



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Modelado de Aspectos Sociales del Comportamiento
Humano para Mejorar las Simulaciones del
Smart-Grid

Modelling Householders' Social Behaviour in order
to Improve Smart-Grid Simulations

Autor

Javier Macarrilla Bastida

Director

Dr. Rafael Tolosana Calasanz

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
2019



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

TRABAJOS DE FIN DE GRADO / FIN DE MÁSTER

D./D^a. Javier Macarrilla Bastida,

con nº de DNI 76973395P en aplicación de lo dispuesto en el art. 14

(Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de

Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la

Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)

Grado _____, (Título del Trabajo)

Modelado de Aspectos Sociales del Comportamiento Humano para Mejorar las
Simulaciones del Smart-Grid

Modelling Householders' Social Behaviour in order to Improve Smart-Grid
Simulations

_____ ,
es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada
debidamente.

Zaragoza, a 22 de noviembre de 2019

Fdo: _____

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis amigos por soportar mis quejas del trabajo. A mi familia por apoyarme, ayudarme (especialmente a mi madre) y siempre confiar en mi trabajo. Y por último, pero no menos importante al director de este proyecto por la paciencia que ha tenido, por enseñarme múltiples conceptos, por su esfuerzo y por presentarme esta idea tan interesante.

Título del resumen

RESUMEN

La respuesta a la demanda está recibiendo un interés creciente como una nueva forma de flexibilidad dentro de los sistemas de energías renovables. Es un nuevo paradigma de gestión de la red eléctrica que consiste en gestionar y controlar la demanda. Los modelos energéticos son una herramienta importante para evaluar la capacidad potencial de las contribuciones del lado de la demanda. Los modelos actuales basados en actividades asumen explícitamente una relación unidireccional causal entre actividades y dispositivos. Sin embargo, existe una clara falta de datos en los que basar esto, con el riesgo de perfiles de dispositivos simulados incorrectos. Existe un requisito para la recolección y comprensión de los datos que describen la relación entre las actividades y el uso de energía de los electrodomésticos, y cómo esto varía dentro y entre los hogares. Hasta la fecha, el foco ha estado localizado en torno a cuestiones fundamentalmente tecnológicas, minimizando el hecho de que la adopción de esta tecnología requiere al final de una interacción con seres humanos. Además, los sistemas de respuesta de la demanda todavía no están implantados de forma generalizada y se utilizan modelos para realizar simulaciones. En este proyecto se modelarán los supuestos socio-técnicos que sustentan los modelos de demanda de energía y unos perfiles de confort, de manera que podremos simular el grado de adopción y de satisfacción de la respuesta a la demanda respecto del confort térmico.

Índice

1. Introducción y Objetivos	1
1.1. Objetivos	3
1.2. Metodología y Organización de esta Memoria	3
2. Conceptos y Tecnologías Subyacentes	5
2.1. Sistemas Multi-Agente	5
2.1.1. El Concepto de Agente y sus Aplicaciones	5
2.1.2. JADE: Plataforma de Sistemas Multi-agente	6
2.2. Lógica Borrosa y Sistemas Borrosos	6
3. Especificación y Cuantificación del Confort Térmico	9
3.1. Confort Térmico	9
3.1.1. Principales Factores	10
3.1.2. Perfiles de Confort	13
4. Modelizado de la Adopción de la Respuesta a la Demanda	15
4.1. Tipos de Hogares	16
4.1.1. Tipo Hogar formado por una Familia	16
4.1.2. Tipo Hogar Soltero Empleado	17
4.1.3. Tipo Hogar formado por una Familia de Tercera Edad	18
4.1.4. Tipo Hogar Piso Estudiantes	18
4.2. Adopción de la Respuesta a la Demanda	19
4.3. Integración en Jade	20
4.3.1. Detalles de Implementación	21
5. Validación experimental	23
5.1. Metodología	23
5.2. Experimentos	25
5.2.1. Experimento A	25
5.2.2. Experimento B	25

5.2.3. Experimento C	26
5.2.4. Experimento D	26
5.2.5. Experimento E	27
5.2.6. Experimento F	28
5.3. Análisis de los Resultados	28
6. Conclusiones y Trabajo Futuro	31
6.1. Conclusiones	31
6.2. Trabajo Futuro	32
Bibliografía	35
Lista de Figuras	37
Lista de Tablas	39
Anexos	40
A. Un anexo	43

Capítulo 1

Introducción y Objetivos

La respuesta a la demanda (*Demand-Response* en inglés) [1] es un nuevo paradigma de gestión de la red eléctrica que consiste en gestionar y controlar la demanda, frente a la aproximación tradicional fundamentada en gestionar la producción de energía. La mayor parte de ellas utilizan exclusivamente una variación en la tarifa energética para modificar los patrones de conducta de los usuarios. De esta manera, durante las horas punta de consumo energético máximo, se pretende conseguir cambios de conducta en las actividades de los usuarios finales de la red eléctrica respecto de sus patrones habituales de consumo, reduciendo la demanda. Este nuevo paradigma ha suscitado un enorme interés, puesto que posibilita una nueva forma de incrementar la flexibilidad en la gestión energética en general y de introducir de los sistemas de energía con bajas emisiones de carbono.

Tal y como se apunta en [2], el interés generado ha propiciado un desarrollo muy rápido de diversas propuestas de respuesta a la demanda. Tal es así que todavía no hemos podido estudiar y analizar su impacto adecuadamente. Hasta la fecha, el foco ha estado localizado en torno a cuestiones fundamentalmente tecnológicas, minimizando el hecho de que la adopción de esta tecnología requiere al final de una interacción con seres humanos. Además, los sistemas de respuesta de la demanda todavía no están implantados de forma generalizada y se utilizan modelos para realizar simulaciones. Puesto que un modelo, por definición, es una simplificación de un sistema complejo del mundo real, los ingenieros necesitan asumir ciertos aspectos con el objetivo de simplificar. Por tanto, los modelos existentes se fundamentan muchas veces más en las expectativas del ingeniero que los diseñó, más que en datos reales [2].

Sin embargo, hay otros aspectos importantes que hay que tener en cuenta, como las cuestiones socio-técnicas y que están relacionadas con el estudio del grado en que las personas y las organizaciones podrían estar dispuestas y ser capaces de participar y adoptar la respuesta a la demanda [3]. Por ejemplo, si se realiza una estrategia de respuesta a la demanda fundamentada en la variación del precio, ¿afecta esa estrategia

a todo el mundo por igual? Para que haya una variación en la demanda, los clientes de la red eléctrica tienen que modificar su conducta y alterar sus actividades: ¿qué factores afectan a la flexibilidad de las actividades diarias?. ¿Deberían las técnicas de la respuesta a la demanda considerar los inconvenientes que genera la alteración de las actividades? [4].

Un tipo de modelo de respuesta a la demanda es el modelo ascendente y que se fundamenta en el modelado de cada una de las actividades que realizan los ciudadanos usuarios de la red eléctrica. Los modelos basados en actividades se fundamentan en el principio de que la demanda se deriva de los patrones de actividad diaria de las personas. Predicen qué actividades se llevan a cabo cuándo, dónde, durante cuánto tiempo, para quién y con quién, y las opciones de uso que harán para completarlas. Los modelos ‘ascendentes’ (en inglés *bottom-up*) simulan el uso de electrodomésticos y aspectos térmicos individuales dentro de una vivienda y los agrupan para proporcionar una estimación de la demanda de energía de toda la vivienda. Un rasgo característico de tales modelos es una representación central de los patrones de ocupación y actividad de los residentes individuales dentro del hogar. En [2], también se clasifican estas actividades en dos grandes grupos, aquellas actividades que requieren de una participación activa del ciudadano, en cuanto a que los individuos del hogar tienen que modificar y cambiar su actividad (reducir el consumo) y aquellas actividades que no requieren de una participación activa del usuario pero que llevan aparejado una degradación en el servicio esperado. Un ejemplo del primer tipo de actividad podría ser el uso del horno, en un momento determinado, ante la necesidad de reducir el consumo en un hogar, se le requiere al usuario que deje de usar el horno. Un ejemplo de actividad del segundo tipo podría ser introducir un incremento en el rango de la zona muerta de su termostato del sistema de calefacción, de manera que el usuario no va a tener que cambiar de actividad, pero sí es posible que la temperatura de su hogar vaya fuera de la zona de confort.

Por otra parte, los modelos basados en actividades carecen de representaciones de las expectativas del servicio [2] que, en gran medida, explican la variación del uso de energía en los contextos. Debido a que estos no están representados, no hay forma de cuantificar el impacto potencial de los cambios en la respuesta a la demanda asociados con el cambio en las expectativas del servicio. Esto lleva a una nueva línea de investigación [2]: ¿cómo se pueden especificar, representar y cuantificar mejor las expectativas de servicio en los hogares de manera que sean adecuadas para modelizar y reflejen rutinas y flexibilidades establecidas y emergentes, en la medida en que puedan capturarse?.

El objetivo global de este trabajo fin de grado es modelizar aspectos sociales del

comportamiento humano, en particular, las expectativas del servicio que tiene el usuario en respuesta a la demanda en las futuras redes eléctricas, con objeto de mejorar los modelos existentes. En las siguientes subsecciones se detallan los objetivos y se describe la metodología propuesta para alcanzarlos.

1.1. Objetivos

En términos generales, el comportamiento humano y las actividades y conductas humanas son complejas. En este trabajo fin de grado, habida cuenta de la limitación temporal, se ha explorado el impacto de la respuesta a la demanda en el confort térmico. De manera que la petición de respuesta a la demanda consiste en una variación del intervalo de zona muerta en el controlador de la temperatura. En particular, los objetivos de este trabajo fin de grado son los siguientes:

O1) Descubrir qué factores determinan la flexibilidad de un cliente de la red eléctrica a la hora de aceptar un cambio en la calidad de un servicio energético respecto del confort térmico (expectativa de la calidad del servicio).

O2) Modelizar esos factores con tecnologías de inteligencia artificial de manera que se permita determinar el grado de adopción de respuesta a la demanda en una población y que permita simular diferentes escenarios, teniendo en cuenta distintos valores de los factores analizados.

