

UNIVERSIDAD DE ALMERÍA
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR Y FACULTAD
DE CIENCIAS EXPERIMENTALES
Departamento de Informática



TRABAJO FIN DE GRADO
GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DEL
CONFORT LUMÍNICO EN EL INTERIOR DE EDIFICIOS
BASADO EN LÓGICA DIFUSA

José Manuel Rodríguez Torres

Dirigida por: Dr. D. Francisco Rodríguez Díaz y

Dra. Dña. María del Mar Castilla Nieto

Almería, Septiembre 2014

TRABAJO FIN DE GRADO
GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL



DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DEL
CONFORT LUMÍNICO EN EL INTERIOR DE EDIFICIOS
BASADO EN LÓGICA DIFUSA

por

José Manuel Rodríguez Torres

Para la obtención del
Título del Grado en Ingeniería Electrónica Industrial.

Director

Director

Autor

Dr. Francisco Rodríguez Díaz

Dra. María Del Mar Castilla
Nieto

José Manuel Rodríguez
Torres

A mis padres y hermanas.

A Lorena.

Su fuerza y aliento han sido la energía en mi trabajo.

Agradecimientos

La realización de este proyecto significa la consecución de un objetivo que llevaba tiempo persiguiendo, y es por esto que cuando intento recordar lo pasado hasta aquí no es posible resumir en estas líneas ni la cuantía de sus aportaciones tanto académicas como morales, ni los nombres de las personas con las que he tenido el gusto de compartir enseñanzas, y me han ayudado a que hoy pueda alcanzar mi sueño, así que espero que estén todos los que son.

En primer lugar, mi más sentido agradecimiento a mis directores de proyecto María del Mar Castilla y Paco Rodríguez. Si Paco me ha aportado esa exigencia y ambición que lo caracteriza, María del Mar me ha demostrado que la paciencia de una investigadora no tiene límite, paciencia que ha tenido conmigo. Ambos coinciden en una cosa, lo bien que me trataron y lo mucho que me ayudaron cuando llegue al CIESOL en el caso de María del Mar, y a la universidad en el caso de Paco. Y por último destacar que como ellos he aprendido que las soluciones a los problemas están después de 'echarle una pensada', sin sus conocimientos este proyecto no existiría.

Mención especial tienen que recibir el equipo humano que forma o ha formado parte del CIESOL en mi estancia, encabezado por su co-director Manolo Pérez. Y a mis compañeros de laboratorio y clase, sin ellos habrían sido más largos esos días de intensivo trabajo en el edificio, en especial a Diego Rodríguez y Juan Horacio que cuando el ánimo decaía siempre encontraba su apoyo moral.

Este trabajo no habría terminado con éxito si Miguel Agüero no hubiera demostrado una vez más su constancia y sus conocimientos eléctricos que me sirvieron de mucho para poder ver la solución con un poco más de luz.

Evidentemente sin el apoyo de mi familia, en especial de mis padres que se han desvivido para que yo pudiera terminar este proyecto y la carrera, no habría sido posible llegar a este momento. Y también quiero agradecer a mis amigos, que más que amigos son familia, que no desistieron en sus llamadas o visitas para hacerme más soportable el verano enclaustrado.

Por último, gracias Lorena por tu paciencia, por sufrir conmigo, y sobre todo por demostrarme día a día tu amor. Solo puedo prometerte que este sufrimiento por mi culpa, y el apoyo que me has dado te lo devolveré con creces.

RESUMEN

El ser humano percibe la mayor parte de la información a través de la vista, por lo que la luz resulta un elemento muy importante, ya que permite distinguir la forma, color y perspectiva del entorno que nos rodea.

Actualmente, la reducción del consumo energético asociado al uso y construcción de los edificios y el incremento de la eficiencia energética en el acondicionamiento climático de los mismos, son cuestiones que están recibiendo una gran atención, tanto desde el punto de vista científico-técnico como desde el empresarial. Los estudios recientes indican que el consumo de energía en los edificios representa el 40 % del consumo energético mundial, siendo más de la mitad atribuible a sistemas de climatización. Por otro lado, la iluminación supone un 20% de la factura eléctrica de las viviendas y entre el 40 y 70% en comercios y oficinas.

Este trabajo fin de grado nace con el principal objetivo de proveer de un sistema de control del confort lumínico basado en lógica difusa a la sala de juntas del edificio CDdI-CIESOL-ARFRISOL. Para alcanzar dicho objetivo se han tenido que desarrollar las siguientes fases:

- Definición del significado de confort lumínico así como de las variables y normas que lo definen. Además, se ha realizado un estudio de las técnicas de control en la materia para poder adoptar la que finalmente ha sido la solución.
- Adecuación de la instalación de la sala de juntas mediante la redistribución de luminarias y la instalación de nuevos sensores y actuadores necesarios para realizar el control de manera eficiente.
- Diseño e implementación de un sistema de supervisión, adquisición y control de datos de la sala de juntas.
- Desarrollo de un modelo de la iluminancia interior en base a las luces artificiales mediante el software de propósito específico (DIALux) y un modelo de la influencia de la luz natural del exterior y las posiciones de las persianas con la iluminancia interior.
- Diseño de un controlador que tiene como variables a controlar la diferencia de iluminancia entre la real y deseada en el interior de la sala, y la diferencia entre el índice de deslumbramiento unificado entre el real y deseado en el interior de la sala, y como salidas las posiciones de las persianas, las orientaciones de las lamas y el estado de las luminarias.

Los resultados obtenidos son prometedores demostrando que la elección del controlador ha permitido controlar la iluminancia en el interior de la sala.

Contenido

Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Motivación del proyecto.....	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Contexto	3
1.4 Resumen de resultados.....	3
1.5 Programa del proyecto	6
1.6 Estructura de la memoria del proyecto	7
Capítulo 2. Confort Visual	9
2.1 Definición de confort visual. Estándares y normas	9
2.2 Parámetros de confort visual y eficiencia energética. Código Técnico de la Edificación.....	10
2.2.1 Iluminancia y uniformidad	11
2.2.2 Control de deslumbramiento.....	14
2.2.3 Modelado y sombras.....	17
2.2.4 Propiedad de Color	17
2.2.5 Ergonomía del puesto de trabajo.....	18
2.3 Estado del arte en el modelado y control del confort visual.....	20
Capítulo 3. Descripción de la planta de ensayos	23
3.1 Descripción del edificio CIESOL.....	23
3.2 Descripción de la sala de juntas.....	29
3.3 Descripción de la arquitectura hardware y software de la red de actuadores y sensores.....	33
3.3.1 Descripción de la arquitectura hardware y software de la red de actuadores y sensores para el edificio	34
3.3.2 Descripción de la arquitectura hardware y software de la red de actuadores y sensores para la sala de juntas	41
Capítulo 4. Diseño del sistema SCADA	55
4.1 Situación actual de los sistemas SCADA	55
4.2 Descripción del entorno de programación Labview	60

4.2.1	Programación con LabVIEW	62
4.3	Arquitectura del sistema SCADA.....	63
4.4	Diseño y desarrollo de la interfaz de usuario.....	65
4.4.1	Arquitectura, distribución de pantallas y navegación	65
4.5	Descripción de los modos de operación.....	70
4.5.1	Modo manual	70
4.5.2	Modo automático	72
Capítulo 5. Modelado iluminancia		73
5.1	Introducción.....	73
5.2	Modelado de la habitación.....	75
5.2.1	Modelado de la iluminación artificial	76
5.2.2	Modelado de la luz natural	82
5.3	Calibración y validación del modelo	98
5.3.1	Validación del modelo de la iluminancia en el interior de la sala para las mañanas de verano.....	98
5.3.2	Validación del modelo de la iluminancia en el interior de la sala para las tardes de verano.	103
Capítulo 6. Control del confort visual		109
6.1	Introducción al control del confort visual.....	109
6.2	Conceptos básicos del control difuso	110
6.3	Desarrollo del sistema de control	116
6.3.1	Especificaciones	116
6.3.2	Diseño.....	117
6.3.3	Implementación.....	129
6.4	Resultados del sistema de control.....	130
6.4.1	Ensayo bajo condiciones forzadas.....	130
6.4.2	Ensayo de una jornada de trabajo del edificio	137
Capítulo 7. Conclusiones y futuros trabajos		143

Capítulo 1. Introducción

1.1 Motivación del proyecto

Actualmente, la reducción del consumo energético asociado al uso y construcción de los edificios y el incremento de la eficiencia energética en el acondicionamiento climático de los mismos, son cuestiones que están recibiendo una gran atención, tanto desde el punto de vista científico-técnico como desde el empresarial [1]. Los estudios recientes indican que el consumo de energía en los edificios representa el 40 % del consumo energético mundial, siendo más de la mitad atribuible a sistemas de climatización [2][3][4]. Por otro lado para tener una idea de la importancia que tiene la iluminación a nivel mundial, el Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE) revela entre otras que la iluminación supone un 20% de la factura eléctrica de las viviendas y entre el 40 y 70% en comercios y oficinas [5]. Además, esto es agravado con el hecho de que el 75% de las oficinas europeas utilizan sistemas de alumbrado anticuados energéticamente ineficientes.[6]

Por lo tanto, disponer de suficiente luz natural es fundamental para unas condiciones de trabajo productivas y creativas. Cada vez más se está concienciando la sociedad y en concreto al mundo empresarial de la necesidades y beneficios del ahorro energético, y poniendo medidas para ello. Sin embargo, el cumplimiento del objetivo de ahorro energético no debe comprometer el bienestar de los usuarios [7], requiriéndose (junto con innovaciones en los diseños constructivos) actuaciones de control específicas sobre los sistemas de iluminación y sombreado orientadas a proporcionar ambientes confortables desde el punto de vista del confort visual con el menor consumo de energía posible [8].

El ser humano percibe la mayor parte de la información a través de la vista, por lo que la luz resulta un elemento muy importante, ya que permite distinguir la forma, color y perspectiva del entorno. El confort visual se puede medir en función de la iluminación, luminancia y reflexión de la luz; todo ello regulado por la normas UNE 12464-1[9].

Estudios recientes demuestran que no existen diferencias significativas con respecto al confort lumínico en un puesto de trabajo en función de si se trabaja sobre papel u ordenador [10], no obstante en el problema que se va a resolver en este trabajo fin de grado se trata de optimizar para las labores típicas de un aula y de una sala de reuniones el uso de la iluminación tanto natural como artificial, con el fin de alcanzar un alto grado de confort visual manteniendo la eficiencia energética.

1.2 Objetivos

El principal objetivo de este proyecto es diseñar e implementar un sistema de control capaz de mantener en función del uso, la ocupación y las condiciones exteriores, un nivel de iluminación adecuado, considerando aspectos de eficiencia energética.

La automatización es un factor esencial para optimizar el confort visual porque permite simultáneamente:

- Asegurar una iluminación agradable durante todo el día ya que los niveles lumínicos varían de una hora a la siguiente, de una estación a otra. Además, y debido fundamentalmente a los diferentes materiales utilizados para el acristalamiento y la decoración de interiores, las protecciones solares fijas (viseras solares, etc.) no pueden optimizar continuamente su eficacia.
- Adaptarse a las variaciones de la luz natural. Los usuarios no son conscientes de los problemas provocados por los cambios en la luz natural hasta que es demasiado tarde para reaccionar. Los sistemas automatizados responden mucho más deprisa.
- Sólo los sistemas automatizados controlados por sensores pueden mantener los niveles de confort programados.
- Garantizar confort sin esfuerzo: los sistemas de control remoto permite a los usuarios establecer sus propios niveles de confort sin levantarse de sus asientos.
- Ahorrar energía: la iluminación en los edificios comerciales supone entre un 20 y un 30% del consumo total de energía eléctrica.

