



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA
CAMPO DE CONOCIMIENTO: TECNOLOGÍA

SIMULADOR VIRTUAL DE AMBIENTES ARQUITECTÓNICOS
PROTOTIPO PARA EL COMPORTAMIENTO PEATONAL

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN ARQUITECTURA

PRESENTA:

JUAN JOSÉ PIÑA MAY

TUTOR PRINCIPAL

DRA. GENEVIÉVE LUCET

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ESTÉTICAS

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. NOVIEMBRE 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

SIMULADOR VIRTUAL DE AMBIENTES ARQUITECTÓNICOS

Prototipo para el comportamiento peatonal



Tesis que para optar por el grado de Maestro en Arquitectura

Presenta:

Arq. Juan José Piña May

Universidad Nacional Autónoma de México

Programa de maestría y doctorado en arquitectura



Tutor:

Dra. Geneviève Lucet

Sinodales:

M. en A. Francisco Reyna Gómez

M. en A. Ernesto Ocampo Ruíz

Dr. Carlos A. Bigurra Alzati

Mtro. Jorge Rangel Dávalos

Ciudad de México, 25 de febrero de 2016



Agradecimientos

A mis padres, por su apoyo incondicional y el aliento que me han brindado en cada proyecto que me he propuesto.

A mi esposa, por su compañía y paciencia.

A la Dra. Geneviève Lucet, por su orientación e interés por llevar la investigación a buen puerto.

A los maestros Ocampo y Rangel, por sus enseñanzas y la excelente forma de motivarme para sacar todo el potencial de la investigación.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por las facilidades que me brindaron.

Al CONACYT, por el apoyo y fomento de la tecnología.

Contenido

Introducción

Capítulo 1. La simulación computacional

Capítulo 2. El ambiente arquitectónico y su comportamiento

Capítulo 3. Modelo de predicción para el comportamiento ambiental

Capítulo 4. Codificaciones de simulación

Capítulo 5. Prototipo de simulador para el comportamiento peatonal

Conclusiones

Referencias

Glosario

Anexos

Índice

Introducción	1
Estructura del documento de investigación.....	3
Antecedentes	4
Capítulo 1. La simulación computacional.....	7
Definiciones y conceptos.....	7
Modelos de simulación: métodos para el modelado de simulación	9
Simulación de ambientes arquitectónicos	10
Modelo de simulación basada en agentes.....	11
Plataforma de desarrollo para la simulación basada en agentes.....	13
Resumen.....	14
Capítulo 2. El ambiente arquitectónico y su comportamiento.....	15
Ambiente arquitectónico: Definición y conceptos	15
Perspectiva holística del ambiente	17
La naturaleza del ambiente construido y el entorno físico.	17
El sistema del edificio	19
Legibilidad	19
Conectividad, accesibilidad y visibilidad.....	21
Complejidad	22
Espacialidad y acontecimiento	23
Factores físicos del ambiente construido.....	24
Las características del individuo	24
Perfil del individuo.....	25
El espacio personal.....	26
La privacidad.....	28
La territorialidad.....	30
El estatus personal	31
El comportamiento del individuo y el estímulo ambiental.....	31
Perspectiva transaccional persona-ambiente	32

Los estímulos del ambiente	34
El comportamiento del individuo	36
Indicadores de los estímulos ambientales.....	38
Resumen	39
Capítulo 3. Modelo de predicción para el comportamiento ambiental.....	40
Un modelo de patrones.....	41
Método de abstracción por patrones.....	43
Modelo de ambientes arquitectónicos	45
Funcionamiento del modelo de ambientes arquitectónicos.....	47
Analogía con el lenguaje de patrones de Christopher Alexander.....	52
Resumen	53
Capítulo 4. Codificaciones de simulación	55
Método de codificación.....	55
Tipos de códigos para simulación	57
Reglas de simulación.....	58
Patrón, algoritmo y código	58
Codificación de los patrones de carácter del edificio y del agente-individuo	60
La representación codificada de las características del edificio	60
Codificación de los patrones de carácter en los agentes virtuales	63
Codificación de los patrones de comportamiento	65
Codificación de los patrones de estímulo en el edificio	67
Codificación de los patrones de comportamiento en el individuo.....	69
Codificación del patrón Selección de ruta.....	70
Codificación del patrón de desplazamiento.....	72
Controladores de simulación	76
Resumen.....	77
Capítulo 5. Prototipo de simulador para el comportamiento peatonal	79
Primer prototipo para el comportamiento peatonal	80
Caso de estudio.....	81
Objetivo de simulación.....	82
Modelo para el comportamiento peatonal a partir del patrón de selección Ruta-mínima	82
Reglas para la colocación de puntos y enlaces de la red de circulación en los edificios.....	84
Reglas de simulación.....	85

Configuración del edificio.....	88
Proceso de abstracción	88
Red de circulaciones.....	89
Configuración del Agente-individuo.....	91
Funcionamiento del prototipo	93
Primeras corridas de simulación.....	97
Calibración y validación del prototipo	100
Resumen	102
Conclusiones	103
Referencias	105
Glosario	109
Anexos.....	113

Introducción

El diseño arquitectónico es una actividad en constante evolución, siempre inmersa entre las corrientes artísticas que le dan forma y los adelantos tecnológicos que auxilian sus procesos. En años recientes es la preocupación por la estética de las formas la que ha marcado el rumbo de la disciplina, los aspectos humanos han quedado rezagados respecto a la necesidad creativa del arquitecto y muchos edificios se han construido para impresionar por su expresividad. La tecnología ha sido fundamental para concretar las ideas del arquitecto, sin embargo existe un rezago en la producción de herramientas para el análisis arquitectónico y poca accesibilidad a las que existen, provocado en parte por los costos y por la poca preocupación del arquitecto en conocer a profundidad las repercusiones sociales de lo que diseñan.

Es necesario recalcar que si bien las herramientas digitales han cambiado de manera radical el proceso de representación arquitectónica mediante la optimización del trabajo de diseño y dibujo, reduciendo recursos y tiempos, la mayoría de los programas computacionales no van más allá de ser simples medios para exponer una idea. La mayoría de los diseños de edificios siguen dependiendo de la experiencia del arquitecto y de su habilidad para sacar nuevos diseños. Aún con los avances de la tecnología digital en realidad virtual y realidad aumentada, en la arquitectura no se ha aprovechado de éstas para mejorar la disciplina, aspecto que sí han hecho campos como la medicina, la aviación, el cine, etc.



Figura 1 . Los cambios en la era de las computadoras. No solo ha existido cambios en el contexto del arquitecto, sino que las formas de trabajo también cambiaron con la entrada de las computadoras y los programas CAD. Edificio C3 UNAM (2016).

Se puede decir que la arquitectura se encuentra en una crisis de credibilidad y profundidad, el arquitecto es superficial y no existe el interés por cambiar. Las necesidades cambiantes de la sociedad han sido olvidadas y las soluciones para el habitar son simples reproducciones de estrategias que no están acordes con el cambio del estilo de vida que las personas han experimentado en las últimas décadas.

A todo lo anterior hay que añadir que un gran número de arquitectos, hasta el día de hoy, no tienen la posibilidad de visualizar todas las variables que intervienen en el diseño de un edificio. El diseño se enfoca en resolver, arquitectónicamente, relaciones funcionales aisladas y analizar con poco rigor científico los elementos diseñados; todo esto se ve reflejado en los edificios defectuosos de las ciudades y en la poca calidad del ambiente arquitectónico.

El investigador del fenómeno del comportamiento ambiental Gary Moore (1979) menciona:

“Cada momento que el arquitecto mueve su lápiz, hace la suposición acerca de las necesidades humanas y las decisiones acerca de cómo el ambiente construido puede servir mejor estas necesidades. En la mayoría de los casos estas suposiciones son inconsistentes, el proceso de toma de decisiones no es analítico, y el edificio resultante no es evaluado para encontrar como realmente está trabajando.”

En la presente propuesta de investigación se pretende dar un giro al modo de entender la arquitectura similar a lo que sucedió con la aparición de las herramientas de diseño asistido por computadora (CAD); con la tecnología digital se propone desarrollar una herramienta de análisis para los edificios, útil tanto para la etapa de diseño como para edificios construidos; una herramienta que le permita al arquitecto visualizar como afectan las decisiones formales de sus diseños a los usuarios que a la postre lo habitarán. De esta manera se pretende mejorar el procedimiento de toma de decisiones en el diseño arquitectónico y por consecuencia mejorar los espacios habitables en los edificios, ya que después de todo la arquitectura no es un sistema aislado de materiales y formas, sino que es un sistema complejo donde interactúan los fenómenos del entorno y los usuarios que la viven, usan, disfrutan, construyen, sufren, entienden o se confunden dentro de los edificios.

La propuesta consiste en desarrollar un simulador virtual de ambientes arquitectónicos utilizando la tecnología de modelado de simulación basada en agentes y la tecnología de realidad

virtual. En el nombre de la propuesta se expresan los aspectos fundamentales: un método, el diseño de un modelo, un medio de visualización y un sistema complejo de la realidad.

El objetivo es construir un primer prototipo de simulación para el comportamiento peatonal como primer paso en el desarrollo de un simulador de ambientes arquitectónicos, con ello se pretende aportar una herramienta de análisis para el arquitecto a partir de un método de simulación basada en agentes, un modelo abstracto para los ambientes arquitectónicos y las herramientas de programación computacional.

La misión principal de la investigación es predecir el comportamiento de las personas dentro de un edificio al momento de interactuar con el ambiente; la visión es cambiar la técnica de diseño arquitectónico a un nuevo método de inmersión total dentro de la realidad virtual, donde cada decisión pueda tomarse, analizarse y evaluarse en tiempo real con herramientas de diseño interactivo y simuladores de comportamiento. En síntesis, el arquitecto diseñando y evaluando en la realidad virtual.

Hipótesis:

En la investigación se afirma que es posible la simulación del ambiente arquitectónico mediante la representación de las interacciones de un edificio, su usuario y el entorno físico con un modelo abstracto de patrones de comportamiento y características de los componentes ambientales en una estructura denominada lenguaje de patrones.

Estructura del documento de investigación

El presente documento es un reporte de investigación que contiene el proceso de desarrollo del primer prototipo de simulación de ambientes arquitectónicos. El trabajo se divide en cinco partes: la simulación computacional, el ambiente arquitectónico, el modelo de predicciones para el comportamiento ambiental, codificaciones de simulación y el prototipo del comportamiento peatonal. Todos los temas se presentan en un orden secuencial establecido por el método de simulación seleccionado para el prototipo y así facilitar el entendimiento de los avances alcanzados.

En el capítulo uno, referente a la simulación computacional, se abordan los conceptos utilizados en el desarrollo de los simuladores, también se mencionan los tipos de modelado de simulación, los métodos más utilizados para la simulación de sistemas complejos, la forma de seleccionar un método, las etapas del método seleccionado en la investigación y el medio de

representación para el primer prototipo; el capítulo forma parte del estado del arte de la investigación y hasta cierto punto es introductorio al método de simulación seleccionado.

El capítulo dos, el ambiente arquitectónico y su comportamiento, es un apartado que nos ayuda a entender el sistema complejo que se pretende simular. En él se define el ambiente y los componentes que interactúan, así mismo se describen las características y los avances de los estudios del comportamiento ambiental y sus componentes; se puede decir que el capítulo es un análisis y un resumen de la complejidad del ambiente arquitectónico.

En el capítulo tres, modelo de predicciones del comportamiento ambiental, se abordan los temas referentes al diseño de la representación de los fenómenos que ocurren en el ambiente arquitectónico. Es una introducción al modelo de patrones como método de abstracción para las características y comportamientos de los componentes ambientales. Este capítulo también es introductorio a la estructura del lenguaje de patrones como abstracción del sistema ambiental; el apartado representa la primera aportación de investigación en el documento, igualmente forma parte del método de simulación.

El capítulo cuatro, codificaciones de simulación, explica el método para trasladar el modelo de predicciones para el comportamiento ambiental a un lenguaje de programación y así construir la aplicación. Abarca temas relacionados a la selección del método de codificación, las reglas impuestas por la simulación basada en agentes y como se codifica cada componente ambiental utilizando sus patrones en un lenguaje. Se puede decir que es el capítulo más especializado de los que tiene la investigación por que entra en conceptos de programación y diseño de algoritmos.

Por último, el capítulo cinco, prototipo de simulador, trata del arquetipo de simulación denominado prototipo del comportamiento peatonal donde se sintetizan todos los temas expuestos. En capítulo se exponen las fases de desarrollo, la selección del caso de estudio y la aplicación del modelo de ambientes; con este capítulo se cierra la aportación de investigación y es fundamental para la comprobación de la hipótesis de investigación.

Antecedentes

La simulación del comportamiento humano ha jugado un papel importante en numerosas disciplinas como la arquitectura, el urbanismo, la animación computacional, la psicología ambiental, entre otros (Narang, Best, Curtis, & Manocha, 2015). Es a causa del interés

multidisciplinario que han surgido múltiples teorías y modelos que pretenden explicar el funcionamiento de los ambientes que rodean al ser humano y los patrones de comportamiento que generan (Holahan, 2015).

Los trabajos sobre el estudio y análisis de los ambientes arquitectónicos realizados a la fecha se dividen en dos; primero se encuentran los modelos teóricos que buscan explicar la interrelación del ambiente físico con la conducta humana (Hillier & Hanson, *The social logic of space*, 1984) (Alexander, 1981) (Holahan, 2015); el segundo enfoque busca reproducir los comportamientos a partir de modelos analíticos de simulación y de patrones encontrados en la observación de los fenómenos ambientales (Helbing, 2012). Para ambos casos el objetivo es predecir el comportamiento de los individuos ante determinados estímulos ambientales y así explicar, analizar o simplemente conocer el funcionamiento de los componentes ambientales y sus interrelaciones.

A finales de la década de los setentas arquitectos como Christopher Alexander intentaron encontrar la manera de automatizar el diseño arquitectónico por medio de modelos de interacción entre los individuos y el ambiente construido (Alexander, 1981), esta inquietud se generó por el surgimiento de nuevas computadoras con la capacidad de realizar cálculos y operaciones matemáticas en tiempos nunca antes vistos (Coello, 2000). Pero más allá de la automatización, Alexander propone un modelo para la arquitectura que pretende entender la relación existente entre el ambiente construido y los usuarios, para de esta manera aplicar estos conocimientos en mejorar el diseño arquitectónico (Alexander, 1981).

Al igual que Alexander y su búsqueda de un ambiente construido más habitable para el ser humano, otras disciplinas han intentado conocer la interrelación del ambiente físico con la conducta y la experiencia humana, lo cual ha llevado al surgimiento de numerosas teorías sobre la toma de decisiones de los individuos dentro de un ambiente determinado, y de cómo éstas son el producto de una serie de estímulos captados por los sentidos, más que una libre elección (Aragónés, Américo, & Corraliza, 1998) (Moore, Tuttle, & Howell, 1985).

Desde una visión analítica existen teorías que conciben las relaciones del espacio construido como el resultado intrínseco de la lógica social (Bermejo, 2009) (Hillier & Hanson, *The social logic of space*, 1984) (Hillier & Peponis, 1984), visión que ha generado muchas formas de entender el funcionamiento del espacio arquitectónico. A partir de estos conceptos se entiende como los

flujo de circulaciones en un edificio son el resultado de la configuración espacial y sus diferentes valores de conectividad, accesibilidad y visibilidad.

En los últimos diez años han surgido numerosas herramientas para modelar los sistemas complejos cuyo propósito es analizar, conocer y comprender las causas y efectos de la estimulación mutua de los elementos dentro de la arquitectura (Helbing, 2012) (Moore, Tuttle, & Howell, 1985). Si bien han existido diversos modelos de simulación como los de eventos discretos y los sistemas dinámicos (Rodríguez, Serrano, Monleón, & Caro, 2008) es hasta la reciente revolución de las computadoras que ha sido posible generar modelos basados en agentes capaces de representar la complejidad de los ambientes con sus diferentes elementos constituyentes (Helbing, 2012).

Todos estos acontecimientos más la introducción de las herramientas de diseño asistido por computadora permitieron el surgimiento de los modelos de simulación. Los modelos, como el de comportamiento peatonal, se han utilizado como herramienta para el diseño y planificación de áreas peatonales, edificios y espacios públicos por su versatilidad en el auxilio del diseño (Helbing & Molnár, 1995), y es precisamente por esta versatilidad y adaptación que los modelos de ambientes tienen y tendrán vigencia en una disciplina como la arquitectura.

Capítulo 1. La simulación computacional

El presente capítulo es un acercamiento a las herramientas, los conceptos y los métodos utilizados en el trabajo de investigación, se exponen los conocimientos importantes para entender el texto y se enumeran las etapas que permitieron la realización del primer prototipo experimental de simulación para el comportamiento peatonal. Todo el documento está organizado en una secuencia de pasos donde el lector debe recordar el nombre de uno, así como el orden para un mejor entendimiento del trabajo. Por otro lado es importante mencionar que muchos temas son especializados en áreas diferentes de la arquitectura, por lo que entender cada concepto desde el principio es fundamental.

La simulación computacional es una herramienta que se utiliza en la investigación científica para comprender e intentar pronosticar el comportamiento de los fenómenos de la realidad, con ella se pueden resolver problemas o simplemente conocer el funcionamiento de algún sistema estudiado (Borshchev, 2013). En muchas actividades humanas la planeación es fundamental, con un simulador se pueden hacer predicciones de un sistema a partir de los datos obtenidos en la observación de algún proceso, la comprensión de un fenómeno o la propuesta de funcionamiento de algún elemento, con ello se puede tomar decisiones o generar información relevante para el surgimiento de nuevos conocimientos.

Definiciones y conceptos

La tecnología de simulación no es nueva en el campo de la arquitectura, existen varios programas para simular diferentes aspectos en los edificios, principalmente factores climáticos, energéticos, estructurales etc., sin embargo la generación de simuladores para el comportamiento humano dentro de un edificio, que utiliza el método basado en agentes y variables múltiples es innovador en el campo.

La simulación es un proceso que consiste en diseñar una representación que toma de referencia un sistema real para llevar a cabo experiencias con él. Con estas herramientas se puede aprender, reproducir y evaluar el comportamiento de cualquier sistema para generar estrategias

enfocadas al funcionamiento del éste (Shannon R. , 1988). Es importante mencionar que en el presente reporte de investigación el sistema para simulación es el formado por los ambientes arquitectónicos, con él se pueda entender el comportamiento de los usuarios dentro de los edificios y auxiliar en la toma de decisiones de la configuración de espacios habitables.

Los ambientes arquitectónicos son sistemas complejos. A diferencia de un sistema simple donde objetos o ideas están interrelacionadas entre sí para la consecución de un fin (Shannon R. , 1988), en un sistema complejo existe una estructura de interrelaciones compuesta por varios niveles. En estos sistemas, el comportamiento surge a partir de la auto-organización de sus componentes donde los niveles son jerárquicos, con grados de autonomía, diferentes para cada componente y por lo general cada componente del sistema percibe su entorno respondiendo a los cambios de una forma potencialmente diferente (Vicsek, 2002).

Para poder simular el ambiente arquitectónico se requiere de un modelo. Un modelo es una representación abstracta, conceptual, gráfica y física de los fenómenos, sistemas y procesos existentes en el ambiente arquitectónico, por medio del cual se explican, describen, analizan o simulan los fenómenos y procesos que ahí ocurren (Gilbert & Boulter, 2000). Esto quiere decir que el modelo para los ambientes arquitectónicos es un proceso cuyo objetivo es abstraer ciertos aspectos de los componentes y funcionamiento del sistema real, previamente observado, para predecir el comportamiento cada componente.

Es importante mencionar que si bien existen muchos tipos de modelos (analíticos, físicos, esquemáticos, etc.), en la investigación se utilizan los modelos computacionales de sistemas dinámicos ya que son los mejores para representar la complejidad de un sistema (Borshchev, 2013). Un sistema dinámico describe procesos que evolucionan con el tiempo. Un edificio cambia sus características según el ambiente que lo rodea, los usuarios que lo habitan y la hora del día, por lo que es un buen ejemplo de sistema dinámico.

Según Law y Kelton (1988), los modelos pueden ser:

- Determinístico: Si el sistema no contiene ningún elemento aleatorio.
- Estocástico: Si algún elemento del sistema tiene una conducta aleatoria.
- Continuo: Cuando las relaciones funcionales entre las variables del sistema sólo permiten que el estado evolucione en el tiempo en forma continua.

- Discreto: Cuando las relaciones funcionales del sistema sólo permiten que el estado varíe en un conjunto finito de puntos temporales.

En la actualidad es muy difícil o prácticamente imposible que un fenómeno complejo se pueda representar con un modelo determinístico, por otro lado los modelos discretos no permiten observar la complejidad de un sistema. El modelo para los ambientes arquitectónicos es multi-método, es decir, todo el modelo es continuo y en algunos aspectos puede ser tanto estocástico como discreto.

Modelos de simulación: métodos para el modelado de simulación

Ya se ha definido que el modelo necesario para representar los ambientes arquitectónicos es computacional y dinámico, ahora hay que mencionar que existen tres métodos para la simulación de un sistema complejo. Un método para el modelado de simulación es un procedimiento para llevar un sistema del mundo real a su modelo (Borshchev, 2013).

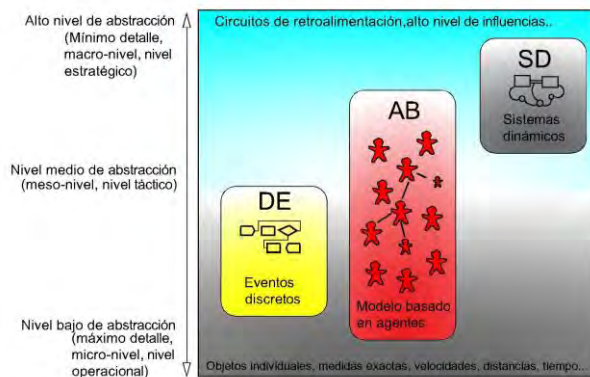


Figura 2. Métodos en el modelado de simulación. Niveles de abstracción para los diferentes métodos. Fuente: Borshchev, A. (2013). *The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic*. Chicago: AnyLogic North America.

Existen muchos métodos para hacer modelos de la realidad, pero para la simulación de sistemas complejos computacionales existen tres métodos principales: Sistemas dinámicos, Eventos Discretos y Base Agente. Todos estos métodos tienen un propósito específico y su elección depende del fenómeno que se quiera representar (Borshchev, 2013). Es importante no confundir el modelo de sistemas dinámicos con el método de simulación con el mismo nombre, ya que incluso un método base agente puede ser un modelo dinámico.

Los métodos se caracterizan por tener un propósito determinado y depender de las herramientas disponibles, el contexto y modelador. Estos métodos de simulación son similares al método científico ya que tienen etapas, son secuenciales, tienen actividades y procedimientos, tienen un principio y tienen un fin; también se parecen a los métodos de simulación tradicionales (no dinámicos), con la diferencia de que utilizan la programación computacional. La aplicación de estos métodos los podemos observar en programas para el análisis de producción industrial,

programas de optimización y en simuladores desarrollados con algún propósito científico (Helbing, 2012) (Borshchev, 2013).

En el contexto histórico, mientras los métodos de sistemas dinámicos fueron creados en los años cincuenta por el profesor Jay Forrester; los modelos de eventos discretos surgieron en 1961 con el simulador de propósito general de Geoffrey Gordon; en otro sentido los modelos basados en agentes fueron posibles hasta el año dos mil gracias al avance tecnológico de las computadoras. Los sistemas dinámicos modelan un fenómeno como una estructura causal cerrada que define el comportamiento; en cambio los eventos discretos consideran el sistema modelado como un proceso o secuencia de operaciones; en contraste, el modelo basado en agentes define un fenómeno a partir de entidades autónomas, con un comportamiento programado de interacción. Mientras los sistemas dinámicos requieren un alto nivel de abstracción y un nivel macro-estratégico; los eventos discretos requieren un nivel de abstracción mínimo con el mayor número de detalles operacionales; por otro lado los modelos basados en agentes tienen una gran flexibilidad ya que permite niveles de abstracción desde un mínimo de detalle hasta un nivel de máximo detalle (Borshchev, 2013).

Simulación de ambientes arquitectónicos

Un simulador de ambientes arquitectónicos es una representación simplificada de las interacciones presentes dentro de un entorno construido y generado a partir de un modelo abstracto. Entre los componentes de todo simulador encontramos: un objetivo de simulación, un programa de requerimientos, un método de simulación y un medio de aplicación; Las representaciones del ambiente por lo general son complejas, soportadas en datos, evolutivas, multivariadas, lógicas, intuitivas, aplicables, medibles, visuales y simplificadas. El diseño del prototipo de simulación requiere de un proceso similar al de los simuladores aeronáuticos y los juegos de video, ya que implican generar modelos a partir de los fenómenos de la realidad. A nivel mundial, diseñar simuladores es útil para muchas disciplinas científicas, de igual manera desde el año dos mil surgió gran interés por la simulación gracias al modelo de simulación basado en agentes y a la evolución de las computadoras, donde investigadores y desarrolladores como Helbing y Molnár (1995), Borshchev (2013), Kontovourkis (2009), Hillier (1984), etc. han encontrado un campo fértil para la investigación de fenómenos complejos.

Modelo de simulación basada en agentes

De los tres métodos de modelado para la simulación de sistemas complejos se seleccionó la simulación basada en agentes para modelar los ambientes arquitectónicos, principalmente por la flexibilidad en el nivel de abstracción, ya que el método acepta abstracciones del fenómeno desde un nivel muy detallado hasta abstracciones muy generales para funcionar (Borshchev, 2013).

La modelación basada en agentes es una técnica donde un sistema es modelado como una colección de entidades autónomas de toma de decisión llamadas agentes, cada agente evalúa su situación y toma decisiones sobre la base de un conjunto de reglas de decisión. A diferencia de los métodos analíticos, que se enfocan en modelar y caracterizar el equilibrio de un sistema, los modelos basados en agentes ofrecen la posibilidad de generar ese equilibrio. En este sentido el modelador representa el comportamiento de las interacciones de los agentes individuales y objetos locales que componen el sistema para obtener como resultado un patrón de comportamiento a nivel del sistema (Helbing, 2012).

El modelo está compuesto por los agentes, un ambiente de interacción y reglas que definen las relaciones entre el agente y su ambiente. Los agentes son entidades físicas o virtuales que toman decisiones de manera autónoma; sus funciones pueden representar átomos, células, animales, gente u organizaciones; tienen recursos propios, objetivos y capacidades sensoriales, es decir, tienen información sobre atributos, estados de otros agentes y del ambiente. El ambiente es el espacio virtual en el que interactúan los agentes y puede representar un espacio geográfico o un escenario del mundo real. Los agentes toman decisiones en base a las reglas y funciones analíticas prescritas por el modelador; las decisiones se basan en la información que el agente tiene disponible, información propia sobre otros agentes y el ambiente. A través de decisiones los agentes reaccionan y se adaptan a situaciones o condiciones del ambiente (Dawn & Steven, 2008).

El método de simulación basado en agentes tiene las siguientes etapas (Banks, Carson, & Nelson, 1996):

1. **Conocimiento del sistema.** En esta etapa se realizan las actividades pertinentes para conocer y comprender el fenómeno de la realidad para después definir cada uno de los procesos que conlleva el sistema. Requiere de una investigación, una recopilación de información, un análisis y una explicación del sistema; al igual que cualquier investigación, es un proceso tanto de búsqueda como creativo, ya que hay que ir conectando temáticas que

en muchas ocasiones se encuentran dispersas. Para el simulador de ambientes arquitectónicos la etapa consiste en conocer cada uno de los componentes, características e interacciones que existen en el ambiente y por otro lado hay que correlacionar el comportamiento con cada uno de los componentes.

2. **Modelado o formulación del modelo.** Etapa que consiste en proponer una representación abstracta de uno o varios fenómenos de la realidad, esto es explicar su funcionamiento o comportamiento. En el proceso de modelado, primero se identifican las características de algún fenómeno, después se interrelacionan sus partes, posteriormente se obtienen sus patrones y por último se explica el comportamiento ambiental. Para los ambientes arquitectónicos se propone un modelo de representación gráfica a partir de la abstracción de los patrones de carácter y comportamiento de sus componentes.
3. **Codificación.** Todo modelo simplificado de la realidad, implica la sistematización de cada componente del ambiente y la explicación de su comportamiento mediante la generación de algoritmos. Un algoritmo es método para resolver un problema, es una secuencia de pasos u operaciones ordenados que permiten realizar una actividad o solucionar situaciones (Aguilar, 2003). Entre las actividades de codificación se encuentran: el diseño de un lenguaje de patrones, la elaboración de los algoritmos para el comportamiento ambiental y la configuración de los agentes. El simulador de ambientes arquitectónicos utiliza la realidad virtual para representar los fenómenos; el diseño del sistema consiste en codificar cada uno de los comportamientos en operaciones y funciones programadas que integran datos de entrada y los comportamientos como datos de salida.
4. **Programación y diseño de interfaz.** La etapa consiste en trasladar los algoritmos diseñados en la etapa de codificación a un lenguaje de programación. Para ello se necesita seleccionar el lenguaje de programación, establecer las clases, variables y métodos que se van a utilizar para diseñar los programas de comportamiento en una programación orientada a objetos¹. Adicional a la programación del modelo es necesario el diseño y programación de una interfaz gráfica de usuario (IGU), medio por el cual la aplicación interactúa con su usuario de manera intuitiva.

¹Deitel (Java, cómo programar, 2008) define la programación orientada a objetos como un modelo de programación donde se aprovecha las relaciones entre las clases programadas, donde los objetos de ciertas clases tienen características como herencia, polimorfismo, encapsulamiento, etc.

5. **Calibración.** Consiste en revisar el fenómeno real estudiado para obtener la mayor cantidad de datos, compararlo con el modelo y mejorar el nivel de representación para el fenómeno. El modelo de simulación para ambientes arquitectónicos se encuentra compuesto por modelos de correlación más pequeños. En la calibración, se utilizan las hipótesis del funcionamiento ambiental, también llamadas hipótesis de calibración, para explicar algún comportamiento, éstas se comparan con los datos del fenómeno real para conocer su validez y así modificar el modelo².
6. **Validación.** La validación es el proceso de medir la bondad de los ajustes alcanzados con los parámetros de calibración y el poder de predicción del modelo. Para la validación se requiere de un estudio del fenómeno real y una comparación de los datos obtenidos con los datos generados por el simulador.

Plataforma de desarrollo para la simulación basada en agentes

Existen tres medios para desarrollar un simulador computacional basado en agentes: primero tenemos la construcción de un programa computacional a través de algún lenguaje de programación, estos permiten programar todos los comportamientos del simulador y diseñar todo el programa desde lo básico; otro medio es a partir de programas existentes diseñados específicamente para elaborar algún método o multi-método de simulación; el último medio es a través de programas de visualización tridimensional que utilizan lenguajes de programación para codificar el comportamiento de objetos y animaciones, estos entornos tienen las características de manejar procesos programables y sistemáticos, herramientas visuales e interactivas. La construcción de un simulador es similar al diseño y desarrollo de cualquier aplicación o programa para computadora o celular; en la red podemos encontrar desde programas diseñados para simulación peatonal, como el simulador Legión (Connor, 2016), programas para hacer simulaciones multi-métodos como AnyLogic (AnyLogic, 2016) y programas para programar comportamientos como la plataforma de desarrollo de videojuegos Unity (Unity, 2016).

El primer prototipo de simulación propone una plataforma de videojuegos y realidad virtual llamada Unity. El programa consiste en un motor de renderizado integrado a un conjunto completo de herramientas y flujos diseñados para crear contenidos 3D interactivos y publicación multiplataforma. Entre sus características está el de utilizar un sistema de scripts en lenguaje de

² Las hipótesis de calibración se utilizan para explicar los fenómenos no tienen modelos comprobados.

programación C# que permite programar comportamientos a objetos tridimensionales por lo que es muy utilizado en el desarrollo de simuladores basados en agentes (Unity, 2016).

Es importante mencionar que se seleccionó la plataforma Unity porque permite integrar la realidad virtual al modelado y simular fenómenos físicos con herramientas pre-programadas.

Resumen

Existen muchas formas para representar los fenómenos que ocurren en el mundo; modelos gráficos, verbales, analíticos etc. De todos ellos los modelos computacionales son los que tecnológicamente muestran un mayor desarrollo, sobre todo a partir de la última revolución digital. En los modelos computacionales existen tres métodos para la representación de sistemas complejos: modelo de sistemas dinámicos, modelo de eventos discretos y el modelo de simulación basada en agentes. Un método se selecciona dependiendo del propósito de la simulación y el nivel de abstracción para el fenómeno que se pretenda simular.

