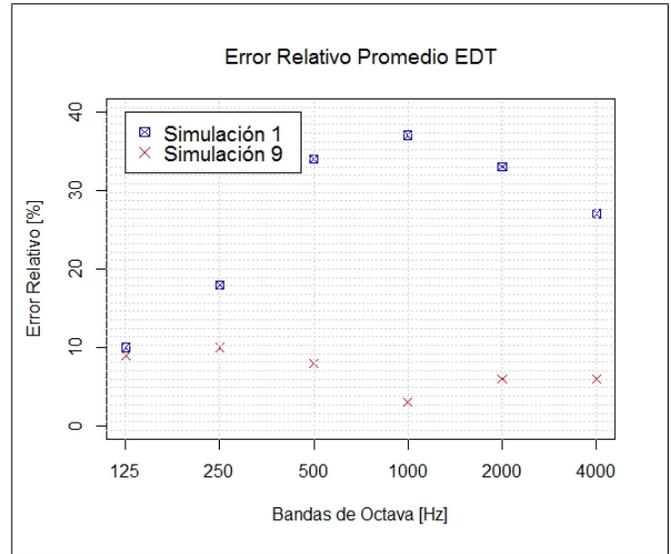


Figura 16. Error Relativo Promedio del EDT

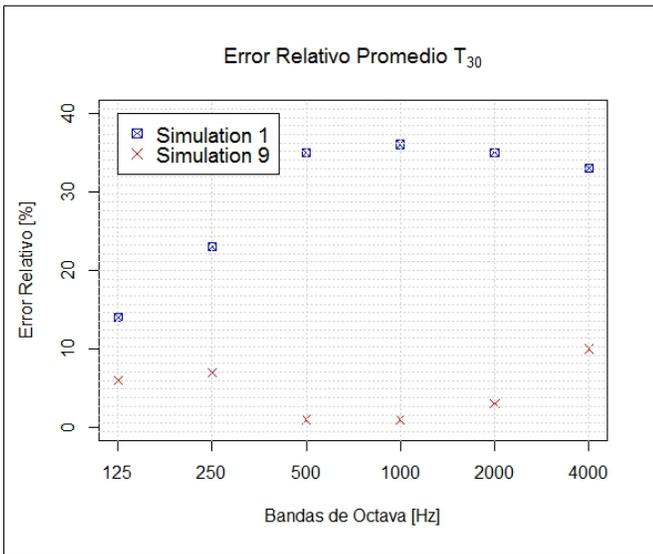


Figura 15. Error Relativo Promedio del T_{30}

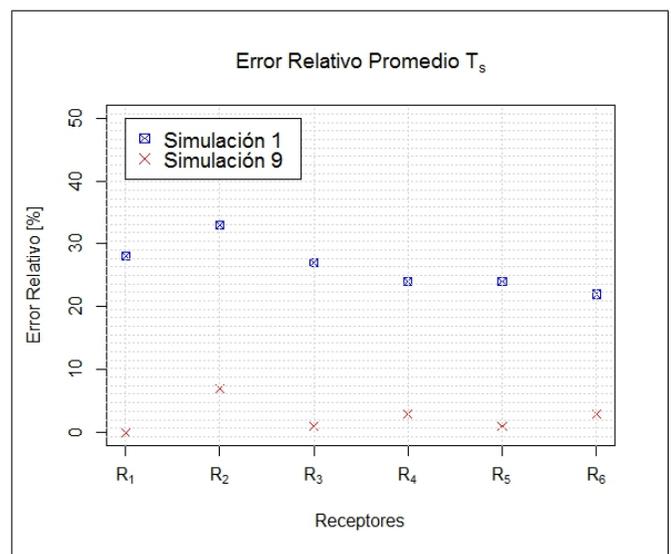


Figura 17. Error Relativo Promedio T_s

al parámetro calculado con datos medidos en todas las bandas de octava consideradas, lo cual contrasta con el resultado de la primera simulación.

Finalmente, la Fig. 20 muestra el comportamiento del parámetro T_s registrado en todos los receptores de la sala. Se puede observar nuevamente que la evidente evolución de los resultados obtenidos en la simulación 1 y la simulación 9, comparados con el valor real en todos los receptores de la sala.

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados presentados en la Sección IV evidencian la importancia que tienen los coeficientes de absorción en un sistema de simulación numérica acústica. Cuando estas variables de entrada son ajustadas, el simulador es capaz de producir respuestas impulsivas con las cuales se pueden calcular parámetros de calidad acústica muy similares a los que

se obtienen con datos medidos experimentalmente. Los errores porcentuales promedio observados en los parámetros EDT y T_{30} (ver Tabs. IV y V), muestran una reducción importante, pasando del 48 % (calculado en la primera iteración) al 0 % (en la última iteración).

También se evidencia que cerca del punto de convergencia, el procedimiento es exitoso para refinar el ajuste de los coeficientes. La Tabla VII, muestra la ocurrencia de una oscilación (es decir el procedimiento de ajuste produce un valor que ya se había alcanzado en iteraciones anteriores). Esta característica es similar al papel que cumple la “temperatura” en el método de “temple simulado”, limitando la magnitud de la corrección cuando el procedimiento está cerca de finalizar la optimización.

El procedimiento de optimización toma a los parámetros EDT y T_{30} como referencia para definir el valor de corrección en los coeficientes en cada banda de frecuencia. A pesar de es-

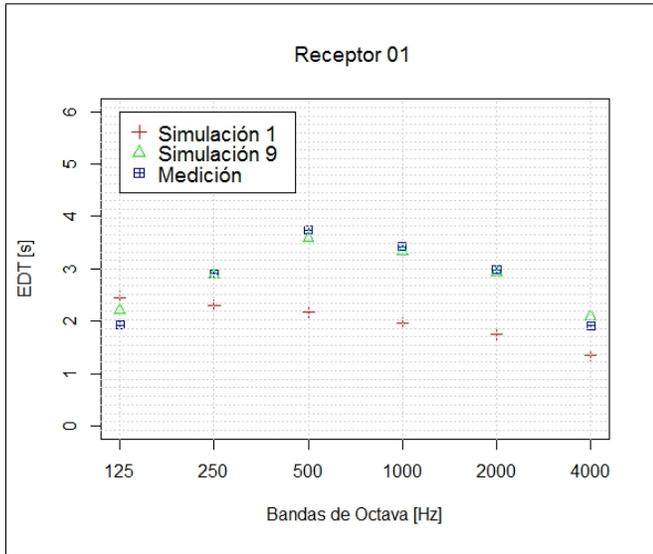


Figura 18. Comparación del EDT calculado en el receptor 1 con datos de mediciones experimentales (cuadrados), información de la simulación inicial (cruces) y resultados de la simulación final (triángulos).