Para conseguir este objetivo, en el marco de este trabajo final de grado se ha desarrollado un controlador basado en lógica borrosa, que permite tomar las decisiones óptimas en base al uso que se le esté dando a la sala y la iluminación natural entrante.

Para la consecución del objetivo principal se tendrá que llevar a cabo los sub-objetivos que posibilitan este. Como lo son:

- Obtener un alto conocimiento de las reglas y normativas que definen el estado de confort lumínico y su control.
- Repaso por la bibliografía existente sobre las técnicas de control del confort lumínico.
- Obtener un alto conocimiento del control basado en lógica borrosa y la capacidad para poder implementarlo.
- Adecuación de la instalación existente en el edificio para el control del confort: Instalación de sensores y actuadores, y redistribución del control de las luminarias.

- Desarrollo del sistema de adquisición de datos, supervisión y control.
- Desarrollo del modelado de la iluminancia en el interior de la sala.
- Diseño e implementación del controlador basado en lógica borrosa.

1.3 Contexto

El presente Trabajo Fin de Grado (TFG), ha sido realizado en el Centro de Investigaciones de la Energía Solar (CIESOL).

El TFG ha supuesto la realización de un proyecto en la línea de trabajo de modelado y control de procesos industriales, en el que se ha aplicado y desarrollado los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera y se han adquirido otros nuevos. Ha sido realizado de forma individual, bajo la supervisión de los directores asignados.

El proyecto se ha llevado a cabo en el edificio CDdI-CIESOL-ARFRISOL [11], del cual podemos obtener una descripción detallada en el capítulo 3, este edificio está ubicado en el campus de la universidad de Almería (véase figura 1.1), en el cual el control del confort térmico y de calidad del aire está muy avanzado. Sin embargo el control del confort lumínico es un área que no se ha comenzado a estudiar y, por lo tanto, es ahí donde se centra este trabajo.

1.4 Resumen de resultados

Cuando se inicio este proyecto se contaba con una sala donde el control del confort térmico y de calidad del aire estaba desarrollado, pero sobre el confort lumínico no se disponía de sensorización ni por supuesto control. Este proyecto por tanto nace desde cero, donde se ha tenido que asimilar y poner en práctica gran cantidad de conceptos para poder llevarlo a cabo.



Figura 1.1. Edificio C-DdI-CIESOL-ARFRISOL.

Además del diseño del controlador cuyos resultados se resumen a continuación, se ha dotado a la sala de juntas de una nueva distribución de las luminarias para hacer más eficiente el control de las mismas, y se han instalado los sensores y actuadores de las luminarias con sus correspondientes tarjetas de adquisición. También para poder adquirir los datos de los sensores y realizar la actuación sobre las luminarias y persianas se ha diseñado un sistema de adquisición de datos, supervisión y control, con el cual se hace posible implementar el controlador además de proporcionar al usuario de la sala la herramienta para poder interactuar con los actuadores (véase figura 1.2)

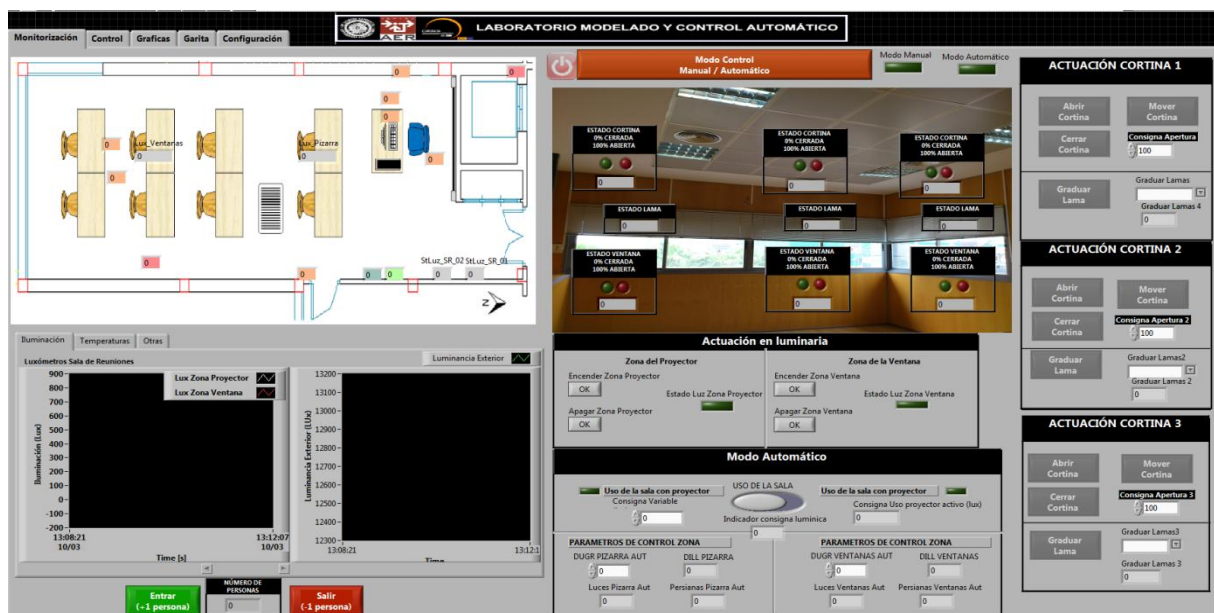


Figura 1.2. SCADA de la sala de juntas.

Por parte de la obtención del modelo y diseño del controlador se presentan en este proyecto resultados muy interesantes, no obstante existe la limitación del tiempo, por lo que los resultados que se muestran a lo largo del TFG se han obtenido principalmente durante los meses de verano quedando para futuros trabajos la validación de los modelos y las técnica de control desarrollada en otras épocas del año.

Dentro del modelado de la iluminación en el interior de una habitación se han obtenido modelos para la iluminación artificial utilizando un software de propósito específico, DIALux y modelos de influencia de la iluminación natural, los cuales diferencian entre distintas franjas horarias. Para el posterior control, en la fase de modelado se han definido 6 estados dependientes de las posiciones de las persianas, esto ha permitido obtener la influencia de la posición de dichas persianas en el nivel de iluminancia interior para un amplio rango.

Por parte del sistema de control, después de un extenso repaso de las diferentes técnicas aplicadas en controlar el confort lumínico, se decide desarrollar un sistema de control basado en lógica difusa, el cual se desarrolla ampliamente en el capítulo 6.

Para este sistema las variables de entrada son la diferencia entre el nivel de iluminación real y el deseado, y la diferencia entre el índice de deslumbramiento unificado real y el deseado, además tendrá constancia del estado en el que se encuentra para poder tomar las decisiones pertinentes a través de la base de reglas. Este control consiste en la obtención mediante los sensores del nivel de iluminación en el interior de la sala (datos reales), el paso mediante el proceso de fuzzificación a unos valores pertenecientes a las funciones de membresía definidas previamente por la experiencia adoptada en el proceso de modelado. La actuación de salida de este sistema será sobre las persianas y luces de la sala, previo paso por el proceso inverso a la fuzzificación (véase figura 1.3).

El controlador hace posible que el usuario de la sala tenga el control total del nivel de iluminación y el índice de deslumbramiento causado por las luminarias. Según los resultados mostrados en el capítulo 6, con el sistema de control se consigue reducir el nivel de iluminancia en el interior, alcanzando 6 niveles. Esto hace posible que se controle la iluminancia interior.

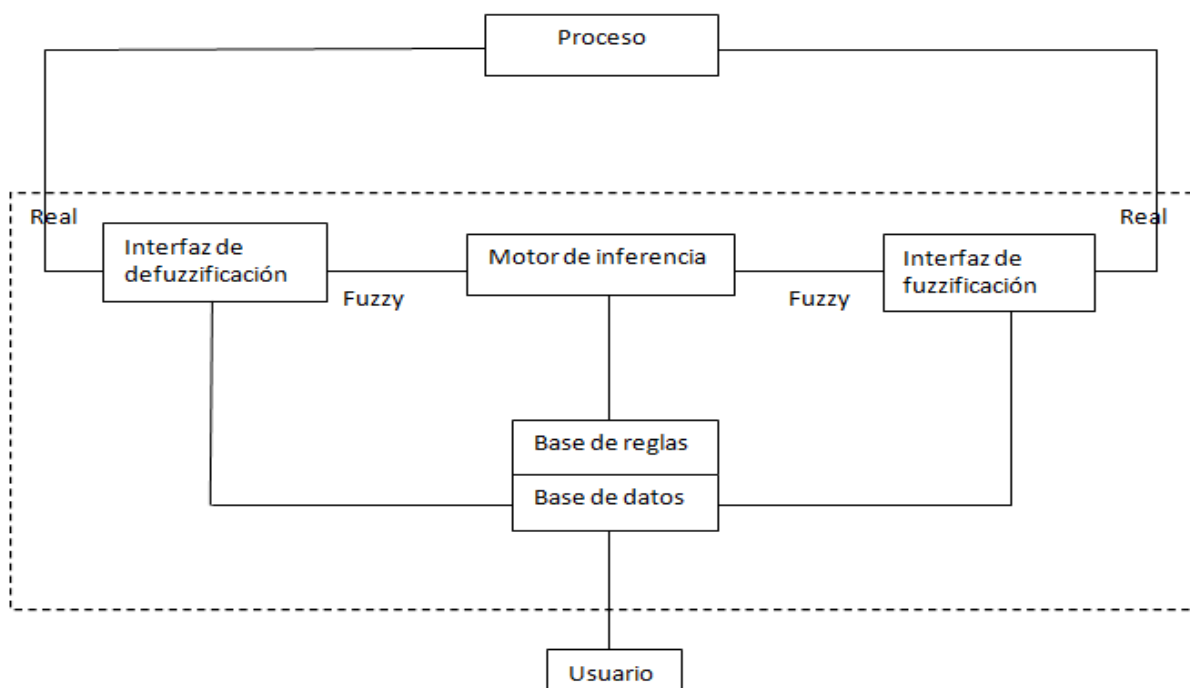


Figura 1.3: Configuración básica del controlador de lógica borrosa [12].

1.5 Programa del proyecto

Este TFG se ha desarrollado a lo largo de 8 meses, desde Febrero hasta Septiembre de 2014. En este apartado se hace una descripción de las principales tareas llevadas a cabo y así como la distribución temporal de las mismas. En la tabla 1.1 se muestra el diagrama de Gantt de la planificación del trabajo que se ha llevado a cabo para la culminación del TFG.

Como se observa, en el primer mes y medio tuvo lugar la búsqueda y asimilación de los conocimientos necesarios para llevar a cabo el resto del proyecto, en ese periodo se busco el significado de confort visual y los parámetros que lo definen y las técnicas de control del confort lumínico existentes. Tras esto se establecieron los objetivos que se pretenden alcanzar, y valorar los métodos de desarrollo e implementación de las solución del problema. En función de esto se decidió los elementos sobre los que se actúa, así como los datos que se deben adquirir, eligiendo el método de control a utilizar.