El simulador de ambientes arquitectónicos tienen las características de ser un sistema complejo y dinámico, donde intervienen un gran número de variables y donde ocurren muchos tipos de comportamientos. Para poderlos representar adecuadamente se requiere de un nivel de abstracción de medio a elevado, ya que es imposible hacer especificaciones de todos los posibles comportamientos de un ambiente; según estas características y por la necesidad de generar un simulador visual de análisis se ha considerado al método de simulación basada en agentes como el ideal para representar a los ambientes arquitectónicos.

En los siguientes capítulos se desarrolla el método de simulación basado en agentes, comenzando con la definición de un sistema complejo, los ambientes arquitectónicos. Los capítulos tienen su cúspide con la construcción del primer prototipo de simulación de ambientes arquitectónicos a partir de patrones.

Capítulo 2. El ambiente arquitectónico y su comportamiento

El método de simulación comienza con el estudio de los ambientes arquitectónicos. Para ello es importante describir el término exponiendo sus componentes, funciones, características, comportamientos y los avances de otras disciplinas respecto al tema. Con esta información se diseña un modelo para explicar la realidad y así elaborar un primer prototipo de simulación.

Es importante mencionar que la investigación del ambiente se aborda desde la perspectiva de la psicología ambiental, las investigaciones del diseño ambiental, la sintaxis espacial, el urbanismo y la teoría de patrones. El enfoque de estos campos está relacionado con el entendimiento de las interacciones entre el ambiente construido, el individuo y el comportamiento; su estudio nos permite generar estrategias para mejorar los ambientes habitables y analizar el funcionamiento ambiental.

Ambiente arquitectónico: Definición y conceptos

Se entiende por ambiente al espacio que nos rodea, en el que estamos inmersos, nuestro hábitat, el lugar donde vivimos y nos movemos, del cual tenemos conocimiento a través de los sentidos (Yáñez, 1983). De manera general se compone de elementos bióticos (los seres vivos) y abióticos (la radiación, temperatura, el agua, el aire, etc.); es dinámico, diverso, correlacionado y con un cierto equilibrio (León, 2011); en general está presente en todos lados del planeta y en específico se puede decir que está presente en los edificios construidos por el hombre. Esta definición sugiere al individuo como un elemento externo, si bien en el ambiente se encuentran otros individuos, en la definición aparta al sujeto del ambiente.

Si bien la definición anterior tiene su validez, la investigación propone una definición de ambiente con un enfoque transaccional que entiende a éste como el entorno que rodea al individuo, incluyendo al mismo individuo dentro de un sistema de interacciones con los otros componentes (Holahan, 2015). De esta forma, el ambiente no sólo cuenta con elementos bióticos y abióticos sino que también tiene anexo los elementos intangibles que componen al propio individuo que

interactúa. Entiéndase por elementos intangibles a los componentes fisiológicos y psicológicos con los que cuenta una persona (Moore, Tuttle, & Howell, 1985).

El enfoque transaccional es un método de investigación en base a los patrones de relación, sostiene que la reciprocidad humano-ambiente se soporta mutuamente (Kopeck, 2006). Albert Bandura (1978) menciona que los efectos de todos los componentes ambientales, psicológicos y de conducta son recíprocos. Esto quiere decir que cada uno afecta y es afectado, ya sea en forma directa o indirecta. Es importante mencionarlo porque el modelo de predicciones ambientales parte de este enfoque.

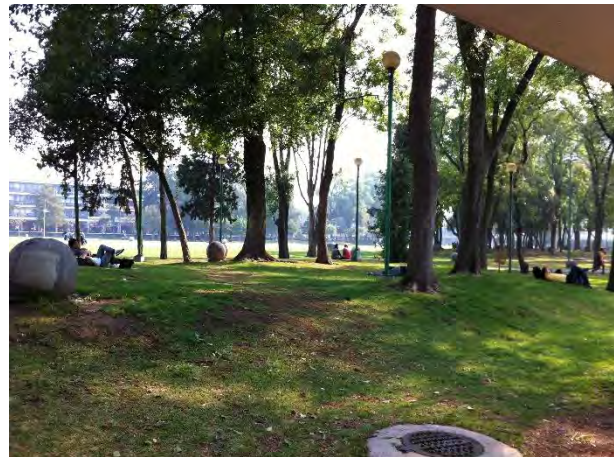


Figura 3. El individuo y su ambiente. El individuo es afectado por las condiciones del entorno y a su vez tiene la capacidad de modificar las condiciones para optimizar su ambiente. UNAM (2016).

Definido el ambiente ahora hay que mencionar que existen 5 tipos diferentes de ambientes, estos son:

1. **El ambiente natural.** Es un ecosistema formado por una parte no viviente constituido por el medio físico y una viviente representada por la comunidad biológica que no ha sufrido modificaciones por parte del hombre. Se presenta al momento de interactuar con los elementos naturales del entorno; engloba el clima, vegetación, los fenómenos naturales y la fauna (Pringle, 1971).
2. **El ambiente artificial o construido.** Es todo aquél ambiente que ha sido pensado y modificado por el hombre para crear un entorno más apto para vivir (Flores, 2001). El ambiente artificial entendido como elemento externo al individuo representa, al igual que el ambiente natural, una serie de estímulos sensoriales.
3. **Los ambientes psicológico y fisiológico.** Son ambientes que se presentan de manera interna en el ser humano, es decir, son procesos o funciones que se realizan dentro del cuerpo. Mientras los procesos fisiológicos se relacionan con los sistemas biológicos del cuerpo, los procesos psicológicos son las operaciones mentales del ser humano, sus capacidades, procesos cognitivos, así como todo el conjunto de significados y valores que se generan por estos procesos (Flores, 2001).

4. **El ambiente social.** Son los fenómenos que ocurren en la interacción entre individuos e involucra los mecanismos generados por la cultura para mantener interrelaciones o acercamientos consensados.

Es importante mencionar que la investigación propone la composición de un tipo de ambiente llamado ambiente arquitectónico; a diferencia de los otros ambientes y en especial del ambiente construido, es un sistema que incluye un entorno físico, un medio construido que modifica el entorno y el individuo que con sus procesos fisiológicos y psicológicos interactúa con los otros componentes. Específicamente se puede decir que el ambiente arquitectónico está compuesto por muchos de los ambientes anteriormente mencionados.

Perspectiva holística del ambiente

El comportamiento del individuo tiene influencia de los diversos aspectos ambientales de donde vive, trabaja y se educa. Aspectos como la luz, el sonido, la temperatura, la extensión del espacio, la privacidad, el territorio, la estructura física y la disposición afectan las actividades diarias, la calidad de las funciones individuales, las funciones sociales y la propia naturaleza de los ambientes diseñados (Holahan, 2015). Estos aspectos no funcionan de manera aislada e independiente de los demás; de hecho los diversos aspectos ejercen influencias traslapadas, simultáneas e interrelacionales en la conducta del individuo.

La perspectiva holística del ambiente contempla al individuo como un participante activo y dinámico en el proceso de enfrentar el ambiente, esto significa que para poder predecir la conducta de una persona en forma precisa, se deben conocer las características tanto de la persona como la naturaleza del ambiente al que esa persona enfrenta. En este enfoque los procesos psicológicos mediante los cuales el individuo enfrenta el ambiente son la percepción, la cognición, las actitudes, el rendimiento y las respuestas enfocadas a los problemas que genera el entorno.

La naturaleza del ambiente construido y el entorno físico.

Existen muchas maneras de obtener las partes y propiedades de los entornos modificados por el hombre; por un lado, el ambiente construido se puede dividir según escalas, por otro, se puede analizar las características de cada componente por separado.

El análisis del ambiente construido y el entorno físico debe ser descriptivo, deductivo y explicativo, porque además de conocer el funcionamiento ambiental se requiere de propuestas

acerca de su funcionamiento; es importante tomar en cuenta la ubicación ambiental, ya que de ésta dependen varias características de los componentes de ambos elementos ambientales (Holahan, 2015) (Moore, Tuttle, & Howell, 1985). El análisis puede hacerse en las ciudades, edificios y espacios arquitectónicos.

Si tomamos en cuenta la escala, el ambiente construido se clasifica en micro-escala, meso-escala y macro-escala. Mientras la macro-escala se compone del conjunto de edificios y circulaciones que conforman una ciudad, la meso-escala está formada por los espacios y circulaciones contenidos en un edificio, y en la micro-escala se observan las áreas de actividad junto con las circulaciones que componen un espacio arquitectónico (Moore, Tuttle, & Howell, 1985). En el caso del estudio del ambiente construido y el entorno físico para la elaboración del modelo, la escala que se maneja es la meso-escala.



Figura 4. El ambiente construido y el entorno físico. La relación que existe entre los entornos modificados por el hombre y los fenómenos de la naturaleza son inseparables. UNAM (2016).

En relación con el entorno físico es importante mencionar las dos formas en las que se puede presentar al individuo³. Por un lado se puede entender como entorno físico al componente del ambiente arquitectónico compuesto por los fenómenos abióticos que ocurren en las áreas exteriores del edificio, los cuales no pueden sufrir modificaciones por parte de los individuos; y por otro lado se puede entender el entorno físico como un componente de los ambientes construidos referente a los fenómenos que ocurren dentro de los espacios y que han sufrido modificaciones causadas por la configuración del edificio, estos fenómenos sí pueden ser modificados por el usuario mediante el intercambio de ciertos aspectos entre el individuo y la configuración espacial.

En el caso del ambiente construido y el entorno físico las características son: sistema, legibilidad, complejidad, conectividad, accesibilidad, visibilidad, acontecimiento, espacialidad y factores del entorno (Bechtel & Churchman, 2002) (Holahan, 2015) (Alexander, 1980) (Hillier &

³ Dividir el entorno físico en dos aspectos es una propuesta de la investigación para hacer más claro las partes del modelo de ambientes arquitectónicos, ya que esclarece el intercambio del individuo con el entorno físico modificable del edificio.

Hanson, 1984) (Lynch, 2010) (Venturi, 1966). A continuación se describe cada una de las características.

El sistema del edificio

El sistema del edificio hace referencia a la función de éste como organizador de las actividades humanas. Existen tres formas en las que se manifiesta, la primera es a través de la tipología de edificación, la segunda es por la organización de las zonas de actividad y la tercera es a través de los horarios de actividad; todas estas funciones del sistema le dan orden a algún aspecto de la actividad del usuario dentro del edificio (Moore G. , 1979). El sistema es similar al organigrama de una empresa; es una característica presente en todos los edificios construidos por el hombre, por lo que se puede decir que es un patrón del ambiente.

Exploremos un poco las formas del sistema. Mientras la tipología edilicia hace referencia a la actividad principal para la que fue diseñado el edificio y la morfología; la organización divide las zonas de un edificio según las actividades de su usuario, de tal manera que los espacios con funciones similares quedan ubicados en una misma zona; por otro lado el horario es la característica del sistema que ordena las actividades del edificio en el tiempo, se puede decir que el horario define el tiempo de uso del edificio durante el día, también que es un acuerdo entre los usuarios de dicho edificio.

El sistema es muy importante en el diseño del prototipo de simulación porque ordena la aparición de los agentes, ya que éste comportamiento está muy relacionado con los aspectos funcionales en los edificios y como está presente en todos los edificios debe ir incluido en la programación del simulador.

Legibilidad

El interés por la forma en que un edificio se da a conocer al individuo se inició por una serie de estudios efectuados por Kevin Lynch. Sus estudios dieron validez al conocimiento científico de las imágenes ambientales y proporcionó un marco de referencia para el estudio de la cognición en relación al ambiente (Holahan, 2015).

Kevin Lynch (2010) define la legibilidad como la cualidad del ambiente que consiste en la facilidad con que sus características pueden ser reconocidas y organizadas en un patrón unificado claro. Entre algunos aspectos legibles en los edificios están: las áreas verdes, la panorámica observada desde un punto distante y la identificación de zonas según la clase social.



Figura 5. La presentación del edificio. La forma, el material, la ubicación y la jerarquía de elementos es la manera en como los edificios se nos presentan. UNAM (2015).

Lynch identifica cinco elementos presentes en los ambientes construidos que definen su nivel de legibilidad:

1. Sendas. Son las vías por donde la gente transita, son primordiales en la formación de mapas mentales ya que son elementos altamente reconocibles del ambiente.
2. Bordes. Se entiende como bordes a las divisiones dentro de un ambiente que separa unas zonas de otras.
3. Distritos o zonas. Son sectores que poseen un carácter distintivo dentro de un ambiente determinado.
4. Zonas de confluencia. Son puntos estratégicos de reunión dentro de un ambiente y marcan el lugar hacia donde la gente se desplaza.
5. Hitos. Son puntos específicos del ambiente con una fuerte carga simbólica que se pueden observar desde sitios lejanos o reconocer ampliamente.



Figura 6. La legibilidad en ciudad universitaria. La jerarquía de elementos y el trazado de andadores le permiten al individuo orientarse y seleccionar el camino deseado. UNAM (2016)

Los elementos definidos por Lynch tienen la función de ayudar a los individuos en la toma de decisiones al momento de encontrarse dentro de un edificio, es un factor que le ayuda a definir una ruta cuando conoce el edificio o a navegar por él cuando no.

Conectividad, accesibilidad y visibilidad

La conectividad y accesibilidad son características del ambiente tratadas de manera analítica en la teoría de sintaxis espacial presentada por Bill Hillier y Julienne Hanson (1984) a finales de los setentas y principios de los noventas. Su finalidad es estudiar la forma en que el espacio arquitectónico se vincula y organiza, tratando de inferir aquellos aspectos de la estructura social que pudieron influir en su diseño.



Figura 7. La circulación en los edificios. La disposición de andadores y espacios de actividad estimulan el flujo de peatones en los edificios. Unidad de posgrado UNAM (2016).

Según Peponis y Wineman (2002) existen dos teoremas básicos de este campo. El primero sugiere que si el edificio es considerado como un sistema que lleva movimiento de un espacio a otro, los espacios que estén más directamente conectados tenderán a atraer altas densidades de movimiento; a esta alta probabilidad de uso en las circulaciones de un edificio se le llama conectividad. El segundo teorema va dirigido a la relación espacial que tienen en común los edificios de una misma tipología. Sugiere que la constancia entre los componentes espaciales de un edificio no sólo reside en su actividad, función o reglas sociales, sino que además hay que tomar en cuenta la tendencia estadística de que algunos espacios son más accesibles que otros en el contexto de un asentamiento o edificio como un todo, a esta tendencia se le conoce como accesibilidad (Estrada, 2003); para entender el teorema hay que mencionar que un espacio es accesible respecto a otro dependiendo la cantidad de espacios (también llamados pasos) que se tienen que pasar para llegar a él, esta cantidad es el índice de accesibilidad. Es importante mencionar que el concepto de accesibilidad presentado es diferente al concepto de accesibilidad como estrategia de inclusión, porque estas últimas se refieren al conjunto de características que debe disponer un entorno para ser utilizado en condiciones de comodidad, seguridad, igualdad y autonomía (Boudeger, Prett, & Squella, 2010); Mientras que el concepto presentado se refiere a

que cada espacio según su ubicación dentro del edificio y su relación con otro espacio, tiene un valor de accesibilidad determinado (Hillier & Hanson, 1984).

En cuanto a la visibilidad, se define como una característica en la cual las densidades de movimiento dentro de un edificio se encuentran relacionadas (además de con la accesibilidad y conectividad) con la manera en que los espacios se presentan visualmente ante los individuos. En el recorrido de los individuos influye la capacidad de ver su próximo destino de recorrido, esta característica también es conocida como isovista por la sintaxis espacial (Bernejo, 2009).

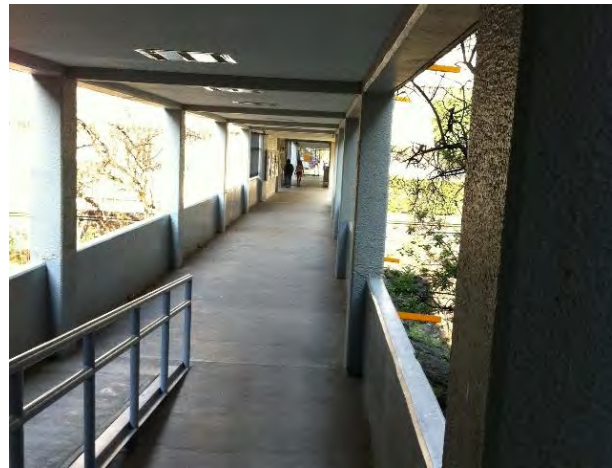


Figura 8. Vista al objetivo. El ubicar visualmente el lugar de destino da la sensación de cercanía. UNAM (2016).

Complejidad

El concepto de complejidad sugiere cierta variedad visual en el medio, en específico el ambiente construido. Entender el proceso por el cual se toma decisiones dentro de un edificio durante la navegación peatonal de los individuos es muy importante, porque está comprobado que las personas tienen inclinación por un nivel de equilibrio entre complejidad y legibilidad, ya que existen preferencias por los lugares que les resultan interesantes a la vista, sin ser confusos o desorientadores (Wohlwill, 1966). Para la navegación se requiere de información adicional que ayude a comprender el ambiente, por lo que la complejidad se considera un patrón importante a valorar.



Figura 9. La complejidad en la arquitectura. Cierta complejidad es útil para identificar lugares y valorar espacios. Ciudad de México (2016).

Stephen Carr (1967) menciona que mientras la legibilidad es la simplicidad y claridad en un edificio, la complejidad ofrece un estímulo para que las personas visiten nuevos lugares permitiendo entender mejor el ambiente. Igualmente Carr sostienen que un edificio alcanza su nivel

óptimo, en lo que respecta su interacción con el individuo, cuando existe un equilibrio entre la complejidad y el orden.

Espacialidad y acontecimiento

Las características de espacialidad y acontecimiento las explica Alexander (1981) a través de su teoría Lenguaje de patrones⁴. En ella menciona que todos los edificios están conformados por patrones de acontecimiento y por patrones espaciales; ambos elementos dependen de la ubicación del edificio ya que son el resultado tanto de la cultura como de otros factores contextuales como el clima, la topografía, etc.

Mientras los acontecimientos son las experiencias que ocurren en un espacio edificado, la espacialidad hace referencia a una configuración espacial específica (mobiliario, estructura, dimensiones, materiales, etc.); por otro lado los acontecimientos son eventos no necesariamente humanos, es decir que pueden ocurrir por la simple presencia de los factores físicos, elementos naturales de un ambiente, además de sucesos generados por los individuos; mientras la espacialidad está vinculada a los acontecimientos que ocurren en su interior.



Figura 10. Espacialidad y acontecimiento. Un acontecimiento, como puede ser la convivencia universitaria, siempre va acompañado de una configuración espacial. UNAM (2016).

De igual manera Alexander menciona que los acontecimientos no pueden separarse de un espacio en el que ocurren, es decir, existe una relación entre la configuración espacial y los acontecimientos que ahí ocurren. Al igual que el acontecimiento, los espacios también se pueden expresar en patrones.

Lo que Alexander nos expresa es que las actividades ocurridas en un espacio se pueden entender a partir de los acontecimientos que continúan pasando en una configuración espacial determinada, porque un acontecimiento no puede separarse de un espacio ya que éste necesita de

⁴ En el libro *Un Lenguaje de Patrones* (1980), Alexander propone un número finito de patrones necesarios para obtener espacios vivos (con la cualidad de vida que él definió). Según él, combinando los patrones se pueden generar un número infinito de soluciones arquitectónicas.

unas condiciones espaciales específicas para suceder y un espacio tampoco puede separarse de los acontecimientos sucesivos que siguen ocurriendo en su interior⁵.

Factores físicos del ambiente construido

Los elementos físicos son los que dan soporte y afectan la vida en la biosfera, ellos determinan el carácter variable del hábitat humano, sus oportunidades y sus limitaciones; el entorno físico hace referencia al clima geográfico y a las condiciones físicas donde se desenvuelve la vida y que influye en las actividades del individuo para hacerlas más o menos eficientes según sus condiciones (Singh, 2006).

Como ya se mencionó, los factores físicos se pueden entender como un elemento del ambiente arquitectónico o como una característica del ambiente construido cuando éste sufre modificaciones a causa de las envolventes de un edificio. Las características del ambiente a través de sus factores físicos contemplan aspectos tales como temperatura, sonido, olor, iluminación, humedad, lluvia, sol y partículas en el aire. Todos constituyen los rasgos variables en el ambiente, son percibidos generalmente de una manera no consiente, tienen una indudable influencia interactiva sobre las personas y pueden afectar nuestra salud y comportamiento (Holahan, 2015).

El relacionar los factores físicos con las actividades humanas es de suma importancia porque son aspectos que influyen en el rendimiento, las respuestas hacia el ambiente y en la formación de actitudes, entre otros aspectos, ya que están presentes en todo momento de la vida del hombre y cómo es un factor que también influye en el comportamiento, es fundamental conocer como se expresa, sus rangos aceptables en el hombre y los efectos a su exposición.

Las características del individuo

El humano es un ser complejo compuesto por muchas características que interactúan y lo definen como individuo. Es posible definirlo en función de tres esferas: biológica, social y psicológica. Mientras la esfera biológica hace referencia a las características físicas, rasgos distintivos y aspectos fisiológicos (funciones del cuerpo); la esfera social hace referencia a la relación de un individuo con otros individuos y abarca aspectos como la territorialidad, el estatus,

⁵ En el libro *El Modo Intemporal de Construir* (1981) Alexander explica la relación entre los acontecimientos y los patrones espaciales a los que están vinculados, también explica el método para obtener y estructurar estos patrones.

rol social, etc. (Deasy, 1985); por otro lado la esfera psicológica se refiere a los aspectos como las características conductuales y los procesos mentales, como pueden ser la valoración de un espacio, las actitudes y la organización mental de un edificio (Holahan, 2015).

Es posible que la existencia de tantas características definan cada aspecto de la vida de una persona, sin embargo hay aspectos de cada esfera que definen la manera como el individuo realiza sus actividades en el ambiente construido, estas son: el perfil, el espacio personal, la privacidad, la territorialidad y el estatus.

Perfil del individuo

Para poder explicar cómo el individuo se comporta en el ambiente, primero es necesario entender la relación perfil-comportamiento. Al hablar de perfil se hace referencia a las características que tienen los individuos con respecto al rol que tienen en un edificio, a los estados fisiológicos y a aspectos culturales que tienen al momento de la interacción (Moore, Tuttle, & Howell, 1985) (Kopec, 2006). Estas características son el tipo de usuario, ciclo de vida y estilo de vida. Todas las personas al entrar en un edificio adoptan un rol, el comportamiento depende de dicho rol, de las capacidades físicas que posee el individuo y la manera de realizar sus actividades. Diferentes grupos de usuarios tienen diferentes necesidades, patrones de comportamiento y maneras de ser afectados por las cualidades del ambiente (Moore G., 1979).



Figura 11. El rol del individuo en el edificio. Toda persona adopta un rol al entrar a un edificio: estudiante, maestro, etc. Unidad de posgrado UNAM (2016).

Por tipo de usuario se hace referencia a las actividades que un individuo realiza dentro de un edificio dependiendo del rol social que adopta. Es una característica que se genera dependiendo del tipo de edificio al que se hace referencia; por ejemplo en un edificio educativo los usuarios se pueden clasificar en profesores, alumnos, administrativos, mantenimiento, etc. En todos los edificios se dan éstos roles.

El ciclo de vida se refiere a los patrones humanos del crecimiento. Bogin y Smith (1996) mencionan cinco etapas: infancia, niñez, adolescencia, juventud, madurez y vejez; cada etapa

tienen sus características particulares y aunque no hay rangos estáticos para cada edad, si se puede decir que son patrones distinguibles del individuo que determinan como éstos enfrentan los estímulos ambientales.

En cuanto al estilo de vida, se refiere a las actividades cotidianas que realiza el usuario de un edificio durante determinados momentos del día. Sus características son la actividad, el tiempo y la intensidad con la que se realizan las actividades. El estilo de vida es un factor cambiante en el tiempo, lo cual quiere decir que la manera como se hacen las actividades hoy día son muy diferentes a como se realizaron en el pasado; el cambio es el resultado de las modificaciones en las estructuras sociales, políticas y económicas (Moore, Tuttle, & Howell, 1985).

El estilo de vida se transforma en cultura cuando la mayor parte de la población comparte actividades. Se puede decir que la cultura hace referencia a los patrones de conducta que se observan en una población; son los elementos tipológicos en una sociedad que van desde la conducta, las costumbres, los edificios, la vestimenta, etc. Los componentes de la cultura son las creencias, valores y conocimientos.

El espacio personal

El espacio personal se define como la zona que rodea a un individuo, en donde no puede entrar otra persona sin autorización. Esta zona es similar a una burbuja que envuelve al individuo creando un límite invisible entre las personas y un posible intruso; todos los individuos manejan una distancia en la que se sienten cómodos con los demás, por lo que se dice que es un patrón de comportamiento. El espacio personal es altamente variable y se estrecha o ensancha de acuerdo a las diferencias individuales, las circunstancias ambientales y la naturaleza particular de las relaciones interpersonales (Kopec, 2006).

El espacio personal está relacionado con el concepto de proxémica, un término inventado por Edward Hall (1966) para definir el estudio científico del espacio como medio de comunicación interpersonal y que se enfoca en el estudio de las distancias de interacción humana. Una de las principales contribuciones de Hall es el haber identificado y descrito cuatro zonas de distancia que regulan la interacción de los seres humanos.

Hall divide el espacio personal en las siguientes cuatro categorías:

- La distancia íntima es la zona que va desde el contacto físico hasta 42 cm. de un individuo; es el área reservada para las practicas amorosas y las confidencias.
- La distancia personal es el área desde los 42 cm. hasta 1.20 m. de una persona; es la distancia propia para la interacción entre amigos íntimos.
- La distancia social se extiende desde 1.20 m. hasta 3.60 m. alrededor del individuo, se utiliza para contacto de negocios, asuntos formales y distantes.
- La distancia pública es la zona que comprende desde los 3.60 m. en adelante de una persona y se reserva para contactos superficiales.

Aunque Hall identifica unas medidas muy específicas de las distancias interpersonales, estas varían según ciertas características del individuo. Culturalmente se puede identificar que la manera de utilizar el espacio personal varía según la nacionalidad del individuo emplazado en un medio ambiente determinado. También se ha demostrado que el carácter étnico influye en las dimensiones del espacio personal sin embargo no es un factor independiente ya que está relacionado con el medio socioeconómico (Holahan, 2015).



Figura 12. Espacio personal. La distancia entre individuos varía dependiendo de la relación existente entre ellos. UNAM (2016).

En la vida diaria, cada individuo utiliza constantemente el espacio personal como un elemento esencial de su interacción con otras personas. Los aspectos importantes de estos espacios pueden traducirse en patrones de movimiento, corporales y gestos.

La privacidad

La privacidad es el control selectivo del acceso a uno mismo o al grupo que uno pertenece. Esta definición pone énfasis en el concepto de control de la información y también comprende el aislamiento de una persona o grupo de personas para restringir el acceso a sí mismos. A diferencia del espacio personal, en la privacidad se utiliza el término de límites o barreras para delimitar las áreas inaccesibles para otros; igualmente mientras el espacio personal representa una reacción hasta cierto punto inconsciente, la privacidad implica un acto consciente de acceso a uno mismo (Holahan, 2015).



Figura 13. Barreras del individuo. En todo momento las personas establecen límites físicos o invisibles para proteger su privacidad y comunicar hasta donde puede ingresar una persona desconocida. UNAM (2015).

Existen tres niveles de privacidad: soledad, reclusión e intimidad (Marshall, 1972); todos ponen énfasis en el aislamiento. La soledad se define como el deseo de estar a solas. La reclusión se refiere al deseo de vivir fuera de la vista de otras personas. La intimidad implica aislarse de los demás con la familia o con una persona especial.

Otros tres niveles refuerzan el concepto de control de la información: anonimato, reserva y retraimiento (Westin, 1967). El anonimato implica evitar que otros conozcan todo acerca de uno. La reserva es el deseo de no descubrir mucho acerca de uno ante personas que no se conoce bien. El retraimiento es la preferencia por no involucrarse con otra gente.

Todos estos niveles de privacidad ayudan a entender las acciones de las personas en su búsqueda de preservar el control hacia su persona y la necesidad de encontrar un espacio donde sentirse cómodo con el grado de interacción con otras personas.

Una de las principales teorías sobre la privacidad la propone M. Wolfe y colaboradores (Laufer & Wolfe, 2015), sostienen que el grado de control personal que un individuo es capaz de ejercer es esencial e incluyen tres tipos de control:

- Control sobre las elecciones; es la libertad de elegir el momento y el lugar para estar a solas.
- Control sobre el acceso; se refiere a regulación del acceso a sí mismo.
- Control sobre la estimulación; se refiere al control de la estimulación proveniente de otras personas, de intromisiones visuales o ruidos no deseados.

Para que se den estos tipos de control el individuo utiliza los límites o barreras interpersonales con la finalidad de regular el acceso a si mismo de parte de otras personas (Altman, 1975). Además de los tipos de control, existen múltiples mecanismos de conducta que el individuo emplea en su afán de lograr un nivel óptimo de privacidad personal. Estos mecanismos de privacidad incluyen la conducta verbal, lenguaje corporal y conducta ambiental; funcionan de manera unificada y cambian de acuerdo a las circunstancias personales y ambientales.

Hay que mencionar además que existe un vínculo entre la privacidad y el ambiente construido. La sensación de privacidad en el individuo se ve afectada por la regulación del grado de acceso visual y de exposición visual que se experimenta en diversos ambientes (Archea, 1977). El acceso visual implica la capacidad del individuo para inspeccionar con la vista el espacio circundante, mientras que la exposición visual se relaciona con el grado en que la conducta propia puede ser registrada por otra persona.

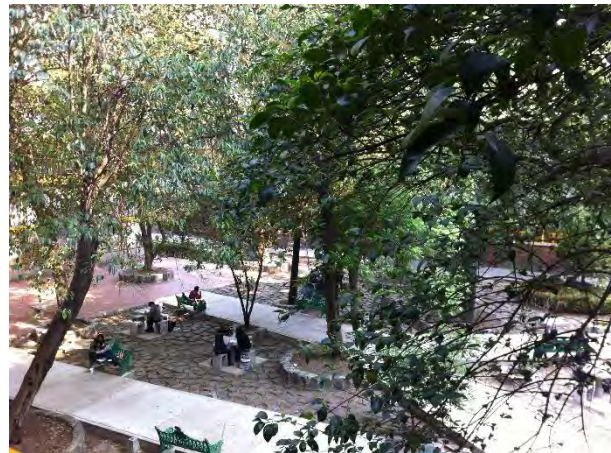


Figura 14. Espacios de privacidad. Las personas construyen elementos en los edificios para generar pequeños territorios. UNAM (2016).

Existen otras dos formas en las que se puede expresar la privacidad en cuanto a la interacción con los otros individuos del entorno social, estos mecanismos en muchas ocasiones son involuntarios, es decir están presentes en el individuo sin que esté consciente de ello o pueda modificarlo. Por lo general estos patrones son aprendidos cognoscitivamente de la observación del entorno cultural de interacción con otros. Los patrones son: la territorialidad y el estatus personal.

La territorialidad

La territorialidad es un patrón de conducta asociado con la necesidad de ocupación o posesión de un lugar o área geográfica por parte de un individuo o grupo, implica la personalización y la defensa contra invasores (Holahan, 2015). La territorialidad involucra además una defensa, personalización e identidad por parte del ocupante o usuario (Edney, 2006). El comportamiento está relacionado con el contacto social como reglas establecidas que se expresan a través de espacios delimitados.



Figura 15. Territorialidad virtual. Los individuos al asentarse en un sitio reclaman el espacio como suyo durante el tiempo que permanecen en él. UNAM (2016).

Diferentes necesidades requieren diferentes tipos de territorio, dependen del papel que desempeñan en la vida de un individuo o grupo de individuos⁶ así como del tiempo que se ocupa un espacio.

Altman (1975) identifica tres tipos de territorio:

- Territorios primarios. Son las áreas que se encuentran bajo el control relativamente completo de los usuarios durante un período prolongado, son primordiales en la vida de sus ocupantes y su posesión es claramente reconocida por otras personas.
- Territorios secundarios. Son los espacios en los que se tiene cierto grado de posesión, aunque no es permanente ni exclusiva, son menos importantes en la vida de los usuarios y tienen un carácter semipúblico.
- Territorios públicos. Son los espacios que están abiertos a la ocupación de manera relativamente temporal, tienden a estar abiertos a cualquier persona y por lo general están sujetos a un patrón de reglas y costumbres.

⁶ La necesidad de territorio puede presentarse de manera personal o de manera grupal, esto significa que un grupo de personas tiene la necesidad de limitar el acceso al grupo y de marcar los límites espaciales permitidos a otras personas.

La capacidad que tienen los espacios para permitir ejercer cierto tipo de territorialidad es un factor que el individuo toma en cuenta al momento de valorar y ocupar dichos espacios ya que satisfacen su necesidad instintiva de posesión.