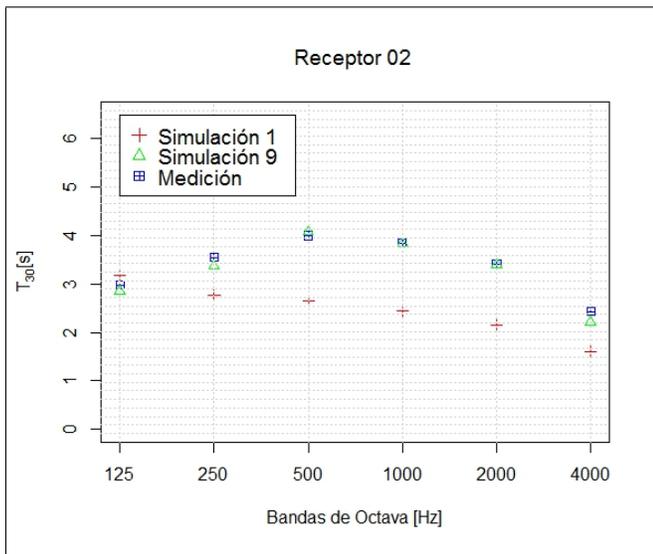


Figura 19. Comparación del T_{30} calculado en el receptor 1 con datos de mediciones experimentales (cuadrados), información de la simulación inicial (cruces) y resultados de la simulación final (triángulos).

to, se pudo observar que el T_s también mejoró sustancialmente reduciendo su error relativo promedio en todos los receptores de 26,27 % a 2,72 %.

El desempeño del procedimiento también fue comparado con estudio similares. Para el caso descrito en este trabajo, se usó una sala con un volumen de 5057,63 m³, con una fuente omnidireccional de la cual partieron 1×10^5 rayos, seis receptores distribuidos en diferentes lugares de la sala y nueve materiales distribuidos en un área de 3453,82 m². En el estudio realizado por C. L. Christensen [9], se usan fuentes que emiten 2×10^3 rayos, en una sala con un área de 937,6 m². Su método de ajuste es una optimización con algoritmos genéticos, mientras que el procedimiento aquí aplicado se puede describir como un ascenso de colinas modificado. Es

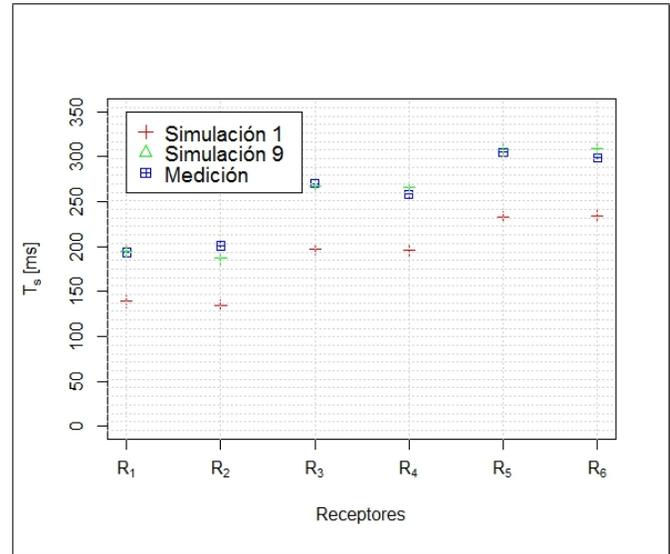


Figura 20. Comparación del T_s calculado en todos los receptores de la sala con datos de mediciones experimentales (cuadrados), información de la simulación inicial (cruces) y resultados de la simulación final (triángulos).

importante resaltar que, en comparación al otro estudio, el procedimiento descrito en este trabajo se desarrolla en una sala antigua (con evidentes deterioros por el paso del tiempo), con alta reverberación (aproximadamente 3.6 segundos), con una mayor complejidad geométrica, actuando sobre materiales distribuidos en un área 3.68 veces mas grande.

En la Tabla VIII se puede observar algunos datos comparativos entre el procedimiento de algoritmos genéticos (AG) y el algoritmo de ascenso de colinas modificado (ACM). En la primera fila, la diferencia en el ajuste de la última iteración para el promedio del EDT a 4 kHz en todos los receptores es de una centésima. Si tomamos los receptores que registran mayor desvío en el EDT, el promedio de error en todas las bandas de frecuencia muestran que el procedimiento AG alcanza el 3%, mientras que el ACM llega al 6%. No obstante, es importante señalar que los puntos de partida fueron diferentes. En el caso del método AG, el procedimiento reduce el error en 23 puntos porcentuales, mientras que el procedimiento ACM reduce el error en 28 puntos porcentuales. En el caso del T_{30} , se toma el receptor con desvío medio y se puede observar que el procedimiento ACM consigue una reducción de 24 puntos porcentuales, frente a la reducción de AG que es de 7 puntos porcentuales. Finalmente, para el T_s se tomó el receptor que poseía el segundo mayor desvío. En este caso se observa que ambos parten con el mismo error (28%), pero en la simulación final el procedimiento AG alcanza un error del 7%, mientras que el ACM llega al 0.44%. Es importante recordar, que el procedimiento ACM no considera el valor del T_s para definir el porcentaje de corrección.

VI. CONCLUSIONES

El presente trabajo es un abordaje de ascenso de colinas modificado para corregir coeficientes de absorción de materiales utilizados en una simulación numérica acústica. Dicho procedimiento está basado únicamente en los parámetros T_{30}

Tabla VIII
ERROR RELATIVO COMPARATIVO ENTRE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD ACÚSTICA

	AG		ACM	
	Simulación inicial	Simulación final	Simulación inicial	Simulación final
Promedio EDT a 4 kHz	31.76	4.52	26.43	5.52
Promedio global en receptor más desviado	27.14	2.96	34.40	6.16
Promedio T_{30} a 250 Hz	27.24	4.18	22.99	6.62
Promedio global en receptor con desvío medio	11.87	5.00	28.41	3.55
T_s global en 2do receptor más desviado	28.17	7.05	28.26	0.44

y EDT , alcanzando desvíos de aproximadamente 5,83% entre los PCAs medidos y simulados, lo cual contrasta con los valores iniciales, que presentaba un desvío promedio del 27,92%. A pesar de estar basado en apenas dos parámetros, el procedimiento también consigue ajustar otros parámetros tales como el T_s , el cual inicialmente presentaba un desvío promedio del 25,87% y alcanzó un 3,18% después de la última iteración de ajuste de coeficientes.

El procedimiento fue aplicado en una sala grande con un comportamiento acústico complejo (alta reverberación, superficies de contorno deterioradas por el tiempo). A pesar de eso, los resultados demuestran que la precisión del procedimiento es comparable con estudios que persiguen el mismo fin, usando procedimientos de optimización más complejos, pero aplicados en salas más sencillas.

Otros parámetros como el C_{50} y D_{80} , no fueron considerados porque la sala poseía elementos que favorecen a la difusión del sonido (las bancas de madera) y el procedimiento no incluye una optimización de los coeficientes de difusión. Esta particularidad será abordada en futuros trabajos, así como la inclusión de otros parámetros para definir el valor de corrección dentro del proceso de optimización.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero de la Escuela Politécnica Nacional al proyecto de investigación que permitió que este trabajo pueda realizarse. Así mismo, los autores agradecen la colaboración del Laboratorio de Instrumentación en Dinámica, Acústica y Vibraciones (LIDAV) que realizó las diversas mediciones experimentales acústicas del Teatro Anchieta.