Una vez sabido los elementos y método de control, en las 6 semanas siguientes se hizo un estudio de mercado sobre las posibles soluciones de distribución de la luminarias de la sala, los actuadores y sensores a colocar, y se llevo a cabo la redistribución de las luminarias con los actuadores y sensores.

En este momento, con todas las luminarias distribuidas en consonancia con los métodos a emplear, los sensores y actuadores colocados, se diseña el SCADA en aproximadamente unas 4 semanas. En la última semana del diseño del SCADA paralelamente se comienza con el diseño definitivo, desarrollo y validación del modelo. Una vez obtenido el modelo se implementa el sistema de tomas de decisiones. En el último mes se realizan las pruebas finales. Las últimas semanas se redacto la memoria a la vez que se desarrollaban las demás tareas.

Los primeros cinco meses de trabajo, debido a que el TFG se compatibilizaba con el seguimiento de las clases, el horario ha sido de 9:00 a 13:00, es decir, 20 semanas de lunes a viernes, 4 horas cada día. Y los tres últimos tres meses más intensos de trabajo, 8 horas de trabajo al día, 10 semanas de lunes a sábado, esto hace un total de 880 horas de trabajo para alcanzar los objetivos de este proyecto.

Tareas	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
Revisión bibliográfica: Confort visual.	■	■						
Revisión bibliográfica: Técnicas de control del confort visual.		■						
Establecimiento de objetivos, estudio de métodos de desarrollo e implementaciones de las soluciones.		■						
Selección de entradas y salidas para el sistema de control.			■					
Estudio de mercado sensores y actuadores, y de la distribución de las luminarias.			■					
Instalación de los sensores y actuadores. Redistribución de las luminarias.			■	■				
Desarrollo del sistema SCADA para la de juntas.				■	■			
Diseño, desarrollo y validación de un modelo de iluminación interior.					■	■	■	
Desarrollo del sistema de toma de decisiones.							■	
Realización de ensayos.							■	■
Documentación del proyecto.						■	■	■

Tabla 1.1: Diagrama de Gantt del trabajo desarrollado en el TFG

1.6 Estructura de la memoria del proyecto

En este apartado se va a comentar la forma en la que la memoria del proyecto está estructurada, resumiendo brevemente el contenido de cada uno de los capítulos que la componen. Este proyecto se encuentra estructurado en siete capítulos donde se profundiza en los aspectos fundamentales que se han desarrollado para cumplir con el objetivo principal del mismo:

- **Capítulo 1:** Realiza una introducción al contenido del proyecto y los principales objetivos del mismo.
- **Capítulo 2:** corresponde con la definición del término confort visual, donde se muestran las normas y estándares que lo definen, y más detalladamente los parámetros que propone el CTE para su definición. También recoge un estado del arte en el modelado y control del confort visual.
- **Capítulo 3:** muestra la descripción de la planta de ensayos, el edificio CDdI-CIESOL-ARFRISOL, y más detallada de la sala de juntas, para los cuales se describe la arquitectura hardware y software de la red de actuadores y sensores.
- **Capítulo 4:** hace referencia al diseño e implementación del Sistema de Control con Supervisión y Adquisición de Datos (SCADA).
- **Capítulo 5:** contiene el modelado de la iluminancia para la sala de juntas, donde se hace mediante un software específico el modelado de las luminarias sin influencia de la iluminación exterior y el modelado de la luz natural con la definición de los estados de las persianas que serán las variables de control en función de las cuales sacaremos la relación entre la iluminancia exterior y la interior.
- **Capítulo 6:** en primer lugar se realiza un estado del arte de los controladores utilizados en el confort visual y después se explica en detalle el controlador basado en lógica difusa. En este capítulo se detallan las especificaciones, el diseño y la implementación del controlador y se muestran los resultados reales obtenidos en el interior de la sala de juntas del edificio CDdI-CIESOL-ARFRISOL.
- **Capítulo 7:** se especifican las conclusiones y los futuros trabajos de este proyecto.
- **Bibliografía:** En este apartado se recoge las referencias a los documentos utilizados para la realización de este proyecto, irán ordenados en orden de aparición y durante la redacción de la memoria se enumeran los textos extraídos de las fuentes a las que se mencionan.

Capítulo 2. Confort Visual

2.1 Definición de confort visual. Estándares y normas

Como se ha mencionado anteriormente, el principal objetivo de este trabajo consiste en aumentar la eficiencia energética en el interior de un edificio manteniendo, al mismo tiempo, unos niveles aceptables de los parámetros que definen el confort visual. Es por ello que se ve imprescindible en primer lugar obtener una visión global del significado de confort visual y eficiencia energética y los parámetros que los definen.

El ser humano percibe la mayor parte de la información a partir del sentido de la vista, por lo que la luz resulta un elemento muy importante, ya que permite distinguir la forma, el color y la perspectiva de los distintos objetos existentes en un determinado entorno [13]. Por lo tanto, el confort visual se puede expresar a través de niveles óptimos de iluminación, luminancia y color [14].

Diferentes instituciones tanto a nivel nacional como internacional se han esforzado en estudiar y regular las condiciones y parámetros que definen el confort visual.

A nivel nacional, en la norma española 'UNE-EN12464-1: 2003. Iluminación. Iluminación de los lugares de trabajo. Parte I: Lugares de trabajo en interiores' se especifican los requisitos para sistemas de iluminación en la mayor parte de los lugares de trabajo en interiores, y por otro lado, en el Código Técnico de la Edificación (CTE) se recogen los métodos de cálculo que hay que utilizar. El CTE considera aceptables los resultados obtenidos mediante el programa informático DIALux, que es el programa con el que, como se mostrará posteriormente, se han realizado los modelos en este trabajo.

Por su parte el gobierno de España a través del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo han sacado una serie de publicaciones en las que se pretende ahondar en el tema de la iluminación abarcando desde las leyes fundamentales de luminotecnia hasta como tomar las mediciones de iluminancias o colocación de las luminarias, en la publicación 'Iluminación en el puesto de trabajo. Criterios para su evaluación y acondicionamiento' [15]. O cuestionarios para evaluar una iluminación ya implantada.

También se ve reflejado en el Boletín Oficial del Estado una serie de recomendaciones sobre la iluminación en los puestos de trabajo como el nivel mínimo de iluminación expresado en Lux, uniformidad, deslumbramiento y otros en función de la zona o parte del lugar de trabajo. Esto queda reflejado en el artículo 8 y

anexo IV del Real Decreto 486/1997, del 14 de Abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo. En el Real Decreto 838/2002, del 2 de Agosto, se establecen los requisitos de eficiencia energética de los balastos de lámparas fluorescentes.

Por otro lado, el grupo de trabajo formado por el Comité Español de Iluminación (CEI) y el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), publican en 2001 la '*Guía Técnica de Eficiencia Energética en Iluminación. Oficinas.*' [16] y en 2005 con la colaboración del Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España (CSCAE) publican la guía titulada '*Guía técnica para el aprovechamiento de la luz natural en la iluminación de edificios*' [17], con el principal objetivo de contribuir a la difusión de técnicas y componentes para la mejora de la eficiencia energética en instalaciones de iluminación mediante la proposición de soluciones avanzadas, de los mercados nacional e internacional, y mostrando aplicaciones relevantes a la actividad a la que cada publicación se dedica.

A nivel internacional destaca el libro '*The lighting handbook*' [18] creado por Illuminating Engineering Society of North America (IESNA) y el la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE) para difundir los conocimientos y proporcionar algunas normas que permitan mejorar el entorno iluminado. La CIE se dedica al intercambio mundial de información sobre todos los asuntos relacionados con la ciencia y la luz, la iluminación, el color y visión, fotobiología y tecnología de imagen. Por otro lado, la IESNA es una autoridad técnica reconocida en la iluminación cuyo principal objetivo ha sido el de comunicar la información sobre todos los aspectos de las buenas prácticas de la iluminación a sus miembros, a la comunidad de la iluminación, y para los consumidores a través de una variedad de programas, publicaciones y servicios. La sociedad ha publicado cerca de 100 publicaciones variadas, incluidas las prácticas recomendadas en una variedad de aplicaciones, guías de diseño, memorandos técnicos y publicaciones sobre gestión de la energía y la medición de la iluminación. La sociedad, además, trabaja en cooperación con organizaciones afines en una variedad de programas y en la producción de documentos y normas públicas de forma conjunta.

2.2 Parámetros de confort visual y eficiencia energética. Código Técnico de la Edificación

El confort visual es un estado generado por la armonía o equilibrio de una elevada cantidad de variables. Las principales están relacionadas con la naturaleza, estabilidad y cantidad de luz, y todo ello en relación con las exigencias visuales de las tareas y en el contexto de los factores personales.

Como se ha mencionado en el apartado anterior, la norma española UNE-EN12464-1 especifica los requisitos para sistemas de iluminación en la mayor parte de los lugares de trabajo de interior, pero es en la Guía Técnica de Eficiencia Energética en Iluminación donde se profundiza en los criterios de calidad y diseño:

2.2.1 Iluminancia y uniformidad

La iluminancia también conocida como nivel de iluminación, E , se expresa en *lux* y se puede definir como la cantidad de luz, en lúmenes, lm , por el área de la superficie en m^2 a la que llega dicha luz.

La cantidad de luz sobre una tarea específica o plano de trabajo, determina la visibilidad de la tarea pues afecta a:

- La agudeza visual.
- La sensibilidad de contraste o capacidad de discriminar diferencias de luminancia y color.
- La eficiencia de acomodación o eficiencia de enfoque sobre las tareas a diferentes distancias.

Cuanto mayor sea la cantidad de luz y hasta un cierto valor máximo (límite de deslumbramiento), mejor será el rendimiento visual.

En principio, la cantidad de luz en el sentido de adaptación del ojo a la tarea debería especificarse en términos de luminancia. La luminancia de una superficie mate es proporcional al producto de la iluminancia o nivel de iluminación sobre dicha superficie.

La iluminancia es una consecuencia directa del alumbrado y la reflectancia constituye una propiedad intrínseca de la tarea. En una oficina pueden estar presentes muchas tareas diferentes con diversas reflectancias, lo que hace muy complicado tanto su estudio previo a la instalación, como sus medidas posteriores. Sin embargo, la iluminancia depende únicamente del sistema de alumbrado y afecta a la visibilidad. En consecuencia, para el alumbrado de oficinas, la cantidad de luz se especifica en términos de iluminancias y normalmente de la iluminancia media (E_{med}) a la altura del plano de trabajo.

Para establecer los valores de la iluminancia media en un plano, (en el caso de este proyecto, el plano sobre el que se estudia este nivel medio es el plano de trabajo de las mesas, es decir, un plano horizontal paralelo al suelo y a una altura de 0,8 m), se puede medir la iluminación en un número determinado de puntos distribuidos simétricamente sobre el plano en cuestión y posteriormente realizar la media aritmética de estas medidas. Más concretamente, el número de puntos a tomar se

establece en función del índice del local, K , un número que representa la geometría del local y que se puede calcular utilizando la ecuación 2.1.

$$K = \frac{L \cdot A}{h \cdot (L + A)} \quad (2.1.)$$

donde L y A son respectivamente la longitud y la anchura del recinto, y h representa la altura de la luminaria sobre el plano de trabajo. En función del valor del índice del local, K , el número mínimo de puntos se establece de acuerdo a las relaciones que se pueden observar en la tabla 2.1.