El estatus personal

Los seres humanos emplean una variedad de técnicas para auto definirse, y esperan una definición de ellos hacia los otros. Por un lado están aspectos como la manera de hablar, la postura, el movimiento, la ropa, la vestimenta y el gusto; por otro tenemos objetos de posesión como edificios, automóviles, espacios, etc. El uso de artefactos físicos para afirmar un prestigio individual o institucional es tan vieja como la misma arquitectura.



Figura 16. Herramientas de estatus. Las personas quieren diferenciarse y mostrar un nivel superior, para ello recurre a vestimenta, lugares privilegiados y aparatos tecnológicos. Biblioteca, UNAM (2015).

En muchos casos éste comportamiento es inconsciente, sin embargo en la mayoría, es una búsqueda de expresión reflejo de la imagen que cada individuo considera apropiada. Por otro lado el sentido de estatus es un patrón de comportamiento relacionado con el uso y las actividades de los espacios arquitectónicos porque es a través de éste que se localizan, dimensionan y jerarquizan las zonas de un edificio (Deasy, 1985).

El comportamiento del individuo y el estímulo ambiental

Hasta este punto del capítulo ya conocemos las características del ambiente construido, el entorno físico y el individuo, ahora se retoman los conceptos de la perspectiva holística del ambiente, el modelo transaccional y la teoría de la estimulación (Holahan, 2015) para entender el proceso de interacción que existe entre los elementos del ambiente arquitectónico (Kopec, 2006). A partir de estos enfoques se



Figura 17. El estímulo ambiental. El ambiente les dice a las personas donde caminar, donde recostarse y donde socializar. UNAM (2016).

pretende diseñar un modelo de predicción para el comportamiento del componente más visible de todos los elementos, el individuo.

El presente capítulo es uno de los más importantes del proyecto de investigación ya que plantea las primeras posturas teóricas con respecto al comportamiento del individuo y los estímulos ambientales; en la primera parte comenzamos con la perspectiva teórica del comportamiento, para posteriormente profundizar en los comportamientos del ambiente y del individuo, información indispensable para obtener los patrones ambientales necesarios para la generación de un modelo de ambientes arquitectónicos.

Perspectiva transaccional persona-ambiente

Según la perspectiva transaccional, el comportamiento humano es el reflejo de las interacciones entre las características de la persona y del ambiente, es decir una acción del individuo está en función tanto de la persona como del ambiente (Lewin, 1936). De ahí que describir las propiedades de cada elemento es el punto de partida para interrelacionar los comportamientos ambientales.

En el concepto de interacción entre componentes es importante mencionar que los factores personales y ambientales no tienen la misma importancia para cada comportamiento, la capacidad relativa de las características ambientales y personales para predecir la conducta dependerá del tipo de comportamiento generado. En otras palabras, un comportamiento tanto del individuo como del ambiente (también llamado estímulo) requiere de alguna, de todas o de ninguna de las características del ambiente o del individuo para generarse. Esta afirmación toma en cuenta la perspectiva holística en el sentido de que el individuo participa activamente en la conformación de las circunstancias ambientales (Holahan, 2015).



Figura 18. Individuos rodeando el edificio. Los edificios generar muchos estímulos en las personas pero solo la combinación de algunos se traduce en un comportamiento.

La perspectiva transaccional difiere en dos aspectos de los modelos tradicionales. En primera instancia, mientras los modelos tradicionales han representado las influencias ambientales

y personales como causantes de efectos separados y unidireccionales en la conducta; en la perspectiva transaccional todos los componentes son recíprocos, cada uno afecta o es afectado, ya sea en forma directa o indirecta (Bandura, 1978). En un segundo aspecto, los modelos de interacción tradicional casi siempre han representado efectos en una sola dirección, donde las variables independientes siempre han tenido el rol de factores ambientales y las dependientes de la conducta; mientras en la perspectiva transaccional, para realizar los efectos recíprocos entre todos los elementos, las variables se presentan como partes en interacción de un sistema integrado (Holahan, 2015).

También hay que señalar como parte de nuestra perspectiva holística-transaccional a la teoría de los escenarios conductuales, Barker (1978) define la unidad ambiental como una situación de conducta, en dicha unidad ambiental se incluye un patrón de conducta particular dependiente de las características ambientales y temporales que la rodean. Una situación de conducta se define de acuerdo con los patrones de conducta característicos de las distintas situaciones y no según la conducta particular que cada individuo tiene en uso del ambiente. En una situación, las características de la conducta y las ambientales son interdependientes y se acoplan en forma natural.

Barker y Wright sostienen que para predecir el comportamiento de las personas en una situación particular, se necesita saber algo sobre la naturaleza de la situación ambiental específica en la que actuarán. Hay que mencionar también que para Barker es mucho más efectivo predecir el comportamiento de los individuos tomando en cuenta el ambiente que lo rodea, que intentar hacerlo a través de un estudio psicológico de éste.

Similar a Barker, Harold Proshansky y sus colaboradores explican que cada entorno arquitectónico está asociado con patrones de conducta característicos. Estos patrones son estables y duraderos, aun cuando cambien algunas de las personas que alberga (Proshansky, Ittelson, & Rivlin, 1976).

Para cerrar con los aspectos teóricos es importante mencionar la teoría de la estimulación (Kopec, 2006), útil para conceptualizar y explicar el ambiente como una fuente sensorial de información visual, sonora, táctil, etc. La teoría propone que cada ser viviente sobre la tierra reacciona a la estimulación sensorial y que examinando los diferentes niveles de información sensorial derivados de un ambiente se puede evaluar sus niveles de estimulación.

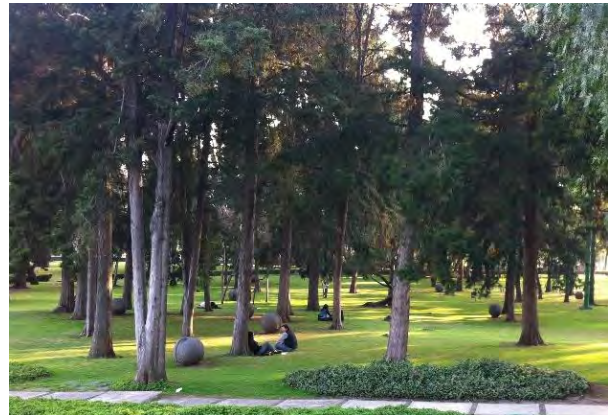


Figura 19. El ambiente y la percepción. Es a través de los cinco sentidos que se da el intercambio entre los elementos del ambiente y la conducta. UNAM (2015).

Los estímulos del ambiente

El comportamiento se presenta en los ambientes arquitectónicos en forma de estímulos. A su vez un individuo puede modificar los edificios con algún comportamiento, cambiando así los estímulos que recibe de éste; estas modificaciones las hace el usuario de los edificios con dos propósitos, el primero es para cambiar la relación actividad-circulación de los espacios arquitectónicos y el segundo es para cambiar las condiciones espaciales generadas por el entorno físico (modificado en un principio por las barreras del edificio); cabe recordar que el usuario no puede modificar el entorno físico que rodea el edificio, sólo el entorno que ya fue modificado. Todo este juego de interacciones las maneja la perspectiva transaccional del ambiente.



Figura 20. El estímulo del edificio. Un edificio puede ser capaz de generar los estímulos suficientes como para pasar de un estado en movimiento a uno contemplativo. Ciudad de México (2015).

Un estímulo es la energía capaz de alterar las condiciones de los organismos sensoriales (Flores, 2001). El entorno y los objetos emiten información a los organismos, esta información es energía capaz de generar en los individuos comportamientos. Los estímulos se procesan de tres maneras: percepción, cognición y generación de actitudes (Holahan, 2015). Mientras la percepción del individuo procesa los aspectos físico-sensoriales de un edificio, la cognición almacena en la

memoria la ubicación de los elementos, y la actitud es una valoración que el individuo hace de los espacios ya conocidos en los procesos anteriores.

Es muy importante para entender la investigación la mención de los estímulos generadores del comportamiento mecánico ya que son éstos los que producen movimiento sostenido e intermitente en cualquier parte del cuerpo de un individuo.

Tomando en cuenta las características del ambiente construido podemos mencionar los siguientes estímulos generados: red de circulaciones, espacios generadores de acontecimientos, privacidad espacial, valoración ambiental y el entorno físico modificado (Alexander, 1981) (Hillier & Hanson, 1984) (Aragónés, Américo, & Corraliza, 1998) (Holahan, 2015).

La red de circulaciones es un estímulo creado por la disposición espacial y las circulaciones en los edificios, este estímulo surge de la combinación de las características ambientales de accesibilidad, conectividad, legibilidad, visibilidad y de los factores físicos del entorno que afectan la selección de ruta de un individuo. De manera que el estímulo generado por la red de circulaciones condiciona el flujo de circulaciones en el sistema del ambiente arquitectónico.

El estímulo de los espacios generadores de acontecimientos surge de las características de espacialidad y acontecimiento en el edificio. Se genera cuando una serie de patrones espaciales se vincula con algún acontecimiento y donde el estímulo del edificio puede afectar tanto al individuo como al entorno físico que lo rodea (Alexander, 1981). Este estímulo es un factor



Figura 21 Estímulo de la red de circulaciones. Los andadores de un edificio están vinculados con el flujo peatonal, pero igual a comportamientos de socialización. UNAM (2016).



Figura 22. Estímulo de acontecimiento. Cierta disposición del espacio y las condiciones del entorno físico atrae a las personas a socializar. UNAM (2016).

que define las actividades que se realizan en un espacio y el tiempo en el que las personas permanecen ahí.

El estímulo generado por la necesidad de privacidad espacial actúa en conjunto con el estímulo generado por los acontecimientos del lugar, al atraer o repeler a las personas de un espacio. La privacidad es el estímulo que determina las barreras o límites que tiene el individuo para alcanzar un nivel óptimo de privacidad y así permanecer, socializar o realizar una actividad. Dicho nivel óptimo influye en los indicadores de los estímulos ambientales que mencionaremos más adelante.

El estímulo que ayuda a la valoración ambiental se genera a partir de los espacios de acontecimientos y las características de privacidad, territorialidad y perfil del individuo; es el que auxilia al individuo a tomar decisiones en el momento de recorrer un edificio, ya que existe una comparación entre el destino de su recorrido y la necesidad de realizar una pausa para disfrutar del ambiente.

Por último, entre las características del entorno físico modificado podemos mencionar los siguientes estímulos generados: frío, calor, barreras de lluvia, acceso de ruido, barreras de sol, baños de sol, deslumbramiento, incomodidad espacial y confort ambiental.

El comportamiento del individuo

Desde un punto de vista holístico-transaccional, la información que parte del ambiente y hace impacto en el individuo, se recibe, evalúa y codifica mediante una red de procesos interrelacionados. Estos procesos incluyen la percepción ambiental y el desarrollo de representaciones ambientales que posteriormente generan una actitud de parte del individuo. Esta información se convierte entonces en la base de las decisiones del individuo en cuanto a cómo, cuándo y dónde actuar con respecto al ambiente (Holahan, 2015).

Tomando en cuenta lo anteriormente, se puede decir que existen tres modos esenciales de interacción humana con el ambiente: orientación, operación y evaluación.

La orientación es la interacción encargada de la navegación general de un individuo dentro de un edificio, esto es posible ya que cada individuo tiene un mapa mental del ambiente (Holahan, 2015). Éste comportamiento está vinculado con la característica de legibilidad del ambiente, ya que es a partir de los elementos legibles de un edificio que se puede dar el conocimiento ambiental

y una posterior selección de rutas en el edificio (Lynch, 2010). Es importante mencionar que el conocimiento ambiental se relaciona con la familiaridad del individuo con el ambiente, además de que existen otras vinculaciones con sus características para la selección de una ruta.

La operación es la interacción encargada de las actividades del individuo en el espacio tomando en cuenta su perfil y las características ambientales presentes. Se encarga de los comportamientos de desplazamiento y evasión, formación de grupos, actividad espacial y decisión espacial.

La evaluación es la interacción encargada de valorar la calidad del ambiente con respecto a las actividades que se realizan en él; se puede conocer a partir de los indicadores de los estímulos ambientales.

En otro sentido Gary Moore (1979) propone que el individuo tiene niveles de comportamiento, estos niveles se dividen en internos y externos.

Los niveles internos son los comportamientos que no se perciben de manera visible, se conforman de procesos que ocurren en el interior del individuo y pueden ser de tipo fisiológico y psicológico. El nivel básico de comportamiento es el fisiológico, también conocido como de supervivencia, es decir, el que responde a la regulación del cuerpo respecto a las características físicas del ambiente. Los comportamientos psicológicos son los que dan significado a ciertos estímulos ambientales y que puede trastornar y mejorar una actividad. Estos dos comportamientos trabajan juntos y por lo general uno puede desencadenar la reacción del otro.

Los niveles de comportamiento externo son visibles para otros individuos. Estos niveles pueden ser: individual, social y cultural. El comportamiento individual se encarga de realizar las actividades del plan de vida, es decir las actividades que el individuo realiza según sus necesidades. El comportamiento social es el que se presenta al interactuar con otros individuos y que se refiere a los límites que se utilizan para comunicar los niveles de privacidad que necesitan dar a respetar. Por último el comportamiento cultural, está relacionado con las costumbres del individuo, marcadas por las relaciones culturales que comparte con otros y que se cimienta en las creencias, valores y conocimientos.

Habría que decir también que el comportamiento interno es el encargado en la toma de decisiones precedentes a un comportamiento externo. Si el comportamiento externo es el encargado

de desplazarse por un camino, con todo lo que implica; el comportamiento interno es el encargado de la selección del camino y la toma de decisiones espaciales que se presentan durante el movimiento, todo estimulado por el ambiente.

Indicadores de los estímulos ambientales

Los dos principales indicadores de los estímulos ambientales son el rendimiento y el estrés. Con estos indicadores se puede hacer una evaluación de la calidad ambiental con respecto a las actividades que se realizan.

Para entender la relación ambiente-individuo a través del rendimiento es importante conocer los tipos de actividades que se realizan en el espacio construido y los efectos que determinados factores ambientales producen en la realización de dichas actividades.

Fred Steele (1973) divide el rendimiento humano en tres categorías de tareas instrumentales:

- Actividades físicas, las que se dan en lo externo del individuo.
- Actividades mentales, las que se realizan dentro del individuo.
- Actividades de interacción, las que ocurren entre individuos.

Entre las variables que pueden afectar el rendimiento se encuentran: la luz, la temperatura, el ruido, la humedad y la disposición espacial.

En cuanto al estrés, es la respuesta del cuerpo a la acción del ambiente, la percepción de la situación de estrés por parte del individuo es esencial para entenderlo, siendo un proceso psicológico activo que asimila y juzga los elementos de la situación en confrontación con un patrón establecido de ideas y expectativas (Holahan, 2015).

Se identifican tres etapas en las respuestas orgánicas del individuo a las condiciones productoras de estrés. La primera etapa, la reacción de alarma, representa un llamado a las defensas del cuerpo. La segunda etapa, la adaptación, implica un esfuerzo por soportar y asimilar la situación. La tercera etapa, el agotamiento, sobreviene si el productor de estrés es fuerte y de bastante duración (Selye, 2000).

También se han identificado dos tipos principales de estrategias que los individuos emplean para enfrentar situaciones de estrés: la respuesta enfocada en el problema cuyas conductas y actos

se dirigen hacia la fuente de estrés y el manejo de la situación como una respuesta enfocada en las emociones que implica un cambio en la actitud proveniente del interior (Folkman & Lazarus, 1980).

Resumen

En este capítulo se definió y describió el sistema complejo de los ambientes arquitectónicos con la finalidad de entender su funcionamiento, conocer sus componentes y analizar los patrones presentes del sistema.

En un primer acercamiento se definió el concepto de ambiente arquitectónico utilizado en la investigación con el propósito de evitar confusiones entre los términos. De igual manera se presentó la perspectiva holística-transaccional para predecir el comportamiento del ambiente arquitectónico, ésta considera al ambiente como un sistema de interrelaciones compuesto por tres componentes: el individuo, el edificio y el entorno físico. El sistema funciona a través de las transacciones, es decir, que un componente es capaz de modificar las características del otro, a diferencia de los métodos tradicionales que estudian el sistema de manera unidireccional, donde el ambiente construido es el único que modifica las características y el comportamiento del individuo.

A partir de estas características se definieron los comportamientos del individuo: orientación, operación y evaluación; y los comportamientos del ambiente, la red de circulaciones, espacios generadores de acontecimientos, privacidad espacial y valoración ambiental.

En el siguiente capítulo se retoman los conceptos para la generación de un modelo partiendo de los patrones ambientales, dicho modelo corresponde a la segunda etapa del método de simulación basada en agentes para representar los ambientes arquitectónicos.

Capítulo 3. Modelo de predicción para el comportamiento ambiental

Si en los capítulos anteriores se definieron los métodos y el funcionamiento del sistema a simular, el presente capítulo expone el modelo para predecir el comportamiento de los sistemas formados por el ambientes arquitectónicos. Es importante recordar que el modelado es la acción de representar un fenómeno de la realidad de manera abstracta, en el caso del sistema de ambientes, la representación se lleva a cabo a partir de la interacción de sus tres componentes: individuo, edificio y entorno físico. El modelo debe ser representativo del sistema, programable con un proceso de codificación, predictivo para los comportamientos de alguno o todos sus componentes, evolutivo (capaz de tener modificaciones o mejoras) y funcionar a partir de comportamientos visibles.

El proceso para elaboración del modelo comienza con el planteamiento de un objetivo de simulación, continua con un método de abstracción para simplificar el sistema estudiado, por último se evalúa su capacidad para explicar los fenómenos del sistema.

El modelo es la base de la simulación, todos los programas dependen y están construidos a partir de él, ya que cada algoritmo generado a partir de él resuelve alguna característica o comportamiento explicado en la representación del sistema y como las predicciones son generadas por el modelo, éste estructura todos los procesos.

El objetivo del modelo es predecir el comportamiento de los individuos dentro de un edificio a partir de la abstracción de los componentes, características y comportamientos del ambiente arquitectónico. Con ello se pretende construir un primer prototipo de simulación para analizar los flujos peatonales en los edificios construidos o por construir.

Si comparamos el cambio que propicia el modelo en el proceso de diseño, se puede decir que en la planeación arquitectónica tradicional los edificios se proyectan a partir de un esquema de espacios y enlaces por relación de actividad, mientras en el modelo de ambientes se entiende al edificio como un sistema donde todos los espacios están relacionados por el usuario; por otro lado

el modelo tradicional divide el edificio en zonas tomando en cuenta una actividad en específico, mientras con el modelo el edificio es un generador de flujos sin divisiones. Hay que decir que mientras procesos tradicionales entienden al edificio como un sistema simple de partes interrelacionadas, el modelo de ambientes lo entiende como un sistema complejo compuesto por varias partes interrelacionadas en varios niveles que crean vínculos y nueva información en la variación de los vínculos.

Antes de adentrarnos en las partes y el funcionamiento del modelo, debemos comenzar con el proceso de abstracción para las características del ambiente arquitectónico, la simplificación por patrones. Para ello se ha tomado como referencia los trabajos de Christopher Alexander (1981), acerca de la generación de patrones en la arquitectura, para identificar los sucesos generados por el ambiente arquitectónico mostrados en el capítulo 2 y así plantear un número finito de patrones con un número infinito de conexiones sintácticas que le dan forma al sistema complejo.

Un modelo de patrones

Cuando se habla de un modelo de patrones, se hace referencia a una simplificación del ambiente arquitectónico a partir de sus elementos, características y comportamientos que se encuentran recurrentemente en los edificios, sus usuarios y su entorno (Alexander, 1981), en otras palabras, los patrones del ambiente arquitectónico. Estos patrones son universales, utilitarios, articulados, jerárquicos, reproducibles, descriptivos, componentes de un patrón mayor y generados a partir de un sistema complejo. Por estas cualidades el método de modelado a partir de patrones ha sido muy útil en el diseño de programas computacionales y simuladores. En arquitectura Christopher Alexander (1981) fue el primero en introducir el concepto; otros investigadores como Bill Hillier (1984) han generado programas de análisis cuyo propósito es identificar diferentes tipos de patrones en los edificios.

Los patrones son universales porque son ampliamente reconocibles por la personas; son utilitarios porque sirven para abstraer características de un sistema real y generan aplicaciones; son jerárquicos porque tiene un nivel dentro del sistema que representan; son articulados porque para generar un sistema se vinculan con otros patrones del mismo nivel; son reproducibles porque se pueden aplicar a sistemas similares; son descriptivos porque expresan un significado, unas propiedades y una conexión del sistema representado; y por último son generadores de un sistema

porque se estructuran en forma de lenguaje y permiten interrelacionar entidades o componentes con otras entidades para definir las funciones del sistema (Alexander, 1981).

Con respecto al lenguaje de patrones, así como las palabras deben tener una relación gramática y semántica entre ellas para crear un lenguaje oral útil, los patrones deben estar relacionados los unos con los otros en una estructura lógica e intuitiva. Es una manera precisa de describir el sistema de ambientes arquitectónicos y sus componentes ya que cada patrón es una característica y un proceso de relación con otros patrones, es decir, cada patrón indica una relación con otro y de qué manera formar un patrón más grande; de este modo se estructura el lenguaje.

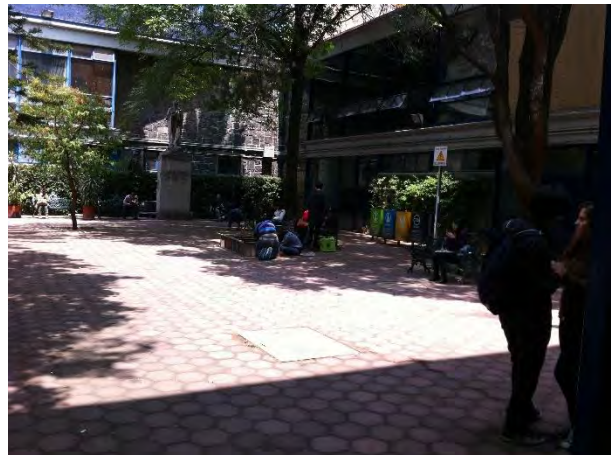


Figura 23. Los patrones de una plaza. Alexander menciona que existe un patrón denominado Lugares-árbol, vinculado a un patrón de socialización. Este vínculo hace referencia a un lenguaje de patrones. UNAM (2016).

La mejor forma de entender un patrón ambiental y un lenguaje es con un ejemplo:

Para comenzar piense en un edificio junto con su ubicación geográfica. Entendiendo que todo edificio puede representarse a partir de patrones seguramente el edificio en el que pensó tiene un patrón denominado Tipo-de-edificio vinculado con la actividad que ocurre en su interior (puede ser oficinas, educativo, comercial, etc.)⁷.

Establezcamos que el edificio imaginario es un patrón Edificio-educativo. Como todo patrón está compuesto o vinculado a patrones más pequeños (método de abstracción), el edificio educativo que imaginó seguramente tiene un patrón que especifica las actividades que se realizan dentro de él (edificio de educación primaria, preparatoria, posgrado, etc.).

Ahora pensemos que el edificio es un patrón Edificio-educativo-posgrado, este patrón tiene a su vez otros patrones que vinculan las actividades en zonas espaciales más pequeñas (zona de oficinas, vigilancia, servicios, salones, etc.). Y así sucesivamente.

⁷ En el caso de edificios multifuncionales se puede asignar una tipología nueva o ver cada función del edificio como la tipología dependiendo de las interrelaciones interiores.

Del ejemplo anterior se puede entender que cualquier edificio puede representarse con patrones y éstos están organizados en una estructura jerárquica. En otro sentido hay que mencionar que para ordenar todos los patrones, en su estructura o lenguaje, cada patrón debe especificar su relación con otros patrones; siguiendo el ejemplo, en el patrón que especifica la zona de salones hay que especificar que tiene una vinculación funcional con otras zonas, como puede ser zonas de oficinas y/o zonas de servicios, para que a partir de esa vinculación tome forma un patrón Edificio-educativo. Es importante mencionar que para que el sistema del edificio funcione correctamente tiene que tener el número de patrones suficiente para representarlo, de otra manera el patrón estará incompleto y el sistema que conforman será defectuoso.

En el ejemplo se mencionaron los patrones propuestos de un solo componente del ambiente, patrones del edificio, los otros dos componentes y las interrelaciones tienen otros patrones que a su vez tienen un lenguaje que vincula todos los patrones de un ambiente arquitectónico.

Ahora se puede decir que:

- Un patrón es un suceso que se repite dentro de un sistema.
- Cada patrón es una característica del sistema y un método de vinculación con otros patrones.
- A la vinculación con otros patrones se le conoce como lenguaje de patrones.
- El lenguaje tiene una estructura de red jerárquica.
- La red de interrelaciones jerárquica forma un sistema complejo simplificado.
- El nivel de simplificación depende de la cantidad de patrones seleccionados del sistema complejo.

Método de abstracción por patrones

Ya se estableció el lenguaje de patrones como método de abstracción y se explicó lo que es un patrón y cómo se forma un lenguaje, ahora se exponen los pasos que tiene el método. Todo el proceso de abstracción por patrones tiene una parte documental, una analítica y un planteamiento explicativo que simplifica un fenómeno o función del sistema de ambientes arquitectónicos; es lineal, descriptivo, deductivo, en cierto aspecto creativo y los resultados no son absolutos (los patrones están propensos a modificaciones). Son el inicio del proceso de modelado.

El hecho de que un patrón, obtenido del método, no sea una verdad absoluta no implica que el modelo y consecuentemente el prototipo sean ambiguos, más bien ésta característica le brinda

mucha flexibilidad al prototipo porque le permite modificar sus patrones sin afectar el funcionamiento general del sistema (Alexander, 1980).

Los seis pasos del método de abstracción son los siguientes:

1. **Selección e investigación del sistema.**

Es la etapa que consiste en recopilar datos y características del sistema que se desea simplificar; la información puede ser documental, de campo, cuantitativa y cualitativa.

2. **Análisis del sistema.** En esta etapa se descompone el sistema en componentes, características y comportamientos a partir de la información obtenida, con el fin de identificar sus partes y descubrir las relaciones existentes entre ellas.



Figura 24. El ambiente arquitectónico. Para poder proponer un patrón primero hay que observar a los componentes del ambiente arquitectónico e identificar los sucesos recurrentes que ocurren dentro de él. UNAM (2016).

3. **Identificación de sucesos recurrentes.** Después del análisis se deben abstraer los elementos, características y comportamientos recurrentes en el sistema, los patrones deben buscar la universalidad, es decir, que se apliquen a todos los sistemas similares⁸.
4. **Definición del patrón.** Todo patrón debe tener un nombre claro, concreto y descriptivo del evento que representa.
5. **Interrelación de patrones.** Cada patrón debe ser componente de uno más grande, el patrón grande se forma a partir de la conexión entre patrones en un lenguaje estructurado y lógico, un lenguaje de patrones. La etapa consiste en proponer las interrelaciones de los patrones a partir de la información obtenida en el primer paso del proceso.
6. **Calibración de patrones.** En esta etapa se modifican los patrones a partir de la nueva información surgida del ambiente o de un segundo ciclo en el proceso de obtención de patrones.

⁸ El hecho de que los patrones busquen la universalidad no significa que en algún momento se alcance, más bien es un objetivo de calibración para los patrones con el propósito de que tengan un mayor nivel de representatividad.

Como resultado del método se obtiene un sistema complejo simplificado en una red jerarquía de patrones, la red conecta los patrones de dos maneras: con un vínculo de aparición, es decir, un patrón se vincula con la aparición de otro; y con un vínculo de relación patrón-componente, cuya función es indicar que un patrón es componente de otro. Estas interconexiones son las que explican las funciones y comportamientos del sistema.

Modelo de ambientes arquitectónicos

El modelo de predicción para el comportamiento humano dentro de los ambientes arquitectónicos establece tres componentes (patrones encontrados en todos los ambientes arquitectónicos): el individuo, el ambiente construido y el entorno físico exterior; el entorno construido tiene la particularidad de tener elementos del entorno físico exterior, sin embargo éstos no tienen las mismas propiedades ya que éstas son modificadas por las barreras del edificio. Con esta primera abstracción se establece que todo el sistema complejo se visualiza a partir de las características e interrelaciones de los tres componentes, los cuales a su vez son complejos.

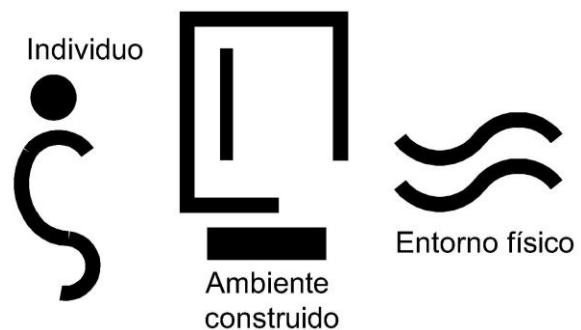


Figura 25. Los tres componentes del ambiente arquitectónico. Las características y las interrelaciones de los componentes forman el sistema complejo de ambientes arquitectónicos.

Tomando en cuenta el método de simplificación de patrones se puede establecer que los componentes el ambiente arquitectónico tienen las siguientes características:

- Patrones más pequeños que lo conforman.
- Un mismo nivel jerárquico en la estructura del sistema.
- Son entidades abstractas⁹.
- Son universales.

En la abstracción de cada componente se aíslan los comportamientos y características en patrones muy bien definidos; es importante mencionar que en algunas referencias el ambiente

⁹ Los componentes del ambiente como patrones no son representados como objetos o entes sino como un cúmulo de elementos físicos, características y funciones.

construido y el entorno físico se consideran como una unidad mientras que en el modelo presentado son componentes separados donde el ambiente construido es una entidad que abarca las barreras sólidas de la edificación junto con los parámetros modificados del entorno físico y el entorno físico tiene propiedades no modificadas por el edificio.

Cada componente del ambiente debe ser entendido de manera similar a un cuerpo humano, donde los órganos no son sólo presencia física, sino que tienen una función, es decir que cada órgano trabaja con los demás para formar el cuerpo. Llegados a éste punto se puede decir que el ambiente arquitectónico y sus componentes se ubican en la cima de la estructura jerárquica del modelo de patrones.

Puesto que cada patrón se conforma por otros componentes más específicos y tomando en cuenta la investigación del sistema complejo del capítulo dos, se establece que cada componente del ambiente arquitectónico tiene dos patrones más pequeños: patrones de carácter y patrones de comportamiento. En el caso de los patrones de comportamiento en el ambiente construido y el entorno físico se denominan patrones de estímulo.

Los patrones de carácter son rasgos sucesivos que tiene un componente del ambiente arquitectónico en el lapso en el que se encuentra en presencia de los otros dos componentes. Mientras en el individuo encontramos patrones de carácter que definen su perfil, espacio personal, nivel de agrupación y ubicación en el espacio; en los ambientes construidos los patrones de carácter definen los tipos de edificación, destinos de recorrido, puntos de circulación etc.; y en el entorno físico los patrones de carácter definen a los elementos generadores de los fenómenos del entorno como son el sol, agua, aire y sonido¹⁰.

Por otro lado, los patrones de comportamiento son acciones recurrentes que realiza un componente, tomando en cuenta siempre sus patrones de carácter, en el momento de interactuar con los otros dos componentes del ambiente arquitectónico. Mientras en el individuo los patrones de comportamiento están relacionados con el movimiento, pausa, agrupación, evaluación y modificación ambiental; en el ambiente construido los patrones de estímulo se relacionan con la red de enlaces espaciales, red de puntos de ruta, estímulos de acontecimiento, barreras de

¹⁰ Las características y comportamientos se especifican en el capítulo dos del documento.

privacidad, etc.; y en el entorno físico encontramos patrones de estímulo como el confort ambiental, barreras de lluvia, barreras de sol, baños de sol, etc.

Los patrones seleccionados para el primer modelo de ambientes arquitectónicos se pueden observar en la tabla 1. En ella se ubican los patrones de manera jerárquica.