1.2. Metodología y Organización de esta Memoria

Para alcanzar estos objetivos, se ha seguido la siguiente metodología cuyos diagramas *Logical Framework (LogFrame)* (visión sinóptica de objetivos, impacto y metodología) y de Gantt (planificación de actividades) pueden verse en los Anexos A. En primer lugar, se ha realizado un estudio de las tecnologías y concepto subyacentes, comenzando por las técnicas de respuesta a la demanda, las técnicas de lógica borrosa para modelizar el confort térmico y las técnicas de sistemas multi-agente para simular el comportamiento humano de adopción de respuesta a la demanda. Una breve introducción a la lógica borrosa y a los sistemas multi-agente así como aplicaciones de uso pueden encontrarse en el Capítulo 2. En segundo lugar, se estudiaron aquellos aspectos sociales que están involucrados en la adopción de la respuesta a la demanda respecto del confort térmico. Los resultados pueden encontrarse en el Capítulo 3. A partir de esos factores, en tercer lugar, se utilizaron técnicas de lógica borrosa para modelizar el confort térmico, modelo que se describe en el Capítulo 3. En cuarto lugar, se construyó un simulador utilizando técnicas de sistemas multi-agente, para modelar

una población y el grado de adopción de la respuesta a la demanda. Se consideraron distintos perfiles de confort térmico y distintos tipos de personas en los hogares. El simulador está parametrizado de manera que se puede configurar el número de personas de cada tipo así como sus perfiles, permitiendo la simulación de distintos escenarios. Este aspecto se explica en el Capítulo 4. En último lugar, se desarrolló una serie de simulaciones para estudiar el grado de aceptación de la demanda a la respuesta en distintos escenarios. Se considera que un usuario no adoptará la petición si como resultado su confort térmico resulta afectado significativamente. Además, se comparó también estos escenarios con la aproximación habitual hasta la fecha que se fundamenta en utilizar únicamente el factor del precio energético. La metodología de simulación, los experimentos realizados y sus resultados pueden verse en el Capítulo 5. Finalmente, las conclusiones y el trabajo futuro pueden encontrarse en el Capítulo 6.

Capítulo 2

Conceptos y Tecnologías Subyacentes

2.1. Sistemas Multi-Agente

2.1.1. El Concepto de Agente y sus Aplicaciones

Un agente puede definirse [5] como un componente de software especial que tiene *autonomía*, que proporciona una interfaz interoperable a un sistema arbitrario y/o se comporta como un agente humano, relacionándose con el medio que le rodea y otros usuarios. Cuando un conjunto de agentes interactúan entre sí, se forma un *Sistema Multi-Agente (SMA)*. Los SMAs son capaces de modelizar sistemas muy complejos. Estos agentes pueden interactuar entre sí de manera indirecta (actuando sobre el medio ambiente) o directamente (a través de la comunicación y la negociación). Otra posibilidad es la cooperación por un objetivo común.

Un agente [5] es *autónomo*, debido a que no necesita intervención humana para su funcionamiento, *social*, por que coopera con humanos u otros agentes para conseguir unos objetivos, *susceptible*, ya que reacciona con el ambiente que lo rodea y *proactivo*, porque no actúa simplemente en respuesta a su entorno sino que es capaz de exhibir un comportamiento dirigido por objetivos al tomar la iniciativa. Además, también puede moverse entre los nodos de la red, no pueden dar falsa información, siempre intenta cumplir sus funciones y cumplir sus objetivos y pueden aprender adaptándose para encajar en el entorno conforme este cambie.

Los SMA [6] se están utilizando en una gran variedad de aplicaciones, desde los mas sencillos hasta sistemas abiertos, complejos y de misión crítica para aplicaciones industriales. Un ejemplo donde se muestra la utilidad de los agentes lo podemos encontrar en este estudio [7]. Nos muestra la rutina de una persona a lo largo del día en la ciudad de Hamburgo. Dependiendo de la ruta, escoge qué forma de transporte es mejor (coche, bici, transporte público), implementando así comportamientos al agente

y la posibilidad de tomar decisiones por si solo.

2.1.2. JADE: Plataforma de Sistemas Multi-agente

Java Agent DEvelopment Framework [8], o JADE, es una plataforma software para el desarrollo de agentes, implementada en Java. JADE facilita un conjunto de funcionalidades que permiten desarrollar SMAs, proporciona funciones básicas en la capa situada entre la de aplicación y sistemas operativos (también conocida como middleware). JADE fundamenta la interacción entre los agentes siguiendo el estándar FIPA-ACL, implementando esta abstracción sobre un lenguaje orientado a objetos (como JAVA) con una API (Interfaz de programación de aplicaciones) muy simple y manejable.

La clase de agente representa una clase base común para agentes definidos por el usuario. Por lo tanto, desde el punto de vista del programador, un agente JADE es simplemente una instancia de una clase Java definida por el usuario que extiende la clase base del Agente. Esto implica la herencia de características para lograr interacciones básicas con la plataforma del agente (registro, configuración, gestión remota, etc.) y un conjunto básico de métodos a los que se puede llamar para implementar el comportamiento personalizado del agente (por ejemplo, enviar / recibir mensajes, usar protocolos de interacción estándar, registrarse con varios dominios, etc.).

2.2. Lógica Borrosa y Sistemas Borrosos

La lógica borrosa o difusa [9] es una forma de lógica de muchos valores, en la que los valores de verdad de las variables pueden ser cualquier número real entre 0 y 1. Se utiliza para manejar el concepto de *verdad parcial*, donde el valor de verdad puede variar entre completamente verdadero y completamente falso. Por el contrario, en la lógica booleana, los valores de verdad de las variables solo pueden ser los valores enteros 0 o 1. El término lógica difusa se introdujo con la propuesta de 1965 de la teoría de conjuntos difusos de Lotfi Zadeh. Sin embargo, la lógica difusa se había estudiado desde la década de 1920, como lógica de valor infinito, especialmente por Łukasiewicz y Tarski. La lógica borrosa se basa en la observación de las personas mientras toman decisiones basadas en información imprecisa y no numérica. Los modelos o conjuntos difusos son medios matemáticos para representar información imprecisa. Estos modelos tienen la capacidad de reconocer, representar, manipular, interpretar y utilizar datos e información que carecen de certeza.

Fundamentalmente, se usa para reproducir modelos semejantes a la realidad. A la hora de hacer un modelo, podemos encontrar varios problemas. Un sistema de lógica

difusa ('SLD') es único porque puede manejar simultáneamente datos numéricos y conocimientos lingüísticos. Es una asignación no lineal de un vector de datos de entrada (prestaciones) en una salida escalar. La teoría de conjuntos difusos y la lógica difusa establecen los detalles de asignaciones no lineales. Muchos problemas de ingeniería pueden expresarse matemáticamente como una combinación lineal de funciones de base difusa. Finalmente, la salida difusa se transforma a una salida numérica en una acción que se denomina *defuzzification*[9] [10].

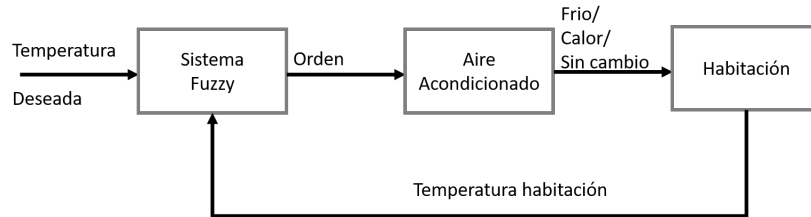


Figura 2.1: Sistema lógico Fuzzy

Para ejemplificar, considérese un sistema de aire acondicionado controlado por un sistema FL como el mostrado en la Figura 2.1. La variable lingüística representaría la sensación térmica de una persona que esta en la habitación, cuando dice "hace frío", "hace calor" la está clasificando según un conjunto de variables (humedad, temperatura, actividad realizada...). La lógica borrosa le da un valor numérico a través de las funciones de pertenencia, pueden ser desde las más sencillas (triangular o trapezoidal), hasta las mas complejas (con forma de campana de Gauss o función por partes). Posteriormente gracias a las reglas CAUSA-EFECTO se forma la matriz 3.1. Las evaluaciones de las reglas difusas y la combinación de los resultados de las reglas individuales se realizan mediante operaciones de conjuntos difusos. Este resultado debe ser desemborronado (*defuzzificado*) para obtener una salida nítida final.

T ^a Actual/ T ^a Deseada	Muy fría	Fría	Neutra	Caliente	Muy Caliente
Muy fría	-	Calor	Calor	Calor	Calor
Fría	Fría	-	Calor	Calor	Calor
Neutra	Fría	Fría	-	Calor	Calor
Caliente	Fría	Fría	Fría	-	Calor
Muy Caliente	Fría	Fría	Fría	Fría	-

Tabla 2.1: Matriz de Reglas para Regular la Temperatura

Capítulo 3

Especificación y Cuantificación del Confort Térmico

De acuerdo con McKenna et al. [2], uno de los retos de los modelos fundamentados en actividades de la respuesta a la demanda es que no se han considerado aspectos sociales en los modelos ingenieriles. En la actualidad la mayoría consideran variaciones de la tarifa eléctrica para modificar el comportamiento de la demanda y no consideran las expectativas de servicio de los usuario de la red eléctrica en cuanto a las actividades rutinarias que realizan. En este trabajo fin de grado, vamos a avanzar en esa línea, intentar especificar, representar y cuantificar las expectativas de servicio en los hogares de manera que sean adecuadas para modelizar y reflejen rutinas y flexibilidades establecidas. No obstante, puesto que el rango y tipo de actividades involucradas en las rutinas diarias de los ciudadanos es amplio, vamos a centrarnos en una actividad que no requiere de una participación activa por parte del usuario, sino que simplemente la expectativa de calidad en esa actividad se va a degradar. En particular, en este trabajo nos vamos a centrar en el confort térmico dentro del hogar.