K	Número de puntos
$K < 1$	4
$1 < K < 2$	9
$2 < K < 3$	16
$K > 3$	25

Tabla 2.1. Relación de puntos a obtener con el parámetro K .

Con ello se pretende asegurar, que no se va a tener una información errónea al hacer el sumatorio de los niveles de iluminación.

Por otro lado, también se pueden encontrar múltiples software de propósito específico como DIALux, que es el que se utiliza en este proyecto, o Radiance. Estos programas son capaces de obtener modelos de iluminancia entre otros en función de la instalación lumínica tanto para interiores como exteriores.

Con el principal objetivo de asegurar que el nivel de alumbrado en un punto concreto del área analizada no sea inferior a cierto valor, debe cumplirse la relación de uniformidad de iluminancia, definida como se puede observar en la ecuación 2.2.

$$U_m = E_{min} / E_{med} \quad (2.2.)$$

En la ecuación anterior, U_m representa la uniformidad media, E_{min} (Lux) la iluminancia mínima E_{med} (Lux) la iluminancia media.

Relaciones de luminancia

Se define la luminancia, L , como el cociente entre la intensidad luminosa procedente de una superficie en una dirección dada en cd y el área aparente de dicha superficie en m^2 . Cuando las superficies son iluminadas, la luminancia depende del nivel de iluminación y de las características de reflexión de la propia superficie.

Más concretamente, cuando el ojo del ser humano explora una cierta tarea, se adapta a la luminancia de la misma. De la misma forma, si el ojo abandona la tarea y mira a un área con un valor de luminancia diferente, deberá adaptarse a ésta. A fin de ser capaz de ver los detalles de la tarea visual con rapidez y exactitud bajo circunstancias prácticas, las diferencias de luminancia dentro del campo de visión no deberán ser excesivamente elevadas (véase tabla 2.2). Sin embargo, al mismo tiempo el entorno visual total en una oficina, deberá ser tal que permita a los músculos del ojo el margen completo de enfoque y apertura. Por esta razón, y para evitar la creación de un entorno monótono, debe existir una variación en las luminancias del campo de visión del trabajador.

Iluminancia de tarea (Lux)	Iluminancia de áreas circundantes inmediatas (Lux)
≥ 750	500
500	300
300	200
≤ 200	E_{tarea}
Uniformidad: $\geq 0,7$	Uniformidad: $\geq 0,5$

Tabla 2.2. Uniformidades y relación entre luminancias de áreas circundantes inmediatas al área de tarea [9].

El confort visual queda afectado negativamente por un exceso de grandes diferencias de la luminancia en grandes zonas del campo de visión. Las investigaciones indican que la incomfortabilidad está asociada a la fatiga producida en los músculos del ojo, los cuales reducen el tamaño de la pupila en presencia de luminancias excesivas, y vuelven a expandirla cuando las luminancias son muy pequeñas.

La necesidad de evitar un exceso de grandes diferencias de luminancia, significa en primer lugar, evitar el deslumbramiento directo e indirecto de las luminarias la cual se tratará con mayor detalle en apartados posteriores. En general, también significa que las luminancias de ventanas deberán limitarse. Finalmente significa que es deseable que se limiten las relaciones de luminancia entre zonas de la oficina, cuando se trate de oficinas de grandes dimensiones. En este sentido, es necesario que los requisitos más severos sean para los alrededores inmediatamente adyacentes a la tarea visual, en lugar de para las superficies más alejadas (paredes opuestas, techos...)

Con el cambio en las actividades de oficinas, de aquellas directamente relacionadas con una tarea visual hacia las del tipo de comunicación, el establecimiento de relaciones de luminancia adecuadas en el entorno total llega a ser más importante [16].

2.2.2 Control de deslumbramiento

El deslumbramiento es la sensación producida por áreas brillantes dentro del campo de visión y puede ser experimentado bien como deslumbramiento molesto o perturbador. El deslumbramiento causado por la reflexiones en superficies especulares es usualmente conocido como reflexiones de velo o deslumbramiento reflejado. Es importante limitar el deslumbramiento para evitar errores, fatiga y accidentes.

En lugares de trabajo interiores, el deslumbramiento molesto puede producirse directamente a partir de luminarias brillantes o ventanas. Si se satisfacen los límites del deslumbramiento molesto, el deslumbramiento perturbador no es usualmente un problema importante [9]. Más concretamente, en el alumbrado de oficinas, el deslumbramiento directo se mantendrá dentro de límites aceptables, si se controla el grado de deslumbramiento molesto.

El índice del deslumbramiento molesto procedente directamente de las luminarias de una instalación de iluminación interior se determina utilizando el método de tabulación del Índice de Deslumbramiento Unificado (UGR, Unified Glare Rating) [16], el cual se puede calcular según la ecuación 2.3.

$$UGR = 8 \log_{10} \left(\frac{0,25}{L_b} \cdot \sum \frac{L^2 \cdot \omega}{p^2} \right) \quad (2.3.)$$

donde

- L_b es la iluminancia de fondo en $cd \cdot m^{-2}$, calculada como $E_{ind} \cdot \pi^{-1}$, en la que E_{ind} es la iluminancia indirecta vertical en el ojo del observador;
- L es la iluminancia de las partes luminosas de cada luminaria en la dirección del ojo del observador en $cd \cdot m^{-2}$;
- ω es el ángulo sólido (estereorradianes) de las partes luminosas de cada luminaria en el ojo del observador;
- p es el índice de posición de Guth para cada luminaria individual que se refiere a su desplazamiento de la línea de visión.

La magnitud de la sensación del deslumbramiento molesto, depende, en principio, del número, posición, luminancia, y tamaño de las fuentes deslumbradoras y de la luminancia a la cual los ojos están adaptados.

En la figura 2.1 se define la zona angular medida a partir de un eje vertical desde la luminaria hacia abajo dentro de la cual es más probable que se produzca deslumbramiento. Para condiciones normales de visión, los ángulos críticos abarcan de 45° a 85° (menos si las dimensiones del local son tales, como para que la luminaria más lejana sea sólo visible bajo un ángulo más pequeño, es lo que puede producirse en oficinas tipo Celda).

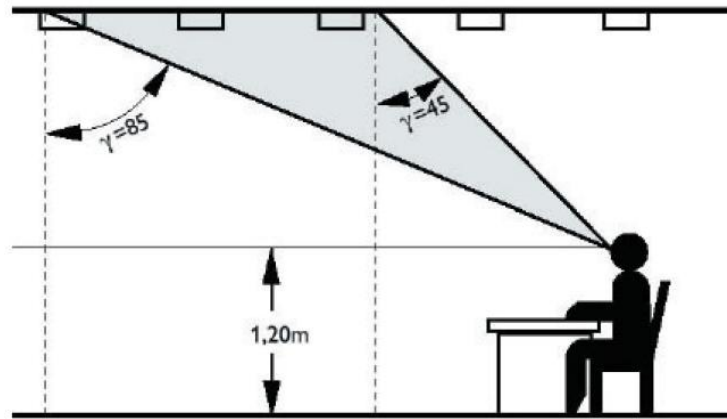


Figura 2.1. Condiciones a satisfacer por las luminarias para la reducción del deslumbramiento molesto [16].

Bajo una serie de circunstancias normalmente presentes en oficinas iluminadas mediante luminarias empotradas o adosadas al techo de forma regular, el deslumbramiento puede limitarse utilizando el Sistema de Curva de luminancia. Este método, se conoce también como el Método Europeo de Limitación del Deslumbramiento o diagrama CIE, facilita límites de luminancia media de las luminarias para diferentes “Clases de Calidad” en limitación de deslumbramiento y en el margen de ángulos críticos mencionados antes (es decir, desde 45° a 85° desde la vertical de la luminaria). En la figura 2.2 se puede observar el diagrama del sistema de curva de iluminancia. Dicho diagrama muestra los límites de luminancia para las diferentes clases de calidad, válido para todas las luminarias sin salida lateral de flujo, tanto para visión longitudinal como transversal. La línea punteada es referida a la curva fotométrica de la luminaria en el plano longitudinal y la continua al plano transversal de la luminaria [16].

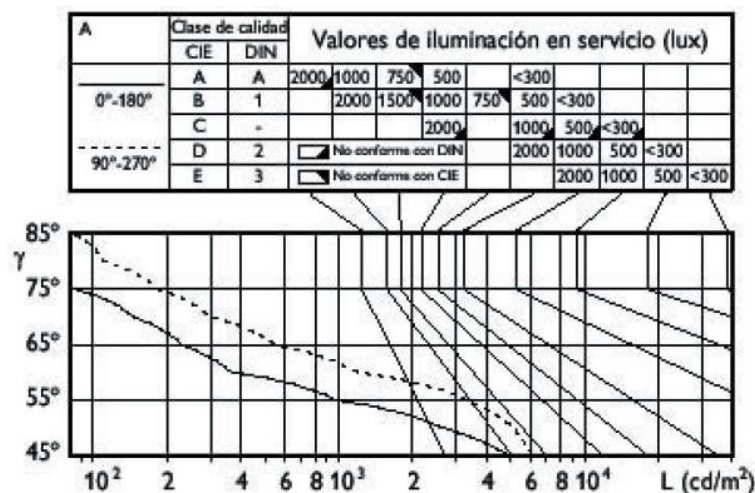


Figura 2.2. Diagrama del Sistema de Curva de Luminancia [16].

El efecto sobre el deslumbramiento, tanto del número de luminarias como de la luminancia de adaptación, está relacionado con la luminancia media sobre el plano de trabajo. En el Sistema de Curvas de Luminancia, dicho efecto se incorpora, especificando para cada Clase de Calidad curvas diferentes de limitación de luminancia y para distintas iluminancias. Para luminarias cuyas lámparas o parte de las mismas sean directamente visibles bajo la gama crítica de ángulos de visión, no sólo deberá limitarse la luminancia media de la luminaria de acuerdo con las curvas del Sistema de Curva de Luminancia, sino que además las lámparas deberán apantallarse adecuadamente. En consecuencia deberán observarse ángulos mínimos de apantallamiento para las diferentes Clases de Calidad de limitación del deslumbramiento.

En el caso en que existan pantallas de ordenador, para no obtener brillos molestos en las mismas, se ha de cumplir que la luminancia sea menor de 200cd en todas las direcciones de las que puedan afectar la pantalla. Las luminarias que cumplen esto para los 360° se denominan de baja luminancia omnidireccional.

Deslumbramiento reflejado y reflexiones de velo

La luz de una fuente luminosa reflejada hacia los ojos de un observador, desde la tarea que contenga una superficie satinada o semimate (como por ejemplo, escritura a mano con lápiz), puede disminuir la visibilidad de la tarea y producir una sensación de incomodidad. Esto es debido a que el deslumbramiento reflejado ensombrece la tarea y reduce el contraste en la misma.

El término técnico utilizado para evaluar la reflexión de velo es el *Factor de Rendimiento de Contraste* (CRF). Éste se define como la relación del contraste de tarea real bajo unas condiciones de alumbrado determinadas y el contraste de tarea (teórico) en un entorno de referencia. El entorno de referencia es una esfera de luminancia uniforme.

El valor CRF para determinadas situaciones de trabajo, depende de las características reflectantes de la tarea, las posiciones de las luminarias en relación a dicha situación y de las características fotométricas de las luminarias. El CIE ha especificado las propiedades de reflexión de una tarea de referencia. Ello ha hecho posible calcular el valor CRF para la tarea de referencia (CRFR) en cada situación de alumbrado y para cada posición de trabajo. Cuanto mayor sea el CRFR resultante, mejores serán la visibilidad y la satisfacción visual.