REFERENCIAS

- [1] I. Bork, "A comparison of room simulation software-the 2nd round robin on room acoustical computer simulation," *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 86, no. 6, pp. 943-956, 2000.
- [2] M. Vorländer, *Auralization: fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [3] ISO3382, "Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters," *Acoustics*, 1997.
- [4] J.-J. Embrechts, "Sound field distribution using randomly traced sound ray techniques," *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 51, no. 6, pp. 288-295, 1982.
- [5] S. Dance and B. Shield, "The complete image-source method for the prediction of sound distribution in non-diffuse enclosed spaces," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 201, no. 4, pp. 473-489, 1997.
- [6] U. M. Stephenson, "Quantized pyramidal beam tracing-a new algorithm for room acoustics and noise immission prognosis," *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 82, no. 3, pp. 517-525, 1996.
- [7] D. Alarcão, J. B. Coelho, and R. Tenenbaum, "On modelling of room acoustics by a sound energy transition approach," in *Proc. of EEA symposium on architectural acoustics*. Madrid. Citeseer, 2000.
- [8] H. Kuttruff, *Room acoustics*. Crc Press, 2009.
- [9] C. L. Christensen, G. Koutsouris, and J. H. Rindel, "Estimating absorption of materials to match room model against existing room using a genetic algorithm," *Proceedings of Fourm Acusticum*, pp. 7-12, 2014.
- [10] Dalenbäck, *Datensatz der CATT-Software*. Data-Category in CATT: BRICK PLASTERED, C: Walls, D: Plastered, 2000.
- [11] C. Harris, *Noise Control in Buildings*. McGraw Hill, 1994.
- [12] Harris, *Handbook of Acoustical Measurements and Noise Control*. McGraw Hill, 1991.
- [13] A. Pilch, "Optimization in the validation of the room acoustic model," *Proceedings of EuroRegio*, 2016.
- [14] R. A. Tenenbaum, T. S. Camilo, J. C. B. Torres, and S. N. Gerges, "Hybrid method for numerical simulation of room acoustics with auralization: part 1-theoretical and numerical aspects," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 29, no. 2, pp. 211-221, 2007.
- [15] L. L. Beranek, "Acoustics," 1996.
- [16] D. Alarcão, J. Bento Coelho, and R. Tenenbaum, "On modeling of room acoustics by a sound energy transition approach," in *Proceedings of EEA Symposium on Architectural Acoustics*, 2000.
- [17] P. Brunet Crosa, F. J. Santistevy Puyuelo, A. Vilanova, L. Chiarabini, G. Patow, E. Staffetti, and J. Suriñach Caralt, "Estructuras geométricas jerárquicas para la modelización de escenas 3d," 1999.
- [18] A. C. Isbert, *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Univ. Politèc. de Catalunya, 1998, vol. 4.
- [19] H. Haas, "The influence of a single echo on the audibility of speech," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 20, no. 2, pp. 146-159, 1972. [Online]. Available: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=2093>
- [20] V. S. Gomez de Melo, "Inteligibilidade de salas de aula do ensino fundamental e avaliação de qualidade acústica via respostas biauriculares obtidas com cabeça artificial de dimensoes infantis," Ph.D. dissertation, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.
- [21] M. R. Schroeder, "New method of measuring reverberation time," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 37, no. 3, pp. 409-412, 1965.
- [22] M. Abad Sorbet, "Estudio acústico y electroacústico de la sala de conciertos ritmo y compás (madrid)," Ph.D. dissertation, E_Telecomunicacion, 2013.
- [23] R. A. Tenenbaum, T. S. Camilo, J. C. B. Torres, and L. T. Stutz, "Hybrid method for numerical simulation of room acoustics: part 2-validation of the computational code raios 3," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 29, no. 2, pp. 222-231, 2007.
- [24] S. P. Russell Norvig, *Artificial intelligence a modern approach*. Stéphane Deconinck, 2010.
- [25] A. Gade, "Acoustics in halls for speech and music," in *Springer handbook of acoustics*. Springer, 2007, pp. 301-350.



Gandhi S. Mora Guevara Estudiante egresado de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador (EPN). Fue ayudante de investigación en el área de simulación numérica acústica durante el periodo 2015-2016. Su trabajo se centró principalmente en técnicas de optimización para coeficientes de absorción acústica en modelos de recintos cerrados. Actualmente presta sus servicios profesionales en la EPN en calidad de Desarrollador e Investigador en Aprendizaje Automático.



Luis A. Bravo Moncayo Ingeniero Acústico por la Universidad Austral de Chile. Entre el 2003 y 2012 se desempeñó como coordinador académico de la carrera de Ingeniería en Sonido y Acústica en la Universidad de las Américas en Quito con funciones docentes, de gestión administrativa y de investigación. En 2006 obtuvo un Máster Executive en Gestión Integral: Calidad, Medio Ambiente y Prevención de Riesgos Laborales por la Escuela de Organización Industrial en Madrid, España. En 2009 obtuvo un título de Magíster en Administración de Empresas con mención en Marketing por la Universidad de las Américas. Actualmente cursa el programa de Doctorado en Ingeniería Acústica en la Universidad Politécnica de Madrid, y es docente de Acústica Ambiental y Metodología de Investigación en la Universidad de las Américas. Ha sido consultor en temas de control de ruido, acústica arquitectónica y ambiental en diferentes instituciones públicas y privadas en Ecuador.



José F. Lucio Naranjo Ingeniero en Sistemas y Computación por la Pontificia Universidad Católica del Ecuador (2005). Máster y Ph.D. en Modelado Computacional por la Universidad del Estado de Río de Janeiro (2010 y 2014 respectivamente). Su investigación doctoral fue reconocida y apoyada por la Acoustical Society of

América mediante ASA International Student Grant. Su principal campo de estudio está enfocado en técnicas de simulación numérica e inteligencia computacional aplicadas al modelado de la propagación acústica y a la generación de realidad virtual. Actúa como investigador y profesor titular de sistemas y computación en la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador (EPN) y también como profesor e investigador a tiempo parcial en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador (PUCE). También ha actuado como profesor en la Universidad del Estado de Río de Janeiro (UERJ), la Universidad Federal Fluminense, la Universidad de las Américas (UDLA) y la Universidad Central del Ecuador (UCE). Fue miembro de la Sociedad Brasileña de Acústica (SOBRAC).

Optimización con Colonia de Hormigas para la Planificación Óptima de la Fuerza de Trabajo

Ant Colony Optimization for Optimal Workforce Planning

Juan C. Pisco-Vanegas, Abraham A. Bayas-Zamora, Rodolfo Najarro Quintero
Amilkar Y. Puris Cáceres, Pavel Novoa-Hernández

Resumen— En este trabajo, el problema de la planificación de la fuerza de trabajo en empresas es enfocado como un modelo de optimización matemática. A partir de la complejidad y la naturaleza del modelo de dicho problema, se propone como método de solución la metaheurística Optimización con Colonias de Hormigas y una variante de este enfoque. Los experimentos computacionales desarrollados indican que la propuesta es efectiva en comparación con otros algoritmos del estado del arte.