PATRONES DEL AMBIENTE ARQUITECTÓNICO					
Ambiente arquitectónico					
Individuo		Edificio		Entorno	
Carácter	Comportamiento	Carácter	Estímulo	Carácter	Estímulo
Usuario-Perfil	Movimiento-desplazamiento	Edificio-tipo	Edificio-caminos	Entorno-Sol	Confort-ambiental
Usuario-ciclo	Evasión-de-obstáculos	Espacio-actividad	Red-de-enlaces	Luz	Barrera-lluvia
Estilo-situación	Pausa-ambiental	Edificio-circulaciones	Visibilidad-de-elementos	Temperatura	Barrera-sol
Usuario-tipo	Actividad-estática	Enlaces-de-circulación	Legibilidad-del-camino	Entorno-Agua	Baño-de-sol
Espacio-personal	Estática-sin-actividad	Accesos-de-edificio	Distancia-del-camino	Humedad	
Niveles-de-Privacia	Agrupación-ambiental	Destinos-de-recorrido	Red-de-puntos	Lluvia	
Nivel-de-agrupación	Agrupación-peatonal	Puntos-de-circulación	Conectividad-del-destino	Aire	
Nivel-de-territorialidad	Agrupación-espacial	Espacio-acontecimiento	Accesibilidad-del-destino	Viento	
Estado-usuario	Modificación-ambiental	Edificio-sistema	Edificio-acontecimientos	Calidad-del-aire	
Llegada-temprana	Selección-de-destino	Edificio-sistema	Edificio-escalas	Sonido	
Llegada-tarde	Selección-de-ruta	Edificio-sistema	Red-de-escalas	Ruido	
Velocidad-peatonal	Selección-de-entrada	Edificio-sistema	Fuerza-de-estímulo	Acústica	
Estado-de-agrupación	Ir-a-siguiente-punto	Punto-de-escala			
	Busqueda-de-obstáculos	Enlace-de-escala			
	Valor-de-ruta	Barreras-de-privacia			
	Valor-de-destino				

JERARQUÍA DE PATRONES	
Primer nivel	
Segundo Nivel	
Tercer Nivel	
Cuarto Nivel	
Quinto Nivel	
Sexto Nivel	
NIVELES DE ABSTRACCIÓN	
Comportamiento Visible	
Característica compleja	

Tabla 1. Propuesta de patrones. A partir de la investigación de los ambientes arquitectónicos y del método de abstracción por observación del sistema se proponen los patrones ambientales.

Lo explicado hasta ahora da a entender que los patrones tienen un nivel de abstracción jerárquico, es decir mientras más alto en la pirámide de patrones nos encontremos más abstracto será el patrón y mientras más abajo más concreto será al definir una característica o función del sistema. Los patrones son el producto del análisis del comportamiento de los ambientes arquitectónicos reales descritos en el capítulo dos.

Funcionamiento del modelo de ambientes arquitectónicos

Todo modelo de la realidad se hace con el propósito de explicar, analizar o experimentar con un fenómeno, según lo que se pretenda conocer de él, es el nivel de abstracción para el modelo. El modelo de predicción presentado no tiene el propósito de integrar todos los comportamientos y características posibles en el ambiente, sino solo aquello que son recurrentes y representativos; la razón principal es que el simulador está diseñado como una herramienta de análisis espacial para el arquitecto, y como tal no necesita de especificaciones para todos los procesos ambientales o de un gran nivel de precisión en la predicción de comportamientos específicos.

Para explicar el funcionamiento del modelo hay que partir de lo general a lo particular. La explicación de los fenómenos que ocurren en el ambiente arquitectónico parte de una serie de

propuestas funcionales del sistema por parte de los usuario del modelo o por planteamientos de información inicial obtenida de observaciones de campo, información que al final del modelo debe arrojar predicciones de comportamiento. En primer lugar, para que el modelo funcione, se establece un edificio que denote una tipología, en seguida, se ubica el edificio en una localización con un entorno que denota las condiciones físicas que se experimentan en ese edificio; después, se establece a los usuarios (o grupo de individuos) que utilizan el edificio; por último, con el ambiente arquitectónico formado, se seleccionan los patrones para dicho ambiente.

Es importante mencionar que el modelo funciona con los datos estadísticos obtenidos de ambientes similares a los del ambiente formado, por lo que entre la base de datos se encuentra entre la información inicial con la que funciona el modelo¹¹.

Con todos los planteamientos de información inicial, el modelo predice el comportamiento del usuario de la siguiente manera:

1. El edificio, con su tipo de actividad específico, determina que tipos de usuario tienen acceso a él, el periodo en el que se dan las actividades dentro de él y el número de usuarios por periodo.
2. El entorno físico afecta los espacios exteriores del edificio con una serie de estímulos variables (localizados en la base de datos inicial).
3. Las barreras del edificio modifica los valores de los estímulos del entorno físico exterior y generan estímulos variables modificados al interior de los espacios de los edificios.
4. Con el escenario formado, el usuario entra compuesto por muchos patrones de carácter, relacionados con las actividades que establece el tipo de edificio seleccionado.
5. Al entrar al edificio el usuario se enfrenta a un número determinado de estímulos generados por el entorno físico y el propio edificio.
6. El individuo únicamente cuenta con cuatro tipos de comportamiento visible: movimiento, agrupación, pausa ambiental y modificación ambiental. Los estímulos del escenario únicamente pueden producir el cambio de un comportamiento a otro.

¹¹ Los patrones para cada componente es una selección probabilística que parte de los datos estadísticos de los casos similares que alimentan el modelo.

7. Tanto el ambiente construido (edificio y entorno modificado) como el entorno físico y el individuo utilizan los patrones de carácter para decidir un comportamiento¹².
8. La selección del patrón de comportamiento es una relación entre los patrones de carácter en el individuo, los patrones de estímulo en la ubicación del peatón dentro del escenario, un lapso determinado y el propio patrón de comportamiento.
9. Los patrones de estímulo del entorno no son modificables por el individuo.
10. Los patrones de estímulo del edificio pueden ser modificados por el individuo a partir del patrón de comportamiento visible denominado Modificación.
11. La estimulación es continua durante todo el lapso que el individuo permanece en el edificio¹³.
12. El mismo procedimiento que funciona para un individuo, funciona para todos los individuos usuarios del edificio.

En la figura 26 se muestra a los tres componentes del ambiente en interacción.

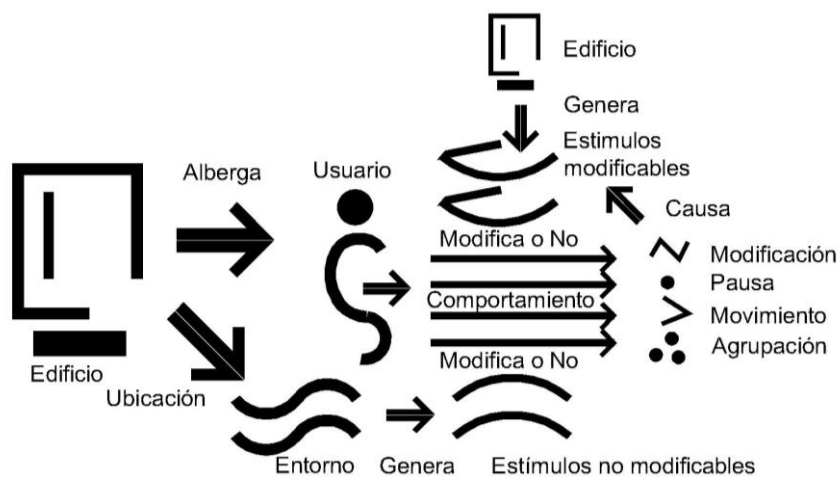


Figura 26. Modelo general del ambiente arquitectónico. El edificio y el entorno físico forman el escenario donde el individuo, con su rol de usuario, genera sus comportamientos.

¹² En el caso del ambiente construido y el entorno físico el comportamiento se denomina estímulo.

¹³ La estimulación va desde los destinos para cada individuo, los caminos y espacios para los comportamientos del individuo hasta las condiciones físicas para que el individuo realice una actividad.

Con el propósito de dejar claro el funcionamiento del modelo de ambientes arquitectónicos se presenta un ejemplo donde intervienen los patrones vinculados al comportamiento peatonal y las predicciones de dicho comportamiento:

Pensemos en un edificio y una ubicación, al hacerlo se construyen los primeros patrones del modelo (ver tabla 1); primero tenemos los patrones “Edificio-tipo”, “Espacio-actividad”, “Puntos-de-circulación”, “Enlaces-de-circulación”, “Accesos-de-edificio”, y “Horarios-de-actividad”¹⁴.

A su vez, los patrones del edificio se vinculan al patrón de carácter del individuo “Usuario-tipo” para determinar los tipos de usuario que pueden acceder a él. Por el simple hecho de que un usuario del edificio sea un individuo posee los patrones “Espacio-personal”, “Niveles-de-privacia”, “Estado-usuario” y “Usuario-perfil” (ver tabla 1).

Por otro lado, el ubicar un edificio en un sitio genera los patrones del entorno, esto quiere decir que cuando se ubica un edificio en su contexto, los patrones del entorno físico existente en el lugar se cambian a patrones del entorno físico modificado. Para el ejemplo establezcamos que los patrones del entorno son los ideales, de esa manera enfocarnos sólo en los patrones del edificio y el usuario¹⁵. En este punto ya está planteado el escenario para hacer predicciones de comportamiento.

Las predicciones comienzan cuando en el edificio los patrones “Accesos-al-edificio” y “Horarios-de-actividad” se vinculan a un patrón de estímulo “Acceso-de-Peatonos” para determinar el número de peatonos por segundo que van a entrar en él y la distribución de los accesos por donde van a entrar.

Inmediatamente que un individuo entra a un edificio, se vinculan los patrones “Usuario-Tipo” y “Espacio-Actividad” con el comportamiento “Selección-de-destino” para determinar el punto del edificio al cual el peatón se va a dirigir.

¹⁴ El nombre de los patrones escrito entre comillas es una propuesta para identificar claramente el patrón y su función, su origen se encuentra en la metodología de Christopher Alexander en el libro *El Modo Intemporal de Construir*.

¹⁵ Aunque los patrones ideales en la realidad no existen, en el modelo se pueden utilizar para cerrar el sistema, es decir, hacer predicciones sin tomar en cuenta a algún componente del ambiente arquitectónico.

Analogía con el lenguaje de patrones de Christopher Alexander

En los años setenta Christopher Alexander publicó las primeras ediciones de los libros *El modo intemporal de construir* y *El lenguaje de patrones*. En ellos formuló una teoría para el diseño de edificios y ciudades, sin embargo lo que Alexander realmente presentó fue un modelo para el diseño de una buena arquitectura a partir de patrones espaciales y de acontecimientos, con un modo de expresión, o lenguaje, para estos patrones.

Para Alexander (1981) un patrón es una actividad o espacio que se repite de manera predecible una y otra vez en cualquier lugar, apareciendo cada vez en manifestaciones distintas según el contexto donde se genere. Los patrones surgen de la relación entre un contexto determinado, cierto sistema de fuerzas que ocurren repetidamente y una configuración espacial que permite que las fuerzas se resuelvan. En este sentido se puede entender a los patrones como una cualidad y un proceso de manera simultánea.

El modelo de Alexander tiene el objetivo de encontrar un modo intemporal de construir, es decir, el diseño de edificios con significado y vida a partir de la observación de los lugares con las cualidades anteriormente mencionadas, Alexander descubrió que todos tenían dos cosas en común, patrones de acontecimiento y patrones espaciales.

Alexander definió los patrones de acontecimiento como los sucesos que proceden de las experiencias vividas, de las actividades, procesos y emociones que se repiten dentro de un ambiente físico; acontecimientos que varían de cultura a cultura. En el modelo un espacio físico no crea acontecimientos sino que un acontecimiento no puede separarse de un espacio físico, es decir, existe un vínculo.

Por otro lado, los patrones espaciales los define como la relación que existe entre los elementos de un espacio físico donde se producen leyes morfológicas.

A partir de los patrones Alexander predice la calidad de un edificio tomando en cuenta las cualidades de sus patrones constituyentes, es decir, patrones vivos generan edificios vivos y patrones muertos degradan un edificio hasta hacerlo desaparecer.

“La afirmación que un patrón está vivo no es una cuestión de gusto, cultura o punto de vista. Establece una relación práctica definida entre un concepto limitado, un conjunto de fuerzas que allí ocurren y el patrón que resuelve dichas fuerzas (Alexander, 1981).”

En sus teorías Alexander menciona que los patrones del edificio forman un lenguaje. En el lenguaje de patrones los elementos están constituidos por los patrones espaciales, definidos y jerarquizados, donde los patrones grandes están constituidos por patrones más pequeños; las reglas de combinación se presentan en una jerarquía donde los patrones también son los que indican como relacionarse entre ellos, en otras palabras un patrón es un elemento y una regla.

Desde un punto de vista general, los patrones de los edificios son una representación formada por componentes repetidos, éstos se dicen vivos cuando dan por resultado la generación de una arquitectura significativa, en otras palabras, es un modelo para obtener una arquitectura con la cualidad de vida que persigue Alexander.

Como es de intuir, la propuesta de Alexander es similar en muchos sentidos con el modelo de ambientes arquitectónicos planteado en la investigación, ya que fue el punto de partida para proponer el método de abstracción del sistema y la guía para conectar sus componentes en la búsqueda de propósito común, representar el ambiente arquitectónico.

Resumen

En el presente capítulo se vincularon las características del sistema de ambientes arquitectónicos real con la propuesta del modelo de predicción para el comportamiento ambiental mediante un método de abstracción cuyo fundamento son los patrones. Se explicó lo que es un modelo de patrones y el método para abstraerlos de un sistema real.

Con el método de patrones se definió a los componentes principales del modelo, al igual que sus características y comportamientos, para posteriormente representar el sistema con una estructura similar al lenguaje.

Otro aspecto importante del capítulo fue la explicación del funcionamiento del modelo. Se presentaron los datos de entrada y la lista interrelacionada de patrones que conforma a los componentes del modelo. De igual manera se representó el sistema a partir de un ejemplo de lenguaje de patrones para finalmente presentar los datos de salida a partir de una representación gráfica.

Por último se presentó una analogía con el modelo intemporal de construir de Christopher Alexander, tema que sirvió para entender los orígenes del modelo de ambientes arquitectónicos y para esclarecer un poco más su funcionamiento.

En el próximo capítulo continuaremos con el siguiente paso del método de simulación, llamado Codificación de Patrones, para mostrar el procedimiento intermedio que consiste en llevar el modelo de predicción del comportamiento a un programa de realidad virtual.

Capítulo 4. Codificaciones de simulación

La codificación del ambiente arquitectónico es el proceso de llevar al modelo de predicción por patrones a una serie de valores simbólicos o caracteres que una computadora utiliza para realizar operaciones y cuyo resultado es simular visualmente el funcionamiento del sistema complejo; estos valores simbólicos forman parte de un programa computacional elaborado a partir de algoritmos¹⁶. Para la codificación se necesita de un lenguaje de patrones completo, algoritmos, una representación digital de los componentes del sistema y de un código de programación; entre las propiedades de la codificación se encuentran: ser lógico, definido, ordenado, finito y legible. La codificación del simulador de ambientes es similar a otros programas de cómputo o aplicaciones ya que ambos crean métodos para producir una visualización u operación a partir de variables, además se sustentan de algoritmos (Cairó, 2005).

En el presente capítulo se hace un recorrido por todo el proceso de codificación, que es el paso intermedio entre el diseño del modelo de ambientes arquitectónicos y el programa de simulación virtual.

Método de codificación

Una vez elaborado el modelo para el comportamiento ambiental, el siguiente paso es su codificación. Para ello se utiliza un método con las siguientes etapas (Kontovourkis, 2009):

- Configuración del ambiente virtual¹⁷.
- Planteamiento del modelo de patrones.
- Diseño de algoritmos, diseño de datos variables y representación matemática.
- Codificaciones de simulación.

¹⁶ Un algoritmo es una serie de operaciones detalladas y no ambiguas para ejecutar paso a paso y que conducen a la resolución de un problema (Joyanes, 1993).

¹⁷ En el capítulo 1 se estableció el programa para videojuegos Unity como herramienta para la configuración del escenario de simulación.

La configuración del ambiente virtual consiste en representar gráficamente los componentes del ambiente arquitectónico dentro de un programa de realidad virtual, para el primer prototipo se propuso la plataforma Unity. Por otro lado, mientras el edificio se representa a partir de una maqueta virtual tridimensional, el usuario puede representarse por un agente virtual simbólico (un volumen abstracto) o figurativo (un volumen antropomorfo virtual). El entorno físico puede ser representado por valores numéricos o efectos visuales, sin embargo en el primer prototipo no se representa, es decir, adquiere el valor de componente con características ideales para la realización de actividades, dado los alcances de la investigación.

El programa Unity, además de permitirnos representar entidades en un ambiente virtual, nos define una manera de codificación a partir de scripts¹⁸. En la codificación de Unity se vinculan las entidades virtuales con los programas de comportamiento para generar una acción visual del componente tridimensional.

En el capítulo anterior se mencionó que un sistema complejo se abstrae a partir de patrones en un lenguaje. El modelo de patrones consiste en abstraer del sistema complejo de ambientes arquitectónicos, expresado en una estructura de patrones, subsistemas más pequeños. Si el sistema completo es la interrelación del individuo, el ambiente construido y el entorno físico, los subsistemas son las interrelaciones de las características, los comportamientos y las acciones de cada componente, igualmente representados en una estructura de patrones.

La etapa de diseño de algoritmos consiste en trasladar el modelo de patrones de los subsistemas obtenidos en la etapa de planeación, a variables para cada componente o a instrucciones ordenadas que los agentes y el edificio virtual utilizan para realizar una acción de simulación. Es importante mencionar que las partes y propiedades de los agentes se expresan en forma de datos variables, es decir, son información que utilizan los algoritmos de simulación en sus métodos.

Posteriormente de diseñar los algoritmos se concluye con el código de programación. El programa Unity utiliza el lenguaje de programación C#¹⁹ para escribir los códigos que le ordenan a los elementos tridimensionales realizar una acción de simulación (Unity, 2016); la codificación

¹⁸ Un script, también llamado archivo de órdenes, es un programa simple que contiene instrucciones para ejecutar una función.

¹⁹ C# es un lenguaje de programación orientado a objetos desarrollado y estandarizado por Microsoft.

consiste en escribir programas simples en el lenguaje de programación C# a partir de clases, variables y métodos, con base en los algoritmos diseñados. Los scripts en C# se convierten en lenguaje máquina para generar comportamientos de las entidades virtuales.

Tipos de códigos para simulación

Para la construcción del simulador se plantean tres tipos principales de códigos:

- Códigos de variables
- Códigos de comportamientos
- Códigos de control

Los códigos de variables son información que define las propiedades de los agentes y edificios virtuales a partir de las hipótesis de simulación²⁰; son variables porque cada agente tiene diferentes propiedades. Son los códigos básicos de datos para el simulador.

Los códigos de comportamiento son programas que utilizan la información de los códigos de variables para programar el comportamiento de los componentes del ambiente arquitectónico en las corridas de simulación²¹, también son conocidos como Scripts.

Los códigos de control son programas que ejecuta el administrador de las funciones del simulador para manipular los datos facilitados por el usuario de la aplicación y manejar el orden, número y ubicación de los agentes, además se utilizan para organizar las funciones principales del programa de simulación.

Ahora exploremos un poco el concepto de las hipótesis de simulación. Es una de las características más importantes de la herramienta de simulación presentada porque proporciona el carácter evolutivo y predictivo, ya que son explicaciones del funcionamiento ambiental y como tal, pueden sufrir modificaciones por los hallazgos encontrados o por observaciones más precisas de los fenómenos ocurridos en el ambiente arquitectónico, es decir, se pueden obtener mejores explicaciones para un comportamiento ambiental (Helbing, 2012).

²⁰ Una hipótesis de simulación es una propuesta acerca del funcionamiento del ambiente arquitectónico, dado que solo es posible observar su comportamiento pero no todos los factores que intervienen para que dicho comportamiento ocurra (Helbing, 2012).

²¹ Las corridas de simulación son las visualizaciones de las predicciones del comportamiento ambiental.

Las hipótesis de simulación son apuestas que proponen características o comportamientos para los componentes del ambiente arquitectónico a través de afirmaciones; por lo general las afirmaciones se encuentran sustentadas en datos estadísticos del ambiente y se expresan en forma de probabilidad; pueden ser medidas, aceptadas, descartadas y remplazadas por otra hipótesis sin que modifique el funcionamiento estructural de la herramienta de simulación.

Reglas de simulación

Para la simulación cada agente actúa de manera independiente de acuerdo a su propio comportamiento pre-programado, la programación debe ir en función de unas reglas de simulación según el método establecido por el modelo basado en agentes (Getchell, 2008); éstas aseguran que los agentes cuenten con las siguientes características:

- Autonomía.
- Actividad independiente.
- Heterogeneidad.

La regla de autonomía establece que cada agente debe ser libre de actuar con la habilidad de tomar decisiones independientes.

La regla de actividad sugiere que cada agente debe actuar de manera independiente de acuerdo a la dirección del objetivo a alcanzar, a la manera de percibir y reaccionar con los alrededores presentados con un edificio virtual o red de nodos. La manera de operar es con programas de comportamiento abastecido con recursos computacionales y habilidades de decisión. A su vez, cada agente debe poder interactuar e intercambiar información con otros agentes y con el ambiente.

Por último la regla de heterogeneidad sugiere que a pesar de que cada agente puede comenzar como un miembro de un conjunto común, debe poder desarrollar una individualidad a partir de su actividad autónoma.

Patrón, algoritmo y código

Se ha mencionado que los componentes del ambiente arquitectónico están compuestos a su vez por características (partes y atributos) y comportamientos que forman subsistemas con una estructura de patrones. Para programar dicha estructura es necesario establecer las variables para

las características y una serie de pasos que permitan simular los comportamientos de cada componente; a este conjunto de pasos se le denomina algoritmo. Un algoritmo debe ser fácil de transcribir a un lenguaje de programación, ser preciso al indicar el orden en el cual debe realizarse cada uno de los pasos, debe aportar un resultado que nunca cambie bajo las mismas condiciones del problema, debe evitar repeticiones innecesarias y debe ser finito (Pinales & Cesar, 2014).

Los algoritmos se representan con diagramas de flujo, herramientas que incorporan visualmente las operaciones que se requieren y la secuencia en que se deben efectuar para solucionar un problema, los diagramas se expresan con símbolos.

Para ilustrar mejor lo que es un diagrama de flujo, en la figura 29 se encuentra el ejemplo de un algoritmo representado en un diagrama de flujo y que sirve para obtener el volumen de un cubo. El diagrama de flujo esta compuesto por un inicio, un final, datos, simbolos que representan operaciones que se efectuan con los datos y flechas que representan el flujo de la tarea.

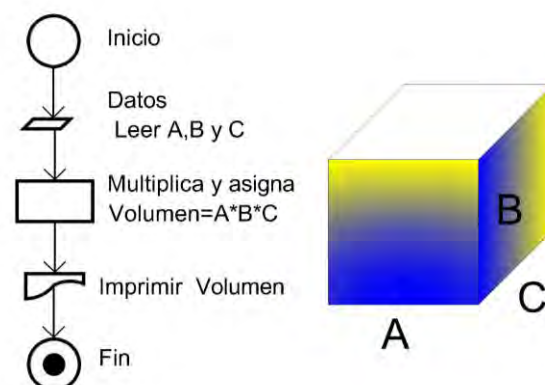


Figura 29. Diagrama de flujo para obtener el volumen de un cubo.

El proceso de codificación para los programas del primer prototipo de simulación utiliza los patrones abstraídos del ambiente arquitectónico y del lenguaje propuesto, para explicar el sistema de ambientes arquitectónicos. Para entender los programas de simulación resultantes, tanto los patrones y los códigos se agrupan según el componente del ambiente que describen.

La codificación tiene cinco pasos:

1. Explicación del funcionamiento real de ambiente.
2. Enumeración de los patrones encontrados en la observación ambiental.
3. Explicación del funcionamiento ambiental a través de una estructura de patrones.
4. Formulación del algoritmo o planteamiento de los datos variables para la estructura de patrones.
5. Escritura del código de programación en el lenguaje C#.

Codificación de los patrones de carácter del edificio y del agente-individuo

Los patrones de carácter son los rasgos recurrentes que tiene cada componente del ambiente arquitectónico en el lapso en el que se encuentra en presencia de los otros dos componentes. Mientras en el individuo los patrones de carácter se representan con los datos variables que cada agente debe seleccionar para configurarse, en el edificio los patrones se representan con la información que éste debe proporcionar a los agentes para ejecutar sus comportamientos y que como tal tienen propiedades del edificio. El reto de representar un edificio junto con sus patrones de carácter recae en el análisis de la relación que existe entre cómo el individuo entiende y recorre el edificio en la vida real y la forma en que el edificio virtual debe codificarse para generar un comportamiento similar en los individuos sin afectar su autonomía.

La representación codificada de las características del edificio

Para exponer el método de codificación para las características del ambiente construido, se utiliza el modelo de patrones correspondiente al subsistema formado por las circulaciones del edificio.

Para entender mejor cómo el ambiente construido interactúa con el usuario en el capítulo 2 se mencionó que los edificios se presentan ante un individuo de dos maneras: en forma de mapa cognoscitivo (Lynch, 2010) y en forma estímulos (Holahan, 2015). Mientras el mapa cognoscitivo es la representación que un individuo tiene de la configuración de todo el edificio, los estímulos son los factores físicos en el edificio (muros, andadores, ventanas, etc.) que generan en el individuo una acción. El mapa cognoscitivo depende del conocimiento que el individuo tenga del edificio, a más conocimiento más complejo y preciso el mapa; por otro lado el estímulo se percibe dependiendo de las capacidades físico-sensoriales del individuo.

Es importante entender como se representa el mapa cognoscitivo en el simulador; si bien el mapa es una representación presente en el individuo, para la simulación el mapa es una representación no visible del edificio, esto quiere decir que la información del mapa, andadores y espacios físicos, utiliza una red de circulaciones generadas por la configuración de los espacios dentro del edificio, la cual utiliza el agente para decidir una ruta de desplazamiento. Para la codificación de la red de circulaciones se propuso utilizar un grafo²² para interrelacionar los

²² Un grafo es un diagrama que describe una situación del mundo real a partir de un conjunto de puntos unidos por líneas que enlazan cierto par de puntos (Bondy & Murty, 1976).

espacios y circulaciones en un edificio a través de puntos y enlaces. La característica principal de la representación del mapa mental es que, en vez de ser una herramienta del individuo, es un estímulo del edificio que el individuo debe interpretar para seleccionar un camino que lo lleve de un punto a otro.

Por otro lado, la parte de la estimulación perceptiva del edificio en el simulador se presenta a partir de una maqueta virtual, es decir la maqueta representa barreras y andadores que el individuo enfrenta al atravesar el edificio.

En resumen, entendiendo que la representación de las características del edificio para el simulador es por una maqueta virtual y por un grafo (representación de los patrones de carácter del edificio), a continuación se propone el lenguaje de patrones para explicar el funcionamiento de la red de circulaciones generadas. En la figura 30 se muestra la estructura que explica el patrón de estímulo de los caminos de un edificio, ésta tiene patrones de carácter, relaciones entre componentes, relaciones por vinculación y patrones de estímulo.

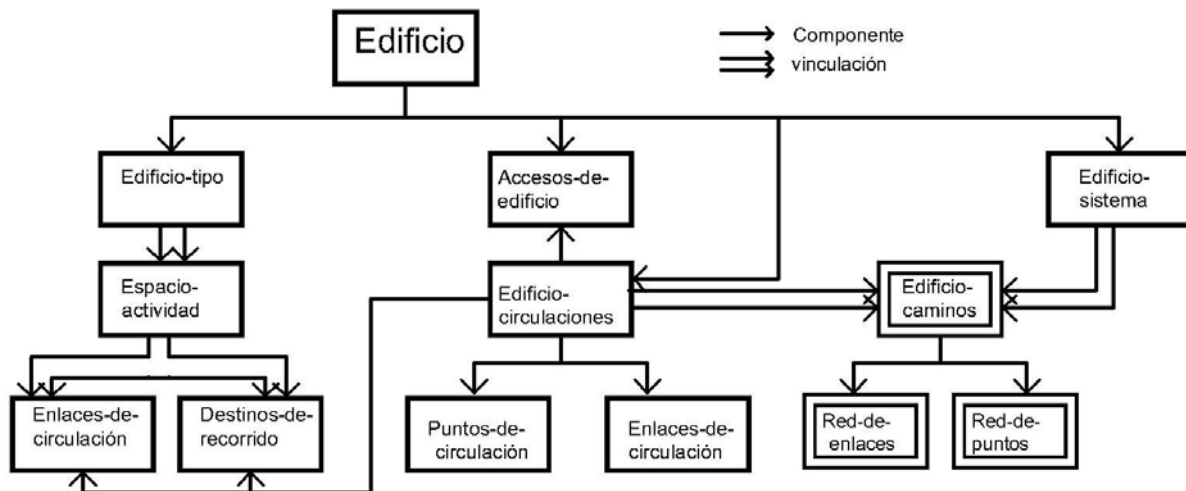


Figura 30. Propuesta de lenguaje de patrones para los caminos de un edificio.

La relación por componente significa que un patrón es componente de otro mayor; mientras la relación por vinculación significa que para que un patrón ocurra debe de estar presente el otro. Es importante recordar que los patrones no generan otros patrones, solo se vinculan, es decir no se entiende un patrón sin el otro (Alexander, 1981).

El lenguaje de patrones se lee de la siguiente manera:

Un edificio pertenece a un tipo (Edificio-tipo), tiene accesos (Accesos-del-edificio) y una organización (Edificio-sistema). La tipología del edificio está vinculada a las actividades que se realizan en él y a los espacios que las albergan (espacio-actividad); a su vez los espacios y las actividades se vinculan a los destinos que el edificio tiene para los usuarios (Destino-recorrido) y a los andadores que tiene (Enlaces-separación). Tanto los andadores, como los destinos y accesos son componentes de las circulaciones del edificio (Edificio-circulaciones) que a su vez se vinculan con el camino que existe de un punto a otro (Edificio-caminos); por otro lado, el horario y la organización del edificio (Edificio-sistema) también se vinculan con el estímulo generado por los caminos del edificio. Por último los caminos están compuestos por puntos intermedios (Red-de-puntos) y conexiones (Red-de-enlaces).

Una vez formulado el lenguaje de patrones se prosigue con el siguiente paso del método. Para el edificio en vez de un algoritmo se propone una representación matemática similar a un mapa donde los datos representan los patrones del modelo de caminos del edificio. Esta representación es un grafo, ver figura 31; con él se describe la configuración espacial de un edificio con puntos unidos por líneas (Bondy & Murty, 1976). Con los grafos el agente puede procesar las propiedades de un sistema de caminos en un edificio.

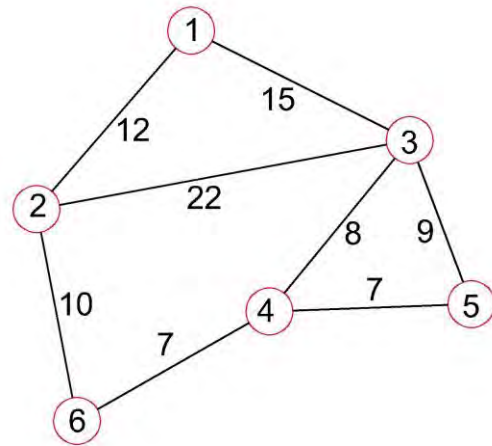


Figura 31. Grafo de cinco vértices y ocho enlaces. Representación gráfica de un grafo con vértices enumerados y enlaces con sus correspondientes pesos.

La selección de un grafo surge gracias a la observación del comportamiento de los individuos dentro de un edificio. El edificio, con su interconexión de espacios y circulaciones, es el que le indica al usuario por donde puede caminar, por otro lado, en el desplazamiento de los individuos por el edificio se observa que existen puntos donde el recorrido deja de ser directo, existe una desviación, éstos son puntos intermedios del recorrido. Al final todos los puntos son los vértices de un grafo.

La principal ventaja de representar los caminos del edificio con un grafo es que éste permite implementar un gran número de algoritmos en el agente y así generar comportamientos de simulación. Con los algoritmos el agente-individuo también puede tomar decisiones antes de un comportamiento (Bondy & Murty, 1976).

$$\begin{array}{c|cccccc}
 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\
 \hline
 1 & 0 & 12 & 15 & -1 & -1 & -1 \\
 2 & 12 & 0 & 22 & -1 & -1 & 10 \\
 3 & 15 & 22 & 0 & 8 & 9 & -1 \\
 4 & -1 & -1 & 8 & 0 & 7 & 7 \\
 5 & -1 & -1 & 9 & 7 & 0 & -1 \\
 6 & -1 & 10 & -1 & 7 & -1 & 0
 \end{array}$$

Grafo B

Posterior a la representación matemática está la codificación de los datos en una representación simbólica con el lenguaje de programación C#. Un grafo se codifica con una matriz, un arreglo de números bidimensional

Figura 32. Representación numérica de un grafo. La representación numérica de un grafo es con una matriz donde el número de vértices es el tamaño del grafo. En el grafo B se muestra una matriz de 6x6.

ordenados en filas y columnas donde una fila es cada una de las líneas horizontales de la matriz y una columna es una de las líneas verticales, ver figura 32. A partir de esta matriz se pueden obtener propiedades sobre los grafos (Gantmacher, 1959). En una matriz se representa la relación de nodos por medio de los valores de los enlaces, en la figura 33 se presenta el código de una matriz en lenguaje C#.

```
private final int[][] matriz={{0,3,9,-1,-1,-1,-1},
    {3,0,2,7,1,-1,-1},{9,2,0,7,1,-1,-1},{-1,7,7,0,5,2,8},
    {-1,1,1,5,0,9,-1},{-1,-1,-1,2,9,0,4},{-1,-1,-1,8,-1,4,0}};
```

Figura 33. Representación del grafo en el lenguaje de programación C#. En el código los vértices del grafo están implícitos en el arreglo de números que tiene, los valores de los enlaces; de esta forma el enlace de los vértices [0], [0] tiene valor de 0 unidades, el enlace de los vértices [0], [1] tiene un valor de 3 unidades, y así sucesivamente.