Debe mencionarse que con luminarias abiertas (y en consecuencia, iluminancias elevadas) un alto valor de CRFR no conduce necesariamente a una situación satisfactoria en cuanto a la supresión de reflexiones de velo.

El deslumbramiento reflejado está influido, en gran medida, por el color y acabado de las superficies que aparecen en el campo de visión del trabajador, por lo que es recomendable que todas las superficies (del local y mobiliario) dispongan de un acabado mate que evite los reflejos molestos [16].

2.2.3 Modelado y sombras

La capacidad del alumbrado para revelar forma y textura, es decir su capacidad de modelado, es importante en la creación de una impresión global agradable especialmente para las personas. Ello puede conseguirse cuando la luz incide más en una dirección que en otra. Sin embargo, si este efecto direccional es demasiado fuerte, ocasionará sombras confusas e incluso quizá impida la visibilidad, especialmente, si tales sombras se producen en la propia tarea visual. Por lo tanto, procurar un buen modelado es especialmente importante con tareas de oficina que impliquen comunicación entre personas.

Cuando la luz viene demasiado difusa, el modelado es ligero y se obtiene una sensación de falta de relieve. Por otro lado, si la componente direccional es muy fuerte, el modelado es duro y las sombras deforman los rasgos característicos de las personas.

Finamente, se obtiene un modelado aceptable cuando la relación entre iluminancia vertical y horizontal es superior a 0'25 en las principales direcciones visuales del observador o posibles observadores [16].

2.2.4 Propiedad de Color

La gente responde a los colores que ve a su alrededor. En aquellas oficinas en las que los trabajadores permanecen expuestos a un determinado ambiente durante largos periodos de tiempo, el color de dicho ambiente puede influir en su rendimiento y es seguro que tiene algún efecto sobre el grado de satisfacción visual experimentado. El esquema de color de una oficina, es decir los colores de los muebles y del techo y paredes, está influenciado en gran medida por las características de color de las fuentes de luz utilizadas. Debemos distinguir dos importantes aspectos de las propiedades cromáticas de las fuentes de luz:

- La apariencia de color de una fuente de luz ó Temperatura de Color (T_{CP}), es la impresión de color recibida cuando miramos a la propia luz.

- El rendimiento en color de la fuente de luz, es la capacidad de la luz para reproducir con fidelidad los colores de los objetos que ilumina.

Tanto la apariencia como el rendimiento de color de una fuente de luz son completamente dependientes de la distribución espectral de la luz emitida. Una indicación de la apariencia de color puede obtenerse a partir de su temperatura de color. Cuanto más baja sea la temperatura de color, más “cálida” será la luz, y cuanto más alta sea, más azulada o “fría” será la luz que nos proporciona esa fuente.

Por lo tanto, si la Temperatura de Color es inferior a 3.300K diremos que es una fuente de luz cálida, si se encuentra entre 3.300 y 5.000K diremos que se trata de un blanco neutro, y si está por encima de 5.000K la luz proporcionada por esa fuente será blanco frío (véase la tabla 2.3).

Apariencia de color	Temperatura de color correlacionada T_{CP} K
Cálida	Inferior a 3300 K
Intermedia	De 3300 K a 5300 K
Fría	Superior a 5300 K

Tabla 2.3. Grupos de apariencia de color de lámparas.

Por otro lado, las propiedades de rendimiento en color de una fuente de luz puede indicarse por el Índice de *Rendimiento en Color* (R_a), índice que puede variar entre 0 y 100, tal que, cuanto mayor sea significa que mayor será la veracidad con que percibiremos todos los colores que ilumine la fuente de luz y cuanto menor sea, significa que habrá mayor número de colores que no será capaz de reproducir adecuadamente [16].

2.2.5 Ergonomía del puesto de trabajo

Desde el punto de vista ergonómico, la instalación de alumbrado debe satisfacer una serie de aspectos que hagan de la actividad a desarrollar por el observador una tarea cómoda, es decir:

- No debe crear problemas de adaptación visual.
- Debe proveer la agudeza visual adecuada.
- Debe proveer a la tarea visual de un rendimiento y satisfacción visual.
- Debe limitar la producción de ruido.
- Debe eliminar el efecto estroboscópico.
- Debe generar al recinto iluminado poca carga térmica [16].

En la tabla 2.4 se muestra los niveles de iluminancia sobre el plano de trabajo, el índice de deslumbramiento unificado y el rendimiento de colores para el tipo de actividad que se realiza.

Tipo de interior, tarea y actividad.	\overline{E}_{med} [Lux]	UGR _L	R _a	Observaciones
Archivos, copias, etc.	300	19	80	
Escritura, escritura a máquina, lectura, tratamiento de datos.	500	19	80	Trabajo en equipo con pantalla de visualización (EPV).
Dibujo técnico	750	16	80	
Puestos de trabajo de CAD.	500	19	80	Trabajo en EPV.
Salas de conferencias y reuniones.	500	19	80	La iluminación debería ser controlable.
Mostrador de recepción.	300	22	80	
Archivos	200	25	80	
Exposición	300	22	80	

Tabla 2.4. Requisitos de iluminación para (áreas) interiores, tareas y actividades. Oficinas [9].

Por último con respecto a la eficiencia energética el Código Técnico de la Edificación propone unos parámetros que estiman el mantenimiento que requiere la instalación y si es eficiente:

- *Factor de mantenimiento (F_m)* es una medida de la disminución que sufre el flujo luminoso emitido por la luminaria con el paso del tiempo:

$$F_m = \frac{E_{med}}{E_{inicial}} \quad (2.4)$$

Siendo E_{med} iluminancia media sobre el plano de trabajo después de un cierto periodo de uso de una instalación, y $E_{inicial}$ iluminancia media obtenida bajo la misma condición para la instalación considerada como nueva.

- *Eficiencia energética de la instalación (VEEI)*: Valor que mide la eficiencia energética de una instalación de iluminación de una zona de actividad diferenciada.

$$VEEI = \frac{P \cdot 100}{S \cdot E_{med}} \quad (2.5)$$

Donde la P es la potencia de la lámpara mas el equipo auxiliar en Watios y S la superficie iluminada (m^2).

2.3 Estado del arte en el modelado y control del confort visual

En este apartado, se realiza un estudio de los trabajos más destacados que se pueden en la bibliografía y que han sido utilizados como base para desarrollar este Trabajo Final de Grado. Más concretamente para cada uno de ellos, se hace hincapié en los índices que utiliza para el control del confort visual y las técnicas de modelado y control del mismo. Dicho estudio se puede observar en la tabla 2.5.

AUTORES	INDICES DE CONTROL	MODELADO	TECNICAS DE CONTROL	REFERENCIA
A. I. Dounis, M. J. Santamouris y C. C. Lefas	<ul style="list-style-type: none"> •Índice de deslumbramiento. •Luminancia superficial. •Iluminación. •Luminancia media de la ventana. 	Conjunto de técnicas de modelado borrosas mediante Ecuaciones diferenciales. Sistema multivariable borroso.	Controlador de lógica borrosa	[12]
F. Linhart, y J. L. Scartezini	<ul style="list-style-type: none"> •Densidad de potencia de iluminación (LPD) •Luminancia •Distribución g_1 •Eficiencia óptica luminaria •Densidad de potencia normalizada •Índice de deslumbramiento unificado •Agudeza visual (AV) •Logaritmo MAR. $AV = \log MAR$ 	Realización de un test en dos condiciones de iluminación diferentes.		[19]
M. Fischer, K. Wu y P. Agathoklis.	<ul style="list-style-type: none"> •Luminancia. 	Modelo basado Matriz de funciones de transferencia. Construcción del modelo a partir de la superposición de las salidas de las diferentes fuentes de iluminación. Ensayo con iluminación natural nula.	Control de la iluminación basado en el modelo de iluminación inteligente. Técnica de aprendizaje supervisado-Nivel bajo. Decisión de redes Bayesianas- Nivel alto. Arquitectura abierta. Lazo abierto División en distritos en función de las fuentes de luz controlables-Grados de libertad 'Backoff Search'.	[20]

Tabla 2.5. Descripción de los trabajos sobre el confort visual.

AUTORES	INDICES DE CONTROL	MODELADO	TECNICAS DE CONTROL	REFERENCIA
C. E. Ochoa y I. G. Capeluto.	<ul style="list-style-type: none"> •Iluminancia. •Índice de deslumbramiento por luz natural. 	Modelo de Radiance, programa específico.	—	[21]
C. E. Ochoa, M. B. C. Aries, E. J. van Loenen, J. L. M. Hensen.	<ul style="list-style-type: none"> •Relación ventana-pared •Factor de luz natural. •Autonomía de luz natural. •Autonomía de luz natural continua. •Índice de deslumbramiento. •Ratio de deslumbramiento unificado. •Índice de deslumbramiento por luz natural. •Consumo de energía. •Criterio de deslumbramiento, uniformidad e iluminancia. 	No se detalla ni modelo ni controlador. Se hace un estudio y simulación de cómo afecta el tamaño de las ventanas en el confort visual y térmico, y la optimización de la relación de ambos.		[22]
W. K. Osterhaus	<ul style="list-style-type: none"> •Niveles de luminancia de luz natural. •Sistema de índices de deslumbramiento británico. •Ratio de deslumbramiento unificado. •Brillo percibido. •Luminancia. •Relación brillo percibido y luminancia. 	<ul style="list-style-type: none"> •Modelo/ecuación del deslumbramiento. •Método Americano de Probabilidad de Confort Lumínico. •Método Europeo del límite de deslumbramiento. 	—	[23]
K-W Park y A. K. Athienitis.	<ul style="list-style-type: none"> •Ratio de iluminancia. •Factor de correlación. •Ángulo perfil. •Iluminancia en la superficie enfrente de la pared donde está el sensor •Iluminancia en el área de trabajo. •Factor de visión. •Luminosidad existente inicial. •Factor de transferencia de lumínico. •Ángulo de altitud solar •Ángulo de inclinación de la persiana. 	<ul style="list-style-type: none"> •Método de factor de iluminación. •Modelo del ratio de iluminación. •Modelos de matrices que relacionan entradas y sus efectos. 	Control predictivo basado en el modelo.	[24]
L. Bellia, A. Cesarano, G. F. Iuliano, G. Spada.	<ul style="list-style-type: none"> •Probabilidad de confort visual. •Ratio de deslumbramiento unificado. •Índice de deslumbramiento de luz natural. 	Ecuación del índice de deslumbramiento y relación con los demás índices.	—	[25]

Tabla 2.5. Descripción de los trabajos sobre el confort visual (continuación).