Palabras Clave— Planificación de la fuerza de trabajo, metaheurísticas, optimización con colonia de hormigas.

Abstract— In this paper the problem of obtaining the Optimal Workforce Planning for enterprises is addressed as a mathematical optimization problem. Given the complexity and specific features of the corresponding optimization model, the Ant Colony Optimization metaheuristic was applied as the solution method. From computational experiments, we have shown the effectiveness of our proposal versus other state-of-art algorithms.

Index Terms— Workforce planning, metaheuristics, ant colony optimization.

I. INTRODUCCIÓN

LA planificación de la fuerza de trabajo (*Workforce Planning*) es una de las actividades más importantes y a la vez más difíciles de concretar en una empresa [1]. Las principales causas que justifican dicha complejidad son: el tamaño de la empresa (expresado a grosso modo, en número de trabajadores y operaciones) y la incertidumbre. En esencia, este problema se puede ver como un proceso de decisión que involucra elementos de personal (*staffing*) y planificación

(*scheduling*).

Planificar la fuerza de trabajo implica algunas características especiales que están ausentes en los demás tipos de problemas de asignación de recursos debido a que el entorno de decisión tiende a ser muy dinámico y los planificadores de la fuerza de trabajo se enfrentan a un conjunto muy heterogéneo de empleados, donde se deben tener en cuenta no solo las preferencias de los diferentes empleados y las limitaciones sindicales, sino también las diferentes habilidades que los trabajadores pueden poseer [1].

Dada la naturaleza cuantitativa de este escenario de decisión y su presencia desde el origen de la empresa misma, ha sido abordado desde varios enfoques de la Investigación de Operaciones (IO). De acuerdo a [2], los trabajos existentes se pueden clasificar en cuatro grandes grupos: 1) modelos de cadenas de Markov, 2) modelos de simulación por computadora, 3) modelos de optimización, y 4) gestión de cadena de suministros mediante dinámica de sistemas.

Los principales estudios se han realizado a partir de los modelos de optimización, enfatizando en las técnicas de Investigación de Operaciones como se presenta en [3], donde se realiza una recopilación de las principales variantes del problema WPP y las técnicas de solución utilizadas.

Pocos trabajos se han encontrado que propongan modelos de optimización basados en técnicas metaheurísticas [4] para el problema WPP mono objetivo. Solo en el trabajo [5] se presenta dos versiones paralelas de un Algoritmo Genético (AG) y del Recocido Simulado (RS) para reducir el costo computacional de la búsqueda y ofrecer mejores soluciones.

Los trabajos más recientes utilizan un enfoque multiobjetivo del problema con una visión más práctica del entorno de aplicación. Por ejemplo, en [6] se utilizan las metaheurísticas Colonia de Abejas y Evolución Diferencial y en [7] la metaheurística GRASP.

La presente investigación pretende contribuir al desarrollo teórico de una propuesta algorítmica para la solución del problema WPP mono objetivo. Concretamente se analizará de manera experimental, la metaheurística Optimización con Colonia de Hormigas (ACO) [8] y una variante de exploración en dos etapas (TS-ACO) [9] que ha sido aplicada a varios

Article history:

Received 01 March 2017

Accepted 22 May 2017

Los autores J.C. Pisco-Vanegas (jpisco@uteq.edu.ec), A. A. Bayas-Zamora (abayas@uteq.edu.ec), R. Najarro-Quintero (rnajarro@uteq.edu.ec), A. Puris Cáceres (apuris@uteq.edu.ec), y Pavel Novoa-Hernández (pnovoa@uteq.edu.ec) son docentes de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Av. Quito km. 1 1/2 vía a Santo Domingo de los Tsáchilas. Quevedo-Los Ríos-Ecuador. Tel: (+593) 5 3702-220 Ext. 8001

problemas de optimización combinatoria con similares características que el WPP y los resultados han sido prometedores [10].

Para una mejor comprensión de la investigación, el resto del trabajo queda organizado de la forma siguiente. En la Sec. II se define matemáticamente el problema de la planificación de la fuerza de trabajo. En la Sec. III se describen los fundamentos de la metaheurística Optimización con Colonia de Hormigas, variante dos etapas. La manera en que el modelo matemático de la Sec. II es transformado para su solución por parte de la técnica empleada, es descrito en la Sec. IV. Para validar la propuesta, se realizó el estudio experimental descrito en la Sec. V. Finalmente, en la Sec. VI se brindan las conclusiones principales que fueron obtenidas.

II. EL PROBLEMA DE LA PLANIFICACIÓN DE LA FUERZA DE TRABAJO

En el problema de Planeamiento de la Fuerza de Trabajo (Worker Planning Problem, WPP) [11] se tiene un conjunto de trabajos $J = \{1, \dots, m\}$ que deben completarse durante el próximo período de la planificación (por ejemplo, una semana). Cada trabajo j requiere un número de horas d_j durante el período de la planificación.

Dado el conjunto $I = \{1, \dots, n\}$ de obreros disponibles. La disponibilidad de cada obrero i durante el período de la planificación es s_i horas. Por las razones de eficiencia, un obrero debe realizar un número mínimo de horas (h_{min}) de cualquier trabajo al que se asigne y, al mismo tiempo, ningún obrero puede ser asignado a más de un número de trabajos (j_{max}) durante el período de la planificación.

Los trabajadores tienen diferentes habilidades, por lo tanto, sea A_i el conjunto de trabajos para los cuales el trabajador i está calificado para realizar. No más de t trabajadores pueden ser asignados durante el período de planeamiento. En otras palabras, a lo sumo t trabajadores pueden ser seleccionados del conjunto I de n trabajadores y el subconjunto seleccionado debe ser capaz de completar todos los trabajos. El objetivo es encontrar una solución factible que optimice la función objetivo. El término c_{ij} se utiliza como el costo de asignarle al trabajador i el trabajo j . Luego, el planteamiento matemático del problema quedaría como:

Variables de decisión

$y_i = \begin{cases} 1, & \text{si el trabajador } i \text{ es seleccionado} \\ 0, & \text{si no se selecciona el trabajador } i \end{cases}$

$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si se asigna el trabajador } i \text{ al trabajo } j \\ 0, & \text{si no se asigna el trabajador } i \text{ al trabajo } j \end{cases}$

z_{ij} , número de horas que tiene el trabajador i para desarrollar el trabajo j .

A_j , conjunto de trabajos para los cuales el trabajador i está calificado.

Q_j , conjunto de trabajadores calificador para realizar el trabajo j .