Codificación de los patrones de carácter en los agentes virtuales

Para explicar los patrones de las partes y propiedades del individuo se expone la codificación del patrón encargado de determinar la velocidad de desplazamiento de los usuarios del edificio (Velocidad-peatonal), fundamental para la simulación del comportamiento peatonal. La velocidad peatonal es una propiedad recurrente y compleja del individuo ya que está vinculada con otras partes y propiedades de éste, patrones simples.

Para entender al individuo dentro del sistema de ambientes arquitectónicos es necesario recordar que éste es un ser complejo, dotado de muchas características que lo definen como unidad; cada individuo tiene un nivel de privacidad compuesto por el espacio personal, la necesidad de agrupación y las barreras que lo separan de otros individuos; por otro lado cada individuo tiene un perfil, el cual es determinado por su rol como usuario dentro de un edificio, su ciclo de vida y sus características físicas; por último, cada individuo tiene características generadas por la relación de ubicación con el edificio. Ya que cada individuo posee estas características, el agente-individuo del simulador también debe de tenerlas.

El patrón Velocidad-peatonal está vinculado con alguno de los patrones de carácter individuo, es decir que el patrón aparece junto con otros patrones de carácter. En la figura 34 se muestra el lenguaje de patrones para determinar la velocidad peatonal. Se lee de la siguiente manera:

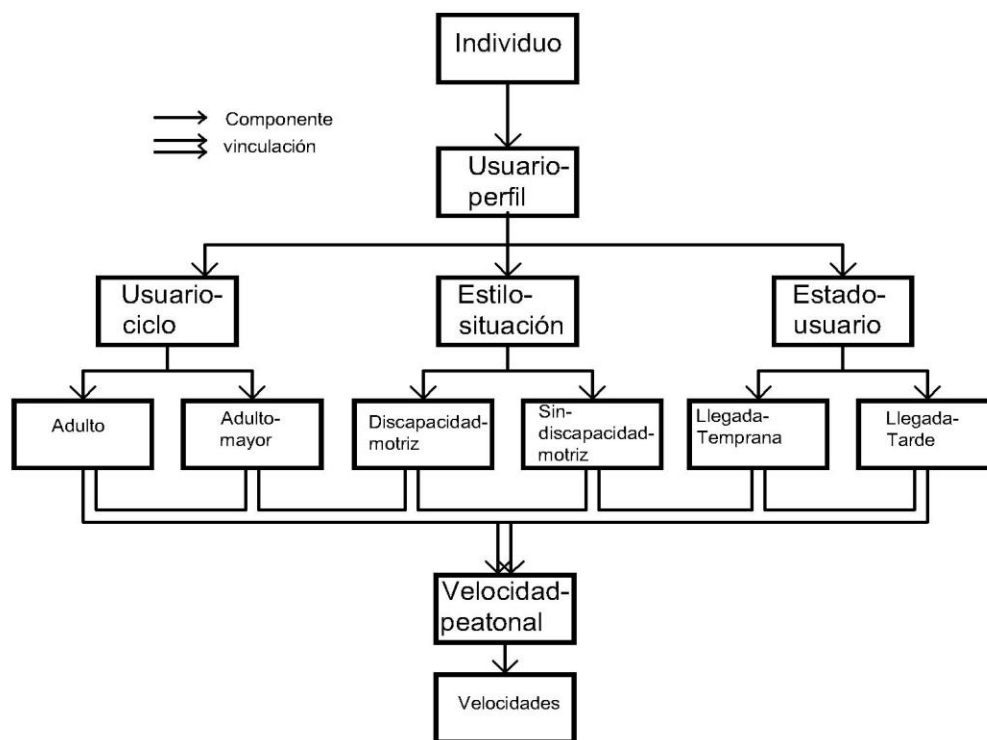


Figura 34. Propuesta de lenguaje de patrones para determinar la velocidad peatonal de un individuo.

Todo individuo tiene un perfil (Usuario-perfil), éste se determina por la edad de la persona (Usuario-ciclo), las capacidades físicas que posee (Estilo-situación) y el estado de usuario que tiene al momento de ingresar a un edificio (Estado-usuario); Se propone que la velocidad peatonal se

vincula a un individuo con un determinado ciclo (Adulto, Adulto-mayor), capacidades físicas determinadas (Discapacidad-motriz, Sin-discapacidad-motriz) y un estado de usuario (Llegada-temprana, Llegada-tarde). A su vez la velocidad peatonal tiene diferentes valores (Velocidades).

Con el lenguaje de patrones formulado, el siguiente paso es definir los datos variables para cada agente. El patrón ciclo se codifica con una variable numérica que determina si el usuario del edificio es adulto (1) o adulto mayor (2); la situación del usuario se codifica con el patrón Discapacidad-motriz (1) y el patrón Sin-discapacidad-motriz (2); para el estado del usuario se codifica el patrón Llegada-temprana (1) y Llegada-tarde (2). Por último el patrón Velocidad-peatonal se codifica dependiendo de los patrones seleccionados, éste puede tener una primera velocidad (1), segunda velocidad (2) y así sucesivamente.

Ya con las variables establecidas, en la figura 35 se propone el algoritmo que devuelve la Velocidad-peatonal al vincular las variables del edificio con las velocidades peatonales propuestas. El algoritmo utiliza una selección aleatoria programada según los datos estadísticos de algún edificio similar o su correspondiente probabilidad.

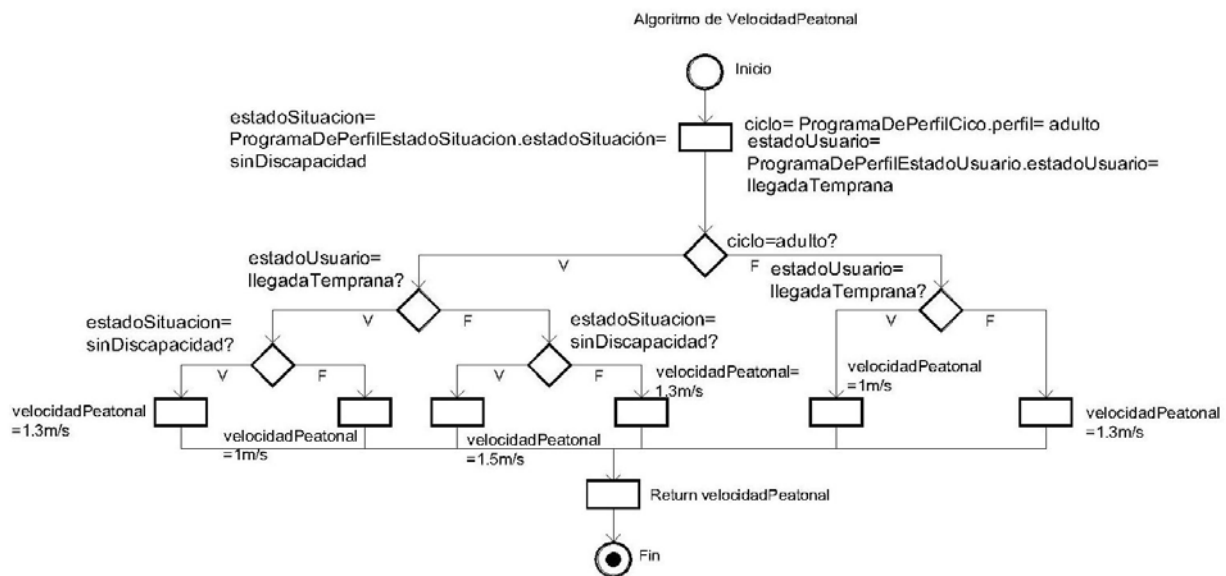


Figura 35. Algoritmo para obtener la velocidad peatonal. Con el algoritmo se programa el agente-individuo en C#.

Codificación de los patrones de comportamiento

En el capítulo tres se definieron los patrones de comportamiento como las acciones recurrentes que realiza un componente del ambiente arquitectónico y que están vinculadas con sus

patrones de carácter. Existen dos tipos de comportamiento: el comportamiento simple y el comportamiento complejo; el comportamiento simple es aquel que está compuesto o vinculado solamente a los patrones de carácter del componente ambiental; por otro lado el comportamiento complejo es aquel que se compone o vincula tanto con patrones de carácter, como con otros patrones de comportamiento del mismo componente o de los otros dos componentes.

Es importante diferenciar entre los patrones de comportamiento del agente-individuo y los patrones de comportamiento del edificio. Mientras los patrones de comportamiento en el edificio son estímulos simples vinculados a sus patrones de carácter, en el individuo los patrones de comportamiento son complejos ya que además de estar vinculados a sus patrones de carácter, se vinculan con los patrones de estímulo del edificio. En la figura 36 se muestra la relación de patrones vinculada al comportamiento complejo que determina la decisión de agrupación del individuo durante el desplazamiento peatonal.

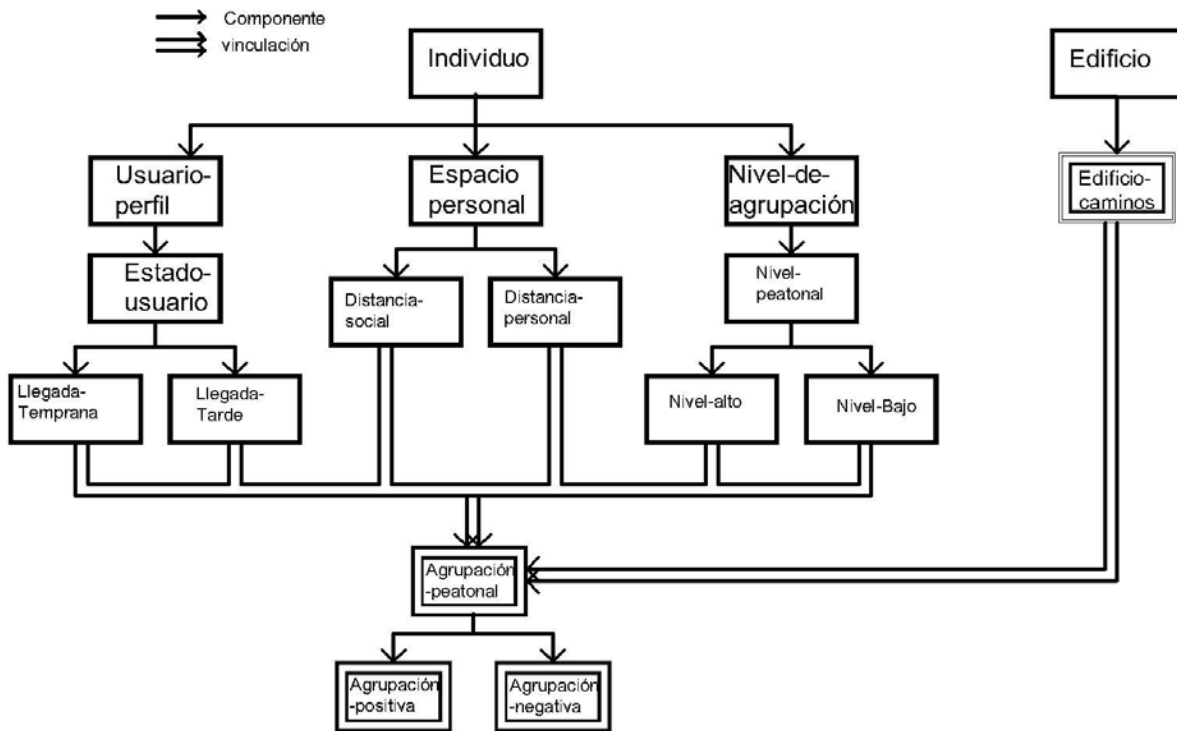


Figura 36. Propuesta del lenguaje de patrones para determinar la agrupación peatonal.

Codificación de los patrones de estímulo en el edificio

La representación de los estímulos del edificio para la percepción del individuo en el simulador se representa con una maqueta virtual. Estos estímulos se presentan en forma de barreras, obstáculos y áreas de circulación con los que el individuo interactúa. A su vez los estímulos que no son visibles se representan por medio de la descripción del fenómeno en un modelo de patrones. Para ejemplificar la codificación de los estímulos no visibles generados por el edificio se expone el lenguaje para el patrón Red-de-rutas, el cual define el número de caminos posibles dentro de un edificio.

Como mencionamos anteriormente, entre las características del edificio se encuentra el patrón circulaciones, compuesto por el patrón enlaces y puntos de enlace. El edificio, entendido como un conjunto de espacios y circulaciones, genera en el individuo la necesidad de caminos y rutas para interactuar con él. Los caminos se vinculan directamente con el patrón Edificio-Circulaciones, figura 37.

El lenguaje de patrones se lee de la siguiente manera:

El edificio se compone de una red de circulaciones (Edificio-circulaciones) que conecta los espacios de actividad existentes dentro de él, además las actividades de los espacios están organizadas por los usuarios en horarios y zonas (Edificio-sistema). Los caminos que llevan de un espacio a otro (Edificio-caminos) se vinculan tanto a la forma de organización de las actividades como a las circulaciones que enlazan a éstas. A su vez el enlace de los espacios tienen puntos intermedios que forman la red de caminos (Red-de-puntos y Red de enlaces).

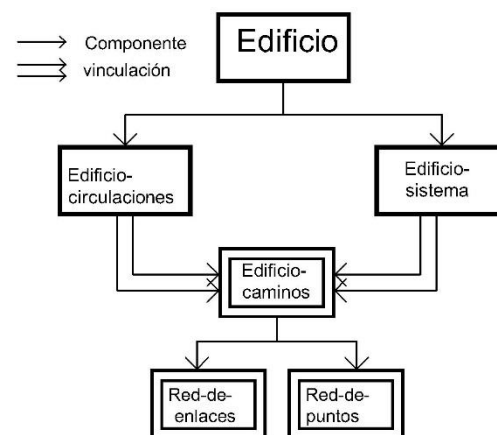


Figura 37. Propuesta de lenguaje de patrones para determinar los puntos y los enlaces de los caminos posibles dentro de un edificio.

Al igual que la representación de las características del edificio, los estímulos no se representan con algoritmos, sino con una representación matemática; dicha representación también es por medio grafos y matrices. Para simular los estímulos del modelo de caminos del edificio es

necesario de dos tipos de matrices que describen un grafo: matriz de adyacencia y matriz de pesos (ver figura 38).

El estímulo generado por los caminos se representa a partir de un grafo con dos tipos de información, El primer valor se obtiene del enlace que hay de un punto a otro y el segundo valor se obtiene del peso que adopta ese enlace. La información de los enlaces denotan una distancia entre un punto y otro aunque es importante mencionar que la distancia no necesariamente se refiere a una distancia física en metros. De esta forma los caminos generados por la relación entre espacios y circulaciones de un edificio se representan a partir de la ubicación de los nodos y enlaces con un peso que representa el valor del estímulo del camino.

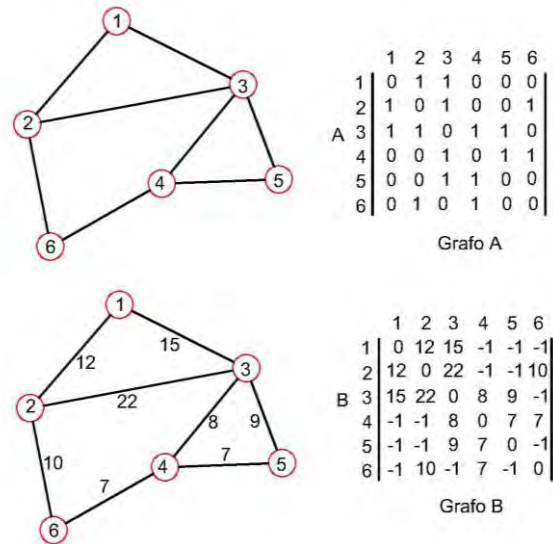


Figura 38. Dos tipos de matrices para un grafo. Representación numérica con una matriz de adyacencia (grafo A) y representación numérica de una matriz de pesos (grafo B).

Para codificar los grafos se utilizan dos tipos de matrices: matriz de adyacencia y matriz de peso. La matriz de adyacencia interrelaciona un nodo con otro a partir de las filas y las columnas en una notación de 0,1 y -1 ; cada nodo tiene una relación de 0 cuando no existe un enlace entre ellos, una relación de 1 cuando el enlace existe y una relación de -1 cuando el nodo es el mismo. La matriz de peso interrelaciona un nodo con otro a partir de una notación numérica; cuando un nodo tiene una relación de 1 con otro nodo, obtenido de la matriz de adyacencia, la matriz de peso le asigna un valor numerico al enlace, este valor puede se la distancia entre los vertices o tener otro significado. De esta manera se representan las conexiones y los estímulos.

El codigo de programación para las dos matrices se muestra en la figura 39 y 40.

```
private final int [][] matrizAdyacencia={{0,1,1,0,0,0},{1,0,1,1,1,0},{1,1,0,1,1,0},{0,1,1,0,1,1},{0,1,1,1,0,1},{0,0,0,1,1,0},{0,0,0,1,0,1}};
```

Figura 39. Codificación de la matriz de adyacencia.

```
private final int[][] matriz={{0,3,9,-1,-1,-1,-1},  
    {3,0,2,7,1,-1,-1},{9,2,0,7,1,-1,-1},{-1,7,7,0,5,2,8},  
    {-1,1,1,5,0,9,-1},{-1,-1,-1,2,9,0,4},{-1,-1,-1,8,-1,4,0}};
```

Figura 40. Codificación de la matriz de pesos.

Codificación de los patrones de comportamiento en el individuo

Para codificar los patrones de comportamiento en el individuo se sigue un método similar al que se utilizó con los patrones de carácter de los componentes del ambiente arquitectónico.

Una vez entendido el sistema real, explicado en el capítulo 2, el siguiente paso para la codificación es formular el lenguaje de patrones con base al modelo de ambientes arquitectónicos, visto en el capítulo 3. El lenguaje para el comportamiento de un agente-individuo se realiza a partir de los patrones que lo componen y de las vinculaciones entre los patrones de carácter del individuo con los patrones de estímulo del edificio.

El algoritmo resultante del lenguaje de patrones para el comportamiento del individuo se encarga de representar la relación de los patrones con tareas que pueden cumplir dos objetivos: el primero es generar datos necesarios para que se presenten otros comportamientos, los cuales se les conoce como algoritmos de decisión; y el segundo es producir un comportamiento visible en el agente-individuo.

Al final, los algoritmos se trasladan a métodos y clases en códigos del lenguaje de programación C#.

Es importante mencionar que la formulación de algoritmos implica un proceso creativo que consisten en imaginar cómo un comportamiento visual de la realidad es afectado por los estímulos del edificio y por otros comportamientos, a su vez el modelador tiene que analizar la manera en cómo todas estas relaciones y comportamientos se pueden codificar en un lenguaje de programación para que la computadora ejecute una simulación.

Para ejemplificar el proceso de codificación se utilizarán dos comportamientos pertenecientes al patrón general llamado Comportamiento-peatonal: Selección-de-ruta y Desplazamiento-peatonal.

Codificación del patrón Selección de ruta

El edificio genera un estímulo en el agente-individuo llamado Edificio-caminos, éste se encarga de presentarle al individuo las diferentes rutas que puede utilizar a través de un grafo representado con una matriz. En el sistema real el individuo genera un mapa cognoscitivo que le ayuda a realizar su comportamiento de navegación en el espacio, en dicho mapa el individuo, desde una ubicación, valora la distancia más corta y el mejor camino para llegar a un destino deseado; para la valoración el individuo toma en cuenta aspectos de referencia como la distancia, accesibilidad, legibilidad, conectividad y visibilidad. Para el simulador estos aspectos de referencia se representan con los patrones de estímulo del edificio y los patrones de comportamiento de decisión en el individuo; los patrones de estímulo se representan con los pesos de enlace de una red de circulaciones representada en un grafo, mientras que los patrones de decisión se representan a partir de los algoritmos de decisión propuestos con el modelo de patrones.

El lenguaje para el patrón Selección-de-ruta genera un algoritmo de decisión a partir de una comparación; el agente valora todas las rutas disponibles que le permiten llegar desde su punto de ubicación hasta el destino seleccionado mediante la elección de la ruta más corta obtenida de los pesos de los enlaces del grafo.

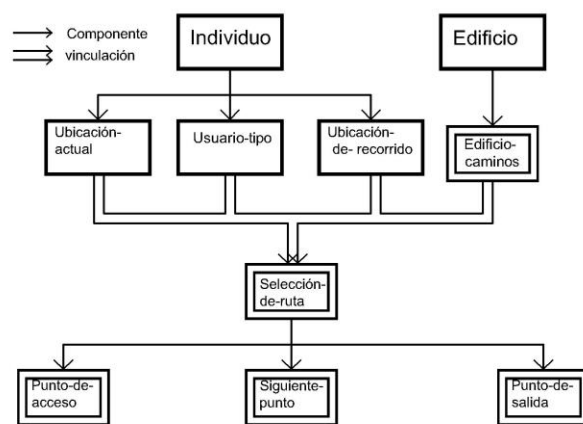


Figura 41. Propuesta de lenguaje de patrones para conocer la ruta de un individuo dentro de un edificio.

En la figura 41 se muestra el lenguaje de patrones que representa el comportamiento para seleccionar una ruta por parte del individuo. El lenguaje se lee de la siguiente manera:

La selección de ruta de un individuo se compone de un punto de acceso, puntos intermedios y un punto de destino; el individuo selecciona una ruta a partir de la vinculación de sus patrones de ubicación, tipo de usuario y ubicación de recorrido; por otro lado el edificio se vincula con

dicha selección de recorrido mediante el patrón de estímulo Caminos del edificio que se encarga de ofrecerle al individuo todos las vías existentes entre su ubicación y el destino seleccionado.

Con el lenguaje de patrones se diseña el algoritmo de selección de ruta, para ello se recurrió a un algoritmo muy utilizado en la teoría de grafos llamado “Algoritmo de Dijkstra” o camino de ruta mínima.

El algoritmo de Dijkstra se utiliza para determinar el camino más corto dado un vértice de origen al resto de los vértices de un grafo con pesos en cada arista; fue escrito por primera vez en 1959 por Edsger Dijkstra (ver figura 42). El algoritmo consiste en ir explorando los caminos más cortos que parten del vértice de origen y que llevan a todos los demás vértices; cuando se obtiene el camino más corto desde el vertice de origen al resto de vértices que componen el grafo, el algoritmo se detiene (Joyner, Nguyen, & Cohen, 2011).

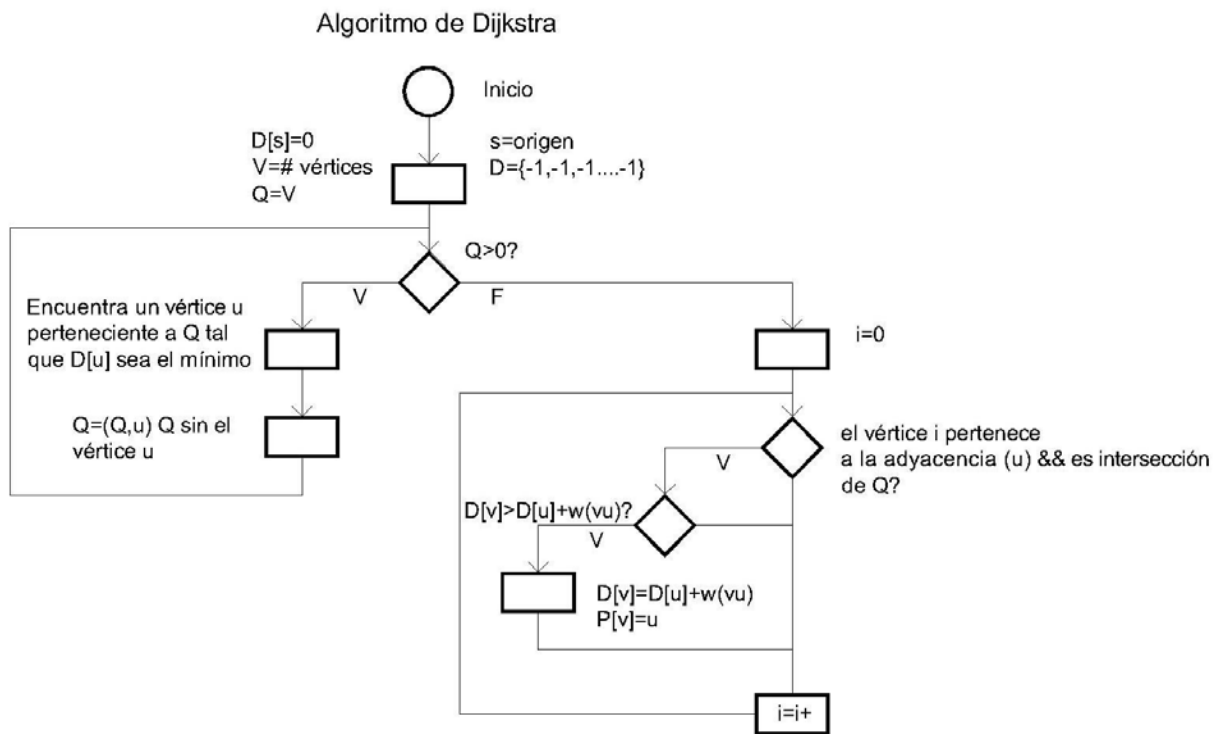


Figura 42. Algoritmo para obtener la ruta más corta entre dos vértices de un grafo.

Con el algoritmo de Dijkstra se puede obtener un arreglo de vertices en secuencia que indica los puntos de la ruta mínima hacia un destino; el arreglo es indispensable para que el Agente-usuario recorra el edificio de un punto a otro.

En el código de la figura 43 están las variables y el método para programar el algoritmo de Dijkstra. Entre los datos de inicio está la matriz del grafo, una serie de arreglos y variables para operar y por último un método llamado RutaMinima, éste genera un arreglo compuesto por los vértices que llevan de un nodo a otro a partir de la matriz proporcionada. El criterio de elección de los vértices es por valores de menor peso, la ruta más corta.

```

public class PruebaFinal
{
    private final int[][] matriz={{0,3,9,-1,-1,-1,-1},
        {3,0,2,7,1,-1,-1},{9,2,0,7,1,-1,-1},{-1,7,7,0,5,2,8},
        {-1,1,1,5,0,9,-1},{-1,-1,-1,2,9,0,4},{-1,-1,-1,8,-1,4,0}};
    int []lista;
    int []ruta;
    int []rutaFinal;
    int []precedente;
    int []distancia;
    int []acumulado;
    boolean []visto;
    int origen;
    int destino;
    int nodos;
    int temporal;
    int auxiliar;//numero que

    public void dijkstra()
    {
        for (int i=0;i<nodos;i++)
            if(matriz[lista[0]][i]>0&& visto[i]==false)
            {
                distancia[i]=matriz[lista[0]][i];
                precedente[i]=origen;
            }
        for(int h=1;h<nodos;h++)
        {
            if (lista[h-1]!=destino && lista[h-1]!=-1)
            {
                for(int i=0;i<nodos;i++)
                {
                    if(distancia[i]>0&&distancia[i]<temporal /*&& matriz[lista[h-1]][i]>0*/&&visto[i]==false)
                    {
                        temporal=distancia[i];
                        lista[h]=i;
                    }
                }
                visto[lista[h]]=true;
                temporal=2000000000;
                acumulado[lista[h]]=matriz[precedente[lista[h]]][lista[h]]+acumulado[precedente[lista[h]]];
                for(int i=0;i<nodos;i++)
                {
                    if(matriz[lista[h]][i]>0 && visto[i]==false)
                    {
                        if(distancia[i]>0)
                        {
                            if(distancia[i]>matriz[lista[h]][i]+acumulado[lista[h]])
                            {
                                distancia[i]=matriz[lista[h]][i]+acumulado[lista[h]];
                                precedente[i]=lista[h];
                            }
                        }
                        else
                        {
                            distancia[i]=matriz[lista[h]][i]+acumulado[lista[h]];
                        }
                    }
                }
            }
        }
    }
}
    
```

Figura 43. Código en C# del algoritmo de Dijkstra.

Codificación del patrón de desplazamiento

El patrón de desplazamiento es un comportamiento importante en la simulación porque permite ver las decisiones del individuo dentro de un edificio, ya que es el reflejo de la interacción de los estímulos del edificio con los patrones de carácter y decisión; es durante el desplazamiento que el individuo tiene la posibilidad de encontrarse con un mayor número de estímulos ambientales, por ello es importante entender el lenguaje de patrones que genera este comportamiento y su codificación.

El desplazamiento del individuo, en el sistema real, comienza en el lapso en el que accede a un edificio y representa el primer comportamiento visible para el simulador. En el proceso de desplazamiento existe una velocidad deseada, un destino deseado y una vinculación con el patrón

que determina el camino que lleva de una ubicación al destino deseado (Selección-de-ruta); los individuos que conocen el edificio utilizan su mapa cognoscitivo para regular todos los procesos, mientras que los individuos que no conocen recurren a sus mecanismos de percepción (Holahan, 2015). El desplazamiento se vincula además con otros comportamientos visibles como la agrupación peatonal y la evasión de obstáculos. El comportamiento termina cuando el individuo toma la decisión de hacer una pausa ambiental o cuando sale del edificio.

En la figura 44 se muestra el lenguaje de patrones para el desplazamiento; se lee de la siguiente manera:

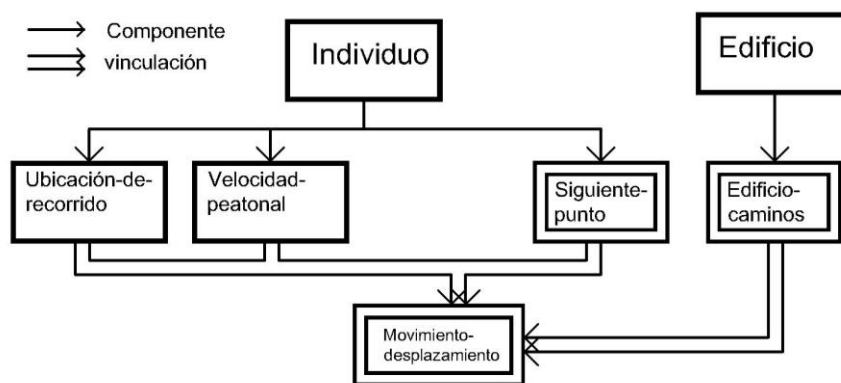


Figura 44. Propuesta de lenguaje de patrones para predecir el comportamiento peatonal.

El desplazamiento es producto de la vinculación con los patrones de carácter del individuo llamados Velocidad-peatonal y Ubicación-de-recorrido; y de sus comportamientos de decisión llamados Siguiete-punto y Agrupación-peatonal. Por parte del edificio el desplazamiento se vincula con el patrón del edificio denominado Edificio-caminos. Al presentarse estos patrones aparecen las condiciones para que un individuo empiece el recorrido peatonal.

Con el lenguaje de patrones para el desplazamiento, se propuso el algoritmo de la figura 45. El algoritmo del lenguaje Desplazamiento es muy diferente a los algoritmos anteriormente mencionados, porque en su diseño hay que tomar en cuenta las herramientas y las clases preestablecidas en el programa de videojuegos Unity, ya que el comportamiento es visual y las visualizaciones en la plataforma de desarrollo del simulador funcionan a partir de un elemento tridimensional, un plano cartesiano y varias instrucciones de comportamiento (Scripts); todas estas funciones ya se encuentran programadas para ser utilizadas y modificadas en Unity.