AUTORES	INDICES DE CONTROL	MODELADO	TECNICAS DE CONTROL	REFERENCIA
V. Congradac, M. Prica, M. Paspalj, D. Bojanic, D. Capko	_____	Modelo mediante ecuaciones de la ganancia solar, ganancia térmica, luz artificial, y del ángulo de las lamas de la persiana. Utilización de un diagrama de lenguaje de modelado unificado.	Optimización por algoritmo genético y lógica difusa.	[26]
A. H. Fakra, F. Miranville, H. Boyer, S. Guichard.	<ul style="list-style-type: none"> •Factor de iluminación natural. •Componente reflejada del exterior. •Iluminación difusa en el interior. •Iluminación directa en el interior. •Iluminación directa del sol. •Iluminación difusa del exterior. •Coeficiente de transmisión de la luz natural de el cristal. •Componente de reflexión interna. •Factor de corrección de ventanas sucias. •Coeficiente de actividad del lugar de estudio. •Coeficiente de transmisión del vidrio. 	CODYRUN: Software de simulación de modelos de interior. Modelo simplificado resultante de la combinación de múltiples modelos más sencillos.	_____	[27]
M. Velds	<ul style="list-style-type: none"> •Nivel de iluminación. •Deslumbramiento molesto. •Iluminancia vertical. 		Controlador proporcionado por Luxmate [28].	[29]
W. R. Ryckaert, C. Lootens, J. Geldof, P. Hanselaer.	•Densidad de potencia normalizada.	Ecuaciones que relacionan potencias consumidas con iluminación.		[30]
V. D. Čongradac, B. M., Bosko Jovan M. Velickovic, y Bogdan V. Prebiracevic.		Modelado de las componentes de la iluminación mediante ecuaciones. Sistema multivariable.	Algoritmo genético. Iteraciones.	[31]
M. Leclercq, E. Arnal, C. Anthierens, E. Bideaux.	<ul style="list-style-type: none"> •Baricentro lumínico. •Nivel de iluminación. 	Iluminancia interior a través de las persianas venecianas.	Control en bucle abierto y bucle cerrado.	[32]

Tabla 2.5. Descripción de los trabajos sobre el confort visual (continuación).

Capítulo 3. Descripción de la planta de ensayos

3.1 Descripción del edificio CIESOL

El C-Ddl-CIESOL-ARFRISOL (Centro de Investigación de Energía Solar), véase figura 3.1, está localizado en el campus de la Universidad de Almería. Con una superficie total de 1071,92 m², está dividido en dos plantas. Más detalladamente, véase figura 3.2, este C-Ddl está formado por seis despachos, todos con orientación este, situados en la planta baja del C-Ddl a excepción del despacho de dirección situado en la planta alta, un total de ocho laboratorios orientados al norte (cuatro en la planta baja dedicados a 'Química Solar' y cuatro en la planta superior, dos de 'Modelado y Control Automático' y otros dos de 'Recursos Energéticos Solares y Climatología'), una nave-taller, donde se encuentra una caldera de alta eficiencia y una máquina de absorción y otras estancias para el personal del centro, como la cocina y los aseos.



Figura 3.1. Vista exterior del C-Ddl-CIESOL-ARFRISOL.

El edificio fue construido siguiendo diversos criterios de arquitectura bioclimática, como el uso de un sistema de calefacción-refrigeración (HVAC acrónimo del inglés Heating, Ventilation and Air Conditioning) basado en frío solar [33]. Este sistema usa un campo de colectores solares planos, un sistema de almacenamiento de agua caliente, una caldera y una máquina de absorción con su torre de refrigeración para producir aire caliente o frío, dependiendo de las necesidades, utilizando casi exclusivamente energía solar. Además el cerramiento del C-Ddl-CIESOL-ARFRISOL es distinto en función de la orientación, por ejemplo, en las fachadas norte y oeste el cerramiento está compuesto por chapa ondulada en la parte exterior, aislamiento y un bloque de termo arcilla, el cual proporciona un mayor aislamiento que los materiales que se usan habitualmente. Por otro lado, en las fachadas sur y este el cerramiento consiste en una fachada ventilada con revestimiento exterior cerámico, cámara de aire, aislamiento de poliuretano y un muro interior de alta inercia térmica. Este tipo de cerramientos de elevada inercia térmica interior combinados con el uso apropiado de un aislamiento térmico producen un retardo en las condiciones interiores respecto de las exteriores, además de amortiguar las oscilaciones diarias de temperatura en el interior del edificio.



Figura 3.2. Esquema de la planta alta (figura superior) y baja (figura inferior) del edificio C-Ddl-CIESOL-ARFRISOL.

Otra de las estrategias utilizadas es el retranqueo de las ventanas que están orientadas al sur y al este para evitar la incidencia directa de la radiación solar en los meses más calurosos y permitir la entrada de radiación en los meses de invierno, véase figura 3.3. Además la cubierta esta sombreada de dos formas distintas para evitar la incidencia de la radiación solar de forma directa.

Como se puede observar, el CDdI-CIESOL-ARFRISOL cuenta con una serie de estrategias pasivas, que permiten aprovechar al máximo las características ambientales del emplazamiento del edificio, y otras activas que hacen uso de energías renovables, como por ejemplo el sistema de climatización basado en frío solar. A continuación, se va a realizar una breve descripción de las principales estrategias presentes en este edificio.



Figura 3.3. Retranqueo de las ventanas orientadas al sur y al este del edificio CDdI-CIESOL-ARFRISOL.

Cerramientos del edificio

Uno de los factores más importantes a la hora del diseño y construcción de un edificio es su cerramiento, ya que es a través del mismo dónde se realiza el proceso de captación solar. En general, en un edificio se pueden considerar dos tipos de cerramientos: acristalados y opacos.

El primero de ellos, es el elemento a través del cual tiene más influencia el proceso de captación solar y por lo tanto el responsable de la mayor parte de las ganancias solares [34]. Por lo tanto, el diseño de los cerramientos acristalados es vital tanto a nivel preventivo (selección de la orientación correcta) como a nivel correctivo (selección del tipo de vidrio correcto). En el caso del CDdi-CIESOL-ARFRISOL se seleccionaron tanto vidrios dobles termoacústicos tipo *climalit* [35] como vidrios de seguridad, con carpintería de aluminio.

Por otro lado, y al contrario de lo que ocurre con los cerramientos acristalados, el flujo de calor a través de un cerramiento opaco no es instantáneo ya que llega al interior con una cierta amortiguación y desfase de tiempo. En el CDdi-CIESOL-ARFRISOL se optó por distintos tipos de cerramientos exteriores en función de su orientación y su uso. Más concretamente, el cerramiento de las fachadas sur y este consiste en una fachada ventilada que está compuesta por una citara de ladrillo perforado, aislamiento de poliuretano proyectado de 3 cm, una cámara de aire y un aplacado de cerámica compacta [35]. Por otra parte, el cerramiento de la zona de la nave y la fachada norte está formado por un bloque de termoarcilla de 20 cm de espesor, un aislamiento de poliuretano proyectado de 3 cm y un revestimiento de chapa ondulada de acero galvanizado [35], véase figura 3.4.



Figura 3.4. Cerramiento exterior del CDdi-CIESOL-ARFRISOL.

Sombreamientos

El lugar donde se encuentra ubicado el edificio está caracterizado por un clima mediterráneo semidesértico. Para amortiguar la influencia de la radiación solar en el interior se utilizan dos tipos de sombreadamiento: exteriores e interiores.

Los primeros, evitan la incidencia de la radiación solar sobre el interior del edificio antes de su paso por el acristalamiento, como por ejemplo, voladizos, cubiertas vegetales, etc. Por otro lado, las protecciones interiores son aquellas que amortiguan la radiación solar una vez que ésta ha atravesado el cristal, como por ejemplo, persianas, cortinas, etc.

En el caso del CDdI-CIESOL-ARFRISOL, se han instalado en todas las ventanas de las fachadas sur y este unas persianas regulables tanto en altura como en orientación. Además, se ha sombreado la cubierta de la nave y de los laboratorios con orientación norte mediante la instalación de paneles solares térmicos para la instalación de frío solar, y fotovoltaicos para la producción de energía, véase figura 3.5.



Figura 3.5. Sombreamiento de la cubierta exterior del CDdI-CIESOL-ARFRISOL.

Ventilación natural

En el caso del edificio donde se ha realizado este proyecto, se ha adoptado una estrategia de ventilación cruzada (originada por las fuerzas del viento) para el acondicionamiento pasivo de la nave durante los meses más calurosos. La ventilación cruzada se consigue mediante la apertura de rejillas en los portones situados en el sur de la nave y en la cara opuesta superior, orientada a norte. Con ello, se pretende refrigerar la nave aprovechando la orientación sur-norte y la configuración de la cubierta inclinada [36].

Instalación de frío solar

El CDdl-CIESOL-ARFRISOL dispone de un sistema activo de climatización basado en energía solar compuesto de un campo de colectores solares, un sistema de acumulación-almacenamiento de agua caliente, una caldera y una máquina de absorción, con su torre de refrigeración, con una potencia de 70 kW de frío, véase figura 3.6.



Figura 3.6. Instalación de frío sola: Máquina de absorción y acumuladores.

Por otro lado, en la figura 3.7 se puede observar el esquema de la planta, donde se destacan tres circuitos principales: El primario (a la izquierda), que es el encargado de proveer la energía necesaria para el sistema de aire acondicionado. El secundario (a la derecha), que es el responsable de llevar el agua fría (en verano) o caliente (en invierno) a los fancoils. Por último, hay un tercer circuito auxiliar (arriba) que conecta la máquina de absorción con la torre de refrigeración.

En condiciones ideales el sistema presenta el siguiente comportamiento [36]: el agua atraviesa los colectores solares, aumentando su temperatura. Este agua caliente entra a la máquina de absorción, que enfría el agua de salida lo suficiente para que, tras inyectarse al sistema de aire acondicionado, se cubran las necesidades de temperatura del conjunto de salas desde donde se esté demandando este servicio.

Por otro lado, y en función de las condiciones climatológicas, puede resultar imposible calentar el agua tanto como se necesita para que la máquina de absorción sea capaz de enfriar el agua a la temperatura de salida, utilizando sólo los colectores solares. Por este motivo, el sistema necesita apoyarse en otros medios para garantizar el servicio en cualquier momento, lo que justifica la inclusión de unos acumuladores y una caldera. Los acumuladores, que son dos tanques de 5000 litros cada uno, se encuentran aislados térmicamente para que no se pierda el calor del agua almacenada, y de esta forma, cuando el sistema está ocioso y la radiación aun se puede aprovechar, se almacena el agua caliente que se genera con los colectores solares en estos tanques. Finalmente, la caldera aporta la potencia necesaria para poder dar servicio a los usuarios del sistema de aire acondicionado bajo cualquier condición meteorológica, pero el objetivo de los sistemas de frío solar es minimizar el uso de esta energía auxiliar. Se puede utilizar sola o calentando hasta la temperatura necesaria el agua proveniente de los acumuladores o de los colectores solares.

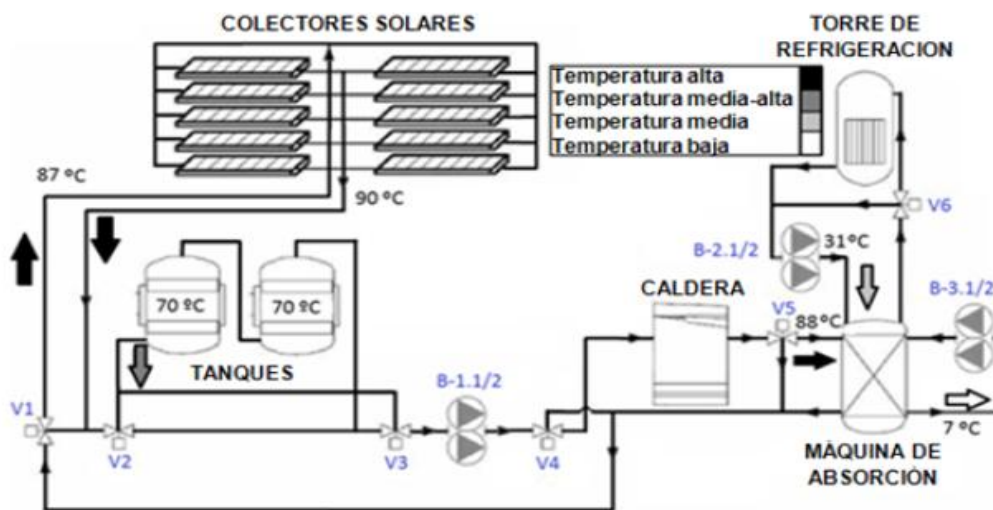


Figura 3.7. Esquema de principio de la planta de frío solar [36].

