

Proyecto Arquitectónico Energéticamente Eficiente Mediante Gramáticas de Formas y Aprendizaje por Refuerzo

Manuela Ruiz-Montiel, Javier Boned, Juan Gavilanes, Pablo Hidalgo, David Belmonte, Lawrence Mandow, and José-Luis Pérez-de-la-Cruz

Universidad de Málaga. Campus de Excelencia Internacional Andalucía Tech
mruiz@lcc.uma.es, {fjboned, jgavilanes}@uma.es, {lawrence, perez}@lcc.uma.es

Resumen En este trabajo presentamos un sistema para la generación de esquemas de viviendas unifamiliares energéticamente eficientes. Los esquemas se sintetizan mediante la ejecución de gramáticas de formas simples, entrenadas por medio de técnicas de aprendizaje por refuerzo, teniendo en cuenta criterios tanto de habitabilidad como de eficiencia energética. Los resultados obtenidos son analizados y validados. ¹

Keywords: Diseño Computacional, Arquitectura, Eficiencia Energética, Gramáticas de Formas, Aprendizaje por Refuerzo

1. Introducción

La Inteligencia Artificial se ha ocupado del problema del diseño en ingeniería y arquitectura al menos desde la década de 1960. Los trabajos de Herbert Simon [1] constituyeron un primer paso en la comprensión progresiva del proceso de diseño, mediante la aplicación al mismo del paradigma del procesamiento simbólico de la información. El diseño se considera como resolución de problemas y, por tanto, como búsqueda en un espacio de estados. Las técnicas de decisión basadas en IA pueden ser pues útiles para la generación de propuestas de diseño.

Actualmente se hace necesaria la investigación en el proyecto de edificaciones eficientes, esto es, partiendo de un diseño y construcción que consuman la menor cantidad de recursos naturales y produzcan un mínimo de residuos durante su ciclo de vida. La metodología habitual, y aún mayoritariamente seguida, pone el mayor énfasis en la tecnología de los sistemas de ahorro energéticos activos superpuestos a unos sistemas pasivos que tienen mucha menor importancia, y que a su vez son consecuencia de una selección de formas arquitectónicas donde lo sostenible ha sido escasamente tenido en cuenta. Behling [2] propone invertir

¹ Este trabajo está subvencionado por la Universidad de Málaga - Programa de fortalecimiento de las capacidades de I+D+I en las universidades 2014-2015, de la Consejería de Economía, Innovación, Ciencia y Empleo, cofinanciado por el fondo europeo de desarrollo regional (FEDER), y por el Plan Propio de Investigación de la Universidad de Málaga - Campus de Excelencia Internacional Andalucía Tech. Manuela Ruiz-Montiel disfruta de una beca FPU (Gobierno de España, Ministerio de Educación). Los autores dan las gracias a sus compañeras María V. Belmonte y Eva Millán por sus valiosos comentarios y opiniones sobre las investigaciones aquí presentadas.

la importancia relativa de estos sistemas, de manera que los sistemas activos tengan una importancia residual y sea el mismo proceso de selección de formas arquitectónicas el que garantice la sostenibilidad de lo proyectado.

En línea con la propuesta de Behling, en este trabajo proponemos la generación de proyectos arquitectónicos que desde su inicio tengan en cuenta criterios de habitabilidad y eficiencia energética. Concretamente, nuestro objetivo es desarrollar un sistema generador de esquemas de viviendas unifamiliares que cumplan con los mencionados criterios y que además aporte diversidad en los diseños propuestos al arquitecto. El sistema emplea *gramáticas de formas* [3] como mecanismo de generación, y la ejecución de tales gramáticas se optimiza mediante técnicas de *aprendizaje por refuerzo* [4]. En la literatura existen varios trabajos que abordan diversas variantes de este problema. Por ejemplo, el trabajo de Caldas [5] utiliza gramáticas de formas y algoritmos genéticos para generar soluciones arquitectónicas eficientes. Granadeiro et al. [6] integran gramáticas de formas con un software de simulación energética, de modo que las evaluaciones obtenidas puedan servir como guía para tomar decisiones en fases tempranas de diseño. A diferencia de estos trabajos, nuestra propuesta utiliza gramáticas de formas muy sencillas. La ejecución aleatoria de sus reglas daría lugar a una gran variedad de diseños, aunque resultando la mayoría de ellos inaceptables. Por ello surge la necesidad de utilizar técnicas de aprendizaje para guiar la aplicación de las reglas hacia las soluciones que cumplen las restricciones de diseño deseadas.