3.1. Confort Térmico

El *confort térmico* se puede definir como la sensación de bienestar que se experimenta cuando la permanencia en un ambiente determinado no exige esfuerzos desmesurados a los mecanismos de que dispone el organismo para mantener la temperatura interna en 37°C [11]. A pesar de los estudios teóricos, es prácticamente imposible utilizar los modelos matemáticos disponibles en el diseño de sistemas de control debido a tres razones principales. Primero, el cálculo del confort térmico requiere un procesamiento complejo e iterativo que hace que sea imposible de implementar en aplicaciones en tiempo real. En segundo lugar, la sensación humana de confort térmico es bastante vaga y subjetiva porque su evaluación cambia según las preferencias personales. Finalmente, la sensación de confort térmico depende de varias variables que

son difíciles de medir con precisión y a bajo costo. La temperatura de los hogares se controla a partir de termostatos que varían las medidas de ‘calefacción, ventilación y aire acondicionado’ (HVAC *heating, Ventilation and Air Conditioning* en inglés) y así conseguimos la zona de confort. La mayoría de los sistemas de gestión de edificios se basan en estándares de la industria que utilizan el voto medio previsto (VMP) como índice de confort térmico, para garantizar y evaluar condiciones ambientales satisfactorias durante la ocupación. El índice VMP se usa para cuantificar la percepción promedio de comodidad de los ocupantes del edificio para quienes se hacen una serie de suposiciones, como sus niveles de vestimenta, niveles de actividad y tasas metabólicas. Los estudios han mostrado correlaciones débiles y dependientes del contexto entre los rangos de confort definidos estándar y los rangos de confort informados por los ocupantes. Los estudios también han demostrado que el confort térmico no se produce en la neutralidad térmica según lo definido por los estándares. Muchas veces, se encuentra que los rangos de confort de los ocupantes son más grandes y más indulgentes que los rangos predichos, lo que implica un potencial de consumo de energía reducido al permitir un control más flexible y adaptativo de los puntos de ajuste del sistema. Muchos factores podrían contribuir a las preferencias de comodidad de cada individuo, por ejemplo, hábitos, diferencias en las tasas metabólicas, sensibilidad al flujo de aire y cambios de temperatura, y la experiencia térmica histórica. [12]. El modelo de confort térmico propuesto en este trabajo fin de grado se inspira en los siguientes trabajos [13], [14] y [12] y además se ha considerado un factor adicional, el grado de sensibilidad del individuo hacia un medio ambiente más sostenible.

3.1.1. Principales Factores

El siguiente artículo [13] se realiza un estudio sobre los factores que producen el confort térmico. Distingue entre los factores humanos y los atmosféricos. Por lo tanto, el confort térmico es un resultado no lineal de la interacción entre cuatro variables dependientes del medio ambiente (temperatura del aire, velocidad del aire, humedad relativa, temperatura radiante media) y dos variables dependientes del personal (el nivel de actividad y el índice de indumento). Para calcular un valor del nivel de confort térmico interior, las variables ambientales deben medirse en una ubicación adyacente al ocupante y el nivel de actividad y el índice de indumento deben ser conocidos.

Índice de Indumento

La variable ‘ropa’ o índice de indumento es el aislamiento térmico proporcionado por la vestimenta. Incluso si el papel principal de la ropa es proteger del frío, también existe atuendo protector para proteger del calor, como para los trabajadores metalúrgicos o

los bomberos. En cuanto al confort térmico, solo se considera el primer caso. Se puede ver un gráfico del índice de aislamiento que tienen las prendas [15]. Nosotros hemos representado la indumentaria en cuatro tipos, como vemos en 3.1. De menos a mas índice serían ‘L’ Ligera se refiere a poca ropa con un calzado que no es cerrado como podrían ser unas chanclas, pantalones cortos y de pijama, es decir, de tela fina y manga corta, ‘N’ Neutro que implica otro tipo de vestimenta como podría ser un chándal, ‘H’ para prendas pesadas, esto implica calzado cerrado y mangas largas, incluso alguna sudadera o jersey, ‘VH’ son los indumentos más pesados, incluso con complementos como podrían ser guantes o gorro.

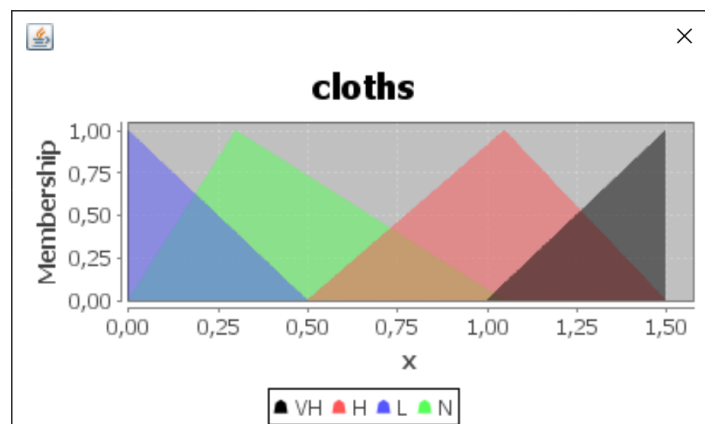


Figura 3.1: Nivel De Aislamiento

Actividad Realizada

El nivel de actividad produce unas reacciones químicas en el cuerpo que se convierten en calor, por eso a más intensidad, mayor tasa metabólica y más calor produce el cuerpo humano [16]. Una actividad que implica mucho movimiento produce más calor. Estas actividades serían las de alta intensidad *high* en este rango hemos considerado, siempre dentro del ámbito de un hogar, algunas que mas esfuerzo implican como cocinar, barrer, planchar, fregar, etc. En un nivel inferior encontramos *medium*, como comer jugar a algún juego de mesa, ducharse, etc. Por último, las de menos intensidad *low* son aquellas que realizamos sin apenas movimiento como ver la televisión, dormir, escuchar la radio etc. Estos valores se dibujan en 3.2

El estudio [14] relaciona el nivel de actividad y nivel de aislamiento por la ropa formando la siguiente tabla 3.1. que corresponderán con nuestras funciones pertenecientes, es decir, las reglas CAUSA-EFECTO.

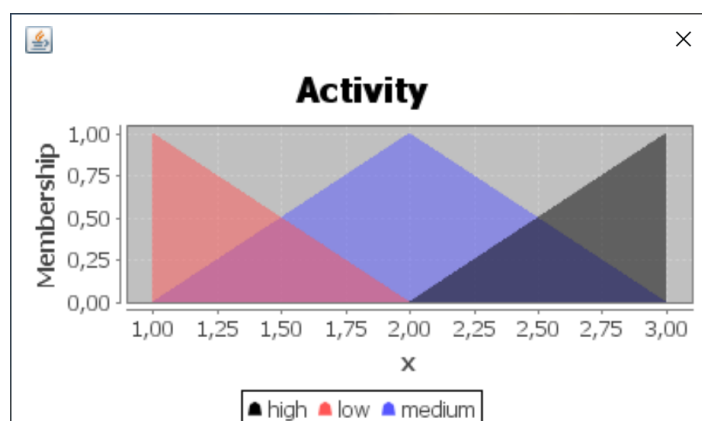


Figura 3.2: Nivel De Actividad

ACTIVIDAD /ROPA	Nivel Bajo	Nivel Medio	Nivel Alto
Ligera	Muy Alta	Alta	Neutral
Normal	Alta	Neutral	Baja
Pesada	Alta	Baja	Muy Baja
Muy Pesada	Neutral	Baja	Muy Baja

Tabla 3.1: Matriz de Temperaturas

Sensibilidad al Medio Ambiente

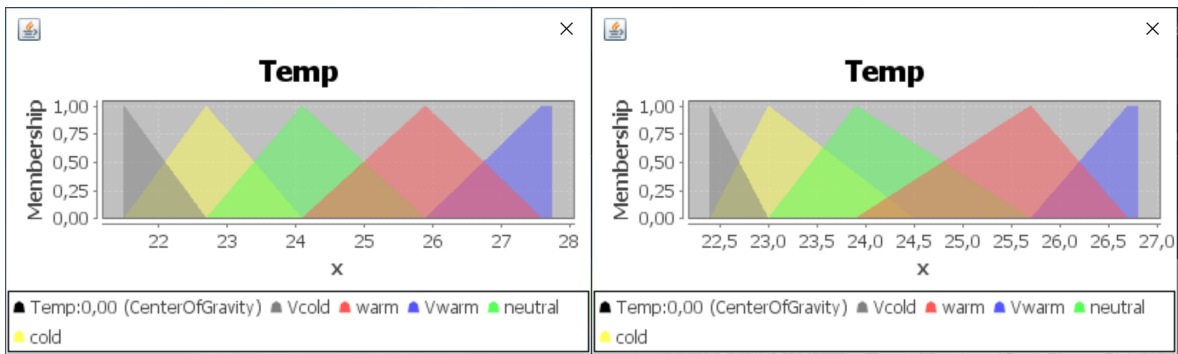
El movimiento ecologista está unido con un compromiso para mantener la salud del ser humano en equilibrio con los ecosistemas naturales, considerando la humanidad como parte de la naturaleza [17]. Aunque no repercute de forma directa en el confort térmico, por ser más respetuoso con el medio ambiente no implica un cambio en tu perfil de confort, si que tiene una implicación indirecta. Como ya hemos dicho, la gente está cada vez mas concienciada con el medio ambiente. Hoy en día hay campañas de alerta contra el calentamiento global, políticas para evitar que las empresas viertan sus compuestos, reducción de emisiones que producen efecto invernadero y los residuos peligrosos, como los nucleares. Esto no es exclusivo de las empresas, diariamente en nuestros hogares también llevamos medidas a cabo: reciclamos los desechos, consumimos menos plásticos, compramos productos ‘eco-friendly’, y ahorramos en agua y energía. Este último ahorro produce que cambiemos algunos hábitos como apagar dispositivos que no se están usando o en vez de calentar la casa hasta 22°C, dejarla en 20°C y abrigarnos más. Por eso, en este escrito se ha decidido incluir como un factor relevante para el confort. A una persona muy concienciada con el medio ambiente no le importará variar un poco más la temperatura. Sin embargo, esta variación de $\pm 1^\circ\text{C}$ que para el individuo no es muy grande, puede suponer un gran ahorro de energía si se extiende por los hogares, liberando de demanda energética la red inteligente.

Lo hemos clasificado en 5 perfiles distintos, inspirados en [18]:

1. **Nada sensible con el medio ambiente:** En este grupo incluimos personas que no ayudan en absoluto a cuidar el medio ambiente e incluso piensan que son medidas inservibles.
2. **Poco sensible con el medio ambiente:** Este grupo si que ve el problema del medio ambiente pero cree que la solución es ajena a ellos, que depende de las industrias. Utiliza a veces el reciclaje pero no de forma regular.
3. **Sensible con el medio ambiente:** Aquí encontramos a los que reciclan de forma habitual y evitan derrochar en agua y electricidad.
4. **Muy sensible con el medio ambiente:** En este punto hemos situado personas que utilizan bombillas de bajo consumo y herramientas para disminuir el caudal del agua, evitan el uso de medios de transporte contaminantes cuando hay alternativas.
5. **Totalmente sensible con el medio ambiente:** Es la parte de la sociedad que más se preocupa participando en acciones a favor del MA, el consumo únicamente de objetos orgánicos e incluso el uso de energías renovables propias en su hogar como las placas solares.