3.2 Descripción de la sala de juntas

Como se puede observar en la figura 3.8, la sala de juntas está ubicada en la primera planta con orientación sur. Esto será determinante en el desarrollo de este trabajo, tanto la localización como el espacio temporal en el cual se ha desarrollado. El suelo está compuesto de parqué laminado flotante en madera de haya sobre espuma de polietileno y pasta niveladora, las paredes y puertas de paso al pasillo y al despacho de dirección son de madera laminada.

Esta sala tiene un área de 67,87 m² y un perímetro de 40,70 m, cuenta con espacio previo al grueso de la sala de 2,13 m de largo y 1,50 m de ancho, y la parte útil de la sala tiene un largo de 13,37 m y 5 m de ancho.



Figura 3.8. Sala de juntas.

Siguiendo con la descripción interna de la sala cabe destacar que se puede seccionar en dos zonas, ya que existe una zona con una altura de 2,80 m, situada cerca de la entrada y la pizarra, y una segunda con una altura de 2,95 m situada al final de la sala, junto a las ventanas, esta diferencia se debe a la existencia de un falso techo por donde pasa el cableado de la instalación a diferentes alturas. De aquí en adelante la zona cercana a la puerta del pasillo se denominará como '*zona proyector*' ya que es ahí donde está colocado el proyector y la pizarra, y la segunda zona se llamará '*zona ventanas*' (véase figura 3.9). Esta división ha resultado de gran interés como se mostrará en apartados siguientes, ya que tendrán características diferentes de iluminación.

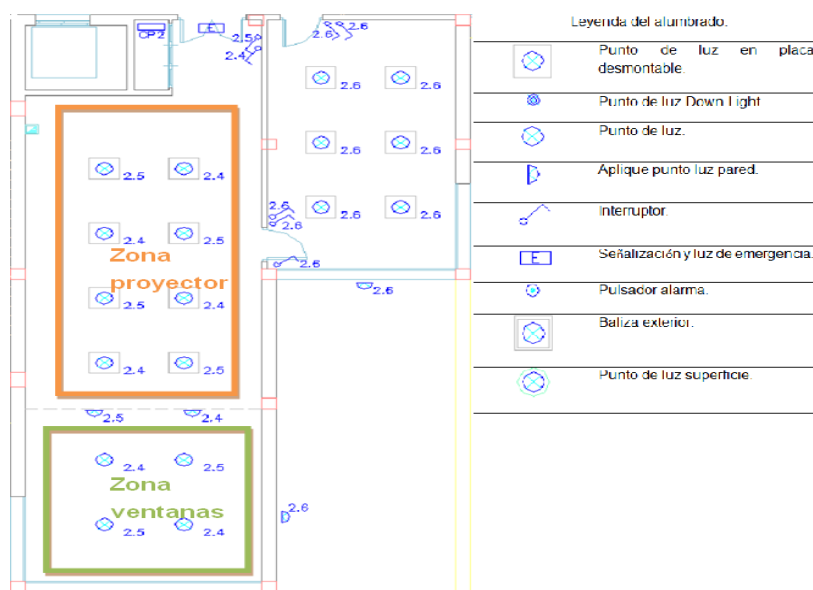


Figura 3.9. Disposición del alumbrado en la sala de juntas.

Una vez expuestas las dimensiones y zonas de trabajo de la sala de juntas se puede calcular el número de puntos en los que se debe obtener la iluminancia a la hora de obtener un modelo según lo expuesto en el capítulo 2.

$$K = \frac{L \cdot A}{h \cdot (L + A)} = \frac{13,37 \cdot 5}{2 \cdot (13,5 + 5)} = 1,82 \quad (3.1)$$

$2 < K < 3$ número de puntos = 16

Para realizar los cálculos del índice que determina el número de puntos utilizados se ha cogido una altura de las luminarias con respecto del plano de trabajo de unos 2 m ya que es un valor intermedio de las dos zonas existentes en la sala, y la diferencia es despreciable, el largo y ancho son los de la zona útil.

La norma, como se indicó en el capítulo anterior, dice que para las dimensiones de esta sala se deben obtener la luminancia de 16 puntos para que sean veraces los cálculos para obtener la luminancia media. No obstante, como se muestra en los capítulos siguientes mediante el software de propósito específico utilizado para modelar la luz artificial se obtiene la luminancia media de las luminarias en la sala con más puntos de los mínimos recomendados por la norma.

Si las dimensiones de la sala y su descripción interna (materiales, uso, mobiliario, etc.) son importantes, más aún lo son las ventanas y luminarias, que son las fuentes de luz directas para la sala, tanto natural como artificial:

Descripción del sistema de iluminación

Como se ha mencionado anteriormente, para la optimización de la energía, se han considerado dos zonas dentro la sala, una más alejada de las ventanas que la otra, por lo que tienen necesidades diferentes de luz artificial. Como es lógico, la zona del proyector necesita un aporte lumínico artificial mayor que la zona de las ventanas, es por esto que dicha zona cuenta con 8 montajes de iluminación y la zona cercana a las ventanas con 4.

Más concretamente, los puntos de luz son montajes empotrados en el falso techo, cada uno cuenta con 4 fluorescentes TL-D 18W/54-765 de la marca Philips, en la tabla 3.2 se muestran las principales características de los fluorescentes. Además, las lámparas fluorescentes se caracterizan por tener una reproducción cromática moderada ($R_a < 60$ ó 70), al igual que su eficacia luminosa ($> 30\%$) y un contenido en mercurio de 8 mg. Estas luminarias no cumple el Código Técnico de la Edificación (CTE).

La distribución de las luminarias en la zona proyector sigue una formación rectangular de 5,4 m de largo y 3 m de ancho, colocadas a lo largo del rectángulo. Por su parte, la zona ventanas cuenta con cuatro montajes de las mismas características, coladas formando otro rectángulo de 3,75 m de largo y 3 m de ancho, colocadas en este caso en el ancho de dicho rectángulo. En la figura 3.9 se puede observar la distribución de las luminarias en la sala de juntas y en el despacho de dirección.

Lámpara	Casco	Flujo Luminoso (Lm)	Eficacia (lm/W)	T de color (K)	I.R.C.	Clase	Vida media (h)		Vida útil (h)	
							EEM Inducido	HF-P	EEM Inducido	HF-P
TL-D 18W/54-765	G13	1050	58	6200	>70	B	13000	20000	6000	7000

Tabla 3.1. Características de los fluorescente PHILIPS TL-D ESTANDAR Ø 26 mm

Como se explica en el capítulo 2 con

$$VEEI = \frac{P \cdot 100}{S \cdot E_{med}} = \frac{864 \cdot 100}{67,87 \cdot 368} = 3,46 \left[\frac{W}{m^2 \cdot lux} \right] \quad (3.2)$$

La sala cuenta con dos interruptores que permiten el encendido y apagado de las luminarias de las zonas antes citadas. Además se ha instalado para este proyecto dos relés que proporcionan la realimentación sobre el estado de las luminarias.

Con respecto a las ventanas cabe destacar que esta sala tiene orientación sur, contando con dos ventanas con orientación sur y una ventana con orientación oeste. Todas ellas cuentan con un retranqueo que evita que en los meses de verano la radiación directa incida a través de las ventanas al interior de la sala. Además, cada ventana cuenta con una persiana veneciana regulable en altura y orientación, que se puede controlar a través de un motor de corriente continua.

Las ventanas (véase figura 3.10) están situadas a una altura de 1,18 m del suelo y sus dimensiones son 2,34 m de largo y 1 m de alto.

Finalmente, es necesario destacar que esta sala, como su nombre bien indica, se usa principalmente para reuniones y exposiciones, donde el trabajo en papel y ordenador es muy frecuente, si bien se puede acceder a ella mediante reserva previa a lo largo de todo el día, es por la mañana cuando más se suele utilizar.



Figura 3.10. Vista de las tres ventanas de la sala de juntas.

3.3 Descripción de la arquitectura hardware y software de la red de actuadores y sensores

Para satisfacer los objetivos para los que se ha diseñado este edificio es necesario disponer de una amplia red de sensores y actuadores, y de un sistema de medida y adquisición de los datos adecuado. La disponibilidad de dichos datos permite comprender el funcionamiento de cada una de las estrategias bioclimáticas que incorpora este edificio, así como el ahorro energético y la disminución de las emisiones de CO₂ que se consiguen con las mismas.

En este apartado se va a realizar un resumen de la red de transmisión contenida, sus características y su distribución por el edificio y más concretamente en la nueva instalación que se ha realizado en la sala de juntas en el marco de este trabajo final de grado. Además, también se incluye una descripción general de los principales sensores y actuadores que se encuentran actualmente instalados en el CDdI-CIESOL-ARFRISOL haciendo una clasificación en función de su ubicación y funcionalidad.

Remarcar que la instalación de sensores y actuadores para desarrollar el control del confort lumínico han sido instalados para satisfacer las necesidades de este proyecto.

3.3.1 Descripción de la arquitectura hardware y software de la red de actuadores y sensores para el edificio

Bus/red de transmisión

Uno de los puntos más importantes en un edificio con estas características cuando se diseña una red de sensores y actuadores apropiada es seleccionar el tipo de tecnología de comunicación (red/bus) a utilizar para comunicarse con los mismos. Para ello, cuenta con una alternativa cableada como lo es TCP/IP a través de Ethernet, ya que cumple las necesidades de escalabilidad, transferencia y seguridad. Por otro lado, presenta una precisión muy alta en la adquisición de información procedente de los sensores.

Además, cuenta con la herramienta de desarrollo LabVIEW®, como tecnología de adquisición, que es la más apropiada en función del medio, y la que mas especificaciones cumple. La parte física de la adquisición de datos se realiza mediante módulos Compact FieldPoint (cFP) de National Instrument que son una plataforma industrial embebida que combinan las mejores características de un ordenador con la fiabilidad, robustez y naturaleza distribuida de los autómatas programables [37].

Finalmente, y en función de las necesidades de medida en el edificio, se han distribuido físicamente una serie de módulos de adquisición mediante una red Ethernet industrial. Más concretamente, el plano interior del edificio se ha dividido en zonas, véase figura 3.11 de forma que se han considerado pequeños núcleos de medición, cada uno de los cuales conecta el conjunto de sensores a la red Ethernet para que estén disponibles desde el centro de adquisición y monitorización.

Sensores. Descripción y localización

El CDdI-CIESOL-ARFRISOL contiene una amplia red de sensores que se encuentran distribuidos por todo el edificio. Más concretamente, se pueden considerar cuatro grandes bloques, agrupados en función de los aspectos específicos que se desean estudiar con cada uno de ellos.