Este artículo se estructura como sigue: en la Sección 2 se presentan los antecedentes necesarios relativos a las gramáticas de formas y al aprendizaje por refuerzo, además de describir las guías de diseño utilizadas para definir los criterios de habitabilidad y eficiencia energética necesarios. En la Sección 3 se detallan los procesos de generación y de aprendizaje, y se justifica la necesidad de estos últimos ilustrando algunos esquemas producidos mediante una ejecución aleatoria de las gramáticas de formas utilizadas. En la Sección 4 se muestran y analizan los resultados obtenidos mediante la ejecución de las mismas gramáticas, pero esta vez guiadas mediante procesos de aprendizaje. En la Sección 5 se describen las conclusiones extraídas y se esbozan las líneas de trabajo futuro.

2. Antecedentes

2.1. Gramáticas de Formas

Una gramática de formas es un conjunto de reglas definidas sobre *formas*. Un segmento o línea, $l = \{p_1, p_2\}$, queda definido por cualquier par de dos puntos distintos p_1 y p_2 , llamados los *puntos finales* de la línea. Una *forma etiquetada* consta de dos partes: una forma y un conjunto de *puntos etiquetados*. Un punto etiquetado (p, A) es un punto p con un símbolo A asociado. Así, una forma etiquetada σ es un par ordenado $\sigma = \langle s, P \rangle$, donde s es una forma y P es un conjunto finito de puntos etiquetados [3].

Una gramática de formas tiene cuatro componentes: (1) S es un conjunto finito de formas, (2) L es un conjunto finito de símbolos, (3) R es un conjunto

finito de reglas con la forma $\alpha \rightarrow \beta$, donde α es una forma etiquetada no vacía y β es una forma etiquetada, y (4) I es una forma etiquetada no vacía, llamada forma inicial o axioma. Una regla puede aplicarse a una forma etiquetada γ cuando existe una transformación τ tal que $\tau(\alpha)$ es subforma de γ , es decir, $\tau(\alpha) \subseteq \gamma$ (una forma etiquetada s_1 es subforma de otra forma etiquetada s_2 si y sólo si cada línea maximal de s_1 está en s_2 , y cada punto etiquetado de s_1 está en s_2). Las transformaciones consideradas aquí son las traslaciones y rotaciones.

La forma etiquetada producida por la aplicación de la regla $\alpha \rightarrow \beta$ a la forma etiquetada γ bajo la transformación τ viene dada por la expresión $[\gamma - \tau(\alpha) + \tau(\beta)]$. Esta forma etiquetada se construye reemplazando la ocurrencia de $\tau(\alpha)$ en γ con $\tau(\beta)$. En la Figura 1 se representan una regla y una derivación a partir de un axioma, es decir, una sucesión de formas generadas aplicando la regla.

2.2. Aprendizaje por Refuerzo

Los problemas de aprendizaje por refuerzo formalizan procesos de decisión en los que la transición de un estado a otro conlleva una recompensa. La solución consiste en determinar una política óptima que establece cuál es la acción en cada estado que permite maximizar la recompensa acumulada durante el proceso.