Función objetivo

$$\text{Minimizar } \sum_{i \in I} \sum_{j \in A_i} C_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in A_i} z_{ij} \leq s_i y_i, \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{j \in Q_j} z_{ij} \geq d_j, \quad \forall j \in J \quad (3)$$

$$\sum_{j \in A_j} x_{ij} \leq j_{MAX} y_i, \quad \forall i \in I \quad (4)$$

$$h_{MIN} x_{ij} \leq z_{ij} \leq s_i x_{ij} \quad \forall i \in I, \quad j \in A_i \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} y_i \leq t \quad (6)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \quad j \in A_i \quad (7)$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad (8)$$

$$z_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I, \quad j \in A_i \quad (9)$$

En este modelo, la función objetivo (1) minimiza el costo de la asignación total. La restricción (2) limita el número de horas para cada trabajador seleccionado. Si el obrero no es escogido, entonces esta restricción no permite ninguna asignación de horas al trabajador. La restricción (3) enfatiza en los requisitos del trabajo, como ha sido especificado el número de horas necesitado completar cada trabajo durante el período de la planificación. La restricción (4) pone límite al número de veces que un trabajador puede ser asignado a realizar trabajos. La restricción (5) limita el mínimo de horas que un trabajador puede ser asignado a laborar en un trabajo, o sea, una vez asignado el trabajador debe realizar un número mínimo de horas; también esta restricción no permite que se le asignen horas de trabajo a un trabajador que no ha sido seleccionado para realizar un trabajo. La restricción (6) limita el número de obreros escogido durante el período planeando.

III. OPTIMIZACIÓN BASADA EN COLONIA DE HORMIGAS EN DOS ETAPAS

La metaheurística Optimización basada en Colonia de Hormigas (Ant Colony Optimization, ACO) [12] es un modelo que imita el comportamiento de las hormigas en su ambiente natural, específicamente la habilidad que presentan en la búsqueda de sus alimentos. Desde su surgimiento en la década de los 90, ha sido utilizada para la solución de numerosos problemas de optimización combinatoria, como el Viajante de Comercio (*Travelling Salesman Problem*) [13], Ordenamiento Secuencial (*Sequential Ordering Problem*) [14], Ruteo de Vehículos (*Vehicle Routing Problem*) [15], Asignación Cuadrática (*Quadratic Assignment Problem*) [16], Redes de Telecomunicaciones (*Telecommunications Networks*) [12] entre otros.

Por su parte la Optimización basada en Colonia de Hormigas en dos Etapas [17], es una variante de exploración para los algoritmos de la metaheurística ACO, que se basa en el principio de Divide y Vencerás. Esta alternativa divide el proceso de exploración en dos fases, en la primera, solo un subconjunto de la colonia se utiliza para explorar una parte del problema, luego las mejores soluciones encontradas en esta

etapa, forma los estados de partida, donde las restantes hormigas de la colonia, inician su recorrido hasta completar las soluciones. Este mecanismo ha demostrado mejorar la eficiencia de los algoritmos ACO y ha sido probado en varios problemas de estudio [17] [18].

En su estructura, se utiliza un parámetro $r \in (0,1)$ que representa la dimensión de la exploración en cada etapa. Para ello, este parámetro afecta directamente, al tamaño de la colonia, la dimensión del problema y la condición de parada del algoritmo. La Fig. 1 muestra el pseudocódigo general de la estrategia. Donde los parámetros cs representa la condición de parada del algoritmo, m la cantidad de hormigas y nn el tamaño de las soluciones.

Algoritmo TS-ACO
<p>parámetros (factor (r), cantidad de soluciones parciales almacenadas (ns))</p> <p>Etapa 1. Exploración</p> <p><i>Paso 1:</i> Calcular los parámetros para la primera etapa</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.1 $m1 = \text{round}(r * m)$ (cantidad de hormigas) 1.2 $cs1 = \text{round}(r * cs)$ (cantidad de iteraciones) 1.3 $nn1 = \text{round}(r * nn)$ (magnitud o tamaño de las soluciones) <p><i>Paso 2:</i> Aplicar un algoritmo ACO utilizando ($m1$, $cs1$, $nn1$) donde:</p> <ol style="list-style-type: none"> 2.1 las $m1$ hormigas parten de un estado seleccionado de forma aleatoria. 2.1 construyen soluciones de tamaño $nn1$ 2.3 el algoritmo se aplica $cs1$ iteraciones <p><i>Paso 3:</i> Almacenar las ns mejores sub soluciones encontradas</p> <p>Etapa 2. Intensificación</p> <p><i>Paso 1:</i> Calcular los parámetros para la segunda etapa.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.1 $m2 = m - m1$ (cantidad de hormigas) 1.2 $cs2 = cs - cs1$ (cantidad de iteraciones) 1.3 $nn2 = nn - nn1$ (magnitud o tamaño de las soluciones) <p><i>Paso 2:</i> Aplicar un algoritmo ACO utilizando ($m2$, $cs2$, $nn2$,) donde:</p> <ol style="list-style-type: none"> 2.1 las $m2$ hormigas se ubican aleatoriamente en una sub solución entre las ns obtenida en la etapa 1 2.2 incorporan a cada solución los restantes $nn2$ estados. 2.3 el algoritmo se aplica $cs2$ iteraciones <p>Fin_TS-ACO</p>

Fig 1. Estrategia de exploración en dos etapas TS-ACO.

Aplicar esta estrategia a la exploración de los algoritmos ACO trae consigo algunas ventajas, como son [9]:

- 1- Presenta menor complejidad computacional.
- 2- Tiene bien delimitado los mecanismos de exploración y explotación.
- 3- Mayor robustez, porque permite aplicar en cada etapa un algoritmo ACO diferente.

Como desventaja se puede evidenciar que no es aplicable a todo tipo de problema combinatorio. Este debe de separable y

brindar la posibilidad de evaluar soluciones en cualquier etapa del proceso de construcción.

IV. MODELO COMPUTACIONAL DE LA PROPUESTA

Para aplicar la estrategia TS-ACO al problema de Planificación de la Fuerza de Trabajo es necesario definir 4 aspectos fundamentales:

La representación del problema en forma de grafo: la estructura de las instancias del problema contiene entre otras cosas una matriz de costos C , donde las filas representan trabajadores y las columnas los trabajos. Bajo esta representación, una celda $C_{ij} = 0$ determina que el trabajador i no está capacitado para realizar el trabajo j , por lo que no puede formar parte de una solución. Bajo este supuesto, se construye un grafo $G=(N,A)$, donde los nodos N representan las celdas de la matriz de costos (*trabajador-trabajo*) y los arcos (A) la posibilidad de alcanzar otra celda. Los nodos que identifican celdas con $C_{ij} > 0$ se encuentran totalmente conexo, mientras que los nodos con costo 0 se encuentran aislados (sin conexión). Con esta representación las hormigas pueden moverse por el grafo construyendo una solución que garantice asignaciones consistentes.

La representación de los rastros de feromona o información memorística de la colonia: Para los rastros de feromona se emplea una matriz cuadrada $N \times N$, donde N representa la cantidad de nodos del grafo. Los valores en la matriz determinan la preferencia de la colonia de hormigas por asignar un trabajador a un trabajo. Los nodos inaccesibles estarán representados por el valor 0 en dicha matriz de feromona.