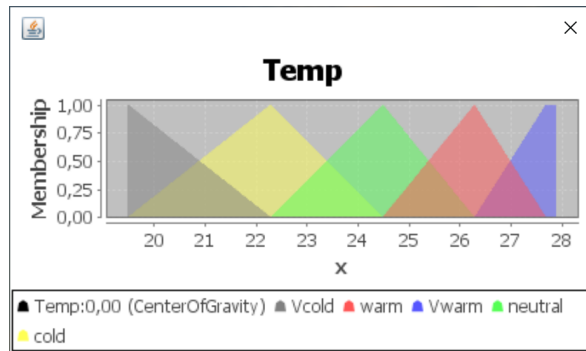
3.1.2. Perfiles de Confort

El perfil de confort en este contexto incluye una escala de sensación térmica, que es la relación entre un índice de percepción térmica y la temperatura ambiente, así como las zonas de percepción térmica (muy frío, frío, neutro, cálido y muy cálido) para cada hogar. Así, evitamos el uso del VMP en este proyecto. Los perfiles se han seleccionado de la pagina 9 de [12]. Escogemos tres perfiles de temperatura para conseguir una mayor variación de población. Figura 3.3 son los perfiles de confort personalizados que hemos escogido, que representan las preferencias de confort de los hogares y las zonas de confort térmico. Usaremos estos perfiles en el proceso de lógica borrosa, con los métodos de ‘Fuzzificación‘ y ‘Desfuzzificación‘ para extraer la zona de confort del usuario en cada momento.



(a) Perfil 1

(b) Perfil 2



(c) Perfil 3

Figura 3.3: Perfis De Confort

Capítulo 4

Modelizado de la Adopción de la Respuesta a la Demanda

En el capítulo anterior proporcionamos una especificación, representación y cuantificación de la expectativa del confort térmico en un hogar. En este capítulo, vamos a integrar todos esos aspectos en una población de hogares, de manera que podremos simular el grado de adopción y de satisfacción de la respuesta a la demanda respecto del confort térmico. Consideraremos que un hogar aceptará la respuesta a la demanda si la variación térmica introducida no conlleva una pérdida significativa del bienestar en el confort térmico. Por contra, si la variación térmica introducida conlleva una pérdida de bienestar, no se aceptará el cambio. Además, queremos estudiar la degradación en el confort térmico cuando la respuesta a la demanda se realiza exclusivamente variando la tarifa energética.

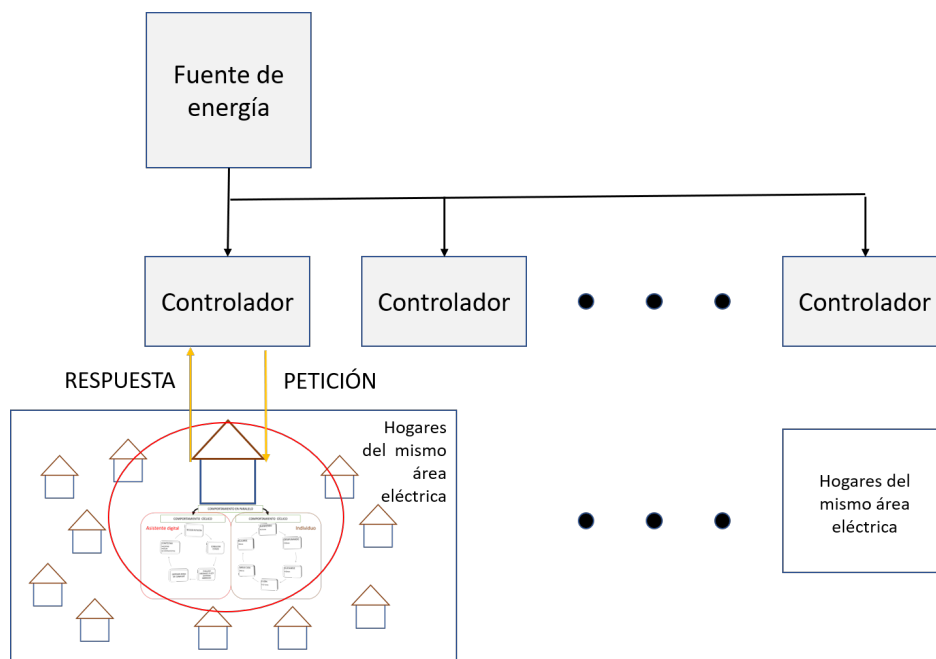


Figura 4.1: Visión Sinóptica del proyecto.

En la Figura 4.1 tenemos una visión sinóptica. Hemos representado como sería la red del proyecto. Estaría compuesta de una fuente, que será la encargada de suministrar energía a la red. Un conjunto de controladores, que controlan la energía consumida y son los que se encargan de enviar y recibir los mensajes de la respuesta a la demanda cuando la red vaya a saturar. Cada controlador se encarga de un área eléctrica compuesta por un número determinado de hogares. Estos hogares son los usuarios de la red eléctrica y los encargados de aceptar o rechazar la petición del controlador.

En las siguientes secciones se especificarán los tipos de hogares que hemos considerado para realizar este trabajo. Además, se describirá cómo se integra el modelo de confort térmico, desarrollado en el Capítulo 3, para modelizar el grado de adopción de la respuesta a la demanda. Finalmente, también se describe la implementación de estos modelos en JADE (plataforma de sistemas multi-agente).

4.1. Tipos de Hogares

En este proyecto hemos considerado cuatro tipos de hogares, que consideramos representativos de nuestra sociedad: *‘Familia’*, *‘Empleado’*, *‘Piso de Estudiantes’* y *‘Pareja de la 3ª Edad’*. No obstante, el sistema permite modelizar fácilmente otros tipos diferentes. En el futuro, se podrían modificar o ampliar las rutinas diarias o añadir algún tipo más que no se haya considerado. Para simplificar el modelizado, en aquel tipo de hogar compuesto por múltiples miembros (v.gr. una familia) se considerarán actividades globales familiares que todos los miembros del grupo familiar realizan simultáneamente, tales como, dormir, asearse, salir fuera de casa, etc. Además, son los encargados de dar valor a los parámetros índice de indumento y actividad y de variarlos cuando el usuario cambie de actividad.

4.1.1. Tipo Hogar formado por una Familia

El hogar representado como *‘familia’* es una adaptación del modelo propuesto en [7]. En este artículo, se modeliza una familia, compuesta por un matrimonio, de entre 30 y 45 años que trabaja y tiene un hijo. Puesto que para la respuesta a la demanda y su impacto en el confort térmico no son relevantes las actividades que se realizan fuera de casa, hemos modelizado esos aspectos con un único estado (actividades fuera de casa).

En la Figura 4.2, puede verse el diagrama de estados en particular para la familia. El primer estado corresponde a la acción que se produce nada más empezar el día, en este caso es el estado *‘Durmiendo’*, es decir, esta persona a las 00:00 está durmiendo y permanece en él durante 8 horas donde la intensidad de la actividad es casi nula. El índice de indumento, es el más alto ya que hemos considerado que los miembros

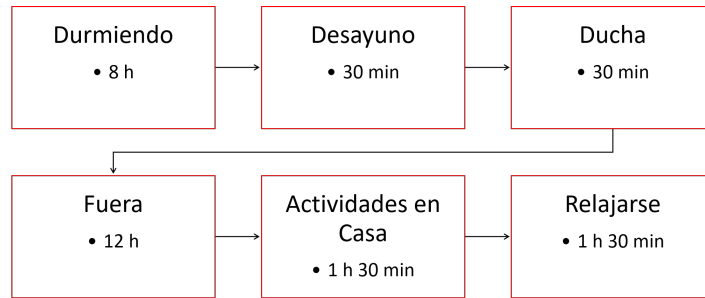


Figura 4.2: Representación de Estados del Hogar Formado por una Familia.

del núcleo familiar podrán estar tapados con la ropa de la cama que deseen. Cuando se despiertan desayunan y se duchan. Por supuesto, con respecto al estado previo (‘Durmiendo’) hay un incremento de la actividad y una disminución en la vestimenta. El próximo estado es ‘Fuera’, esto se refiere a las actividades que realizan fuera de casa que irán variando (*llevar y recoger a los hijos, trabajar, comprar, etc.*). No diferenciamos entre estas actividades ya que al estar fuera de casa, asumimos que la respuesta va a ser aceptar el cambio de temperatura siempre, independientemente de la actividad o la indumentaria. Una vez vuelve a casa, realiza una serie de actividades que las hemos simplificado en una. Hemos considerado que nos moveremos en unos rangos, tanto de actividad como de indumento semejantes (por ejemplo, *jugar con los niños, hacer la cena, limpiar la casa etc.*). La última fase se refiere a actividades con poca actividad que se pueden realizar desde el sofá sentados o tumbados en la cama.

4.1.2. Tipo Hogar Soltero Empleado

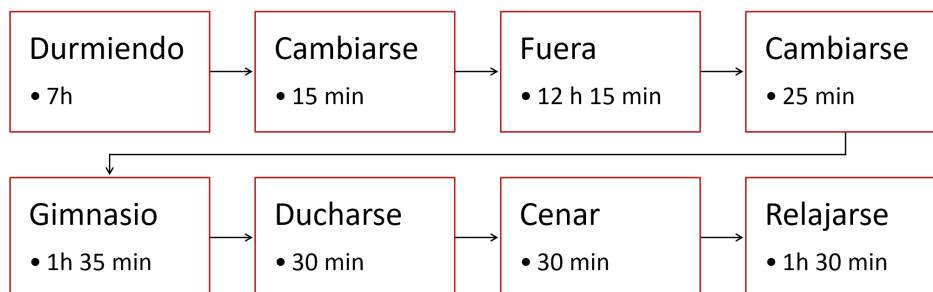


Figura 4.3: Representación de Estados del Hogar Formado por un Trabajador.

El diagrama de estados de la Figura 4.3 muestra una una representación de un hogar compuesto por trabajador que vive solo. De los perfiles creados es el que más tiempo

el usuario está fuera del hogar. Esto se debe a que la mayoría de personas trabajan fuera del hogar. Las actividades realizadas en el hogar son las que hemos considerado mas habituales: asearse, cambiarse, cenar etc.

4.1.3. Tipo Hogar formado por una Familia de Tercera Edad

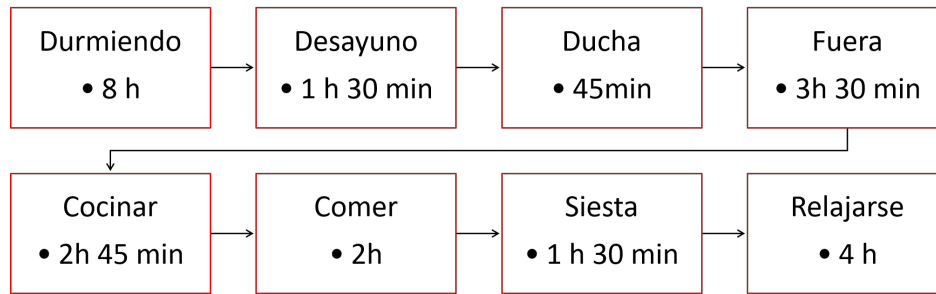


Figura 4.4: Representación de Estados del Hogar Formado por una Familia de la 3ª Edad.