El *valor* asociado a un par (*estado*, *acción*) representa la recompensa acumulada que podemos esperar si nos encontramos en un determinado estado y aplicamos la acción a y a continuación seguimos una política π . A su vez, las acciones de la política se eligen mediante juicios de valor, de modo que se elige la acción a que produce un par (s, a) con valor máximo. Los métodos basados en diferencias temporales aproximan los valores óptimos de los estados mediante un proceso iterativo dividido en *episodios*, a su vez divididos en *pasos*. Al principio del proceso, los valores asociados a cada par son arbitrarios, y por tanto la política asociada a tales valores también es arbitraria. En cada episodio se parte de un estado inicial y se intenta alcanzar un estado final mediante una estrategia que combina explotación y exploración. En los pasos de explotación se elige la acción que dicte la política aprendida hasta el momento, con el fin de evaluarla. En los pasos exploratorios se elige la acción a tomar aleatoriamente, para intentar mejorar la política existente probando nuevas opciones. En cada paso, los valores obtenidos hasta el momento se van *reforzando* con nuevos valores. Tras numerosos episodios de aprendizaje, los valores se habrán modificado tendiendo a definir una política próxima a la óptima.

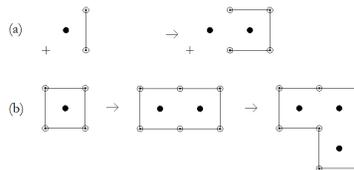


Figura 1. Una regla (a) y una derivación (b) de formas

En nuestro caso, los estados son formas y las acciones son posibles aplicaciones de las reglas. En concreto, una acción es un par $(regla, transformación)$ que determina cuál es la regla a aplicar y cuál es la transformación a usar para hacer corresponder la parte izquierda de la regla con alguna parte del estado actual.

Si bien los métodos más directos de aprendizaje por refuerzo utilizan una tabla para almacenar los valores asignados a los pares (s, a) , en nuestro caso el elevado tamaño del espacio de estados y acciones dificulta la utilización de este método. En su lugar emplearemos un método de generalización que sólo tenga en cuenta determinados rasgos o características de los pares (s, a) , y que permita aprender el valor como una función de dichos rasgos. Concretamente, el algoritmo de aprendizaje por refuerzo que hemos empleado es el algoritmo $Q(\lambda)$ con un aproximador lineal, tal como aparece en [4] (p. 213).

2.3. El proyecto de viviendas energéticamente eficientes

El proyecto de viviendas unifamiliares energéticamente eficientes es un proceso restringido por múltiples condiciones. En este trabajo pretendemos satisfacer condiciones de dos tipos: de *habitabilidad* y de *eficiencia energética*.

Para definir los criterios de habitabilidad nos hemos basado en la propuesta elaborada por el estudio Montaner y Muxí [7] para la Junta de Andalucía, donde se detallan las condiciones que ha de cumplir una vivienda básica según el número de personas que van a habitarla. Nuestro sistema genera esquemas de viviendas para dos personas. En la propuesta de Montaner se definen diversos tipos de ámbitos que han de estar presentes en una vivienda, de entre los cuales hemos considerado los tres tipos principales: 1) *ámbitos especializados* (necesitan instalaciones específicas para su funcionamiento), 2) *ámbitos no especializados* (no necesitan instalaciones específicas, su uso queda determinado por los usuarios, por ejemplo: comedor, salón o dormitorio) y 3) *ámbitos complementarios* (espacios de distribución). En la Figura 2 se representan visualmente las relaciones de proximidad entre los distintos ámbitos. Además, la normativa establece que la superficie total ha de ser como mínimo de $46 m^2$ y que en cada ámbito no especializado ha de poder inscribirse un círculo de 2,8 metros de diámetro.

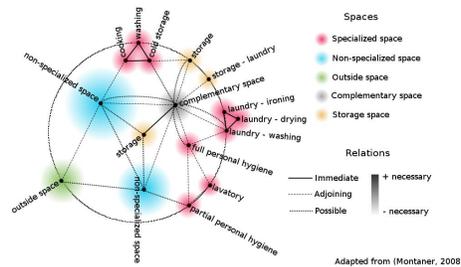


Figura 2. Elementos y relaciones en una vivienda (adaptado de [7]).