Función heurística o de visibilidad de la colonia: Este elemento es elemental para el buen desempeño del algoritmo y luego de algunos estudios se definió por la ecuación (10):

$$\eta_{p,k} = 1 - \frac{|T_{TRABAJADOR(p)} - T_{TRABAJO(k)}|}{C_{pk}} \quad (10)$$

donde $T_{TRABAJADOR(p)}$ representa el tiempo disponible que le queda al trabajador p para terminar su jornada, mientras que $T_{TRABAJO(k)}$ determina el tiempo que le queda al trabajo k para ser completado (esta información está disponible en las instancias que se utilizan en el análisis experimental). Como se puede apreciar, esta función favorece la asignación que conlleve a reducir el tiempo de terminación tanto de los trabajadores como de los trabajos pendientes, teniendo en cuenta el costo de la asignación.

Selección del Algoritmo ACO: Dentro de esta meta heurística existen varios algoritmos documentados, en nuestro caso seleccionamos el algoritmo Max-Min Ant System, por ser de los más utilizados en el estado del arte. Este algoritmo introduce una mejora al algoritmo Ant System para controlar la convergencia prematura. Para ello, utiliza una cota superior e inferior que controlan que los valores de feromona, (ver ecuación 11):

$$\begin{aligned} \tau_{MAX} &= 1/(1 - CEvap) * 1/Cost(S) \\ \tau_{MIN} &= \tau_{MAX}/10 * Nt \end{aligned} \quad (11)$$

20	20	10	1000	54	3	4													
0	0	0	0	0	0	32	0	36	0	52	40	0	56	0	36	0	0	0	0
0	39	0	0	0	51	27	0	0	0	0	0	0	0	35	37	0	0	0	0
0	38	43	0	0	0	0	0	0	41	55	50	55	55	35	0	0	61	0	0
0	0	0	0	45	0	0	63	34	0	57	50	0	0	36	0	0	0	35	0
0	0	0	59	0	57	0	58	0	46	0	44	55	0	0	43	41	0	41	0
0	0	45	0	49	60	40	0	0	47	57	0	0	63	0	39	47	0	42	0
40	0	0	0	0	52	0	57	0	37	0	0	49	54	0	0	0	0	0	57
0	0	0	49	44	0	0	0	0	0	53	0	0	0	36	0	41	59	0	0
38	0	0	0	0	0	33	0	0	0	0	0	0	0	33	32	0	60	34	0
0	0	40	0	0	0	37	61	0	48	0	48	59	58	45	0	42	63	47	58
0	0	0	0	41	58	0	65	0	45	64	49	60	0	46	40	0	69	38	0
0	0	39	0	44	61	39	0	44	50	57	47	0	0	0	38	0	0	42	62
45	0	37	0	45	0	39	62	38	44	0	53	58	61	0	0	44	0	0	0
0	34	0	0	0	0	0	53	0	0	0	0	0	0	32	0	38	0	37	57
0	40	34	0	0	52	29	61	37	0	0	44	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	56	0	0	41	0	0	0	0	0	35	0	41	0	39	60
0	0	0	0	0	0	0	0	37	42	55	46	0	0	0	0	0	57	0	57
0	0	37	58	0	52	0	0	35	0	62	0	53	0	0	39	0	0	0	63
46	47	48	0	0	55	0	62	0	0	63	48	63	63	46	0	0	64	43	60
0	0	0	0	0	0	0	0	0	35	0	46	0	54	0	0	0	55	0	0
20																			
16																			
16																			
32																			
20																			
32																			
12																			
36																			
16																			
20																			
40																			
16																			
36																			

Fig 2. Esquema de una instancia del problema WPP.

TABLA I.
PARÁMETROS UTILIZADOS EN EL ESTUDIO EXPERIMENTAL.

	m	cs	nn	r	ns	CEvap	α	β
MMAS	20	Cantidad de iteraciones 1000	Todas las tareas terminadas	-	-	0.7	2	3
TS-MMAS	20	Cantidad de iteraciones 1000	Todas las tareas terminadas	0.2	10	0.7	2	3
P-TS-MMAS	20	Cantidad de iteraciones 1000	Todas las tareas terminadas	0.2	-	0.7	2	3

donde $CEvap$ representa la constante de evaporación de la feromona, $Cost(S)$ el valor del costo de la mejor solución (S) encontrada por el algoritmo y Nt la cantidad de trabajadores utilizados en la instancia. Otro elemento importante que incorpora el algoritmo *Max-Min Ant System* es la manera en que actualiza los rastros de feromona. La ecuación (12) se utiliza para disminuir (proceso de evaporación) los valores de la matriz τ y la ecuación (13) aumenta dicho valor en los componentes de la solución S , con un valor proporcional al costo de esta ($Cost(S)$).

$$\tau_{ij} = (1 - CEvap) * \tau_{ij} \quad (12)$$

$$\tau_{rs} = \tau_{rs} + Cost(S), \forall a(r, s) \in S \quad (13)$$

Por último, el algoritmo utiliza una función de transición de estado para que cada hormiga se desplace por el grafo construyendo su solución. Dicha función (ecuación 14) determina un valor probabilístico para cada estado vecino N_i^k , utilizando para ello la información heurística y el valor de feromona, donde α y β representan parámetros de influencia del algoritmo.

$$p_{ij} = \frac{(\tau_{ij})^\alpha * (\eta_{ij})^\beta}{\sum_{j \in N_i^k} (\tau_{ij})^\alpha * (\eta_{ij})^\beta}, \forall j \in N_i^k \quad (14)$$

En este trabajo se estudia además una variante de la exploración en dos etapas basada en feromona (P-TS-MMAS), en la cual no se almacenan las mejores ns soluciones encontradas en la primera etapa, por lo cual, las hormigas que exploran en la segunda etapa comienzan de un nodo del grafo seleccionado aleatoriamente como sucede con las hormigas de la primera etapa. Lo único que se reutiliza es la información memorística almacenada en la matriz de feromona reduciendo de esta forma los niveles de intensificación del algoritmo aumentando la exploración en la segunda etapa.

En términos algorítmicos la variante P-TS-ACO aplica los mismos pasos que el algoritmo TS-ACO descrito en la Fig. 1 omite el paso 3 de la etapa 1 y los pasos 2.1 y 2.2 de la etapa 2.