En este caso, el esquema de estados de la Figura 4.4 es una gráfica que reproduce la rutina diaria de una persona o una pareja que ya no trabaja, esta jubilada, y tiene una elevada edad. Vemos que el esquema es similar al hogar formado por una familia. Sin embargo, con respecto a la Figura 4.2 vemos una disminución de las actividades que implican una intensidad alta y de las que se realizan fuera de casa. Por lo tanto, pasará un mayor tiempo en la vivienda donde tendrá lugar el mayor número de actividades. Aunque, habrá casos en los que esta relación de edad y disminución de la actividad no se cumpla. Además, la población a la que queremos representar en este modelo son individuos mas propensos a enfermar. A la hora de programar se podría añadir un factor corrector, que también se puede utilizar en familias por los bebés, que produzca que esta población sea menos propensa a aceptar una variación del confort.

4.1.4. Tipo Hogar Piso Estudiantes

Hemos considerado que otra vivienda representativa podrían ser pisos de estudiantes, al ya que es una fórmula de hogares que se repite bastante y cada vez más, debido a facilidades que proporcionan los gobiernos con programas como Erasmus+ o becas que ayudan a ir a estudiar fuera del hogar familiar. Se puede ver representada en la 4.5. También podríamos incluir en este tipo pisos compartidos, a gente que no es estudiante y quiere independizarse pero no tiene suficientes recursos para hacerlo

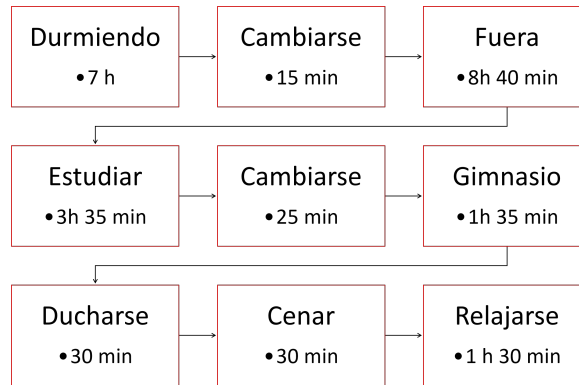


Figura 4.5: Representación de Estados del Hogar Formado por Estudiantes.

solo. Este tipo de modelo representa viviendas con actividades de mayor intensidad. La rutina es parecida a la de empleado añadiendo un periodo para estudiar de unas 3 h y 30 min. Además, cuando nos referimos ir al gimnasio, valdría cualquier otro tipo de deporte, como salir a correr, jugar a fútbol, etc. En época de exámenes podríamos considerar que en el último estado, en vez de relajarse, lo que hagan es estudiar; como tienen los mismo rangos, no afectaría a la simulación.

4.2. Adopción de la Respuesta a la Demanda

Cada hogar tendrá un perfil de confort, por simplicidad solo vamos a considerar que puedan tener uno de los tres perfiles del capítulo anterior. Además, en cada hogar, dependiendo de los individuos que vivan en él, tendrán unas actividades u otras, por ejemplo, una pareja de la tercera edad estará mas tiempo en casa que un trabajador que vive solo. Aun así, hay actividades que todos los hogares comparten aunque estas varíen sus duraciones o el momento del día en el que se realizan. Ya detalladas en las secciones anteriores.

Durante una simulación, en un momento dado, el sistema de control de la red eléctrica podrá enviar una petición de respuesta a la demanda a un hogar, ampliando la zona muerta de control de temperatura, conllevando una variación de temperatura en él. En ese momento, utilizando el perfil de confort del hogar, las reglas establecidas en la Tabla 3.1 y el estado en que se encuentra el hogar, se determinará si la variación de la temperatura está fuera de la zona de confort. En general, se considerará que está fuera de la zona de confort, si en algún momento la temperatura del hogar queda fuera del rango de temperatura deseado.

Para establecer el rango de temperatura deseado se usará la lógica borrosa, a partir de los factores de la Subsección 3.1.1, las reglas CAUSA-EFECTO de la Tabla 3.1 y los perfiles de confort 3.3. Obtendremos el CdG (Centro de Gravedad), es decir, la

temperatura ideal a la que esta el individuo, también el rango deseado y (aplicando el factor sensibilidad al MA 3.1.1) podremos saber si acepta o no la petición. Por ejemplo, un valor de índice de indumento= 0.25 y un valor de actividad= 1.6, (causa) con un perfil 3.3c el CdG será 26.29, es decir, la temperatura ideal seria alta ‘warm‘ (efecto) . Si la temperatura fuese mas baja de 24.5, el individuo podría pasar frío y si superase los 27.5 grados pasaría calor, este sería el rango tal y como se representa en la Figura 4.6. Esta histéresis se obtiene de los posibles valores de salida, al realizar la simulación una vez efectuado el proceso de difuminado (fuzzificación).

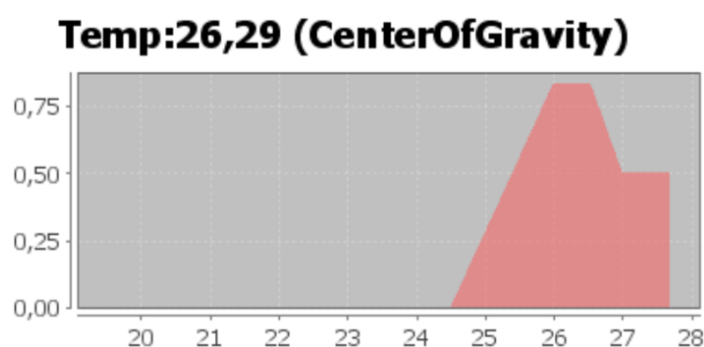


Figura 4.6: Centro De Gravedad

4.3. Integración en Jade

A la hora de programarlo vamos a utilizar principalmente dos tipos de agente uno representa los controladores y el otro para representar los hogares o usuarios. Este último se divide en cuatro que representan los cuatro tipos de hogares de la sección anterior. A cada controlador se le asignarán un número determinado de viviendas. Esto sirve para que: cada hogar solo tenga un controlador, no haya hogares sin controlador y un controlador no pueda enviar mensajes a hogares de otro controlador. De esta forma, a la hora de simular diremos el número de controladores que queremos y cuantos hogares por controlador y estableceremos una serie de porcentajes (Figura A.1) que caracterizarán los hogares tras un proceso aleatorio. Por ejemplo: si estamos en una ciudad famosa por el porcentaje de estudiantes, como podría ser Salamanca en España o Bolonia en Italia, tendremos un gran porcentaje de pisos de estudiantes y un menor número de viviendas con ocupantes mayores.

En este punto tenemos: por un lado los controladores y por el otro los hogares que van cambiando de estados. ¿Pero cómo se produce la comunicación entre los hogares y los controladores? Para eso hemos pensado que, en cada hogar, para incorporarse a la tecnología la respuesta a la demanda tiene un asistente digital (e.g. Asistente de Google o Amazon Alexa, etc.). El asistente está conectado a un termostato inteligente,

por consiguiente, cuando el controlador envía un mensaje al hogar, este es recibido por el asistente que conociendo las características del hogar explicadas previamente en la sección 3.1.1 y el estado actual del individuo, tomará la decisión de aceptar o rechazar. Lo vemos gráficamente en la siguiente Figura 4.7. Otra posibilidad sería que el asistente cuando recibiese el mensaje del controlador cambiase, automáticamente la temperatura y que el individuo si ve que no esta en su zona de confort, la rechazase. En nuestro programa esta función del asistente digital está incorporada en el agente que representa los usuarios y es la parte que se encarga de recibir y enviar mensajes.

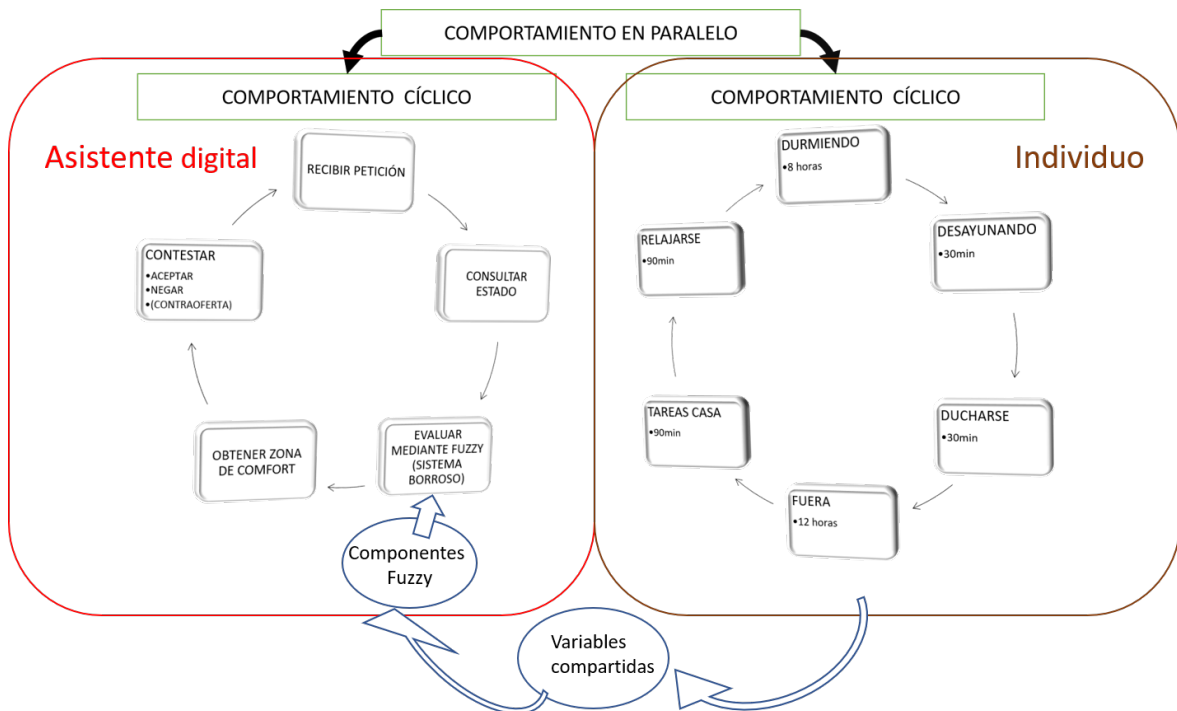


Figura 4.7: Representación Asistente Digital

4.3.1. Detalles de Implementación

Aquí se explican algunos detalles interesantes de funciones utilizadas para el correcto funcionamiento del programa. Para que la comunicación se produzca exactamente entre los agentes que queremos y no entre un agente y el primero que lo reciba, el programador debe establecer primero unas características al mensaje (Figura 4.8). En la primera línea de la figura creamos el mensaje (en este caso una petición), en las próximas añadimos agentes que lo reciben, el contenido, un Identificador y el lenguaje [19]. El usuario recibe un mensaje del controlador, es una petición para variar la temperatura del hogar un número de grados. Este valor estará comprendido entre $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Exclusión Mutua 'Mutex' se usa para evitar, de forma simultanea, el acceso a una

```
ACLMessage Request = new ACLMessage(ACLMessage.REQUEST);
Request.addReceiver(UserAgents);
Request.setConversationId("consume");
Request.setContent(" "+ b);
Request.setLanguage("Español");
```