Estos criterios de habitabilidad se tuvieron en cuenta en un trabajo previo de los autores [8]. La parte novedosa del presente artículo consiste en añadir criterios para optimizar la eficiencia energética, al igual que en extender el proceso de evaluación de las soluciones generadas, que ha sido realizado mediante una herramienta oficial para la evaluación de la eficiencia energética.

Para determinar los criterios de diseño pasivo hemos considerado la guía del estandar Passivhaus [9], el informe técnico Enerbuilding [10] y la revisión de Pacheco et al. [11], siempre en el contexto climático español. Podemos clasificar los criterios considerados en tres categorías:

1. Criterios relacionados con el contorno de la vivienda. Según Pacheco et al. [11], las prácticas de diseño pasivo habitualmente implican maximizar tanto la compacidad del contorno como la porción de la fachada orientada al sur
2. Criterios relacionados con los ámbitos interiores de la vivienda. Según el estándar Passivhaus [9], la orientación de los distintos ámbitos internos puede afectar a la eficiencia energética de la vivienda. Por ejemplo, la sala de estar puede funcionar mejor orientada al sur debido a la idoneidad de esta orientación a lo largo de toda la jornada tanto en invierno como en verano; y el dormitorio puede beneficiarse de una orientación al este, al permitir el aprovechamiento de la luz natural del amanecer para despertar
3. Criterios relacionados con los huecos (ventanas o acristalamientos). Según la guía de diseño pasivo Enerbuilding [10], la superficie acristalada hacia el sur debe representar un porcentaje significativo de la vivienda

3. Generación de viviendas energéticamente eficientes

En este trabajo hemos implementado un sistema de generación de viviendas sujetas a las condiciones expuestas en la Sección 2.3. El sistema sintetiza las soluciones mediante un conjunto de gramáticas de formas. Este proceso de generación se ha dividido en cuatro fases: (1) generación de un contorno, (2) ubicación de los distintos ámbitos de la vivienda, (3) ubicación de los huecos (ventanas) en las distintas fachadas y (4) agrupación de huecos contiguos.

En el Cuadro 1 se recogen los criterios concretos que han de cumplirse en cada fase. Nuestro sistema considera algunas condiciones adicionales que, a pesar de no estar recogidas en las guías de diseño mencionadas en la Sección 2.3, se han añadido dada su relevancia arquitectónica. En la fase 2, se ha determinado que el acceso a la vivienda ha de estar próximo al distribuidor y la cocina. Para la fase 3 se ha establecido que los ámbitos no especializados, así como la cocina y el baño, tengan asociado un hueco; y también se ha limitado la proporción del acristalamiento en la fachada oeste. Para la fase 4 no existen criterios, ya que únicamente agrupa los huecos ya existentes para formar ventanales o porches sin modificar la ubicación de los huecos ni la superficie acristalada de la vivienda, y por tanto no altera el rendimiento energético ni afecta a la habitabilidad.

Criterios Fase 1	CF1-1: La superficie total ha de ser como mínimo de $48 m^2$ CF1-2: La compacidad del contorno (área/perímetro ²) ha de maximizarse CF1-3: La proporción de fachada orientada al sur (perímetro sur/perímetro total) ha de maximizarse
Criterios Fase 2	CF2-1: Han de existir dos ámbitos no especializados, una cocina, un baño, un ámbito distribuidor y un acceso a la vivienda CF2-2: Los ámbitos no han de solaparse CF2-3: Criterios de distancia extraídos de la Figura 2, donde dos ámbitos se consideran cercanos si la distancia entre ellos es inferior a 4 metros CF2-4: Los ámbitos no especializados deben estar orientados al sur o al este
Criterios Fase 3	CF3-1: La superficie acristalada total ha de comprender un porcentaje mínimo del total de la fachada, que depende de la compacidad del contorno. Si el perímetro es mayor de 40 metros, y por tanto la compacidad es menor, dicho porcentaje es el 25 %. En otro caso, el porcentaje es del 30 % CF3-2: Todos los ámbitos han de tener una ventana asociada CF3-3: La superficie acristalada hacia el sur ha de comprender como mínimo el 40 % del total de la fachada sur CF3-4: La superficie acristalada hacia el sur ha de comprender como mínimo el 40 % del total de la superficie acristalada CF3-5: La superficie acristalada hacia el oeste ha de comprender menos del 20 % del total de la superficie acristalada