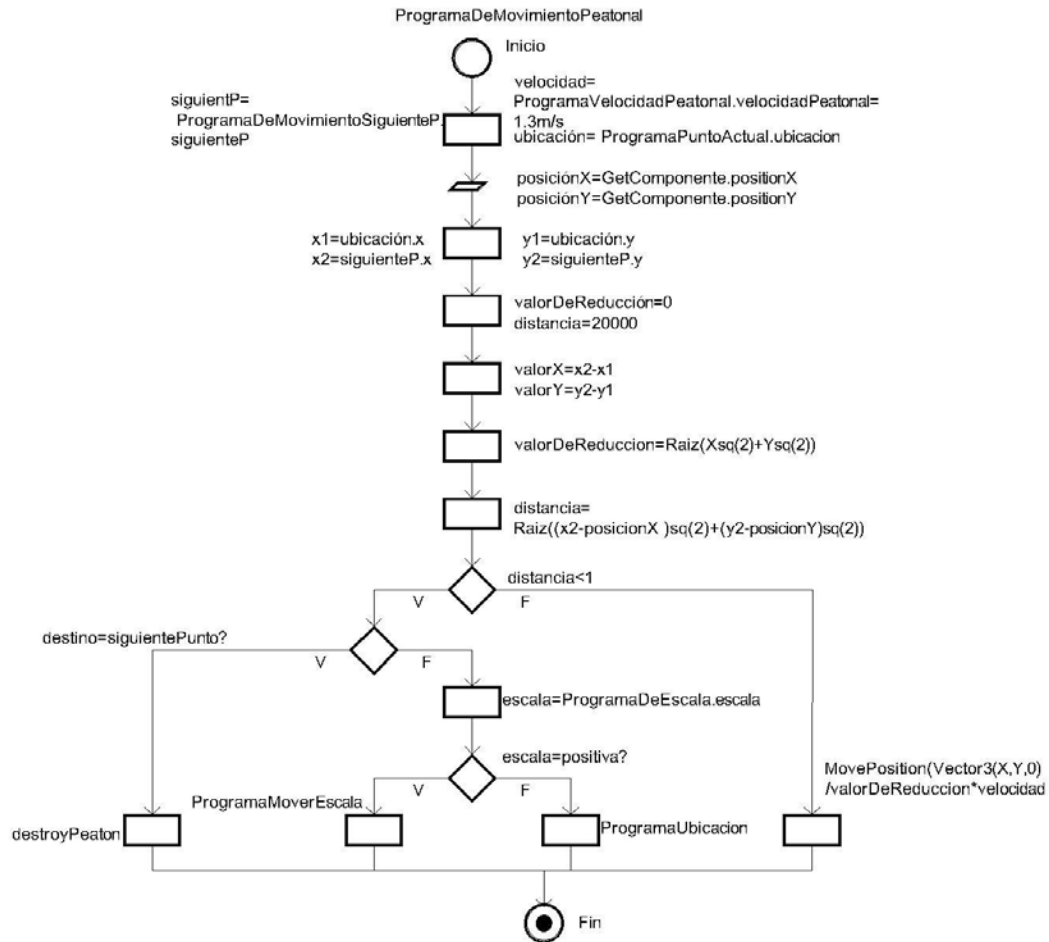


Figura 45. Algoritmo para mover un objeto tridimensional a partir del lenguaje de patrones Desplazamiento.

Como ya se ha explicado, el objeto representado tridimensionalmente y con comportamiento visible es el agente-individuo. Para el algoritmo de desplazamiento primero se accede a los datos variables del edificio y del individuo, necesarios para que el método de desplazamiento funcione, con éstos se determina el destino de desplazamiento y la velocidad deseada del comportamiento; posteriormente se ubica las coordenadas del objeto tridimensional y del destino deseado respecto al origen del plano cartesiano proporcionado por Unity; Después, se determina la dirección del agente individuo respecto al destino con una operación de vectores; Por último, se programa el desplazamiento con una instrucción preestablecida por Unity que consiste en cambiar la posición del objeto tridimensional en cada cuadro, siguiendo la dirección establecida.

Es importante mencionar que en Unity siempre se toma como referencia el punto de origen para la ubicación y vectorización de las fuerzas que representan el movimiento (ver figura 46), por

lo que encontrar el vector de un punto (X1, Y1) en dirección a otro punto (X2, Y2) requiere de una resta de vectores, donde la dirección del objeto al destino es igual a (X2-X1, Y2-Y1) (Unity, 2016).

Otro detalle importante es que el vector no sólo nos proporciona una dirección sino que además no indica una magnitud (que puede representar velocidad, fuerza, etc.). Es importante controlar la magnitud proporcionada por el vector porque, en el caso del desplazamiento, hace variar la velocidad del agente dependiendo de la ubicación del destino deseado; para ello hay que aplicar un valor de adecuación²³ para convertir la velocidad generada por la ubicación del destino a 1 y así controlar la velocidad con otra variable que proporciona el patrón Velocidad-peatonal.

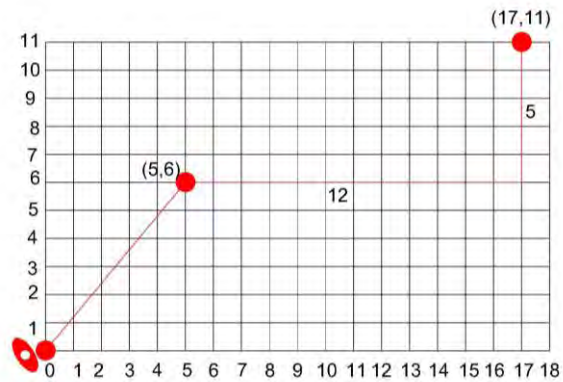


Figura 46. Manejo de vectores para el programa de simulación.

El código se encuentra en la figura 47. Se puede observar como los patrones Velocidad-peatonal, Ubicación-de-recorrido y Destinos-de-recorrido se codifican en las variables X, Y; el método *Update* es una clase perteneciente a Unity que se utiliza para mover un objeto o realizar una función en cada cuadro de simulación; por último la instrucción *GetComponent* es una programación de Unity que representa la aplicación de una fuerza a determinado objeto virtual, ésta necesita la referencia de un vector.

```
public class Peaton : MonoBehaviour
{
    float velocidad= VelocidadPeatonal.velocidad;
    int X1= Peaton.ubicacion.X;
    int X2= Destino.ubicacion.X;
    int Y1= Peaton.ubicacion.Y;
    int Y2= Destino.ubicacion.Y;
    int X;
    int Y;
    float valorReduccion;

    void Update(){
        moverAlDestino ();
    }

    void moverAlDestino(){

        X=X2-X1;
        Y=Y2-Y1;
        valorReduccion= Math.Raiz((X*X)(Y*Y))

        GetComponent<Rigidbody> ().MovePosition(GetComponent<Rigidbody> ().position+new Vector3(X,0,Y)/valorReduccion*velocidad*Time.deltaTime);
    }
}
```

Figura 47. Código en C# para programar el desplazamiento con vectores en Unity.

²³ El valor de adecuación representa una variable que permite controlar los valores de un vector.

Controladores de simulación

Los controladores de simulación son programas que manipulan las funciones de los componentes del simulador a partir de unos datos de entrada proporcionados por el modelador o el usuario del programa. Tienen injerencia en la interfaz, las corridas de simulación y los datos de salida del simulador; son programas coordinados entre componentes que permiten el intercambio de información y también son normativos para las interrelaciones entre componentes. Se encuentran al mismo nivel que los otros tipos de código dentro de los programas de comportamiento de Unity; se pueden visualizar dentro de la simulación y la interfaz gráfica de usuario.

Los códigos de los controladores de simulación tienen las siguientes funciones:

- Regular el tiempo de simulación.
- Determinar la velocidad de simulación.
- Regular el acceso de agentes al simulador.
- Presentar los datos del simulador.

El tiempo de simulación controla las condiciones y estímulos iniciales del simulador a partir de los datos de inicio, fecha, hora y lapso de simulación. Básicamente establece el tiempo preciso en el que se va a efectuar la simulación la cual comienza en el momento de apretar el botón de inicio y termina cuando el tiempo del controlador alcanza el periodo establecido.

La velocidad de simulación es una función que toma en cuenta el tiempo de simulación para determinar la rapidez con la que los agentes se mueven dentro de las corridas de simulación, esto ocurre a partir del dato de entrada con el mismo nombre. Es un factor exponencial que modifica los valores reales de los componentes.

El acceso de agentes es un programa del controlador que utiliza el tiempo de simulación y la velocidad de simulación para distribuir la aparición del agente-individuo en las corridas del programa. Una segunda función es distribuir a los agentes dentro de la maqueta virtual según una entrada seleccionada por otro programa de comportamiento. El controlador opera con los datos de distribución de agentes y de selección de entradas para los agentes según su tipo.

```

public class ControladorDeEntradas : MonoBehaviour
{
    int peatonTipo;
    Transform []entradas;
    float distribucionPeatonal;
    int velocidadDeSimulacion=2;
    int tiempoDeSimulación=5; //5 minutos
    float inicioDeSimulacion= 9.5; // 9:30 am

    public void entradasDePeatones ()
    {
        peatonTipo= PeatonTipo.Tipo();
        distribucionPeatonal=DistribuciónPeatonal.distribucion(tiempoDeSimulación,inicioDeSimulacion);//
        instantiate(peatonTipo, entradas[Random.range(1,3)], distribucionPeatonal/velocidadDeSimulacion);
    }
    void Update ()
    {
        entradasDePeatones ();
    }
}
    
```

Figura 48. Código para el controlador de acceso de agentes al simulador.

En la figura 48 encontramos un ejemplo del código de control para el acceso de agentes. Se puede observar cómo la función Entrada-de-peatones está vinculada con los datos de inicio y con otros datos de control. La función del programa es aparecer un tipo de peatón en una ubicación aleatoria, tomando en cuenta que son 2 peatones por segundo en un simulador con el doble de la velocidad real.

Resumen

En el capítulo se describió el proceso utilizado para trasladar el modelo de ambientes arquitectónicos y la información del sistema real al lenguaje de programación utilizado por la plataforma de videojuegos Unity para la elaboración de un simulador basado en agentes. Se definió el método de codificación y sus cuatro etapas:

- Configuración ambiental.
- Planteamiento del modelo de patrones.
- Diseño de algoritmos.
- Codificación de simulación.

Por otro lado se definieron las reglas que deben imperar en el diseño de comportamientos de todo simulador:

- Actividad.
- Autonomía.
- Heterogeneidad.

Para exponer las etapas del método de codificación, y debido a la complejidad de explicar todos los patrones que intervienen en el ambiente arquitectónico, se seleccionaron las características y comportamientos más representativos de los componentes del ambiente. En cada característica y comportamiento seleccionado se describió cada paso para llevar los patrones a un código de programación.

Por último se expuso el tipo de código de simulación para los controladores del programa donde se explicó el funcionamiento y aplicación de estos tipos singulares de código.

En el próximo capítulo se retomarán los códigos expuestos para el diseño y construcción del primer prototipo de simulación elaborado con el modelo de patrones. En el primer prototipo se incluirán algunos patrones que forman el modelo del comportamiento peatonal con el propósito de comprobar la hipótesis de investigación, es decir probar que es posible realizar un simulador funcional de predicciones de comportamiento a partir de patrones en un lenguaje.

Capítulo 5. Prototipo de simulador para el comportamiento peatonal

Hasta este punto de la investigación se cuenta con un sistema real, un método de simulación, un método de abstracción, un modelo y un método de codificación. Ahora se presenta el proceso de construcción del primer prototipo para la simulación de los ambientes arquitectónicos; con la elaboración del prototipo se comprueba la hipótesis de investigación, es decir, a partir del programa de simulación se comprueba la factibilidad de hacer predicciones del comportamiento ambiental con un modelo de patrones estructurados mediante la abstracción de los componentes, características y funciones del ambiente arquitectónico.

El prototipo es la primera aplicación desarrollada a partir del proceso de simulación expuesto en la investigación, su finalidad es ser la base en la elaboración de un programa mayor de predicciones para el comportamiento ambiental en los edificios.

Los pasos para construir el prototipo son:

1. Selección del comportamiento de simulación y definición del sistema.
2. Selección del caso de estudio.
3. Definición del objetivo de simulación.
4. Adecuación del modelo de ambientes arquitectónicos al caso de estudio.
5. Establecimiento de las reglas de simulación.
6. Configuración del edificio.
7. Configuración del Agente-individuo.
8. Armado de prototipo.

Otro propósito de construir el prototipo es evaluar el modelo de predicción expuesto en el capítulo 3, esto es si la explicación de los fenómenos ambientales a partir de la interacción de las características y comportamientos de los elementos ambientales o si se requiere de otro planteamiento; por otro lado, con el prototipo también se evalúa la formación el diseño del sistema

de ambientes arquitectónicos con un modelo de patrones. A continuación se explican cada una de las etapas.

Primer prototipo para el comportamiento peatonal

Sin lugar a duda el comportamiento peatonal es una de las actividades humana que más se ha buscado simular en los edificios, porque permite visualizar los estímulos que se generan en el ambiente construido de forma clara y evidente, ya que es un mecanismo visual por el cual los individuos se enfrentan a un mayor número de estímulos y la base para comportamientos más complejos dentro de un edificio (Helbing, 2012). Este tipo de comportamiento está presente dentro de un ambiente arquitectónico desde el momento en que el individuo atraviesa el acceso a un edificio hasta que hace una pausa o sale del ambiente.

El comportamiento peatonal es la capacidad de los individuos para desplazarse de un lugar a otro, se puede analizar de dos maneras, la primera es a través de la navegación general de una persona y la segunda con la navegación específica.

La navegación general consiste en la capacidad del individuo de dirigirse a un destino a partir de una red de puntos intermedios localizados en su mapa cognoscitivo. Por otro lado, la navegación específica se refiere a los procesos perceptivos y las acciones que un individuo realiza al enfrentarse con los obstáculos del ambiente, también se le conoce como movimientos de evasión de obstáculos.

Para que el comportamiento peatonal ocurra, primero debe haber un destino deseado que estimule al movimiento; después debe existir un sistema de circulaciones en el edificio que permita llegar al destino deseado desde el punto de ubicación del peatón; posteriormente debe existir una decisión de ruta donde el peatón recurre a sus conocimientos previos de los caminos del edificio localizados en su mapa cognoscitivo, si el peatón no tiene conocimientos previos recurre a su sistema perceptivo para analizar los alrededores y buscar referencias; la selección de ruta toma en cuenta algunos de los siguientes aspectos: distancia, visibilidad, conectividad y accesibilidad; Por último, el individuo realiza su desplazamiento.

Además de la ruta, el individuo tiene que lidiar con obstáculos presentes en el recorrido, para ello utiliza diferentes mecanismos perceptivos. La percepción auxilia el comportamiento

peatonal del individuo al proteger aspectos como su espacio personal, velocidad y distanciamiento; además activa su conducta de evasión de obstáculos.

En el primer prototipo de simulación se representa el comportamiento peatonal a partir de la navegación general tomando en cuenta únicamente un criterio, la selección de ruta por distancia al destino. Por otro lado, la navegación específica se representa a partir de las distancias establecidas por Edward T. Hall de espacio personal y de un número limitado de patrones de evasión de obstáculos.

Caso de estudio

El ambiente seleccionado para predecir el comportamiento peatonal con el primer prototipo de simulación fue la Unidad de posgrado de la Universidad Nacional Autónoma de México. El complejo es un lugar accesible, de contacto constante, reciente ocupación, requerimientos de adecuaciones funcionales y con facilidades administrativas para accionar; por otro lado se cuenta con el apoyo de la institución para obtener información y el interés de mejorar las instalaciones.

La Unidad de posgrado es un edificio destinado a albergar las actividades académicas y administrativas de maestría, doctorado y especialización de 42 disciplinas, más las que se integren, ya que aún se encuentra en proceso de ocupación. El conjunto tiene 11 cuerpos más pequeños divididos por letras, una plaza central, tres accesos, un estacionamiento, una red de caminos y tres módulos circulación vertical.

La unidad está organizada en dos anillos de edificios, zonificado en bloques, con una extensión de terreno de 15,500 m² aproximadamente, de los cuales 5000 m² están ocupado por los bloques del edificio, es integrador de varias disciplinas, está apartado de la zona central de la Ciudad Universitaria y forma un conjunto con el edificio de posgrado de la facultad de economía; los bloques localizados en el anillo exterior del círculo se dividen en tres niveles, una planta baja y sótano en algunos bloques, por otro lado el anillo interior tienen dos niveles, la planta baja y una terraza.

El conjunto se ubica en la zona sur de la Ciudad universitaria, al oriente de la avenida Insurgentes y al sur del Centro Cultural Universitario, en el circuito de posgrado de la colonia Coyoacán en la Ciudad de México.

Objetivo de simulación

Para construir el simulador se necesita plantear un objetivo de simulación, es decir establecer la predicción que se quiere obtener de la representación del comportamiento peatonal.

El propósito de la simulación es obtener los flujos peatonales de la Unidad de Posgrado que surgen de la selección de ruta por distancia al destino y compararlos con los flujos reales del edificio. Para ello se diseña el prototipo con una red de circulaciones a partir de una maqueta virtual y un grafo; los caminos del edificio se definen con los andadores tridimensionales, enlaces de las áreas de actividad y los espacios de circulación como generadores de una representación matemática, un grafo. El valor de los enlaces entre vértices del grafo corresponde a la distancia que existe entre los puntos que conecta.

Con el prototipo se puede conocer el porcentaje de flujo peatonal que corresponde a la decisión de ruta del usuario estimulada por la distancia a un destino. Por otro lado en la Unidad de Posgrado, el modelo puede ayudar a explicar la relación entre la densidad de personas por espacio y los flujos de recorrido dentro del edificio.

Modelo para el comportamiento peatonal a partir del patrón de selección Ruta-mínima

La representación concreta del desplazamiento del individuo por un edificio es una variante del modelo de ambientes arquitectónico explicado en el capítulo 3. Para su diseño se requiere de una selección de los patrones de los componentes del ambiente que se vinculan al comportamiento peatonal en los edificios. Entre las partes de este sub-modelo encontramos al individuo, los espacios de actividad en el edificio, los andadores, los caminos, las entradas, las rutas y el desplazamiento.

El modelo es predictivo, acotado y autónomo. Mientras el modelo completo predice el comportamiento de todos los componentes a partir de las variables del ambiente dentro de patrones, el modelo para el comportamiento peatonal predice únicamente el flujo de circulaciones por la selección de ruta mínima por parte del individuo; por otro lado se dice que el modelo es autónomo por que no necesita de todos los patrones del ambiente arquitectónico para predecir un comportamiento.

El prototipo de simulación es similar a las aplicaciones de localización y selección de rutas que utilizan los dispositivos GPS, ya que también generan la ruta a partir de la distancia más corta entre un emplazamiento y un destino. El modelo específico se diseña a partir de las áreas de circulación peatonal de la Unidad de posgrado.

En el modelo, el individuo es un agente de simulación representado por un objeto tridimensional y por los patrones que abstraen sus características y comportamientos. En el simulador cada agente tiene un rol en el edificio establecido por el tipo de usuario que representa, además cada agente maneja una velocidad peatonal deseada y un destino de desplazamiento producto de dicho rol.

Por otro lado el edificio, además de representarse con una maqueta virtual, se configura con un grafo definido por dos patrones: Espacio-actividad y Edificio-circulaciones. Se puede decir que uno es el complemento del otro, ya que en conjunto forman la red de circulaciones presentes en todos los edificios utilizando vértices y enlaces. A su vez todos estos patrones se vinculan a la aparición de un patrón de estímulo en el edificio denominado Edificio-caminos, indispensable para que un individuo selecciona una ruta que lo lleve de su ubicación a un destino deseado.

En la figura 49 se puede observar gráficamente los componentes del modelo específico con la configuración del edificio y el agente-usuario.

Es importante mencionar que los datos de entrada para simulación son: la ubicación de los puntos de circulación, conexión de los enlaces entre puntos para formar la red de circulaciones y los pesos de cada enlace a través de la distancia entre puntos.

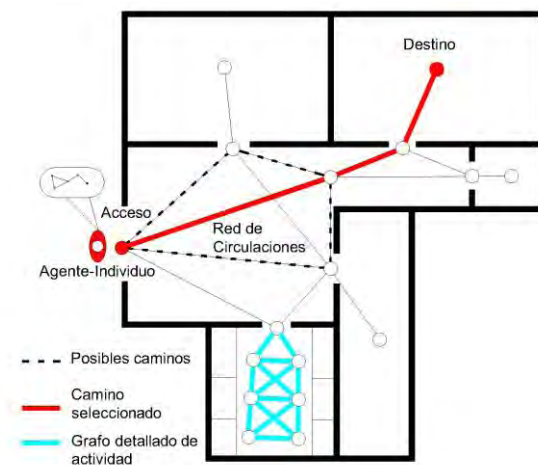


Figura 49. Modelo específico del comportamiento peatonal.

Reglas para la colocación de puntos y enlaces de la red de circulación en los edificios

Los puntos de circulación son los datos de entrada que el usuario del simulador debe colocar en la aplicación para generar el grafo que representa la red de circulaciones del edificio virtual. La colocación de los puntos depende de la escala del flujo de circulaciones que se desea simular. Si en el edificio se desea observar las circulaciones a gran escala, cada espacio representa un punto de circulación; por otro lado si se quiere analizar las circulaciones detalladas de un espacio, se debe colocar un punto para cada área de actividad, ver figura 50.



Figura 50. Colocación de grafo detallado de actividad.

Los parámetros para colocar los puntos de circulación a gran escala son los siguientes:

1. Al centro de cada espacio de actividad se coloca un punto de circulación.
2. En las entradas de cada espacio de actividad se coloca un punto de circulación.
3. Las áreas de circulación de diferente tamaño se delimitan en figuras regulares. En el caso donde dos figuras se conectan y no existe una barrera física se coloca un punto de circulación, ver figura 51.
4. La entrada al edificio lleva un punto de circulación.

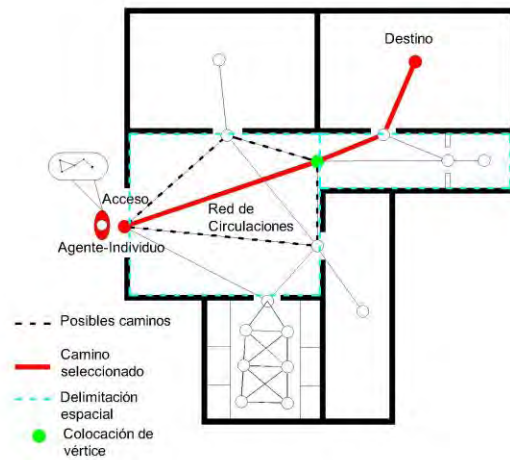


Figura 51. Delimitación de espacio del edificio.

Los parámetros para colocar los enlaces son los siguientes:

1. Todos los vértices se conectan entre sí con un enlace, exceptuando los que al conectarse con la línea del enlace atraviesan una barrera del edificio.

2. Todos los puntos de circulación deben llevar cuando menos un enlace con otro punto.
3. Si un punto de circulación se conecta con otro punto y el enlace toca o pasa a una distancia menor de 1 metro de un punto de circulación diferente, el enlace se elimina, ver figura 52.

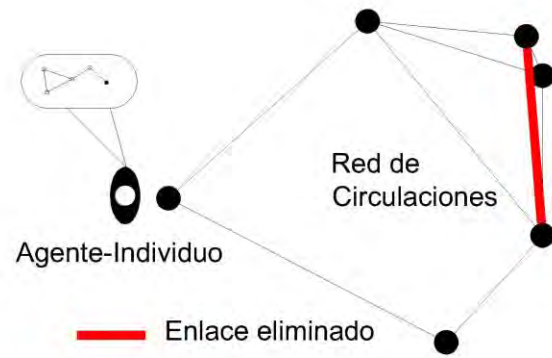


Figura 52. Criterio para eliminar un enlace del grafo de la red de circulaciones.

La red de circulaciones funciona junto con el comportamiento para seleccionar una ruta en la navegación general del comportamiento peatonal.

En otro sentido, la navegación específica se compone de los patrones para la evasión de obstáculos denominados: Evasión-de-obstáculos-móviles y Evasión-de-obstáculos-estáticos; éstos se representan con algoritmos que generan las acciones de evasión en el agente-individuo.

El patrón Evasión-de-obstáculos-móviles es el que le ordena al Agente-individuo desplazarse en un patrón de evasión cuando en su ruta aparece un obstáculo en movimiento, en específico otro individuo o un objeto móvil del edificio. Uno de los patrones de evasión se pueden observar en la figura 53.

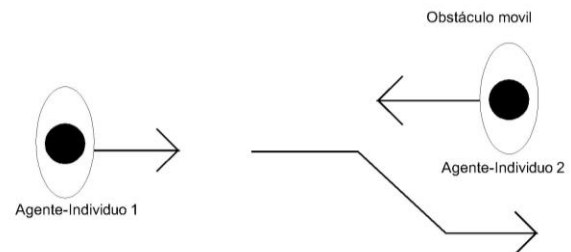


Figura 53. Patrón de evasión de obstáculos móviles.

Reglas de simulación

Las reglas de simulación son pautas que garantizan que la configuración de los agentes de simulación respondan a la complejidad del sistema real, ya que les asignan a cada agente unas propiedades particulares y una estructura de comportamientos complejos; se puede decir que las reglas permiten representar las decisiones autónomas de un individuo a partir de tres factores: las características adquiridas a lo largo de su vida, la conducta generada por los estímulos ambientales y los comportamientos aprendidos de situaciones ambientales precedentes.

Cada agente de simulación, de manera análoga al sistema real, se configura con los patrones de carácter del individuo de manera aleatoria. Al existir un vínculo entre las características de los individuos y los patrones de comportamiento se puede decir que en el simulador existe una cantidad casi infinita de agentes diferentes con distinto comportamiento. Todo lo anterior responde a las características que debe tener una simulación basada en agentes: autonomía, heterogeneidad y actividad independiente.

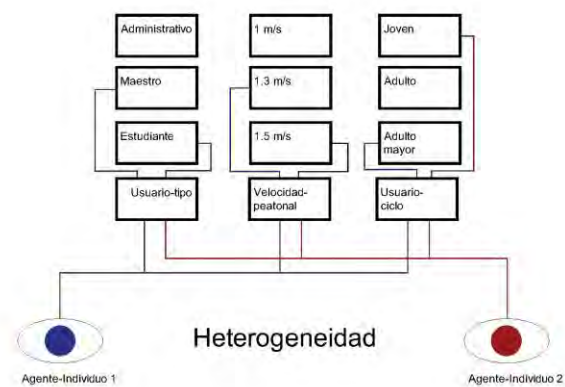


Figura 54. La heterogeneidad del agente-individuo.

Las reglas para el prototipo de simulación son las siguientes:

1. El Agente-individuo ingresa al escenario virtual guiado por un controlador que determina la cantidad de agentes y la ubicación inicial de cada agente.
2. Una vez en el edificio, cada agente se configura con variables y programas de comportamiento cuyo origen son dos tipos de patrones: patrones de carácter y patrones de comportamiento.
3. Las variables provenientes de los patrones de carácter se configuran en cada agente de manera aleatoria, por lo que cada agente es heterogéneo.
4. Cada Agente-individuo realiza un comportamiento vinculado cuando menos con una variable de carácter.

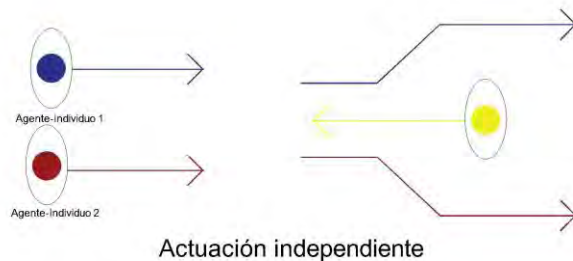


Figura 55. La actuación diferenciada entre agentes.

5. La actuación de cada Agente-individuo es independiente de los otros agentes, ya que existe muy poca probabilidad de que dos agentes tengan las mismas variables al mismo tiempo.
6. Los agentes seleccionan un destino de recorrido al momento de ingresar al simulador.
7. Los agentes seleccionan su ruta a partir del acceso donde el controlador los ubicó, el destino de recorrido seleccionado con las variables de carácter y la información de los caminos al destino proporcionado por el grafo de circulaciones del edificio.
8. La selección de ruta consiste en la evaluación de las distancias de todos los posibles caminos que llevan de una posición inicial a un destino seleccionado donde la elección se hace por la ruta más corta.

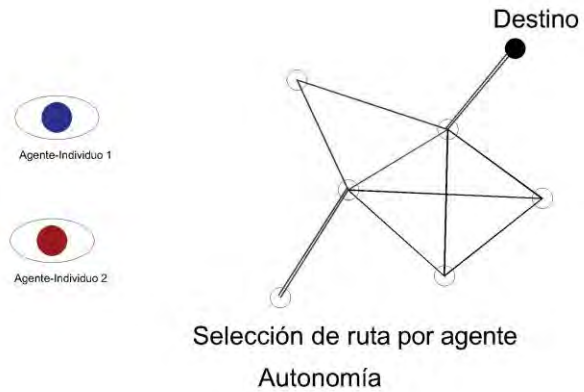


Figura 56. La autonomía en la selección de una ruta.

9. El edificio cuenta con variables y programas de estímulo producto de dos tipos de patrones: patrones de carácter y patrones de estímulo.
10. El edificio sólo envía información al Agente-individuo a través de los programas de estímulo.
11. Los programas de estímulo son el resultado de la vinculación entre las variables del edificio y los datos de entrada que le asigna el usuario del simulador.
12. El edificio se vincula con el comportamiento peatonal del Agente-individuo de dos maneras: con el programa de estímulo que surge del patrón Red-de-Circulaciones y por las barreras generadas por la maqueta virtual que delimita los espacios por donde los agentes pueden pasar.
13. El controlador organiza el tiempo y la velocidad de simulación a partir de los datos de inicio que proporciona el usuario del simulador.

En las figuras 54, 55 y 56 se representan las reglas de heterogeneidad, autonomía y actuación independiente de los agentes de simulación dentro del prototipo.

Configuración del edificio

Definido el edificio de la Unidad de posgrado como objeto de estudio, la siguiente etapa para el proceso de elaboración del prototipo consiste en el modelado del escenario virtual; para ello se procede de dos maneras: la primera es con la modelación del edificio en una maqueta virtual y la segunda es con el diseño de un grafo y una matriz de adyacencia para la red de circulaciones del edificio.

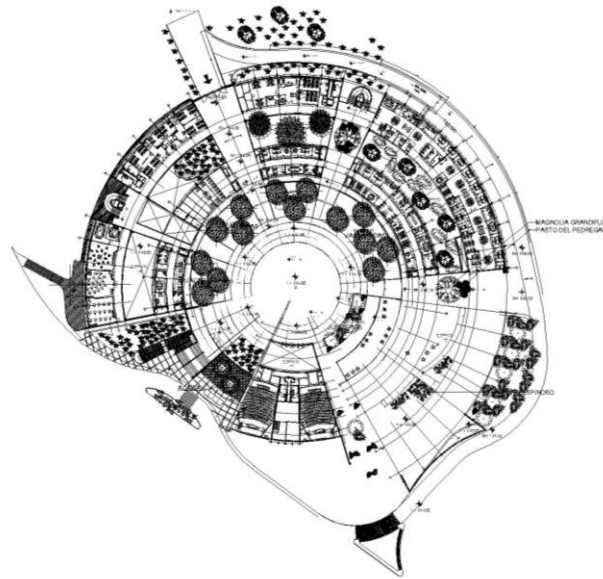


Figura 57. Plano original de la unidad de posgrado. Planta baja.
Fuente: Dirección general de obras y conservación UNAM.

Proceso de abstracción

Para elaborar el modelo tridimensional y el grafo del edificio primero se debe definir el nivel de abstracción necesario para representar el fenómeno a predecir. Según el objetivo del primer prototipo, únicamente es necesario conservar las zonas funcionales de cada bloque construido; para ello se realiza un proceso de simplificación. Comparando la figura 57 con la figura 58 se puede observar la diferencia

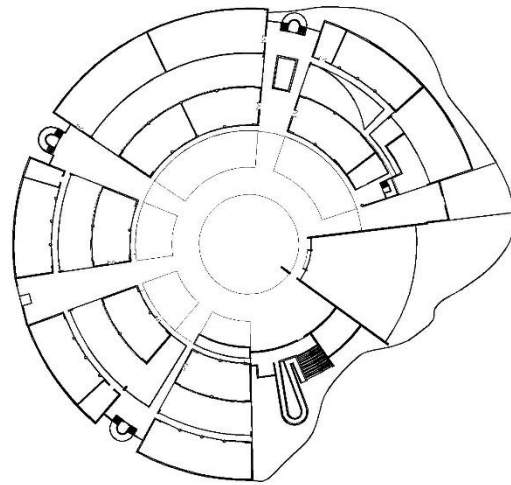


Figura 58. Plano simplificado de la unidad de posgrado para simulación.

entre las funciones totales del edificio y las funciones agrupadas en bloques.

El proceso consiste en reducir las áreas del edificio en sectores cada vez más generales, pudiendo llegar hasta la totalidad de la construcción; en la figura 59 se delimitan las áreas funcionales del proceso de simplificación.

Para el primer prototipo se seleccionó las áreas generales de la planta baja. La intención fue analizar únicamente los flujos peatonales existentes entre los accesos del edificio y los espacios de la planta baja, los accesos y los módulos de circulación vertical y por último los espacios de la planta baja y otros destinos específicos.

Red de circulaciones

Anteriormente se expuso el tema acerca de los criterios para configurar la red de circulaciones en un edificio, ahora se expone la aplicación de dichos criterios en el caso de estudio.