Figura 4.8: Enviar un mensaje en JADE.

sección de código entrante que no puede ejecutarse simultáneamente por más de un hilo. Ejemplo, cuando un usuario accede a un archivo, nadie más debería tener acceso al mismo archivo al mismo tiempo. Así evitamos que los datos, como los que tienen formato ‘double‘ (para los números con decimales), se solapen, de tal forma que los que recibe el usuario no son los datos reales. Esto pasa con ‘double‘ y ‘long‘ debido al tamaño de bits= 64. Los valores aleatorios se obtendrán a partir de una ‘semilla‘ (long seed en inglés) para reproducir una mayor aleatoriedad entre las acciones de los usuarios y evitar un patrón conocido. A cada controlador se le asigna un número determinado de hogares. Es importante que una vivienda no pueda pertenecer a dos controladores a la vez ya que podría producir problemas de comunicación. Por eso, a la hora de programarlo cuando se crea un controlador, todas las viviendas que pertenecen a ese controlador se registran en un directorio Jade con el mismo argumento; esto produce una comunicación única 4.9.

```
DFAgentDescription df = new DFAgentDescription();
df.setName(getAID());
ServiceDescription sd = new ServiceDescription();
sd.setType("Controller"+Argument);
df.addServices(sd);
```

Figura 4.9: Introducir Agente en un Directorio.

El controlador se va a encargar de enviar las peticiones para ahorrar energía. Pero también es el encargado de recoger las respuestas. Para evitar que se produzca un gran número de mensajes sin respuestas, el controlador tiene limitado a un 20% del total de hogares que controla sin responder. Para cada agente que representa un hogar hemos creado un método para eliminarlo. Este método es necesario para que cuando una vivienda se dé de baja de la red inteligente, el controlador deje de enviarle mensajes.

Capítulo 5

Validación experimental

Desde un primer momento hemos dicho que los modelos actuales de la respuesta a la demanda no tienen en cuenta aspectos sociales del usuario. En este capítulo vamos a realizar una la variación de los distintos parámetros para cuantificar el impacto potencial que la respuesta a la demanda puede tener sobre la calidad en la expectativa del confort (servicio que se ha considerado en este trabajo). Comprobaremos la tasa de aceptación que tienen los usuarios respecto a la variación de temperaturas. Lo compararemos frente a los modelos actuales fundamentados en el factor económico. La tasa de aceptación es el número de respuestas que aceptan los cambios de temperatura, recibidas por cada controlador, respecto al número total de la suma de peticiones enviadas por cada controlador.

5.1. Metodología

El simulador descrito e implementado podría utilizarse para introducir datos reales y observar cuál es el comportamiento de una población real. También puede utilizarse para explorar distintos escenarios. Este último caso que hemos realizado en ese trabajo fin de grado, realizando distintas simulaciones variando factores. Los factores que hemos variado son: tipo de hogar (4 parámetros), sensibilidad respecto al medio ambiente (5 parámetros) y perfil de confort (3 parámetros). Se hace dependiendo del estudio de la población que queramos analizar; si queremos una ciudad envejecida se incrementa el número de hogares de tercera edad y de familias respecto a la de pisos de estudiantes y solteros. Lo mismo con la sensibilidad ecológica, si el lugar de estudio es una población con alta educación medioambiental, tendrá una mayoría de población respetuosa con el medio ambiente. Aproximadamente, hemos realizado 90 simulaciones ?? de distintas poblaciones que nos parecen más representativas y de cómo puede crecer o disminuir la aceptación según cada factor. Luego hemos realizado los gráficos con los resultados que consideramos de mayor interés.

Hemos calculado todos los experimentos con dos datos fijos: el número de controladores y el número de hogares por controlador, 35 y 60 respectivamente, que hacen un total de 2100 viviendas. Hemos escogido esto por varias razones: la principal es que si escogemos un número mayor, el simulador muestra problemas de escalabilidad y los tiempos crecen exponencialmente y no hemos escogido menos por razones de precisión. Gracias a la repetición de simulaciones, para las 2100 viviendas y 35 controladores, usando los mismos parámetros hemos calculado la desviación media estándar de los datos que será en torno a un 0,25 % y nunca superará el 0,5 % lo que implica una precisión aceptable.

Para representar los diagramas según el nivel de sensibilidad con el medio ambiente hemos dado utilizado un índice. Lo calcularemos a partir de la media ponderada asignando un valor de -2, -1, 0, 1, 2 a nada sensible, poco sensible, sensible, muy sensible, totalmente sensible respectivamente formando la Tabla 5.1a. La Tabla 5.1b representa todos los porcentajes de los hogares que usaremos en las simulaciones.

ÍNDICE	NadaEco %	PocoEco %	AlgoEco %	Eco %	MuyEco %
0.4	10	15	20	35	20
-0.4	20	35	20	15	10
0	20	20	20	20	20
0.85	10	10	15	15	50
0.5	10	10	15	50	15
0	10	15	50	15	10
-0.5	15	50	15	10	10
-0.85	50	15	15	10	10

Número	Familia %	Empleado %	Estudiantes %	Ancianos %
1	25	25	25	25
2	30	25	15	30
3	20	30	35	15
4	20	25	45	10
5	38	23	15	24

(a) Tabla para los Índices

(b) Porcentajes por Tipo de Hogar

Figura 5.1

Inspirados por la distribución de rentas de la ciudad de Zaragoza (hallado a partir de las rentas del artículo del diario El País ¹), concluimos que la población tiene la siguiente distribución: muy alta = 5 %, alta = 15 %, media = 40 %, baja = 25 % y muy baja = 15 %. Por otro lado, hemos considerado que no todos los hogares de rentas altas aceptarán la petición de la respuesta a la demanda, pero sí que ninguno de los de rentas bajas podrá rechazarla. Se supone que de las rentas muy altas un 30 % la rechazarán, de las altas un 10 % y de las medias un 5 %. De las bajas y muy bajas hemos considerado que no habrá rechazos. El total de aceptación sería un 95 %. Con estos datos podemos estimar una estrategia de respuesta a la demanda fundamentada exclusivamente en la variación del precio energético. Este dato se comparará con los experimentos realizados a continuación.

¹El mapa de la renta de los españoles, calle a calle, septiembre de 2019 (último acceso, 21 de noviembre de 2019) https://elpais.com/economia/2019/09/11/actualidad/1568217626_928704.html

5.2. Experimentos

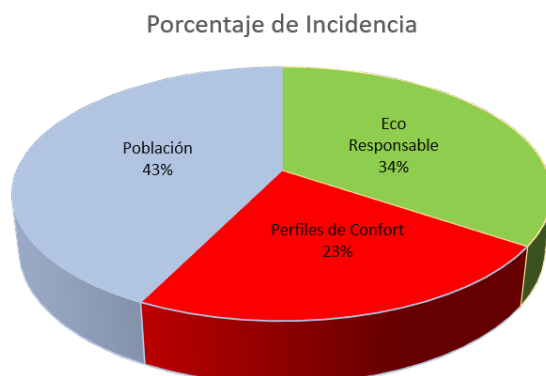


Figura 5.2: Porcentajes de Incidencia

Primero simularemos para ver el grado en el que afecta cada factor. Dejando fijos los factores de dos de los tres parámetros, variamos los factores del tercero hasta que alcance el valor máximo, es decir, el 100%. Repetiremos este proceso para las demás posibilidades. Después, calculamos la diferencia entre el valor máximo y mínimo de cada factor y los comparamos con respecto a los otros. Aunque no está fundamentado en datos reales, este primer estudio es útil ya que obtenemos la siguiente gráfica de la Figura 5.2 y vemos que para nuestros datos la aceptación depende del tipo de hogar, seguido por el factor ecológico.

5.2.1. Experimento A

La gráfica de la Figura 5.3 se ha obtenido a partir de 8 simulaciones. Estas ocho simulaciones comparten los mismos porcentajes para los tipos de hogares: 24% de hogares de la 3ª edad, familias 38%, pisos de empleado 23% y de estudiantes solo el 15%. Tomamos estas medidas porque son las que más se asemejan a la actualidad de la ciudad de Zaragoza ² Además, ya que no hemos realizado un estudio sociológico de los perfiles de confort, estos se mantendrán en las ocho simulaciones con las mismas probabilidades 33.33% cada uno. Si modificamos el índice de MA, es decir, cambiamos los porcentajes de sensibilidad con el MA según 5.1a en cada simulación obtenemos:

5.2.2. Experimento B

Este experimento representa la mayor aceptación (88.89%) que encontramos dentro de las simulaciones que consideramos factibles por los porcentajes. Corresponde a lo que

²Cifras de Zaragoza: Datos demográficos del Padrón de Municipal. Datos Provisionales al 1 de enero de 2018 (último acceso, 21 de noviembre de 2019) <http://www.zaragoza.es/contenidos/estadistica/Cifras-ZGZ-18-01.pdf>

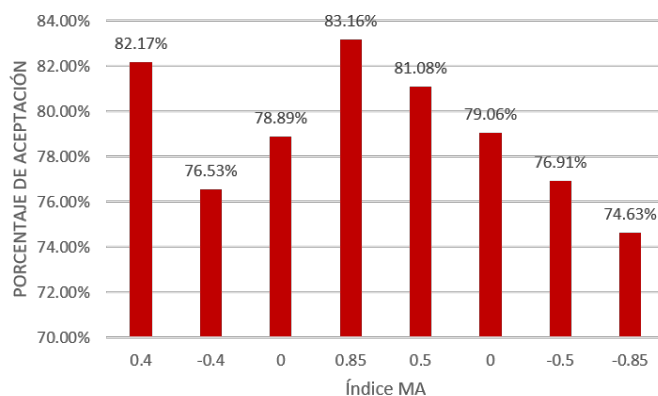


Figura 5.3: Porcentajes Población Ciudad Española Variando la Sensibilidad con el MA

hemos considerado una población joven y tiene los siguientes porcentajes: estudiantes (45 %), empleados (25 %), familia (20 %) y ancianos (10 %). Con un perfil de confort 3.3c del 60 % y 20 % de los otros dos. Y una población distribuida de forma que un 50 % esta totalmente sensibilizada con el MA, muy sensibilizada 15 %, sensibilizada 15 %, nada 10 % y poco un 10 %. Es la que más se acerca a las que manejan los modelos actuales pero aun así esta 6 puntos por debajo. Si consideramos para todos los perfiles de confort la misma probabilidad de aceptación (33.33 %), en vez de 60 % 20 % y 20 %, disminuirá casi un 2 % (86.92 %).