Cuadro 1. Condiciones para una vivienda para dos personas.

3.1. Procesos de generación

En la Figura 3 se ilustran algunas reglas de las gramáticas de cada una de las fases ². Las reglas funcionan añadiendo o desplazando etiquetas de distintos tipos, que representan el contorno/interior de la vivienda, los distintos ámbitos y los huecos o ventanas. Para cada gramática se establece una condición de terminación, para poder decidir cuándo detener la aplicación de las reglas. A continuación se detallan los distintos pasos necesarios para sintetizar un esquema:

1. La producción de un esquema comienza con un axioma definido por un núcleo de $6 \times 4 m^2$. A partir de esta forma, se aplica la regla de la gramática 1 (ver Figura 3) hasta alcanzar un contorno de 48 metros cuadrados
2. La fase 2 consta de cuatro gramáticas: las tres primeras (gramáticas 2.1, 2.2 y 2.3) ubican los ámbitos necesarios de la vivienda. Cada una de estas gramáticas se aplica una vez (escogiendo alguna de sus reglas) sobre la forma sintetizada por la gramática utilizada anteriormente. La gramática 2.4 se utiliza sobre la forma producida por la gramática 2.3, y contiene reglas que desplazan los ámbitos ubicados. Estas reglas se aplican hasta satisfacer los criterios de la fase 2 o hasta un límite de 50 aplicaciones
3. La fase 3 ubica los huecos aplicando la gramática 3 sobre la forma sintetizada por la gramática 2.2. Las reglas de la gramática 3 se aplican hasta que la superficie acristalada total sea mayor o igual a un porcentaje de la superficie total de fachada, que dependerá de la compacidad del contorno. Trabajamos con tres tipos de huecos: al sur, al norte, y al este/oeste, con distintos elementos de protección
4. La fase 4 reagrupa los huecos transformándolos en ventanales o porches, aplicando la gramática 4 de manera aleatoria sobre la forma sintetizada por la gramática 3

En la Figura 4 mostramos dos esquemas generados mediante esta secuencia de pasos sin utilizar políticas. Es decir, la regla a aplicar en cada paso se escoge

² Los detalles de todas las gramáticas utilizadas pueden encontrarse en el informe técnico alojado en <https://goo.gl/4F1UrA>

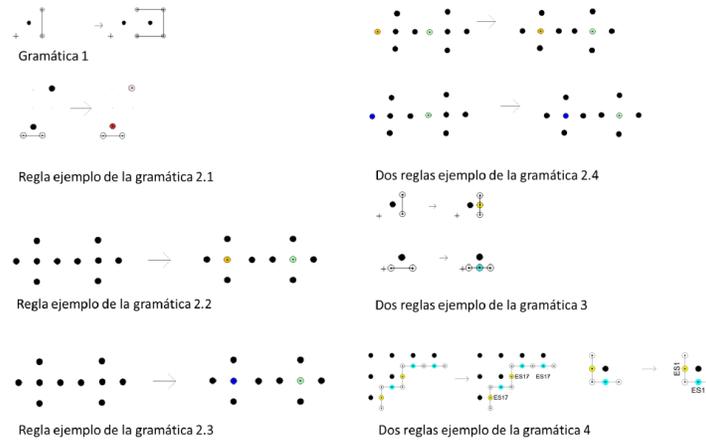


Figura 3. Algunas reglas de las gramáticas de formas utilizadas.

de manera aleatoria. Para la presentación final de los esquemas se sustituyen las etiquetas y segmentos manejados por las gramáticas por elementos arquitectónicos (paredes, puertas, ventanas, etc) o etiquetas textuales, y se proporcionan vistas detalladas en dos y tres dimensiones, así como las evaluaciones de la demanda energética destinada a refrigeración y calefacción y el límite de consumo del Código Técnico de la Edificación (15 kw/m² en un año, línea punteada).