V. ESTUDIO EXPERIMENTAL

TABLA II.
RESULTADOS DE CADA ALGORITMO INVOLUVRADO EN EL ESTUDIO

Instancia	MMAS	TS-MMAS	P-TS-MMAS	AG	RS
s20_01	892.9	923.8	897.7	963	939
s20_02	956	965.5	944	994	952
s20_03	959	983.8	972.2	1156	1095
s20_04	994.3	1022.1	951.5	1201	1043
s20_05	1013	1038.5	993.9	1098	1099
s20_06	950.3	962.6	978.9	1193	1076
s20_07	963.7	971.1	934.2	1086	987
s20_08	1073.3	1083.5	994	1287	1293
s20_09	938.8	980.4	909.9	1107	1086
s20_10	891.3	915.8	890.5	1086	945
u20_01	1280.9	1307.1	951.9	1631	1586
u20_02	1061.1	1167.4	960.1	1264	1276
u20_03	1065.8	1120.4	1025.1	1539	1502
u20_04	1207.9	1357.1	1023	1603	1653
u20_05	1021.3	1195.5	969.2	1356	1287
u20_06	1088.7	1068.9	1016.4	1205	1193
u20_07	993.5	1096.8	970.5	1301	1328
u20_08	1308.7	1257.9	940.7	1106	1141
u20_09	821.3	864.4	832.4	1173	1055
u20_10	964.6	997.1	945.2	1214	1178

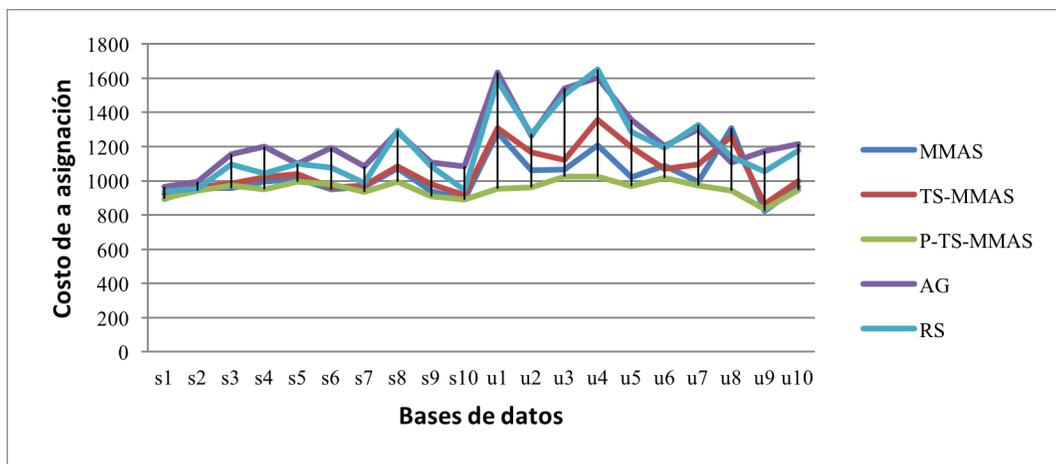


Fig 3. Resultados comparativos entre los algoritmos considerados.

TABLA III.
RESULTADOS DEL TEST DE HOLM

	AG		RS		MMAS		TS-MMAS	
	Valor p	$\alpha/4$	Valor p	$\alpha/3$	Valor p	$\alpha/2$	Valor p	$\alpha/1$
P-TS-MMAS	2.0841E-11	0.0125	1.1980E-08	0.0166	4.6525E-04	0.025	0.1095	0.05

Para el estudio experimental, se implementó¹ el algoritmo Max-Min Ant System de la meta heurística ACO y además de las dos alternativas de la exploración en dos etapas TS-MMAS y P-TS-MMAS presentadas anteriormente. Las instancias utilizadas se obtuvieron de [5] así como los resultados de un Algoritmo Genético y el Recocido Simulado en su versión secuencial.

A continuación, se presenta una breve descripción de las instancias utilizadas (ver Fig. 2):

- 1- La primera fila representa por su orden; el número de trabajadores, número de trabajos, número máximo de trabajos que puede contener una solución, un dato que no se utiliza, tiempo máximo que puede ser asignado un trabajador, máximo número de tareas que puede realizar un trabajador, tiempo mínimo que puede ser asignado un trabajador.
- 2- Segundo, una matriz de costo de orden cantidad de trabajadores x cantidad de trabajos, donde el valor cero significa que el trabajador no está calificado para realizar dicho trabajo, como se había explicado anteriormente.

¹ El código fuente está desarrollado en java y puede ser entregado a petición de los interesados con los autores.

3- Por último, el vector columna que aparece representa la duración de los trabajos en cuanto a tiempo.

Por su parte la Tabla I muestra los parámetros utilizados por cada algoritmo propuesto en este trabajo. Estos valores fueron el resultado de un estudio de parámetros más extenso.

La Tabla II muestra los valores promedio sobre 25 ejecuciones independientes de cada algoritmo propuesto, así como los presentados en [5].

Además, se realizó un análisis estadístico para determinar si las diferencias obtenidas a favor del P-TS-MMAS son realmente significativas. Para ellos se aplicó el test no paramétrico de Friedman [19] para k muestras relacionadas con un valor de significancia de 0.05 donde el valor p obtenido ($3.8339E-11$) determina que existen diferencias significativas en el grupo.

Seguidamente se aplicó el test de comparaciones múltiples de Holm [20] tomando como muestra de control el algoritmo P-TS-MMAS y aplicándose sucesivas comparaciones con cada uno de los algoritmos restantes para un $\alpha = 0.05$, donde la aparición de un valor p menor que su correspondiente α/i , determina la existencia de diferencias significativas a favor del algoritmo de control.

Para este caso de estudio, se puede apreciar en la Tabla III, que el algoritmo P-TS-MMAS es mejor significativamente que las dos variantes de referencia (Algoritmo Genético y Recocido Simulado) y que la propuesta MMAS. Solo no supera significativamente los resultados de la otra variante de la exploración en dos etapas estudiada en este trabajo.

Estos resultados demuestran que la exploración en dos etapas aumenta el nivel de exploración del espacio de búsqueda, garantizando soluciones de mejor calidad en el escenario de estudio.

VI. CONCLUSIONES

Como resultado de este trabajo se logró realizar una modelación del Problema de Planeamiento de las Fuerzas de Trabajo que permitió la aplicación de la Meta-heurística ACO específicamente el algoritmo MMAS. En este modelo se definió una función heurística que dirige la exploración hacia los estados con menor tiempo de terminación teniendo en cuenta los costos de dicha asignación.

Por otra parte, se presentó una modificación a la estrategia de exploración en dos etapas, la cual no utiliza implícitamente las mejores sub soluciones obtenidas en la primera etapa, solo la información memorística almacenada en la matriz de feromona. Esta modificación garantiza aumenta los niveles de exploración en la segunda etapa, obteniendo los mejores resultados en el análisis comparativo realizado para un conjunto de 20 instancias del problema.

En el análisis estadístico desarrollado se pudo constatar que los resultados obtenidos por P-TS-MMAS son significativamente mejores que dos algoritmos de referencia del estado de arte (Algoritmo Genético y Recocido Simulado), así como la versión original del MMAS.