5.2.3. Experimento C

En el extremo opuesto a 5.2.2 encontramos una población distribuida de forma que el 50 % de la población no es sensible con el MA, un 15 % poco sensible, otro 15 % sensible, 10 % muy sensible y 10 % totalmente sensibilizada. Asimismo, los tipos de hogares tienen las siguientes proporciones: 30 % de hogares correspondería a la 3ª edad, 30 % a familias y un 25 % y 15 % de empleados y estudiantes respectivamente. La aceptación bajaría hasta el 74.37 %. Esto es una gran variación frente al 95 % de personas que molestaríamos.

5.2.4. Experimento D

La gráfica (representada en Figura 5.4) está compuesta por 16 simulaciones. Todas las simulaciones tienen todos los perfiles de confort igualados al 33.33 %. La parte representada como ‘población envejecida’ (8 de las 16 simulaciones) tiene siempre las mismas probabilidades: 30 % hogares con miembros de la 3ª edad, 30 % familias, 25 % empleados y 15 % estudiantes. Para la parte representada como ‘población joven’ (resto de simulaciones) tenemos: 10 % ancianos, 20 % a familias, 25 % de empleados y 45 % estudiantes. Para representar gráficamente las 16 simulaciones haremos cada

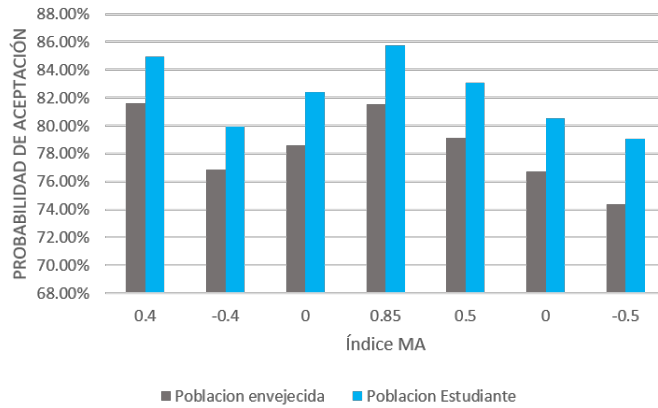


Figura 5.4: Comparación Poblaciones Opuestas

simulación, con los porcentajes que se refieren a sensibilidad con el MA, para cada uno de los índices representados en 5.1a. Estas simulaciones muestran que la diferencia de aceptación, con estos porcentajes, son 4 puntos inferiores en la población envejecida frente a la joven. Esto se debe fundamentalmente a la diferencia en la cantidad de horas que permanecen en el hogar.

5.2.5. Experimento E

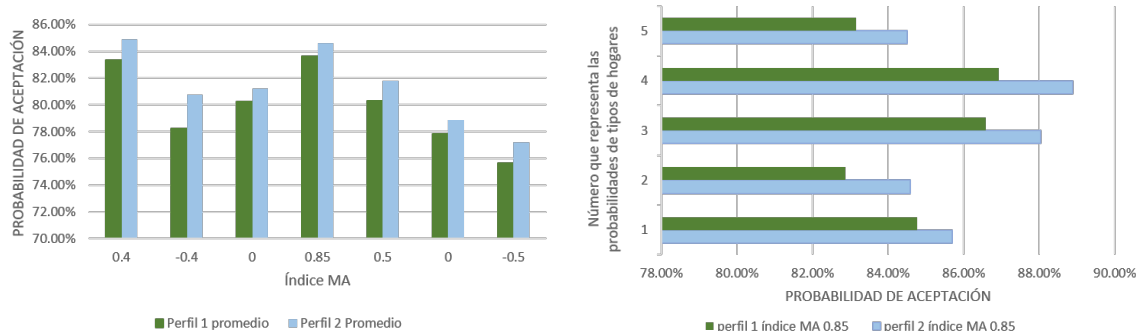
Debido a como programamos la parte de sensibilidad, a la hora de representarlo tiene un comportamiento lineal 5.5. Esta gráfica se ha obtenido fijando en las 5 simulaciones los porcentajes de tipo de hogar (todos iguales a 25 %) y los perfiles de confort (todos 33 %) y variando en cada una los porcentajes de sensibilidad MA según 5.1a. Esto implica que cuando el índice de MA sea igual, la variación será mínima.



Figura 5.5: Recta de Tendencia Variando Índice MA

5.2.6. Experimento F

La gráfica (representada en Figura 5.6a) está compuesta por 16 simulaciones. Todas las simulaciones tienen todos los tipos de hogares igualados al 25%. La parte representada como ‘Perfil 1 promedio’ (8 de las 16 simulaciones) tiene siempre las mismas probabilidades para los perfiles de confort: 33.33% en cada perfil. La parte representada como ‘Perfil 2 promedio’ (las otras 8 simulaciones) tiene siempre las mismas probabilidades para los perfiles de confort: 60% para el representado en 3.3c y 20% para los otros dos. Para representar gráficamente las 16 simulaciones haremos cada simulación, con los porcentajes que se refieren a sensibilidad con el MA, para cada uno de los índices representados en 5.1a. Actuando de forma similar obtendremos 5.6b pero ahora mantendremos fijos los valores que representan la sensibilidad con el MA (nada sensible 10%, poco sensible 10%, sensible 15%, muy sensible 15%, totalmente sensible 50%) y cambiaremos para cada simulación los porcentajes en los tipos de hogares, sabiendo que los números del eje de ordenadas representan la primera columna de 5.1b. Los porcentajes de los perfiles de confort serán: para ‘perfil 1 índice MA 0.85’ 33.33% en cada perfil y para ‘perfil 2 índice MA 0.85’ 60% para el representado en 3.3c y 20% para los otros dos. De las dos gráficas podemos establecer que la aceptación aumenta si aumentamos las probabilidades del perfil 3.3c y que esta variación no es constante, se encuentra entre el 1% y el 2%, es decir, habrá perfiles que producen una tasa de aceptación mayor.



(a) Comparación Mismo Índice de MA Distintos Porcentajes (b) Comparación Mismo Índice de MA Distintos Porcentajes

Figura 5.6

5.3. Análisis de los Resultados

Las simulaciones realizadas en este proyecto pretenden cubrir un amplio abanico de posibles ciudades y estudiar cuál es el grado de adopción de la respuesta a la demanda respecto del confort térmico en todas ellas.

Vemos que las tasas de adopción estarán entre al 88.9% y 74.37%. Comparándolos con los calculados si solo se tiene en cuenta el factor económico, que serían en torno al 95%, vemos que hay muchos casos en los que no se tendría en cuenta el impacto de la respuesta en la demanda en la expectativa de confort del usuario. Por lo tanto, la tecnología podría producir que entre la gente mas desfavorable no llegasen a su nivel de confort en algunas temporadas o incluso que no pudieran encender la calefacción en invierno o el aire en verano.

Capítulo 6

Conclusiones y Trabajo Futuro

6.1. Conclusiones

Frente a la aproximación tradicional de adaptar la producción energética a la demanda, las técnicas de *respuesta a la demanda* suponen todo un cambio de paradigma, en tanto que intentan gestionar la demanda de consumo energético y constituyen uno de los aspectos fundamentales de las redes eléctricas inteligentes. La enorme flexibilidad que introducen permite gestionar mejor la inclusión de las energías renovables y los picos de demanda energética; pero, por otra parte, requieren de una participación activa de los usuarios de la red, en cuanto a que tendrán que modificar sus patrones de consumo energético. El interés generado ha propiciado un desarrollo tan rápido que todavía no ha estudiado el impacto social de la respuesta a la demanda. La mayor parte del desarrollo se ha localizado en torno a cuestiones fundamentalmente tecnológicas, minimizando el hecho de que la adopción de esta tecnología requiere al final de una interacción con seres humanos. Prueba de ello es que los modelos existentes de respuesta a la demanda se fundamentan mayoritariamente en variaciones de la tarifa eléctrica para controlar la demanda. Como resultado de esa estrategia, los hogares más vulnerables (v.gr. pocos recursos económicos), por ejemplo, se verían forzados a adoptar un cambio en su patrón de comportamiento en contra de su voluntad, afectando a las expectativas del servicio de una o varias actividades desempeñadas en un hogar al usar energía eléctrica.

En este trabajo fin de grado, se analiza el grado de adopción de la respuesta a la demanda respecto del confort térmico. El confort térmico en un hogar es una sensación humana que depende de un número de variables tales como la temperatura, la actividad desempeñada, el índice de indumento o la sensibilización del individuo respecto de la sostenibilidad del medio ambiente y el ahorro energético. La respuesta a la demanda aplicada al confort térmico requiere de un aumento en la zona muerta de la temperatura del controlador, de manera que si la temperatura abandona la zona de confort del

usuario, el usuario no querrá adoptar el cambio. En este trabajo, el confort térmico se ha modelizado utilizando lógica borrosa y se han utilizado técnicas de sistemas multi-agente para modelizar una población de hogares, cada uno de ellos con un perfil tipo de temperatura. En la población, se han considerado distintos tipos de hogares, representativos de la sociedad occidental actual, tales como una familia con hijos, un individuo soltero, una pareja de la tercera edad y un hogar formado exclusivamente por estudiantes.