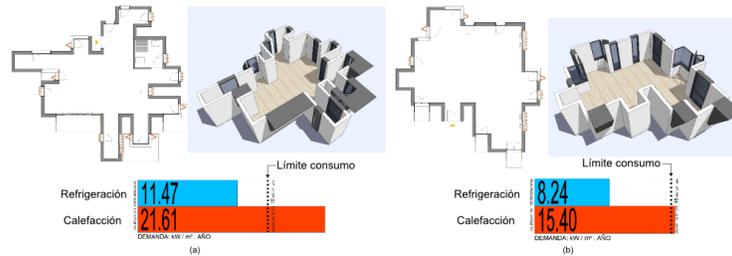


Figura 4. Dos esquemas generados sin mecanismos de control, junto con sus evaluaciones energéticas en refrigeración y calefacción.

La evaluación de la demanda energética de los esquemas generados se ha efectuado mediante la herramienta oficial del Ministerio de Fomento español LIDER-CALENER. Para la construcción de estructuras y cerramientos, en este trabajo hemos elegido el sistema constructivo Baupanel[®]. Para la ejecución de los huecos se han elegido carpinterías de aluminio y doble acristalamiento con vidrios de bajo factor solar. Como vemos en la Figura 4, las viviendas no

resultan habitables desde la perspectiva de la guía de Montaner & Muxí. Desde el punto de vista de la evaluación energética, tampoco cumplen las condiciones de calefacción. Estas deficiencias justifican la necesidad de un mecanismo que dirija la aplicación de las reglas.

3.2. Procesos de aprendizaje

Para conseguir buenos diseños necesitamos políticas de actuación para las fases 1, 2 y 3. Estas políticas decidirán qué regla (y qué transformación) es mejor aplicar en cada paso, con el objetivo de sintetizar diseños válidos en base a los criterios recogidos en el Cuadro 1. La fase 4 no necesita una política dado que se considera que todas las agrupaciones de huecos generadas son admisibles.

Las políticas se generan mediante procesos de aprendizaje por refuerzo. La recompensa que se utiliza en los procesos de aprendizaje para cada fase viene dada por los criterios del Cuadro 1, si bien los criterios CF1-1, CF2-1 y CF3-1 no se consideran en las recompensas porque ya han sido considerados en el test de estado final (CF1-1 y CF3-1) o en las mismas gramáticas de formas (CF2-1).

En nuestro caso el gran tamaño del espacio de estados y acciones impide utilizar un enfoque tabular para aprender las políticas. Así, en lugar de almacenar los valores de cada par (s, a) en una tabla, utilizaremos una función lineal que determine el valor a partir de determinados rasgos o características de dichos pares. Dicha función quedaría definida como sigue: $f(s, a) = w_1 r_1 + \dots + w_n r_n$, donde w_i y r_i son el coeficiente y el rasgo i -ésimo, respectivamente. Los procesos de aprendizaje aprenderán los coeficientes w_i , de manera que en cada estado s , la acción a a tomar será aquella con la cual se obtenga un mayor valor de la función $f(s, a)$, desempataando aleatoriamente en caso de que haya más de un par (s, a) con el mismo valor máximo. Los rasgos a utilizar para cada gramática, así como las recompensas, se detallan en el Cuadro 2.

En el trabajo previo de los autores [8] puede encontrarse una descripción detallada de los parámetros del algoritmo, así como de la experimentación necesaria para alcanzar valores robustos. En la siguiente sección mostramos los resultados obtenidos.