Como líneas futuras se plantea estudiar mecanismos auto-adaptativos que posibiliten el ajuste de los parámetros decisivos de la metaheurística durante la ejecución. Existen evidencias sólidas [21], [22] que indican que este tipo de

técnica de control de parámetros resulta efectiva en contextos complejos como el tratado en el presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] P. De Bruecker, J. Van den Bergh, J. Beliën, and E. Demeulemeester, "Workforce planning incorporating skills: State of the art," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 243, no. 1, pp. 1–16, 2015.
- [2] J. Wang, "A review of operations research applications in workforce planning and potential modelling of military training," DSTO, 2005.
- [3] E. D. Philippe De Bruecker, Jorne Van den Bergh, Jeroen Beliën, "Workforce planning incorporating skills: State of the art," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 243, no. 1, pp. 1–16, 2015.
- [4] I. Boussaid, J. Lepagnot, and P. Siarry, "A survey on optimization metaheuristics," *Inf. Sci. (Nijl)*, vol. 237, pp. 82–117, 2013.
- [5] E. Alba, G. Luque, and F. Luna, "Parallel metaheuristics for workforce planning," *J. Math. Model. Algorithms*, vol. 6, no. 3, pp. 509–528, 2007.
- [6] K. M. Iman Fozveh, Hooman Salehi, "Presentation of Multi-Skill Workforce Scheduling Model and Solving the Model Using Meta-Heuristic Algorithms," *Mod. Appl. Sci.*, vol. 2, no. 10, pp. 194–205, 2016.
- [7] E. M. G.-N. Diego Novoa, Camilo Olarte, David Barrera, "A GRASP-based approach to the multi activity combined timetabling and crew scheduling problem considering a heterogeneous workforce," *Int. J. Ind. Eng. Comput.*, vol. 7, no. 4, pp. 597–606, 2016.
- [8] M. Dorigo and T. Stützle, *Ant colony optimization*. MIT Press, 2004.
- [9] A. Puris, "Desarrollo de meta-heurísticas poblacionales para la solución de problemas complejos," Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, 2010.
- [10] A. Puris, R. Bello, and F. Herrera, "Analysis of the efficacy of a Two-Stage methodology for ant colony optimization: Case of study with TSP and QAP," *Expert Syst. Appl.*, vol. 37, no. 7, 2010.
- [11] T. Glover, F. Kochenberger, G. Laguna, M. Wubben, "Selection and assignment of a skilled workforce to meet job requirements in a fixed planning period," in *MAEB*, 2004, pp. 636–641.
- [12] M. Dorigo, M. Birattari, and T. Stützle, "Ant colony optimization," *IEEE Comput. Intell. Mag.*, vol. 1, no. 4, pp. 28–39, Nov. 2006.
- [13] A. Puris, R. Bello, Y. Martínez, and A. Nowe, *Two-stage ant colony optimization for solving the traveling salesman problem*, vol. 4528 LNCS, no. PART 2. 2007.
- [14] L. M. Gambardella and M. Dorigo, "HAS-SOP: Hybrid Ant System For The Sequential Ordering Problem." 1997.
- [15] J. E. Bell and P. R. McMullen, "Ant colony optimization techniques for the vehicle routing problem," *Adv. Eng. Informatics*, vol. 18, no. 1, pp. 41–48, 2004.
- [16] T. Stützle and H. H. Hoos, "MAX-MIN Ant System," *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 16, no. 8, pp. 889–914, 2000.
- [17] A. Puris, R. Bello, and F. Herrera, "Analysis of the efficacy of a Two-Stage methodology for ant colony optimization: Case of study with TSP and QAP," *Expert Syst. Appl.*, vol. 37, no. 7, pp. 5443–5453, 2010.
- [18] R. Bello, A. Puris, A. Nowe, Y. Martínez, and M. M. García, "Two step ant colony system to solve the feature selection problem," in *PROGRESS IN PATTERN RECOGNITION IMAGE ANALYSIS AND APPLICATIONS PROCEEDINGS*, 2006, vol. 4225, pp. 588–596.
- [19] G. G. Brunk, "A test of the Friedman-Savage gambling model," *Q. J. Econ.*, vol. 96, no. 2, pp. 341–348, 1981.
- [20] S. García, D. Molina, M. Lozano, and F. Herrera, "A study on the use of non-parametric tests for analyzing the evolutionary algorithms' behaviour: a case study on the CEC'2005 Special Session on Real Parameter Optimization," *J. Heuristics*, vol. 15, pp. 617–644, 2009.
- [21] P. Novoa-Hernández, C. C. Corona, and D. A. Pelta, "Self-adaptive, multipopulation differential evolution in dynamic environments," *Soft Comput.*, vol. 17, no. 10, pp. 1861–1881, Mar. 2013.
- [22] P. Novoa-Hernández, C. C. Corona, and D. A. Pelta, "Self-adaptation in dynamic environments - a survey and open issues," *Int. J. Bio-Inspired Comput.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–13, 2016.



Juan Carlos Pisco Vanegas. Es docente de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Los Ríos, Ecuador. Es Licenciado y Máster en Tecnologías en las ramas de Electromecánica, Electrotecnia y Electrotecnología (SPBGPU).

por la Universidad de Granada (España). Ha sido Profesor Auxiliar en la Universidad de Holguín en el período 2007-2015. Sus intereses investigativos, relacionados con la Soft Computing, incluyen: problemas dinámicos de optimización, meta-heurísticas, problemas de optimización multi-objetivo, entre otros.



Abraham A. Bayas-Zamora. Es profesor de Física y Álgebra de la facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Recibió el grado de Ingeniero Civil, especialidad estructuras en la Universidad Técnica de Ambato, y en el año 2016 el grado de Magister en Gerencia de Innovaciones Educativas en la Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Se inició como docente en la Facultad de Ingeniería Agronómica en la Universidad técnica de Ambato, luego se desempeñó como Docente de Matemáticas y Física en el Sistema Nacional de Nivelación y Admisión del Ecuador (Senescyt). El principal interés ha sido la docencia, aunque también ha dedicado su tiempo a la producción y mejoramiento del cacao CNN51.



Rodolfo Najarro Quintero. Es Ingeniero Mecánico por el Instituto Politécnico José A. Echevarría, La Habana, Cuba 1997. Se Diplomó en Marketing Internacional por la Universidad de La Habana, Cuba 1999. En 2015 obtuvo el título de Master en Conectividad y Redes de Ordenadores por la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador. Es docente de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo.



Amilkar Puris Cáceres. Ph.D. en Ciencias Técnicas por la Universidad Marta Abreu de las Villas, Cuba. Sus principales investigaciones han sido en el área de las Meta-heurísticas Poblacionales para la solución de problemas complejos. Actualmente se desempeña como docente e investigador en la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador.



Pavel Novoa-Hernández. Actualmente trabaja como Profesor Agregado de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Los Ríos, Ecuador, y como Profesor Invitado en la Universidad Estatal de Milagro. Es Ingeniero Informático por la Universidad de Holguín (Cuba) desde el 2007. Obtuvo el título de Master en Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial por la Universidad Central de Las Villas (Cuba), en el 2010. En el 2013 obtuvo el grado de Doctor (Ph.D) en Tecnologías de la Información y la Comunicación

Published by:

Escuela Politécnica Nacional
Facultad de Ingeniería de Sistemas
Departamento de Informática y Ciencias de la Computación
Ecuador

<http://lajc.epn.edu.ec/>
lajc@epn.edu.ec

May 2017