Con objeto de estudiar el grado de adopción de la respuesta a la demanda respecto del confort técnico, se han realizado distintas simulaciones variando los porcentajes del tipo de hogares y perfiles de confort de temperatura y los distintos parámetros de que afectan al confort térmico. Con los datos usados se observa que en el peor de los casos, entorno a un 20 % de los hogares estaría descontenta con el cambio introducido por la respuesta a la demanda en su confort térmico y en el mejor, un 8 % de los hogares estarían descontentos. Esto quiere decir que efectivamente hay que revisar los modelos actuales ya que producirían malestar en las personas con menos recursos, incluso en algunos casos que no pudieran encender los dispositivos eléctricos que proporcionan un confort térmico. Además, con nuestras simulaciones podemos comprobar que los tipos de hogares que más tiempo pasan dentro tienen un porcentaje de aceptación más bajo. Otra conclusión sería que si la concienciación con el medio ambiente es mayor, habrá mas aceptación. Esto se podría materializar políticamente, introduciendo acciones en la educación de la población en materia de la sostenibilidad del medio ambiente y el ahorro energético, por ejemplo, introduciendo estos temas en los *curricula* de asignaturas de primaria y secundaria.

6.2. Trabajo Futuro

Existe un problema de escalabilidad en el simulador realizado, cuando se incrementa en gran medida el número de agentes. Esto se produce porque a la hora de realizar el intercambio de mensajes el controlador busca entre una lista y cuando excede el límite de tiempo establecido, expira un *timeout* y se genera un error. Como la red eléctrica tiene una estructura arborescente, el problema es fácilmente escalable, cada área eléctrica se puede simular en un computador.

Por otra parte, mediante IA (Inteligencia Artificial) podríamos ver qué hogares son más favorables para aceptar las variaciones. Asimismo, la IA nos puede ayudar a añadir una evolución del usuario ya que el perfil de confort de una misma persona varía con el tiempo. También hay técnicas ya utilizadas, en los que la IA recopila datos y es capaz de procesarlos y formar perfiles de confort para cada uno de los individuos de un hogar,

evitando la aproximación de que cada hogar tiene un único perfil de confort y tener en cuenta el de todas las persona, es decir, que las viviendas es un conjunto colectivo y no una vivienda. También, podríamos obtener una mejor aproximación de como actuaría el factor 'sensibilidad con el medio ambiente'. Considerar las actividades de una forma mas detallada, en particular aquellas que requieren de un cambio activo por parte del usuario.

Finalmente, se podría utilizar la localización espacial del usuario fuera del hogar y la distancia a su hogar y utilizarlo como variable para adoptar o no una petición de respuesta a la demanda. Si está acercándose a casa, es un factor que habría que considerar en simulación. Esta técnica se esta realizando hoy en día con termostatos inteligentes que están conectados a tu teléfono y cuando ven que te diriges al hogar lo empiezan a climatizar el hogar para que cuando el individuo llegue, tenga la temperatura de confort.

Bibliografía

- [1] Peter Palensky and Dietmar Dietrich. Demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads. *IEEE transactions on industrial informatics*, 7(3):381–388, 2011.
- [2] Eoghan McKenna, Sarah Higginson, Philipp Grunewald, and Sarah J Darby. Simulating residential demand response: Improving socio-technical assumptions in activity-based models of energy demand. *Energy Efficiency*, pages 1–15, 2017.
- [3] Sarah J Darby and Eoghan McKenna. Social implications of residential demand response in cool temperate climates. *Energy Policy*, 49:759–769, 2012.
- [4] Gareth Powells, Harriet Bulkeley, Sandra Bell, and Ellis Judson. Peak electricity demand and the flexibility of everyday life. *Geoforum*, 55:43–52, 2014.
- [5] Jacques Ferber and Gerhard Weiss. *Multi-agent systems: an introduction to distributed artificial intelligence*, volume 1. Addison-Wesley Reading, 1999.
- [6] Scott A DeLoach, Mark F Wood, and Clint H Sparkman. Multiagent systems engineering. *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering*, 11(03):231–258, 2001.
- [7] Liang Yang, Peter Hoffmann, Jürgen Scheffran, Sven Rühle, Jana Fischereit, and Ingenuin Gasser. An agent-based modeling framework for simulating human exposure to environmental stresses in urban areas. *Urban Science*, 2(2):36, 2018.
- [8] Fabio Luigi Bellifemine, Giovanni Caire, and Dominic Greenwood. *Developing multi-agent systems with JADE*, volume 7. John Wiley & Sons, 2007.
- [9] Jerry M Mendel. Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial. *Proceedings of the IEEE*, 83(3):345–377, 1995.
- [10] Zeynep Çipiloğlu Yıldız. A short fuzzy logic tutorial. Technical report, Celal Bayar University, April 2010.

- [11] Wikipedia. Estrés térmico — wikipedia, la enciclopedia libre, 2019. [Internet; descargado 17-noviembre-2019].
- [12] Farrokh Jazizadeh, Ali Ghahramani, Burcin Becerik-Gerber, Tatiana Kichkaylo, and Michael Orosz. Human-building interaction framework for personalized thermal comfort-driven systems in office buildings. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 28(1):2–16, 2013.
- [13] Helmut Mayer, Jutta Holst, Paul Dostal, Florian Imbery, and Dirk Schindler. Human thermal comfort in summer within an urban street canyon in central europe. *Meteorologische Zeitschrift*, 17(3):241–250, 2008.
- [14] Maher Hamdi and Gerard Lachiver. A fuzzy control system based on the human sensation of thermal comfort. In *1998 IEEE International Conference on Fuzzy Systems Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence (Cat. No. 98CH36228)*, volume 1, pages 487–492. IEEE, 1998.
- [15] Wikipedia contributors. Clothing insulation — Wikipedia, the free encyclopedia, 2019. [Online; accessed 3-November-2019].
- [16] Wikipedia contributors. Thermal comfort — Wikipedia, the free encyclopedia, 2019. [Online; accessed 3-November-2019].
- [17] Wikipedia. Ecologismo — wikipedia, la enciclopedia libre, 2019. [Internet; descargado 3-noviembre-2019].
- [18] Claudia Pahl-Wostl, David Tàbara, Rene Bouwen, Marc Craps, Art Dewulf, Erik Mostert, Dagmar Ridder, and Tharsi Taillieu. The importance of social learning and culture for sustainable water management. *Ecological economics*, 64(3):484–495, 2008.
- [19] Hasan Al-Aidaros and Shuang-Hua Yang. Using jade for the development of multi-agent systems. *Measurement and Control*, 38(10):299–303, 2005.

Lista de Figuras

2.1. Sistema lógico Fuzzy	7
3.1. Nivel De Aislamiento	11
3.2. Nivel De Actividad	12
3.3. Perfiles De Confort	14
4.1. Visión Sinóptica del proyecto.	15
4.2. Representación de Estados del Hogar Formado por una Familia.	17
4.3. Representación de Estados del Hogar Formado por un Trabajador.	17
4.4. Representación de Estados del Hogar Formado por una Familia de la 3 ^a Edad.	18
4.5. Representación de Estados del Hogar Formado por Estudiantes.	19
4.6. Centro De Gravedad	20
4.7. Representacion Asistente Digital	21
4.8. Enviar un mensaje en JADE.	22
4.9. Introducir Agente en un Directorio.	22
5.1.	24
5.2. Porcentajes de Incidencia	25
5.3. Porcentajes Población Ciudad Española Variando la Sensibilidad con el MA	26
5.4. Comparación Poblaciones Opuestas	27
5.5. Recta de Tendencia Variando Índice MA	27
5.6.	28
A.1. Archivo Principal	47

Lista de Tablas

2.1. Matriz de Reglas para Regular la Temperatura	7
3.1. Matriz de Temperaturas	12

Anexos

Anexos A

Un anexo

Logical Framework

LOG-FRAME PROBLEMA	OBJETIVO GLOBAL (impacto)	PROPOSITO (qué se desea realizar)	OBJETIVOS (objetivo global detallado)	ACTIVIDADES (metodología, herramientas)	VALIDACIÓN
<p>Demand-Response en áreas residenciales está recibiendo un interés cada vez mayor como una nueva forma de flexibilidad dentro de los sistemas de energía de bajo carbono. Demand-response intenta modificar la demanda de los clientes en sus hogares mediante la variación del precio de la energía. Existe un número significativo de modelos para estudiar y analizar su comportamiento; pero, hasta donde sabemos, dichos modelos únicamente no incluyen aspectos sociales. Por tanto, la realidad en cuanto a la implantación de demand-response, podría ser muy distinta respecto de lo que indican los modelos actuales.</p>	<p>Mejorar la precisión de los modelos técnicos actuales de demand-response en la futura smart grid, de manera que recojan no solo los aspectos técnicos sino también los sociales.</p>	<p>Modelar aspectos sociales del comportamiento humano, en particular, las expectativas del servicio que tiene el usuario en demand-response en las futuras redes eléctricas, con objeto de mejorar los modelos existentes.</p>	<p>O1) Descubrir qué factores determinan la flexibilidad de un cliente de la red eléctrica a la hora de aceptar un cambio en la calidad de un servicio energético (expectativa de la calidad del servicio).</p>	<p>A1- Estudio de las tecnologías y concepto subyacentes A2- Análisis de los aspectos sociales para la adopción de demand-response</p>	<p>A4- Simulación experimental</p>
			<p>O2) Modelar esos factores con tecnologías de inteligencia artificial de manera que se permita determinar el grado de adopción de demand-response en una población y que permita simular diferentes escenarios, teniendo en cuenta distintos valores de los factores analizados</p>	<p>A3- Utilización de técnicas de inteligencia artificial, en particular, de sistemas multi-agente (JADE) para construir un simulador del comportamiento humano en cuanto al grado de adopción de demand-response por una población</p>	
<p>título</p>	<p>Modelado de aspectos sociales del comportamiento humano para mejorar las simulaciones del smart-grid</p>				
<p>title</p>	<p>Modelling householders' social behaviour in order to improve smart-grid simulations</p>				

Gráfico de Gantt

Fichero de configuración desde el que se cambian los parámetros del simulador.

```
CONTROLADORES DE LA CIUDAD;  
Controladores = 35  
  
HOGARES POR CONTROLADOR  
Hogares = 60  
  
PROBABILIDADES DE CADA PERFIL;  
probabilidad perfil Familia:  
A = 25  
probabilidad perfil Empleado:  
B = 25  
probabilidad perfil Piso_estudiantes:  
C = 25  
probabilidad perfil Pareja_Anciana:  
D = 25  
PROBABILIDADES PERFILES ECOLOGISTAS;  
NadaEco = 20  
PocoEco = 20  
AlgoEco = 20  
Eco = 20  
MuyEco = 20  
  
PROBABILIDADES TIPO DE PERFIL;  
Tipo1 = 33.33  
Tipo2 = 33.33  
Tipo3 = 33.33
```

Figura A.1: Archivo Principal