4. Resultados

Para evaluar los resultados generados hemos analizado la mejora en las recompensas obtenidas al final de cada fase, siendo r_i la recompensa obtenida en la fase i -ésima ejecutando las reglas de manera aleatoria, y r_i^* la obtenida utilizando las políticas aprendidas. Por término medio, medido en la generación de 10 esquemas, $r_1^*/r_1 = 2,47$, $r_2^*/r_2 = 1,09$ y $r_3^*/r_3 = 1,39$. En la figura 5 podemos ver dos esquemas distintos generados utilizando las políticas aprendidas. Como vemos, la evaluación energética de estos esquemas cumple con los límites establecidos por el Código Técnico de la Edificación. Adicionalmente, se cumplen más criterios del Cuadro 1, hecho que además de reflejarse en las mejoras sobre las recompensas obtenidas también puede visualizarse en los esquemas generados.

Recompensa Gramática 1	En los estados finales, la recompensa se calcula mediante una suma ponderada de los criterios CF1-2 y CF1-3, normalizada entre 0 y 1. En caso de que esta suma sea superior a 0.8, la recompensa se considera igual a 1. En el resto de estados la recompensa es nula
Rasgos Gramática (normalizados entre 0 y 1)	RG1-1: Número de módulos de $1m^2$ con un vecino RG1-2: Número de módulos de $1m^2$ con dos vecinos RG1-3: Número de módulos de $1m^2$ con tres vecinos RG1-4: Número de módulos de $1m^2$ con cuatro vecinos RG1-5: Longitud de la proyección sur del contorno
Recompensa Gramática 2.4	Cada criterio individual extraído de CF2-2, CF2-3 y CF2-4 se evalúa a 1 o -1 dependiendo de si se cumple o no, respectivamente. En los estados finales, la recompensa se calcula mediante una suma ponderada de estas evaluaciones. En el resto de estados la recompensa es nula
Rasgos Gramática 2.4	En esta gramática trabajamos con 48 rasgos binarios que caracterizan a la forma final mediante las distancias entre pares de ámbitos. Por ejemplo, existen tres rasgos para el par cocina-baño, donde el primer rasgo se evalúa a 1 si la distancia entre ellos es menor de 2 metros y a 0 en otro caso. De manera similar, el segundo y el tercer rasgo se evalúan a 1 cuando la distancia está comprendida entre 2 y 4 metros y cuando es mayor de 4 metros, respectivamente
Recompensa Gramática 3	Cada criterio individual extraído de CF3-2, CF3-3, CF3-4 y CF3-5 se evalúa a 1 o -1 dependiendo de si se cumple o no, respectivamente. En los estados finales, la recompensa se calcula mediante una suma de estas evaluaciones. En el resto de estados la recompensa es nula
Rasgos Gramática 3	En esta gramática trabajamos con 12 rasgos binarios que caracterizan a la forma final mediante el porcentaje de huecos existentes en cada orientación. Por ejemplo, existen tres rasgos para los huecos orientados al sur, donde el primer rasgo se evalúa a 1 si el número de huecos en esta orientación representa menos del 35 % de esta fachada y a 0 en otro caso. De manera similar, el segundo y el tercer rasgo se evalúan a 1 cuando el porcentaje está comprendido entre el 35 % y el 70 % y cuando es mayor del 70 %, respectivamente

Cuadro 2. Recompensas y rasgos de las gramáticas.

Además, vemos que el hecho de utilizar estas políticas no implica que siempre se produzca un mismo esquema, es decir, el sistema no alcanza una única solución. Al contrario, obtenemos diversidad debido a que dos estados distintos pueden estar representados por un conjunto de rasgos idéntico.

