

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

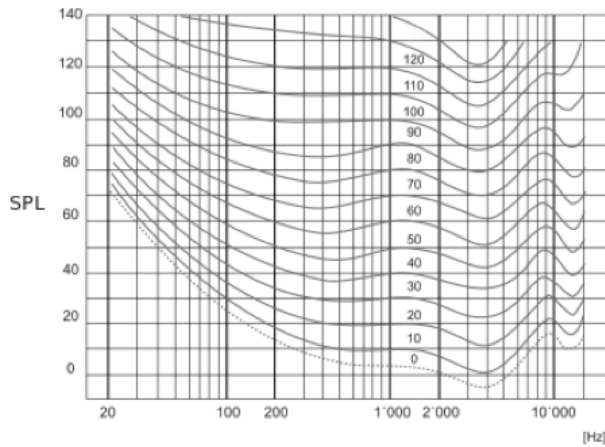


Fig. 1. Curvas isofónicas de Fletcher & Munson (1933) [7]

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 sensoneural 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.

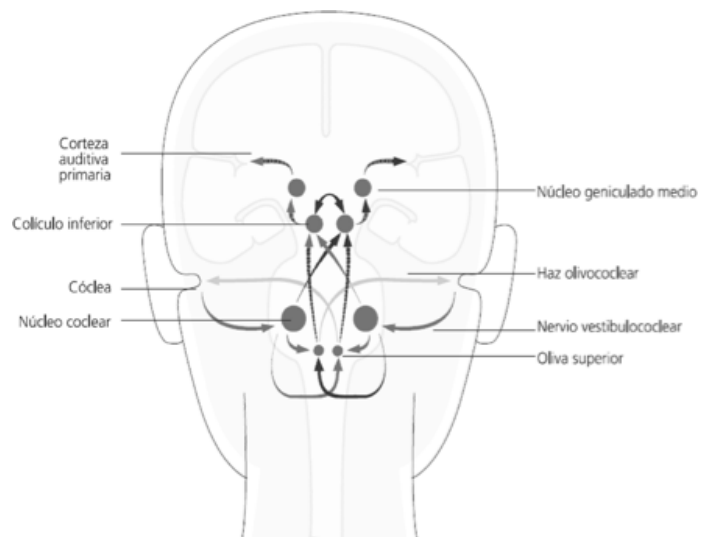


Fig. 2. Representación esquemática de la vía auditiva [7]

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.

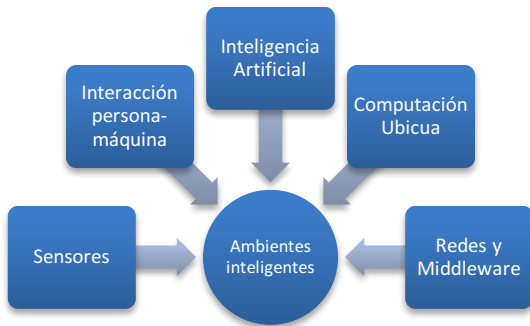


Fig. 3. Interacción de disciplinas en AmI. [9]



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

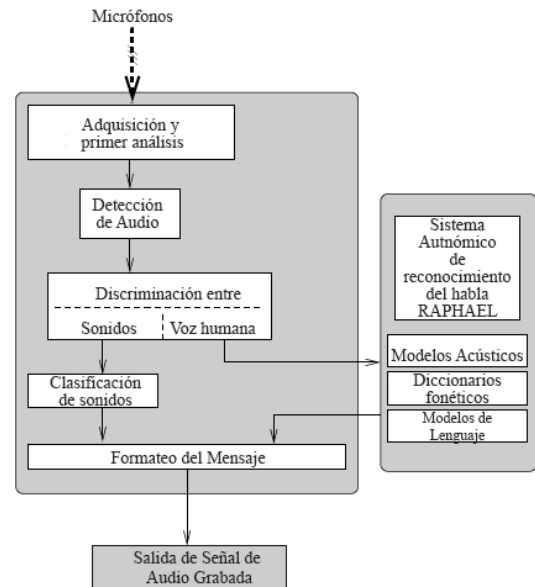


Fig. 5. Organización del sistema de registro de la señal acústica. [15]

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.

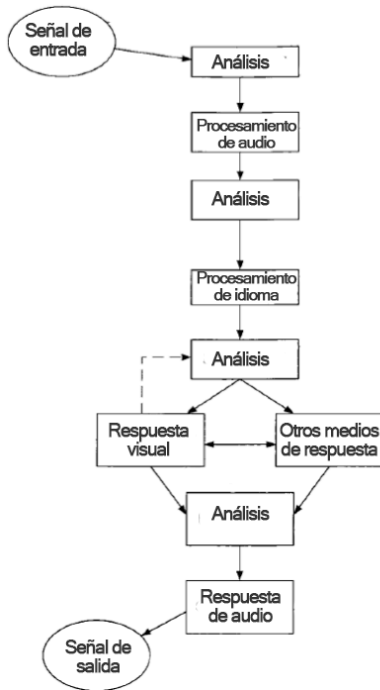


Fig. 6. Diagrama funcional de un agente acústico. [16]

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.

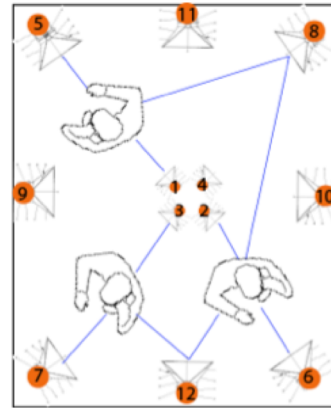


Fig. 7. Sistema de atractores. [19]

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).

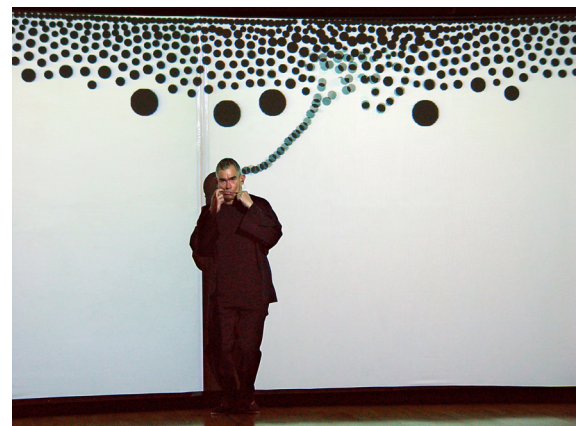


Fig. 8. Vocalista en *Messa di Voce* y resultado gráfico de la ejecución [20]

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