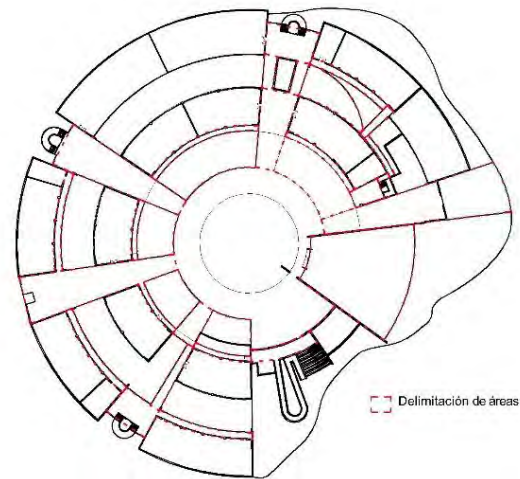


Figura 59. Regularización de áreas del edificio.

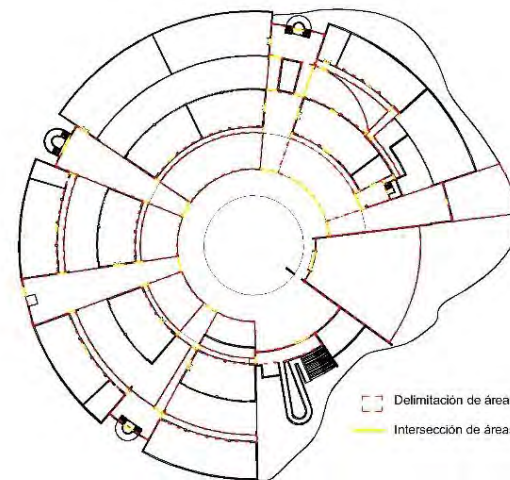


Figura 60. Ubicación de intersecciones entre áreas

Para la configuración de la red de circulaciones en la unidad de posgrado primero se convirtieron los espacios cerrados y abiertos del edificio simplificado a una geometría simple. Después se identificaron los bordes compartidos entre los espacios y se marcaron las líneas que no tenían barrera. Posteriormente se ubicaron los vértices de circulación de tal manera que cada punto se encuentra ubicado en las líneas traslapadas que no tiene alguna barrera del edificio encima. A continuación, se colocó un vértice en cada espacio simplificado. Después, se enlazaron los vértices con los parámetros de colocación establecidos. Por último se midieron las distancias entre vértices y se colocó el peso de enlace. La secuencia del proceso se muestra en las figura 59,60 y 61.

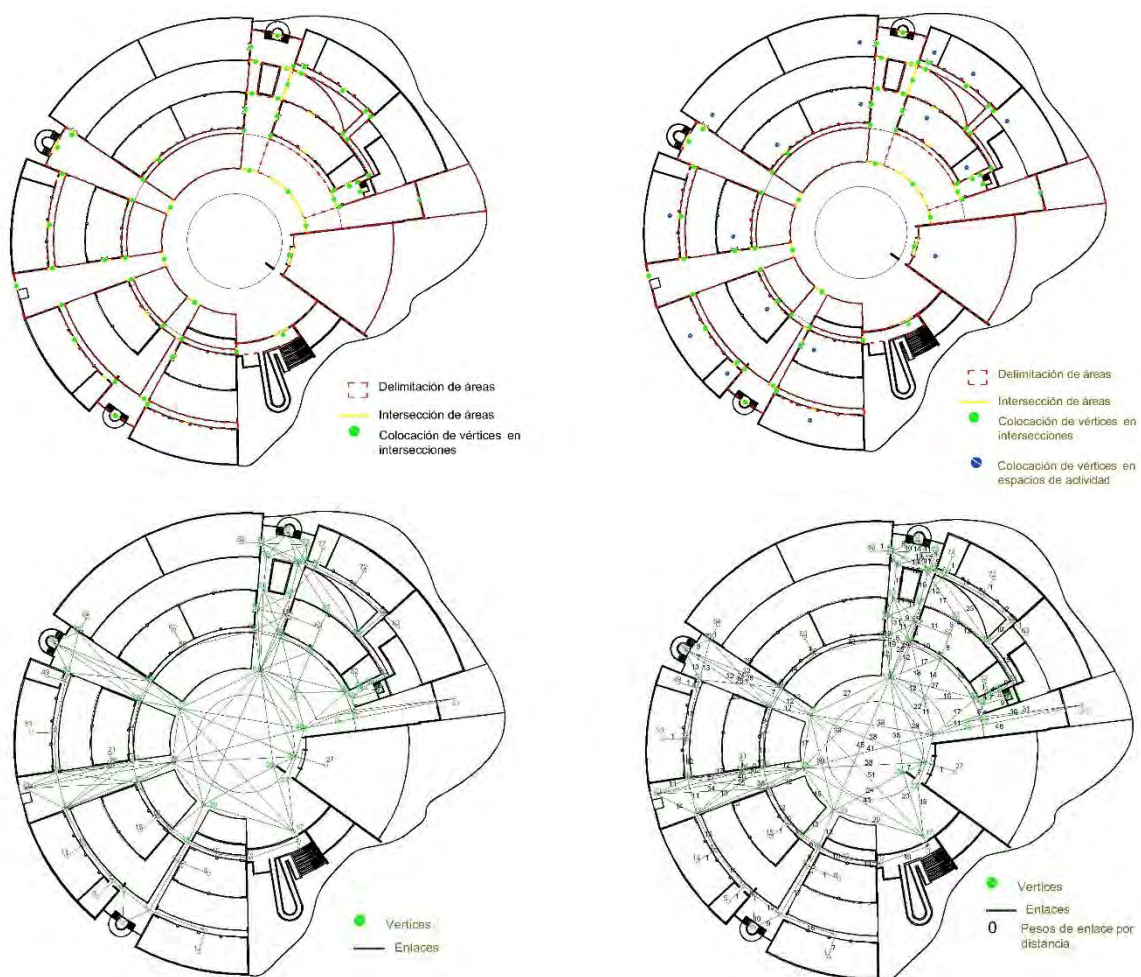


Figura 61. Método de colocación de vértices y enlaces. Con los vértices y enlaces se forma el grafo que representa la red de circulaciones de la Unidad de Posgrado.

Configuración del Agente-individuo

El proceso de configuración del Agente-individuo tiene dos aspectos: el primero es establecer una forma virtual de representación y el segundo es dotar a la representación virtual con la información de los patrones de carácter y comportamientos del individuo en forma de códigos de variables y programas. Con ambos aspectos es posible generar acciones visibles de simulación.

El agente-individuo es el componente móvil del simulador, en el prototipo puede tener tanto una presencia latente como una presencia en el tiempo. La presencia latente quiere decir que el agente se encuentra como un componente prefabricado dentro del programa, antes de que el controlador lo coloque en la ubicación dentro del edificio durante la simulación; la presencia en el tiempo quiere decir que el agente ya se encuentra en la maqueta virtual en un lapso de simulación. La configuración del usuario puede ocurrir en alguno de estos dos estados según los propósitos del modelador.

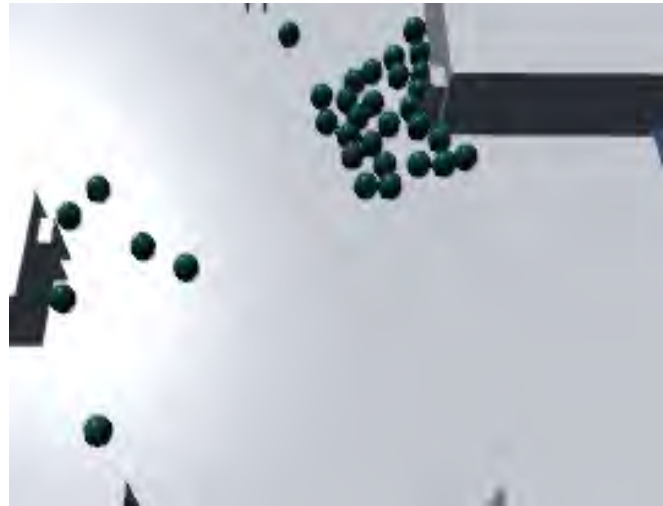


Figura 62. Representación abstracta del individuo en el ambiente arquitectónico.

El agente en el primer prototipo tiene forma de esfera, una forma abstracta, porque es un volumen sugiere movimiento, además permite optimizar los recursos de la computadora, ya que, a diferencia de una forma antropomórfica, tienen menos elementos que la componen lo que ocupa menos procesos de cálculo; es por esta razón que la esfera fue la forma ideal para las corridas de simulación.

Con respecto a la información del agente-individuo, tomando en cuenta el objetivo de predecir los flujos peatonales, se seleccionaron algunos patrones del grupo presentado en el modelo de ambientes arquitectónicos del capítulo 3.

Dicha selección abarcó únicamente a los patrones que tuvieran una relación con el movimiento del individuo por el edificio, ya sea como componente o como vínculo. La importancia de una discriminación a conciencia de los patrones radica en que no es posible formar una unidad funcional sin todos los patrones que intervienen en dicho funcionamiento, es decir que sin algún patrón que cierre el sistema las simulaciones no serían posibles. Esto es así ya que cada patrón es un componente de un patrón más complejo o está vinculado a otro patrón. En la tabla 2 se encuentran los patrones seleccionados para configurar al agente-individuo.

PATRONES DEL COMPORTAMIENTO PEATONAL	
Individuo	
Carácter	Comportamiento
Usuario-Perfil	Movimiento-desplazamiento
Usuario-ciclo	Evasión-de-obstáculos
Adulto	Selección-de-destino
Adulto-mayor	Selección-de-ruta
Estilo-situación	Selección-de-entrada
Discapacidad-motriz	Ir-a-siguiente-punto
Sin-discapacidad-motriz	Busqueda-de-obstáculos
Usuario-tipo	
Administrativo	
Estudiante	
Maestro	
Espacio-personal	
Estado-usuario	
Llegada-temprana	
Llegada-tarde	
Velocidad-peatonal	
Patrones-de-velocidad	
Ubicación-en-el-espacio	
Exterior	
Interior	

JERARQUÍA DE PATRONES	
Primer nivel	
Segundo Nivel	
Tercer Nivel	
Cuarto Nivel	
Quinto Nivel	
Sexto Nivel	
NIVELES DE ABSTRACCIÓN	

Tabla 2. Propuesta de patrones para la configuración del comportamiento peatonal del agente-individuo.

Los patrones carecen de sentido sin una estructura que los una, como ya se ha mencionado la unión se da por ser componente de un patrón mayor o por estar vinculado a otro patrón; a esto nos referimos con un lenguaje de patrones. En la figura 63 se encuentra el lenguaje que configura al Agente-individuo.

El lenguaje se lee de la siguiente manera:

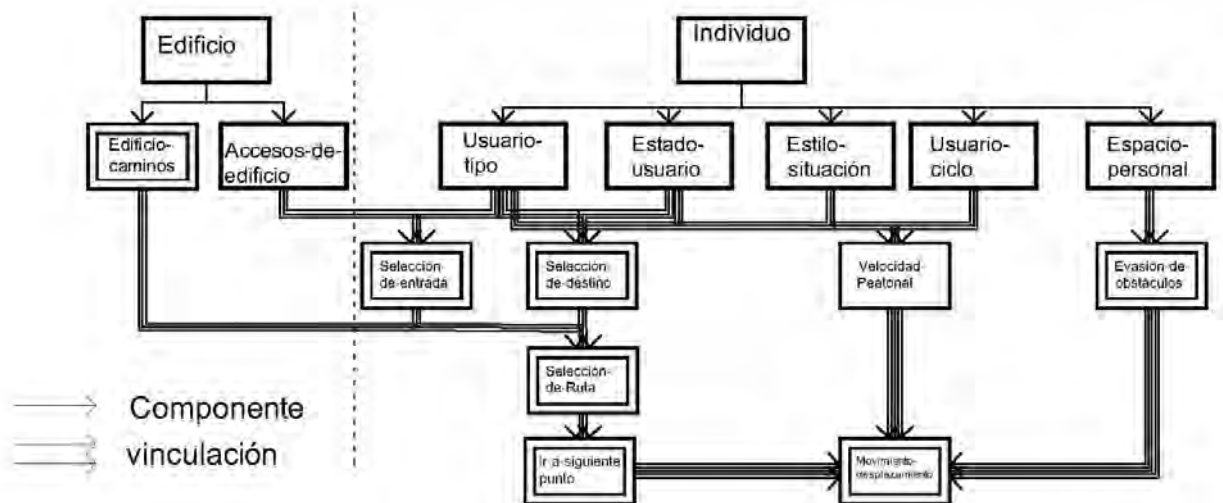


Figura 63. Propuesta de lenguaje de patrones específico para el comportamiento peatonal.

En el comportamiento peatonal intervienen tanto patrones del edificio como patrones del individuo. En el edificio hay accesos (Accesos-de-edificio) que se vinculan con la aparición de un tipo de usuario (Usuario-tipo) que a su vez se vincula a la selección de una entrada en el edificio (Selección-de-entrada). Así mismo el patrón de comportamiento que selecciona un destino (Selección-de-destino) se vincula a los patrones que definen el tipo y estado del usuario (Usuario-Tipo y Estado-usuario), mientras que el patrón de carácter que define la velocidad de desplazamiento del peatón (Velocidad-peatonal) se vincula además con los otros patrones de carácter del individuo (Estilo-situación y Usuario-ciclo). Los patrones de comportamiento del individuo relacionados con las decisiones de ruta (Selección-de-entrada y Selección-de-destino), junto con el patrón de estímulo del edificio que determina los caminos dentro de él (Edificio-caminos) se vinculan con la decisión de ir al próximo punto del camino (Ir-a-siguiente-punto). Se puede establecer que el desplazamiento peatonal (Movimiento-desplazamiento) es el vínculo entre el patrón de carácter Velocidad-peatonal, el patrón Evasión-de-obstáculos y el patrón de comportamiento Ir-a-siguiente-punto, junto con la información del edificio.

El lenguaje hace posible formular varios algoritmos para el comportamiento peatonal y programar el Agente-individuo del simulador.

Funcionamiento del prototipo

El primer programa para el comportamiento peatonal funciona a partir de unos datos de entrada, un controlador de usuario (interfaz), datos del edificio, un controlador de simulación,

agentes prefabricados y un proceso de simulación. El prototipo es un modelo continuo, es probabilístico, y gráfico. Todos estos elementos se integran dentro del programa Unity, con la finalidad de obtener una aplicación para realizar corridas de simulación.

Los datos de entrada son la información, proporcionada por el usuario del programa, que establecen las posibilidades de los procesos de cálculo en las corridas de simulación. Entre los datos se encuentran la fecha, hora, lapso y velocidad de simulación; todos los datos se vinculan con la información pre-programada dentro del prototipo y comunica al programa cómo efectuar los pasos de la simulación en el tiempo.

El controlador es el programa que decide cuándo comienza o finaliza una corrida de simulación y forma parte de la interfaz gráfica de usuario (IGU). Para ello cuenta con un botón de inicio y un botón de final, el botón de final puede detener la simulación en cualquier momento de las corridas. Los botones se encuentran en la aplicación final, fuera del entorno de Unity.

Los datos del edificio son la información que el usuario proporciona utilizando un grafo en forma de arreglo numérico, con los vértices y los pesos de los enlaces que lo configuran, además de representar la red de circulaciones en el edificio, son la información que utilizan los agentes para activar su patrones de selección de ruta. En el primer prototipo el arreglo del grafo se realiza con un procedimiento manual en forma de matriz, es decir que aún no existe el programa para configurarlo automáticamente.

El controlador de simulación es el programa encargado de manipular la aparición y desaparición de los agentes en las corridas de simulación utilizando los datos de entrada proporcionados por el usuario del programa. Funciona con datos estadísticos obtenidos e ingresados por el modelador, éstos son la información de la Unidad de posgrado; la información puede probabilística o estadística, está relacionada con el número de personas que ingresan al posgrado por segundo en un lapso, el tipo de personas que utilizan determinada entrada, el porcentaje de usuarios por entrada y el porcentaje de usuarios por destino.

Los agentes prefabricados son los modelos tridimensionales de cada tipo de agente configurados con los scripts de programación que se activan al momento de que el controlador los coloca en una posición dentro de la simulación; la función de los scripts es la de dotar al agente de

características únicas. Antes de que inicie la simulación los agentes se mantienen en un estado latente no visible dentro de la aplicación.

El proceso de simulación comienza en el momento que el usuario del programa pulsa el botón de inicio y termina cuando el finaliza el tiempo proporcionado de simulación o cuando el usuario pulsa el botón de salida. En las corridas de simulación se ejecutan los métodos programados en el lenguaje de programación y los agentes interactúan con el edificio según sus características y comportamientos. A continuación se presentan las acciones de una corrida de simulación a modo de resumen y de forma explícita.

1. Inmediatamente después de apretado el botón de inicio el controlador comienza a contar el tiempo e ingresa al primer agente-individuo a una ubicación dentro del edificio tomando en cuenta los datos de inicio ingresados y los patrones de carácter predefinidos por el estado latente del agente.
2. Al ingresar, el agente se configura con el resto de los patrones de carácter utilizando los scripts programados para este propósito, después los datos se almacenan como atributos en las variables de los programas de comportamiento visible.
3. A través de los patrones de carácter y del patrón de rutas del edificio (Puntos-de-ruta) el agente activa su primer patrón de comportamiento en el ambiente para seleccionar un destino deseado (Selección-de-destino).
4. El agente calcula la ruta más corta desde el punto donde el controlador lo ubico hasta el punto de destino seleccionado, este comportamiento lo realiza con el patrón de selección de rutas vinculado con la información de la red de circulaciones que tiene el edificio. Con la selección de una ruta se obtiene un arreglo con los puntos de la red de circulaciones que llevan al destino.
5. El agente realiza el patrón de comportamiento Ir-al-siguiente-punto para seleccionar el punto ubicado después del punto en el que se localiza en primera instancia.
6. El agente realiza el patrón de comportamiento visual Movimiento-desplazamiento, para moverse del punto localizado al punto deseado.
7. Durante el desplazamiento el agente activa el patrón de comportamiento Búsqueda-de-obstáculos para localizar una potencial barrera en la trayectoria.

8. En el encuentro con un obstáculo el agente activa el patrón de comportamiento visual Evasión-de-obstáculos que se encarga de evitar colisiones entre elementos de la simulación.
9. El agente llega al punto deseado y evalúa si es el destino deseado ingresando al arreglo de la ruta seleccionada.
10. Si el punto de arribo no es el destino se repite todo el proceso desde el paso 5 hasta alcanzar el destino o hasta que el botón de finalizar se active o hasta que termine el tiempo de simulación.
11. Si el agente llega al destino se contabiliza su ruta y desaparece.
12. El controlador continúa apareciendo agentes y contando el tiempo hasta que el lapso de situación se termine o el usuario del programa apriete el botón de finalizar.

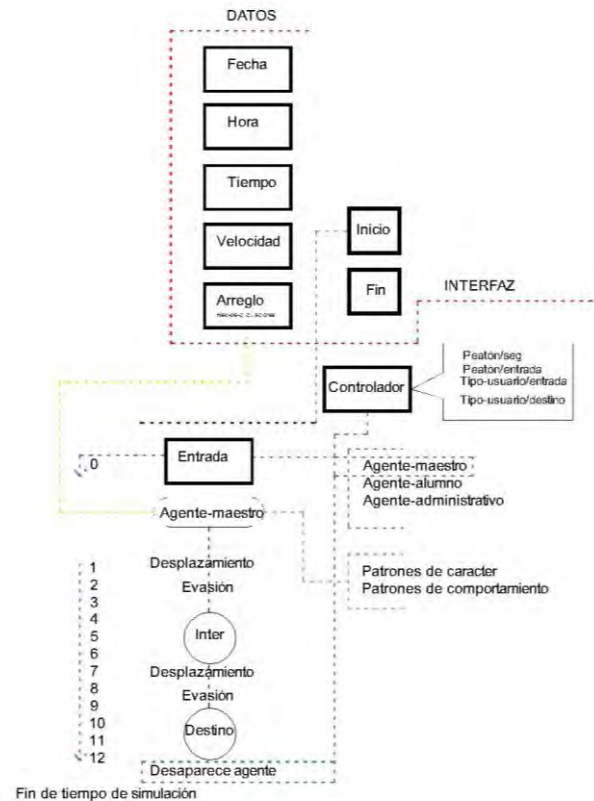


Figura 64. Funcionamiento del simulador a partir de los datos de entrada.

Esquemáticamente el funcionamiento del simulador se muestra en la figura 64.

Gráficamente el proceso de las corridas de simulación se muestra en la figura 65.

Con los elementos y el proceso de simulación es posible hacer el armado del prototipo, para ello se ingresan todos los volúmenes tridimensionales que representan

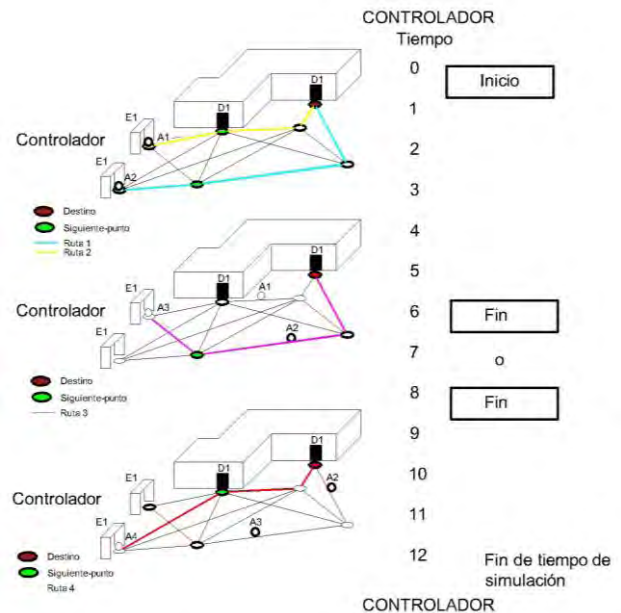


Figura 65. Funcionamiento gráfico del prototipo de simulación.

visualmente al ambiente arquitectónico y todos los programas de comportamiento de los agentes para las corridas de simulación.

Primeras corridas de simulación

Las corridas de simulación efectuadas por el prototipo de simulación para el comportamiento peatonal consisten en procesos de cálculo y visualización realizados dentro del programa Unity donde interactúan las funciones y algoritmos de los diferentes componentes del modelo basado en agentes y que representan a los elementos del ambiente arquitectónico formado en la Unidad de posgrado. El resultado de dicho proceso es la predicción de los de flujos de circulación generados por los agentes a partir de la configuración espacial del edificio, los tipos de usuario presentes, los datos de distribución poblacional y el programa de selección de rutas cuyo único parámetro es la distancia más corta de un punto a otro.

En las corridas de simulación se integran todos los conceptos y procesos expuestos en la investigación por primera ocasión. La generación de las visualizaciones son el resultado de formar un micro sistema real del modelo de ambientes arquitectónicos; el sistema entrelaza los datos generados por la Unidad de posgrado, en forma de patrones de estímulo, con los agentes-usuario programados con patrones de carácter.

Para que una predicción del comportamiento peatonal pueda efectuarse el programa debe alimentarse con datos estadísticos o con datos probabilísticos del edificio. Los datos utilizados en el primer prototipo son de tipo estadístico procedente de observaciones efectuadas en la plaza central de la unidad de posgrado, éstos se encuentran integrados dentro del código.

Para comprobar el funcionamiento del simulador se presenta una comparación entre los flujos de circulación observados en la unidad de posgrado y los flujos generados en las corridas del prototipo de simulación.

La comparativa entre el edificio y el modelo tiene por objeto encontrar la diferencia y las similitudes entre las trayectorias peatonales, accesos recurrentes y las formaciones peatonales generadas para generar la primera calibración del prototipo necesaria para ajustar los algoritmos y plantear nuevos patrones generadores del flujo peatonal en el modelo diseñado.

En la plaza central de la unidad de posgrado existen 6 nodos de circulación principal correspondientes a los accesos y salidas de la plaza, y 4 nodos complementarios que tienen la

función de unir los nodos principales que se encuentran obstaculizados por algún elemento del edificio. Los nodos son puntos de referencia utilizados en la observación del edificio y en la programación del simulador, en el caso de los nodos principales se utilizan para representar los extremos de los flujos de circulación y en el caso de los nodos complementarios, se utilizan como puntos intermedios (ver figura 66).

En la unidad se forman 14 trayectorias posibles generadas por la distribución de los nodos; éstas tienen diferentes dimensiones y conectan las secciones del edificio con los accesos y con otras secciones. Las trayectorias son los puntos que correlacionan la línea más corta entre dos puntos de una circulación de la plaza y el trayecto peatonal que ocurre entre esos mismos puntos. Las trayectorias se utilizan para ubicar la posición de los peatones observados en la plaza de la unidad de posgrado dentro de un plano. En la figura 67 se encuentra la ubicación de las trayectorias analizadas en el edificio diferenciadas con colores y números necesarios para identificar los flujos peatonales. En la figura se presentan los resultados de la observación realizada el 23 de septiembre de 2016 entre las 2:00 pm y las 2:10 pm. En las observaciones se puede observar la formación de 9 flujos peatonales en la plaza central de la unidad de posgrado de los 14 posibles. La ubicación de las posiciones peatonales sugiere la presencia de fuerzas que distorsionan la línea de trayectoria más corta entre dos puntos por parte de los individuos. Con la observación se puede observar también que existen trayectorias más

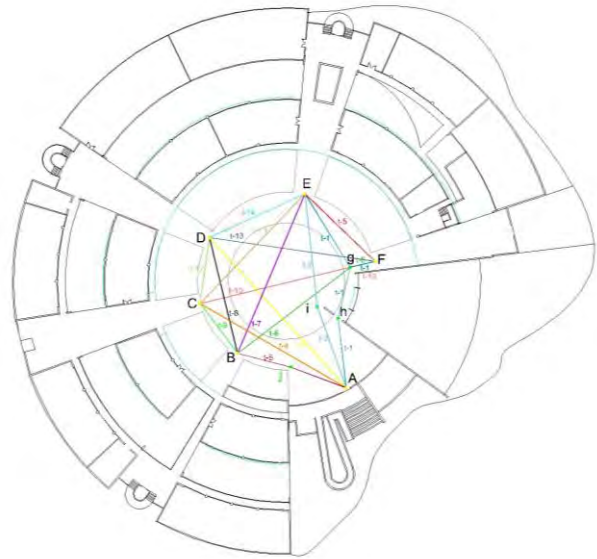


Figura 66. Red de circulaciones formada en la plaza de la Unidad de posgrado, Con letras mayúsculas se ubican los nodos principales y con letras minúsculas los nodos intermedios.

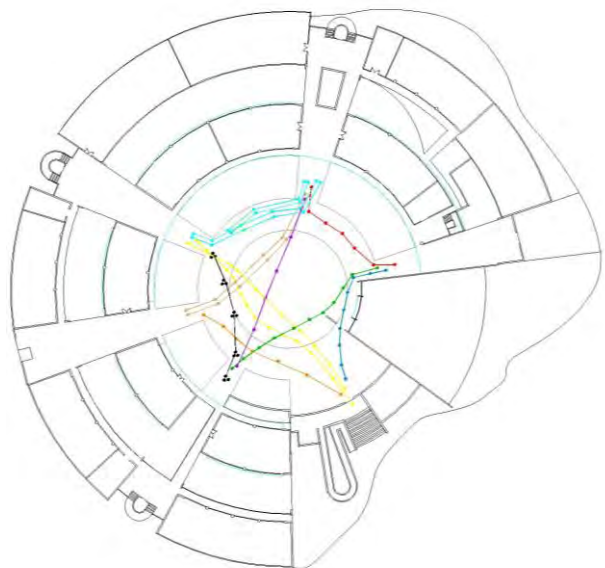


Figura 67. Datos de flujos de circulación obtenidos en la Unidad de posgrado donde se observan con colores los recorridos obtenidos entre las 2 y las 2:10 de la tarde.

utilizadas que sugieren un patrón de relación funcional entre sectores del edificio.

En la figura 68 se muestran los flujos generados por el simulador. Los datos programados en el simulador fueron los siguientes:

- Cuatro agentes (estudiante, maestro, administrativo y mantenimiento).
- Una matriz de 82 x 82 elementos que representan todos los posibles caminos de la unidad de posgrado.
- Intervalos de 20 peatones que ingresan cada 2 segundos.
- Ubicación de nodos en la maqueta virtual.
- Porcentajes de usuario (70% estudiantes, 20% maestros, 8% administrativos y 2% mantenimiento)²⁴.
- Velocidades peatonales (1.1 m/s, 1.3 m/s, 1.4m/s y 1.5m/s)²⁵.

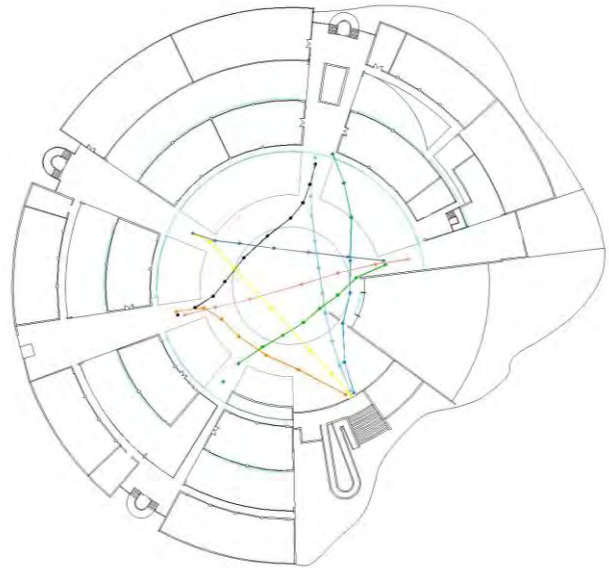


Figura 68. Flujos obtenidos por el prototipo de simulación a partir de predicciones del comportamiento peatonal a partir de peatones. Los flujos están marcado por color.

Lo que se puede observar es que el simulador genera 8 flujos peatonales de las 14 posibilidades de la plaza central de la unidad de posgrado. Los flujos formados por las posiciones de los agentes son líneas más regulares que los encontrados en la observación de la plaza, la explicación es que en la trayectoria de los agentes solo influye la fuerza de atracción existente entre el peatón y el punto de destino. Otra diferencia importante entre los flujos reales y los simulados es la existencia de un flujo, en el simulador, cuyo recorrido es diferente a los marcados por los nodos principales de la unidad, la explicación de éste comportamiento es que en la unidad de

²⁴ Los datos utilizados para el primer prototipo son estimados que no representan necesariamente la realidad estadística de la unidad de posgrado, las cantidades tienen la finalidad de comprobar el funcionamiento del sistema generado en el prototipo.

²⁵ Las velocidades peatonales son seleccionadas por los agentes tomando en cuenta la configuración inicial de usuario.

posgrado el área que ocupa las mesas exteriores de la cafetería funciona como un obstáculo para los peatones mientras que en el simulador ese obstáculo no existe lo que permite la generación del flujo peatonal por esa zona.

La diferencia principal entre los flujos presentes en la plaza de la unidad de posgrado y el modelo de simulación es la presencia del flujo 14 y el flujo 5 (ver figura 66) que por otra parte son trayectorias con mucha incidencia en el edificio, estos flujos no están presentes en el modelo de simulación. En el modelo, la trayectoria entre los puntos que unen los flujos 14 y 5 se realizan por otros senderos de la unidad de posgrado, esto se explica debido a que la decisión del flujo peatonal en el modelo se genera a partir de la selección del camino más corto entre dos puntos, por lo que las secciones del edificio que unen las trayectorias 14 y 5 no son tomadas en cuenta dado que existen caminos más cortos para unir estos espacios. La ausencia de las trayectorias 14 y 5 demuestra que la selección de una ruta y su subsecuente flujo peatonal no está influenciada únicamente por el camino más corto de un punto a otro, sino que existen otros patrones del edificio que también deben ser tomados en cuenta por el simulador.

Gracias a la comparativa entre los flujos reales y los flujos simulados se comprobó que los componentes del prototipo generan corridas de simulación y que los componentes siguen la lógica de los algoritmos programados, por otro lado también mostró la necesidad de calibrar los datos iniciales de simulación para generar flujos más reales y por último se obtuvo nuevos patrones para generar más algoritmos en la formación de flujos peatonales.

Calibración y validación del prototipo

Si bien los procesos de calibración y validación están fuera de los alcances del presente trabajo de investigación, es importante exponer en qué consisten y cuál es la importancia de realizar dichos métodos. Todo prototipo de simulación pasa por uno o varios procesos de calibración y validación antes de llegar a ser un producto terminado, incluso, aún después de terminado, los productos continúan mejorándose a partir de estos procesos, lo que se denomina como actualización del producto.

En lo referente a la calibración del prototipo, es un proceso por el cual se remplazan o modifican los parámetros de la aplicación a partir de información estadística actualizada o de información que en el momento del desarrollo no era conocida. Su función principal es la de elevar

el poder de predicción del prototipo con respecto al sistema que representa, también se utiliza para identificar errores en la programación.

El prototipo de simulación del comportamiento peatonal parte de un número de hipótesis de simulación, cada hipótesis, como se ha mencionado anteriormente, explica un funcionamiento de alguna parte del simulador, tomando en cuenta la información recabada del fenómeno en el momento de desarrollar el prototipo. Como la información cambia constantemente las hipótesis pueden reafirmarse, remplazarse o eliminarse del prototipo de manera similar a lo que ocurre en cualquier hipótesis de investigación.