5. Conclusiones y Trabajo Futuro

En este trabajo presentamos una propuesta para generar esquemas de viviendas unifamiliares energéticamente eficientes mediante gramáticas de formas. Las gramáticas por sí solas no garantizan la producción de soluciones factibles, luego es necesario un mecanismo que permita dirigir la generación hacia soluciones mejores desde el punto de vista de la habitabilidad y de la eficiencia energética. En este artículo hemos utilizado técnicas de aprendizaje por refuerzo para implementar dicho sistema. Los criterios de habitabilidad y de eficiencia energética han sido extraídos de diversas guías de diseño. Para validar los resultados desde el punto de vista energético se ha utilizado la herramienta LIDER-CALENER. Los esquemas generados utilizando el sistema de control son superiores a los generados utilizando únicamente las gramáticas de formas, tanto desde el punto de vista del grado de satisfacción de los criterios considerados como desde el punto de vista de la evaluación energética.

Como trabajo futuro se abren dos posibilidades. En primer lugar, existe un margen de mejora importante para el proceso de aprendizaje de la segunda fase,

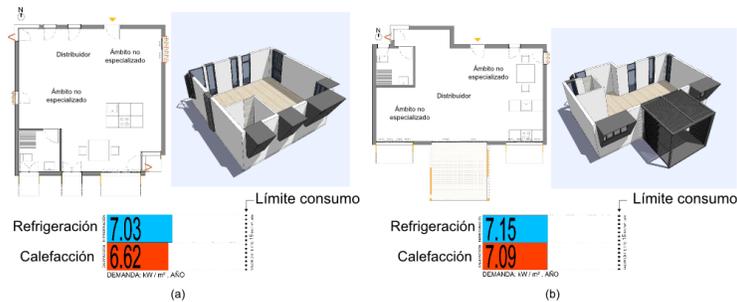


Figura 5. Dos esquemas generados utilizando las políticas aprendidas, junto con sus evaluaciones energéticas en refrigeración y calefacción.

ya que la política aprendida apenas mejora la recompensa obtenida de manera aleatoria. En segundo lugar, en el presente trabajo las recompensas relacionadas con la eficiencia energética han sido definidas a partir de “buenas prácticas” de diseño pasivo. Sin embargo, otra opción es utilizar la evaluación energética proporcionada por LIDER-CALENER directamente como recompensa en lugar de posterior validación del sistema, lo cual implica automatizar el proceso de obtención de la evaluación energética.

Referencias

1. Simon, H.A.: *The sciences of the artificial*. MIT Press, Cambridge, MA. (1968)
2. Behling, S., Behling, S., Schindler, B.: *Sol Power: La evolución de la Arquitectura Sostenible*. Gustavo Gili, Barcelona (2012)
3. Stiny, G.: Introduction to shape and shape grammars. *Environment and Planning B* **7** (1980) 343–351
4. Sutton, R.S., Barto, A.G.: *Reinforcement learning: an introduction*. MIT Press, Cambridge, Ma. (1998)
5. Caldas, L.: Generation of energy-efficient architecture solutions applying gene arch: An evolution-based generative design system. *Advanced Engineering Informatics* **22**(1) (2008) 59 – 70
6. Granadeiro, V., Duarte, J.P., Correia, J.R., Leal, V.M.: Building envelope shape design in early stages of the design process: Integrating architectural design systems and energy simulation. *Automation in Construction* **32**(0) (2013) 196 – 209
7. Montaner & Muxí Arquitectes: *Propuesta de nueva normativa de viviendas*. Technical report, Dirección general de ordenación del territorio, Junta de Andalucía (2008)
8. Ruiz-Montiel, M., Boned, J., Gavilanes, J., Jiménez, E., Mandow, L., Pérez-de-la-Cruz, J.L.: Design with shape grammars and reinforcement learning. *Advanced Engineering Informatics* **27**(2) (2013) 230–245
9. *Guía del Estándar passivhaus - edificios de consumo energético casi nulo* (2011)
10. *Enerbuilding: Eficiencia energética en viviendas* (2008)
11. Pacheco, R., Ordóñez, J., Martínez, G.: Energy efficient design of building: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **16**(6) (2012) 3559 – 3573