Una hipótesis de simulación se reafirma cuando los datos nuevos referentes al fenómeno ratifican los datos previos, en este caso los nuevos datos solo complementan a los existentes. El remplazo de hipótesis se presenta cuando los datos nuevos del fenómeno contradicen a los dos existentes. Por último, una hipótesis de simulación se elimina cuando los datos revelan que la información del prototipo no tiene ninguna relación con el comportamiento real del fenómeno.

Para el proceso de calibración del prototipo primero hay que hacer una observación directa del fenómeno real partiendo de las hipótesis de simulación planteadas para la primera aplicación. Segundo, hay que recabar datos del fenómeno tomando en cuenta las variables propuestas por dicha hipótesis para el prototipo. Tercero, se comparan los datos de la realidad con los datos del prototipo. Por último, la hipótesis y la información se remplazan, complementan o borran del prototipo.

Por otra parte, la validación es la asignación del valor de asertividad que tiene un prototipo para reproducir el comportamiento real. La validación cuenta con un índice de asertividad, una evaluación y una asignación de valor para el prototipo; el proceso es metódico y comparativo. Es el modelador el encargado de llevar a cabo el proceso de validación.

En relación con el índice de asertividad, es un rango que determina la capacidad de reproducción de un fenómeno por parte de un modelo, por lo general va de 0 a 1, donde el 0 representa el valor más bajo de asertividad y el 1 es el nivel más alto (Helbing).

La evaluación consiste en comparar las corridas de simulación generadas por el prototipo con videos, encuestas, etc. obtenidas directamente del sistema real. La comparación revela la diferencia que existe entre ambos datos.

La asignación del valor consiste en obtener un valor entre 0 y 1 a partir de la diferencia que existe entre los resultados de las corridas de simulación y el fenómeno real.

Resumen

En el capítulo se presentó el proceso requerido para desarrollar el primero prototipo de simulación a través de todos los conceptos y métodos aprendidos en los capítulos anteriores, para ello primero se seleccionó un comportamiento dentro de todos los comportamientos del ambiente arquitectónico, el comportamiento peatonal; se identificaron los patrones que componen el comportamiento peatonal y los que se vinculan a que el comportamiento se active. Posteriormente se seleccionó y describió el caso de estudio, la Unidad de Posgrado de la UNAM; el objeto sirvió como referencia para obtener la información de simulación y como ambiente a reproducir. Después se definió el objetivo de simulación, reproducir el comportamiento peatonal de la unidad de posgrado. Una de las partes más importantes que se presentó fue la generación de un sub-modelo para el comportamiento peatonal, un micro sistema del modelo de ambientes arquitectónicos. Posteriormente se definieron las reglas que rigen al prototipo basadas en las propiedades de autonomía, heterogeneidad y actividad que debe poseer una simulación basada en agentes. Se concluyó la explicación del diseño del prototipo con la definición de la configuración de sus componentes, el edificio virtual y el agente individuo, así como la explicación del funcionamiento general de prototipo.

El capítulo finaliza la exposición de los resultados con las corridas de simulación del primer prototipo de simulación del comportamiento peatonal y describe brevemente las siguientes dos etapas para la generación de un simulador, la calibración y la validación. Con el capítulo 5 se termina la parte de la aportación de investigación.

Conclusiones

El arquitecto se encuentra en un mundo que sufre numerosos cambios; por un lado la sociedad a la que le construye ha cambiado sus hábitos y costumbres en un lapso muy corto, situación que exige una forma diferente de concebir los edificios; mientras que por otro lado, los avances tecnológicos ofrecen nuevos materiales y herramientas de análisis que tienen que ser incluidas en el diseño arquitectónico.

Ante el panorama presentado la investigación propuso una herramienta para ayudar al arquitecto a diseñar edificios, instrumento enfocado a entender al protagonista de los espacios, el individuo, porque entendiendo como el usuario de los edificios interactúa con su ambiente se facilita la toma de decisiones pensadas para él. La herramienta es un simulador que predice el comportamiento de los individuos dentro de un edificio en un entorno físico; su función es mostrarle gráficamente al arquitecto las repercusiones que tienen sus decisiones referente a los espacios arquitectónicos mediante el entendimiento holístico de los componentes ambientales y cuya finalidad es mejorar los espacios habitables.

En la tesis se expuso el proceso para crear el primer prototipo de simulación, el cual representa el primer paso del desarrollo de la herramienta. Todo el proceso de construcción comenzó con la etapa introductoria de conceptos, necesaria para entender la forma de llevar a cabo el prototipo, en ésta se definieron el método de simulación y el diseño del modelo. El proceso continuó entendiendo el sistema complejo de los ambientes arquitectónicos donde se identificaron los componentes, las características y los comportamientos de cada elemento ambiental. Después se propuso un modelo para explicar el sistema real, éste consistió en abstraer los patrones de cada componente y esquematizar las interrelaciones en un lenguaje. Posteriormente se codificó el esquema denominado lenguaje de patrones trasladándolo a algoritmos y posteriormente a un lenguaje de programación. Para terminar el proceso con la selección de patrones para el sistema de comportamiento peatonal del prototipo y el armado final.

En el presente trabajo se puede observar que las virtudes de la herramienta son muchas, si bien esta investigación solo representa el primer paso de un desarrollo mayor, la investigación tiene la capacidad de cambiar la manera en que trabaja el arquitecto.

Como resultado de la investigación están: la adaptación y aplicación del método de simulación, planteamiento de una estructura para aprovechar e interrelacionar las investigaciones sobre el comportamiento ambiental, diseño de un modelo abstracto que explica el funcionamiento del ambiente arquitectónico utilizando un lenguaje de patrones, implementación de la teoría de grafos a la simulación del comportamiento peatonal y el primer prototipo de ambientes arquitectónicos enfocado al comportamiento peatonal. Por otro lado el desarrollo tecnológico de un simulador abre un nuevo panorama para el arquitecto donde temas como la teoría de grafos, los sistemas complejos, las matrices, la programación orientada a objetos y la realidad virtual dejan de ser campos únicamente competentes a otras disciplinas; ahora el arquitecto tienen la responsabilidad de integrarse al mundo multidisciplinario y transdisciplinario que exige su profesión para así entender mejor los objetos que diseña y expresar con la arquitectura edificios más acordes con la época que vivimos.

Todas las aportaciones son importantes e innovadoras. Al presentar los resultados se puede observar que el objetivo de diseñar y construir el prototipo se cumplió, y que el proceso aportó mucha información al desarrollo de la tecnología de simulación.

En relación con la hipótesis de la investigación referente a la factibilidad de simular el comportamiento a partir de un lenguaje de patrones, podemos concluir que el prototipo funcional confirma el planteamiento. En contraste es importante mencionar ciertos aspectos: el primero es que no se realizaron procesos de calibración y validación al prototipo por lo que no es posible saber el nivel de asertividad que tienen sus simulaciones; segundo, hace falta recopilar datos estadísticos para conocer el funcionamiento real del sistema planteado para el prototipo, y tercero es necesario hacer estudios para corroborar las hipótesis de simulación utilizadas en el prototipo.

Al final concluimos con la reflexión de que la importancia de toda la investigación radica en que se dio el primer paso para generar espacios virtuales de inmersión arquitectónica lo que nos acerca a la visión del trabajo: el arquitecto diseñando y evaluando en la realidad virtual.

Referencias

- Aguilar, L. (2003). *Fundamentos de programación*. España: Mc Graw Hill.
- Alexander, C. (1980). *El lenguaje de patrones*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Alexander, C. (1981). *El modo intemporal de construir*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Altman, I. (1975). The environment and social behavior. En D. Kopec, *Environmental Psychology for Design* (pág. 65). New York: Fairchild Publications.
- AnyLogic, C. (19 de marzo de 2016). *AnyLogic*. Obtenido de <http://www.anylogic.com/about-us>
- Aragónés, J., Amérigo, M., & Corraliza, J. (1998). *Psicología ambiental*. Madrid: Pirámide.
- Archea, J. (1977). The place of architectural factors in behavioral theories of privacy. *Journal of social issues*, 116-137.
- Bandura, A. (1978). The self system in reciprocal determinism. En C. Holahan, *Psicología ambiental. Un enfoque general* (pág. 398). México: Limusa.
- Bandura, A. (1978). The self system in reciprocal determinism. En C. Holaha, *Psicología Ambiental. Un enfoque general* (pág. 398). México: Limusa.
- Banks, J., Carson, J., & Nelson, B. (1996). *Discrete-event system simulation*. New Jersey: Practice Hall.
- Barker, R. (1978). *Habitats, environments, and human behavior*. San Francisco: Jossey-Bass.
- Bechtel, R., & Churchman, A. (Edits.). (2002). *Handbook of Environmental Psychology*. New York: John Wiley & Sons.
- Bermejo, J. (2009). Leyendo los espacios: una aproximación crítica a la sintaxis espacial como herramienta de análisis arqueológico. *Arqueología de la arquitectura*, 47-62.
- Bogin, B., & Smith, H. (1996). Evolution of human life cycle. *American journal of human biology*, 703-716.
- Bondy, J., & Murty, U. (1976). *Graph theory with applications*. New York: North-Holland.
- Borshchev, A. (2013). *The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with Anylogic*. Chicago: AnyLogic North America.
- Boudeger, A., Prett, P., & Squella, P. (2010). *Manual de accesibilidad universal*. Chile: Ciudad accesible.
- Burillo, J., & Aragónés, J. (1991). *Introducción a la psicología ambiental* (Tercera ed.). Madrid: Alianza Editorial.
- Cairó, O. (2005). *Metodología de la programación: algoritmos, diagramas de flujo y programas*. México: Alfaomega.

- Carr, S., & Schissler, D. (1967). The city as a trip: Perceptual selection and memory in the view from the road. En C. Holahan, *Psicología Ambiental. Un enfoque general* (pág. 108). México: Limusa.
- Coello, C. (2000). Una breve historia de la computación en el siglo XX: Las grandes contribuciones de los matemáticos. *Miscelánea Matemática*, 29-60.
- Connor, D. (19 de Marzo de 2016). *Legion: Science in motion*. Obtenido de <http://www.legion.com/legion-software>
- Dawn, C., & Steven. (2008). Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: A review. *Annals of the Association of American Geographers*, 314-337.
- Deasy, C. L. (1985). *Designing places for people. A handbook on human behavior for architects, designers and facility managers*. Nueva York: Whitney Li.
- Deitel, P. (2008). *Java, cómo programar*. México, D.F.: Pearson Educacion de México.
- Edney, J. (2006). Human Territoriality. En D. Kopec, *Environmental Psychology for Design* (pág. 64). New York: Fairchild Publications.
- Estrada, C. (2003). *El papel de la sintaxis espacial en la generación del ruido ambiental*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Flores, C. (2001). *Ergonomía para el diseño*. México: Designio.
- Folkman, S., & Lazarus, R. (1980). Coping in an adequately functioning middle-aged population. *Journal of health and social behavior*, 219-239.
- Gantmacher, F. (1959). *The theory of matrices*. New York: Chelsea Publishing Company.
- Getchell, A. (2008). *Agent-based Modeling*. California: Department of Physics, University of California.
- Gilbert, J., & Boulter, C. (2000). *Developing models in science education*. Dordrecht: Kluwer.
- Hall, E. (1966). *La dimensión oculta*. México: Siglo XXI.
- Helbing, D. (Ed.). (2012). *Social self-organization. Agent based simulation and experiments to study emergent social behavior*. New York: Springer.
- Helbing, D., & Molnár, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *The American Physical Society*, 1-18.
- Hillier, B., & Hanson, J. (1984). *The social logic of space*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hillier, B., & Peponis, J. (1984). What do we mean by building function? *Designing for building utilization*, 61-70.
- Holahan, C. (2015). *Psicología ambiental: Un enfoque general*. Austin, Texas: Limusa.
- Joyanes, L. (1993). *Metodología de la programación, diagramas de flujo, algoritmos y programación estructurada*. España: Mc Graw Hill.

- Joyner, D., Nguyen, M., & Cohen, N. (2011). *Algorithmic Graph Theory*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kontovourkis, O. (2009). *Computer-generated circulation diagrams: a critical analysis of theoretical approaches*. Bath: University of Bath.
- Kopec, D. (2006). *Environmental Psychology for Design*. New York: Fairchild Publications.
- Laufer, R., & Wolfe, M. (2015). Privacy as a concept and social issue: A multi-dimensional development theory. En C. Holahan, *Psicología ambiental. Un enfoque general* (pág. 283). México: Limusa.
- Law, A., & Kelton, W. (1988). *Simulation Modeling & analysis* (Segunda ed.). New York: McGraw-Hill.
- León, E. (2011). *Ecología y medio ambiente*. México: Santillana.
- Lewin, K. (1936). *Principles of topological psychology*. Nueva York: McGraw-Hill.
- Lynch, K. (2010). *La imagen de la ciudad*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Marshall, N. (1972). Privacy and environment. *Human ecology*, 93-110.
- Moore, G. (1979). *Environment-behavior studies*. New York: Universidad de Wisconsin Milwaukee.
- Moore, G. (1979). Environment-behavior studies. En J. Snyder, & A. Catanese (Edits.), *Introduction to architecture* (págs. 46-71). New York.
- Moore, G., Tuttle, P., & Howell, S. (1985). *Environmental design research directions*. Michigan: Praeger.
- Narang, S., Best, A., Curtis, S., & Manocha, D. (2015). Generating pedestrian trajectories consistent with the fundamental diagram based on physiological and psychological factors. *PlosOne*, 1-17.
- Peponis, J., & Wineman, J. (2002). Spatial structure of environment and behavior. En B. Bechtel, & A. Churchman, *Handbook of environmental psychology*. Nueva York: Wiley & Sons, Inc.
- Pinales, F., & Cesar, V. (2014). *Problemario de algoritmos resueltos con diagramas de flujo y pseudocódigo*. Aguascalientes: Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- Pringle, L. (1971). *Introducción a la ecología*. Buenos Aires: Marymar.
- Proshansky, H., Ittelson, W., & Rivlin, L. (1976). Freedom of choice and behavior in a physical setting. En H. Proshansky, W. Ittelson, & L. Rivlin, *Environmental psychology: People and their physical settings*. Nueva York: Holt, Rinehart y Winston.
- Rodríguez, B., Serrano, D., Monleón, T., & Caro, J. (2008). Los modelos de simulación de eventos discretos en la evaluación económica de tecnologías y productos sanitarios. *Gaceta Sanitaria*, 151-161.
- Selye, H. (2000). The evolution of the stress concept. *American Scientist*, 185-226.
- Shannon, R. (1988). *Simulación de sistemas. Diseño, desarrollo e implementación*. Mexico: Trillas.
- Shannon, R., & Johannes, J. (1976). Systems simulation: the art and science. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 723-724.

- Singh, Y. (2006). *Environmental Science*. New Delhi: New Age.
- Steele, F. (1973). *Physical settings and organization development*. Adison-Wesley.
- Unity, T. (10 de Marzo de 2016). *Unity Game Engine*. Obtenido de <https://unity3d.com/es>
- Venturi, R. (1966). *Complejidad y contradicción en arquitectura*. Nueva York: Museo de arte moderno.
- Vicsek, T. (2002). Complexity: The bigger picture. *Nature*, 131.
- Westin, A. (1967). Privacy, personal space, territoriality and crowding. En D. Kopec, *Environmental Psychology for Design* (pág. 69). Monterey, CA: Brooks/Cole.
- Wohlwill, J. (1966). The physical environmet: A problem for a psychology of simulation. En C. Holahan, *Psicología Ambiental. Un enfoque general* (pág. 64). México: Limusa.
- Yáñez, E. (1983). *Arquitectura: teoría, diseño, contexto*. México: UNAM.

Glosario

Conceptos de simulación

La simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias dentro de los límites impuestos por un cierto criterio o un conjunto de ellos para el funcionamiento del sistema.

Un simulador de usuarios en ambientes arquitectónicos mediante predicciones de comportamiento es un modelo de evaluación de ambientes construidos que recrea la interacción real entre la arquitectura y los usuarios en escenarios virtuales donde se analiza y valora la funcionalidad. Ésta herramienta se compone de un fundamento teórico, un proceso de programación y traslado del lenguaje físico-cognitivo a lenguaje computacional y un programa interactivo de visualización.

Modelo es una representación simplificada de la realidad. Así, un modelo representa de manera simplificada los diferentes componentes y procesos que forman parte del sistema en estudio. El proceso de construcción de un modelo contribuye a identificar, seleccionar y ordenar la información disponible en relación al funcionamiento del sistema de estudio.

Un escenario virtual es una simulación por computadora, dinámica y tridimensional, con alto contenido gráfico, acústico y táctil, orientada a la visualización de situaciones y variables complejas, durante la cual el usuario ingresa, a través del uso de sofisticados dispositivos de entrada, a "mundos" que aparentan ser reales, resultando inmerso en ambientes altamente participativos, de origen artificial.

Patrones virtuales de estimulación ambiental. Son procesos que pretenden reproducir en un ambiente virtual los estímulos que se repiten en el ambiente y que se producen por una ubicación o contexto definido.

Patrones virtuales de conducta. Son procesos que pretenden reproducir en modelo de simulación virtual la conducta que se repite de parte de un individuo ante un estímulo ambiental.

Patrones virtuales de ambientes arquitectónicos. Son procesos que pretenden reproducir dentro de un modelo de simulación los ambientes arquitectónicos surgidos de los anteproyectos de los arquitectos.

Conceptos de interacción ambiental

Los estímulos ambientales son factores físicos que consiguen generar una reacción funcional en un organismo; El fenómeno de estimulación consta de tres partes, un sujeto que percibe los estímulos, un ambiente generador y el patrón de reacciones generadas. El intercambio de información ambiente-individuo suele ser consiente e inconsciente donde los receptores son los sentidos. En la arquitectura los estímulos se producen tanto de la ubicación del edificio en el contexto, la configuración espacial y el diseño formal.

La percepción ambiental es un proceso que implica conocer el ambiente físico por parte de un individuo a través de los sentidos; este proceso es inconsciente y fundamentalmente ocurre al momento de recorrer un espacio e interactuar con los estímulos que lo rodean.

La proxémica es un modelo antropológico espacial de observaciones sobre el uso que el ser humano hace del espacio y cómo responden las personas haciendo uso de las distancias entre ellas y otras.

Espacio personal es el área que mantienen los individuos alrededor de sí mismos en la cual otros no pueden inmiscuirse sin despertar molestias.

Los patrones arquitectónicos son sucesos que se repiten de manera predecible una y otra vez en cualquier lugar, apareciendo cada vez en manifestaciones distintas, según el contexto donde se genere. En arquitectura estos patrones pueden ser de acontecimientos, funcionales, morfológicos, estimulantes y formales; se caracterizan por estar relacionados unos con otros, ser replicables y medibles.

Cognición espacial es la adquisición, organización, utilización y revisión de conocimiento acerca del ambiente espacial. La cognición se refiere a cualquier nivel de función cerebral que empieza por organizar y estructurar los datos sensoriales que representan nuestra entrada a la información ambiental.

Mapa mental es un constructo que aborda aquellos procesos que hacen posible a la gente adquirir, codificar, almacenar, recordar y manipular la información acerca de la naturaleza del ambiente espacial.

Legibilidad es la facilidad con que las formas de la ciudad son reconocidas, organizadas en unidades coherentes, está muy relacionada a la identidad del elemento y a la cantidad de gente que transita por él.

Wayfinding u orientación de desplazamiento es una función adaptativa que permite moverse a través del ambiente con eficacia para encontrar los lugares a los que se dirige el individuo. Se trata de conocer cuáles son las informaciones almacenadas que se usan para resolver un problema para realizar con éxito un desplazamiento.

Privacidad es la capacidad de la persona o grupo de personas de regular o controlar selectivamente la cantidad e intensidad de contactos o interacciones sociales en un contexto socio ambiental determinado, así como el flujo de información que se produce en tales interacciones, todo ello en función de las necesidades concretas de la persona de relacionarse con el mundo social en un momento y situación determinados.

Territorialidad es un patrón de conducta asociado con la posesión u ocupación de un lugar o área geográfica por parte de un individuo o un grupo, que implican la personalización y la defensa contra invasores.

Evaluación pos ocupacional es un examen de efectividad en ambientes diseñados y ocupados por usuarios humanos donde el objetivo es establecer hasta qué punto el diseño de un edificio cumple efectivamente con las propuestas iniciales por las cuales fue diseñado.

Walkthroughs o camino a través es una técnica de evaluación de edificios consistente en entrevistas no estructuradas que utiliza el ambiente físico como incitación para ayudar a los encuestados a articular sus reacciones frente al medio.

Ergonomía es la aplicación científica de la información para analizar el sistema formado por las personas y las máquinas o espacios de trabajo con las que interactúa.

Actitud ambiental es un proceso mediacional, que agrupa un conjunto de objetos de pensamiento en una categoría conceptual, que evoca un patrón significativo de respuestas

fundamentalmente valorativas. Se trata, por tanto, de una evaluación de personas, situaciones, objetos, etc. que predispone las acciones relacionadas con el objeto de actitud.

Accesibilidad es la facilidad con que un lugar puede ser alcanzado desde otro, es una cualidad referida al espacio.

Adaptación es un proceso por el que un organismo se acomoda al medio ambiente y a los cambios de éste.

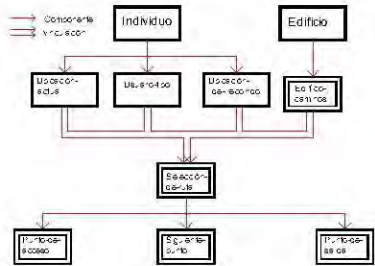
Isovista es el área de un entorno construido directamente visible desde una localización dentro de un espacio.

Acontecimientos generados por el espacio son situaciones entre personas que solo son posibles cuando hay determinada configuración espacial o formal que estimula la realización de actividades.

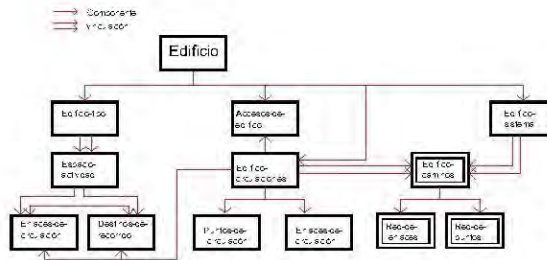
Stress ambiental es la respuesta del cuerpo a la acción del ambiente. La percepción de la situación de stress por parte del individuo es esencial para entender el stress, siendo un proceso psicológico activo el cual el individuo asimila y juzga los elementos de la situación confrontándolos con un patrón establecido de ideas y expectativas.

Anexos

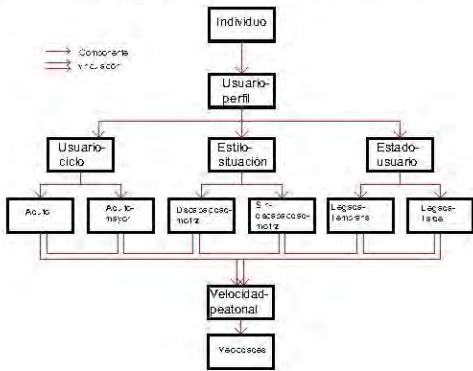
Lenguaje de patrones para el comportamiento de selección de rutas



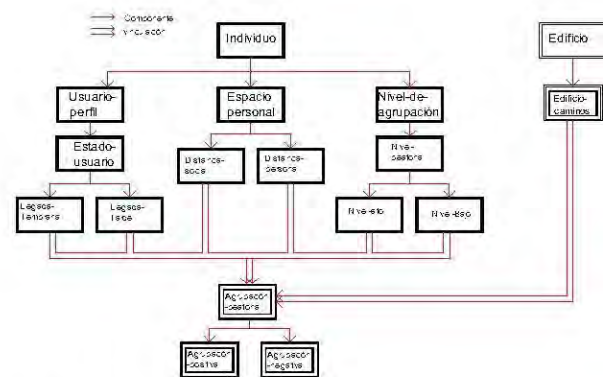
Lenguaje de patrones que representan las circulaciones del edificio



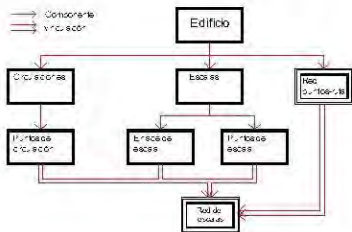
Lenguaje de patrones que representa el comportamiento para seleccionar una velocidad deseada.



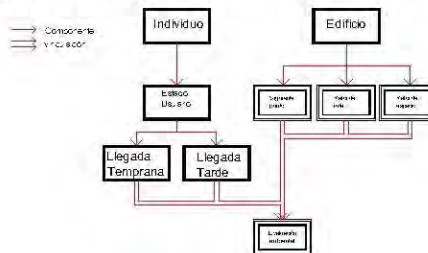
Lenguaje de patrones que representan el comportamiento de agrupación peatonal



Lenguaje de patrones que representan la red de escalas

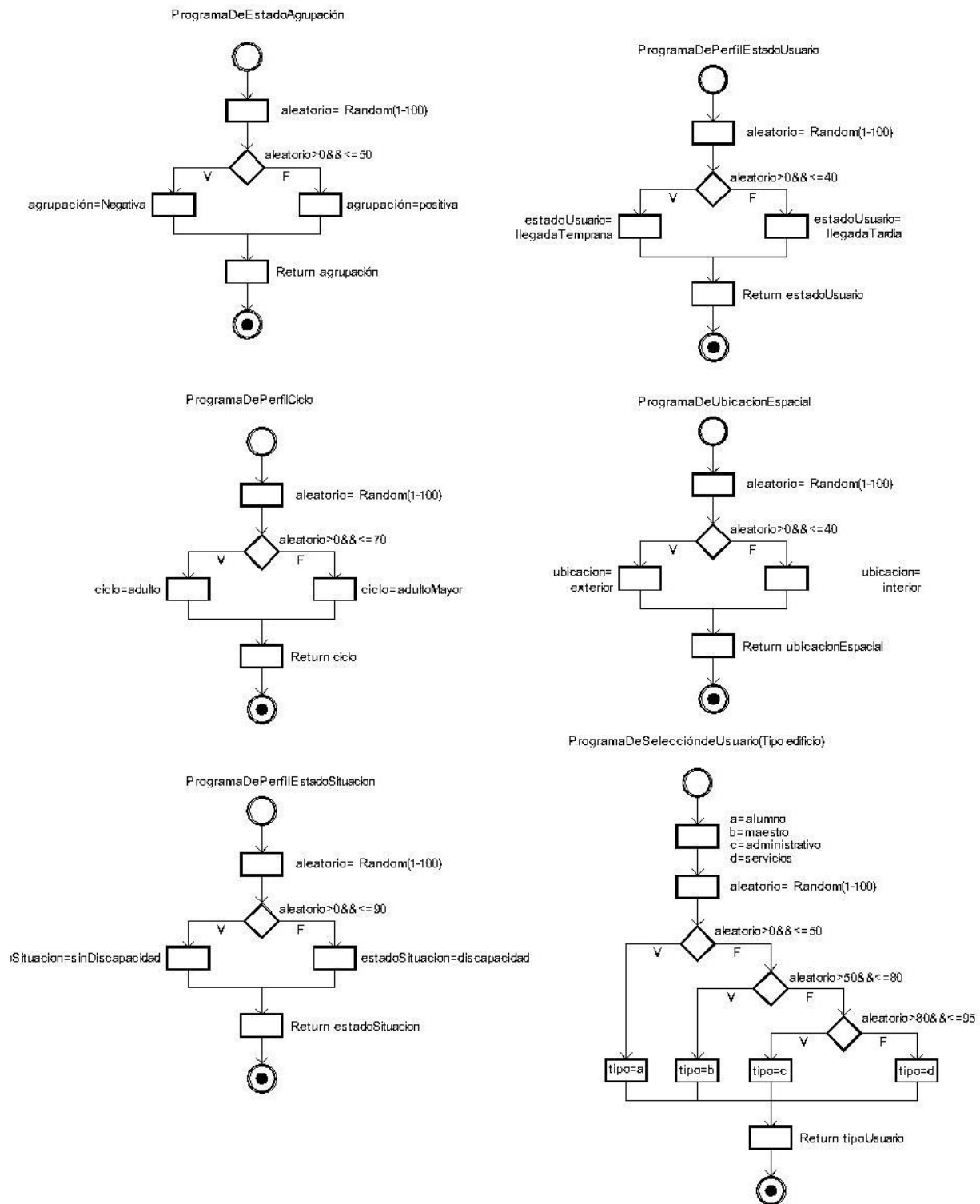


Lenguaje de patrones que representan el comportamiento de evaluación ambiental

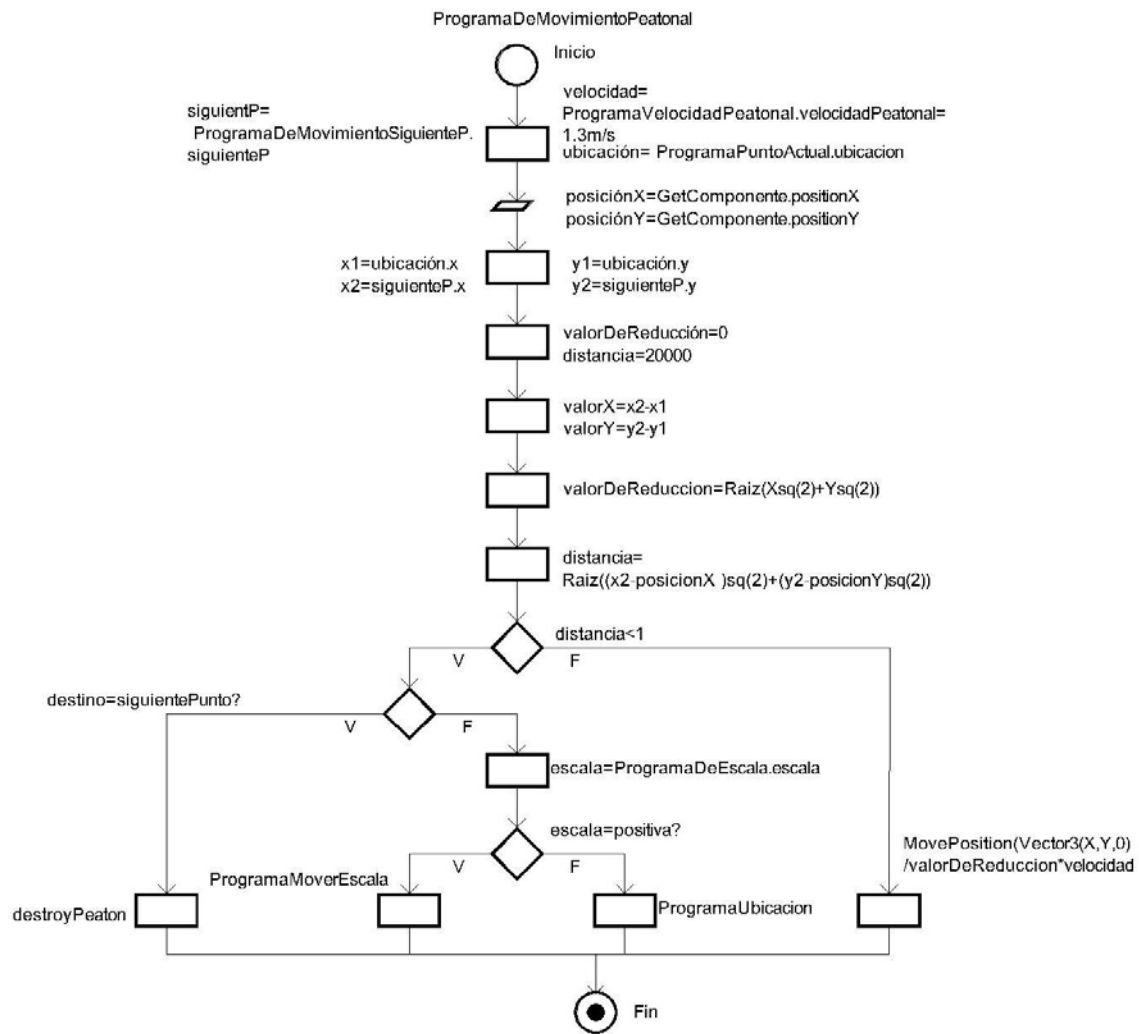


Anexo 1. Propuesta para los lenguajes de patrones que configuran al agente-individuo en el primer prototipo de predicciones para el comportamiento peatonal.

ALGORITMOS PARA LOS PATRONES DE CARÁCTER



Anexo 2. Algoritmos propuestos para la selección de patrones de carácter en los programas de configuración del agente-individuo utilizado en el prototipo de simulación.



Anexo 3. Algoritmo para el comportamiento peatonal para programar al agente individuo en el prototipo de simulación.