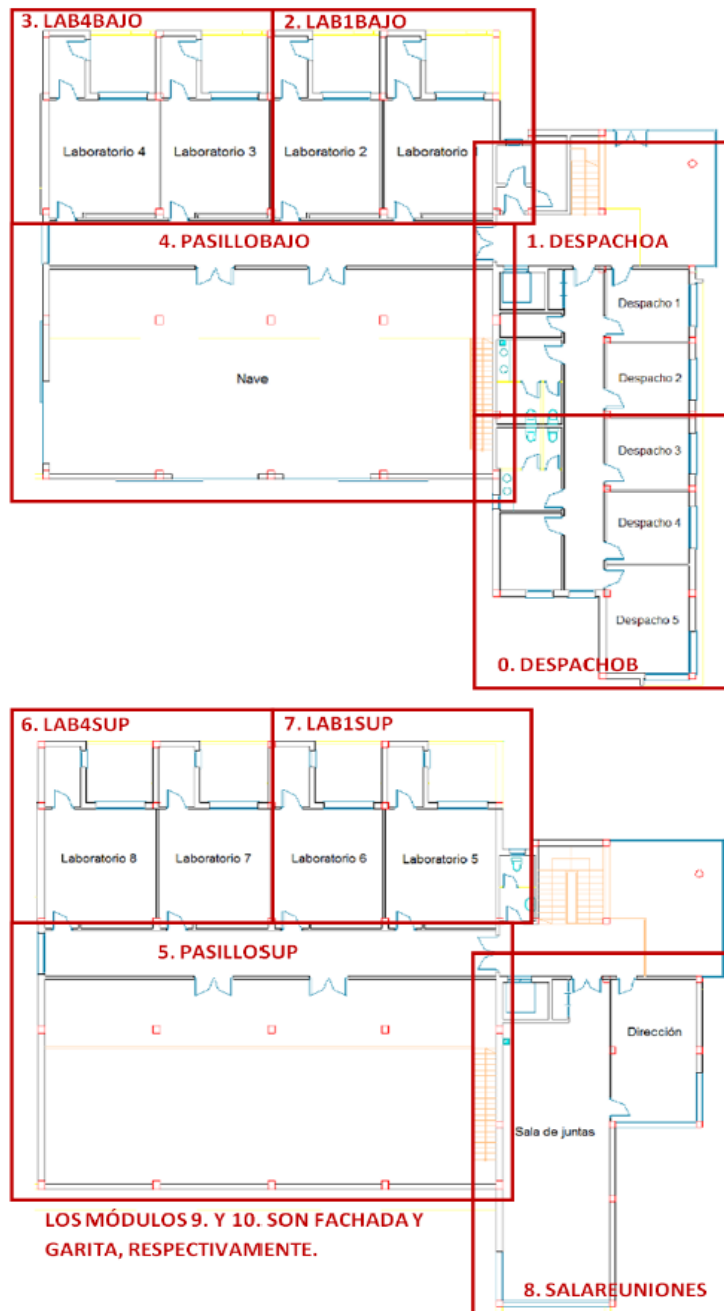


Figura 3.11. Plano de distribución de módulos de adquisición en el CDdI-CIESOL-ARFRISOL.

Para configurar los módulos de adquisición y a las tarjetas repartidos por el edificio, se dispone de una herramienta para este propósito en el ordenador encargado del control de los sensores y actuadores del edificio (véase figura 3.12).

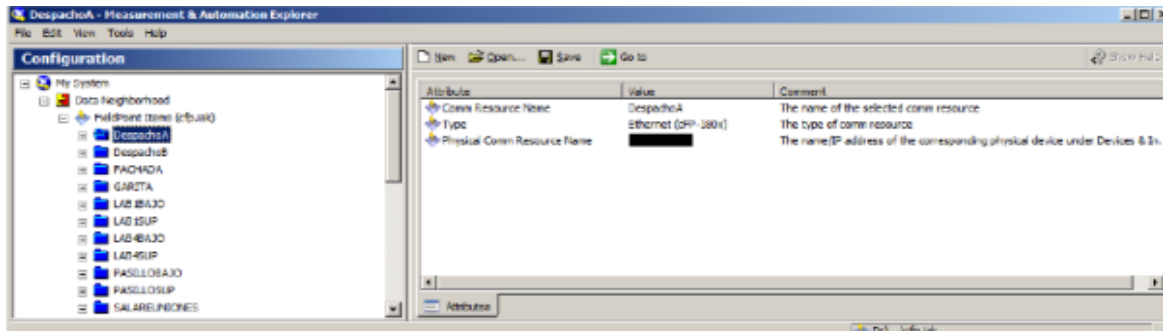


Figura 3.12. Herramienta de configuración de los módulos de adquisición en el CDdI-CIESOL-ARFRISOL.

- Sensores en el interior del edificio

Tal y como se puede observar en la tabla 3.2, en el interior del edificio existen una gran variedad de sensores de diferentes tipos disponiendo de un total de 163 medidas. La mayor parte de estos sensores, se han instalado con el principal objetivo de analizar el confort de los usuarios en el interior de los distintos recintos del CDdI-CIESOL-ARFRISOL. Para ello, se tiene cinco recintos característicos del edificio (dos despachos, dos laboratorios y la sala de juntas) que tienen una red de sensores más amplia que en el resto de los habitáculos, véase figura 3.13.

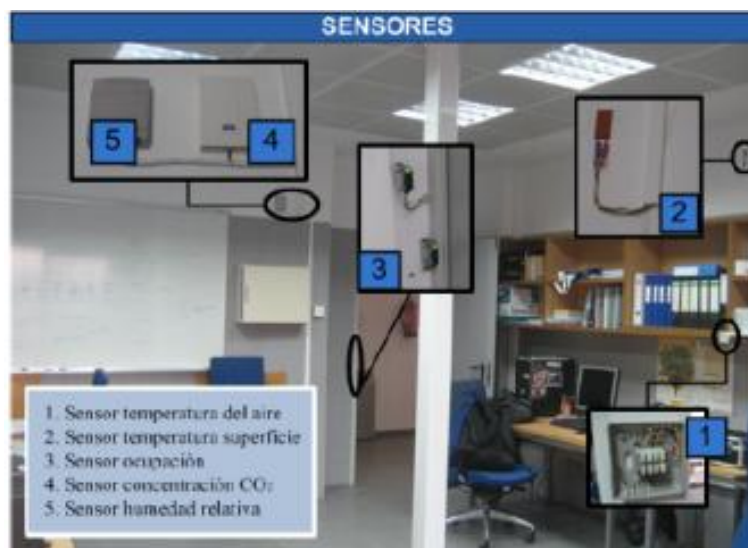


Figura 3.13. Sensores en el interior de un recinto característico del CDdI-CIESOL-ARFRISOL.

- Sensores en la estación meteo-radiométrica

Se dispone de una estación meteo-radiométrica situada en la azotea del edificio, véase figura 3.14. En ella se dispone de una gran variedad de sensores que son detallados en la tabla 3.3.

Tipo de sensor	Nº de sensores
Temperatura de aire interior	56
Temperatura de superficie	30
Temperatura de cristal	4
Humedad relativa interior	8
Concentración de CO ₂ interior	6
Temperatura del agua en circuito de refrigeración	12
Caudalímetro en el circuito de refrigeración	6
Anemómetro de hilo caliente	3
Apertura/Cierre de puertas	19
Apertura/Cierre de ventanas	9
Entrada/Salida de personas	8
Sensores de iluminación de interior	2
Total	163

Tabla 3.2. Sensores en el interior del C-Ddi-CIESOL-ARFRISOL [10].



Figura 3.14. Sensores en la estación meteo-radiométrica del CDdi-CIESOL-ARFRISOL.

Tipo de sensor	Nº de sensores
Radiación global horizontal	1
Radiación difusa	1
Pirheliómetro	1
Pirgeómetro	1
Radiación neta	1
Anemómetro ultrasónico	1
Veleta	1
Veleta sónica	1
Temperatura de aire	5
Humedad relativa	2
Concentración de CO ₂	1
Presión atmosférica	1
Sensor de iluminación de exterior	1
Total	19

Tabla 3.3. Sensores en la estación meteo-radiométrica del CDdi-CIESOL-ARFRISOL [38].

- Sensores en la fachada ventilada

Como se puede observar en la tabla 3.4, el espacio con una mayor concentración de sensores es la fachada ventilada. Esta zona, seleccionada para estudiar el comportamiento térmico de este tipo de cerramiento, está situada en la fachada sur del edificio. Para ello, la fachada ventilada cuenta con un gran conjunto de sensores que se encuentran agrupados en distintas alturas y profundidades.

Más concretamente, se disponen de medidas de temperatura y de densidad de flujo térmico en diferentes planos y a diferentes alturas, velocidad de viento en el interior de la cavidad a diferentes alturas, radiación global e infrarroja sobre la superficie exterior de la fachada, velocidad y dirección de viento frente y próximas a la fachada. Además, también se cuenta con un conjunto de sensores de temperatura distribuidos en el interior de la cavidad para determinar si el flujo de aire es laminar o turbulento, véase figura 3.15. Finalmente, al otro lado del muro se encuentra uno de los despachos seleccionados como característicos que dispone de una amplia red de sensores. De esta forma se puede analizar tanto el comportamiento de la fachada ventilada como su efecto en dicho despacho.

Tipo de sensor	Nº de sensores
Radiación global vertical	1
Pirgeómetro vertical	1
Anemómetros de hilo caliente	3
Anemómetro ultrasónico	1
Veleta	1
Temperatura de aire exterior	1
Humedad relativa exterior	1
Temperatura de superficie	17
Temperatura de aire en el canal de la fachada	12
Sensores de flujo	2
Total	40

Tabla 3.4. Sensores en la fachada ventilada del C-Ddl-CIESOL-ARFRISOL [38].

- Sensores en la instalación de frío solar.

Por último, en la tabla 3.5 se puede observar el gran número de sensores de los que dispone el sistema de climatización basado en frío solar, en el cual se trabaja en el desarrollo de controladores avanzados de naturaleza híbrida [39]. La mayor parte de los sensores que aparecen en dicha tabla se encuentran instalados en la nave taller, esto se debe a que en dicha ubicación se encuentra la mayor parte de la maquinaria del sistema de frío solar (caldera, tanques de acumulación, máquina de absorción, bombas, etc.).

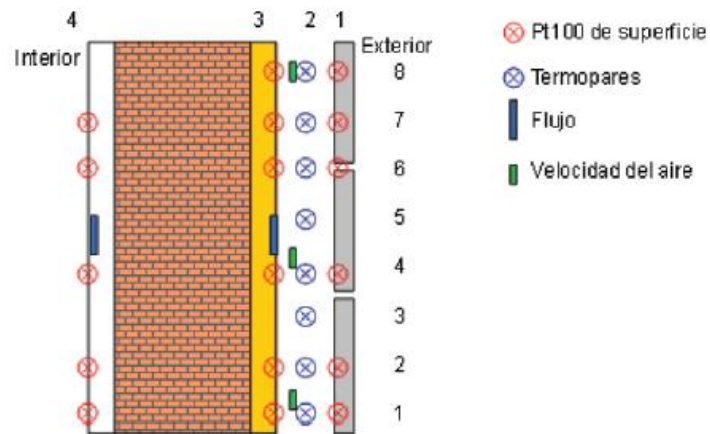


Figura 3.15. Distribución de sensores en altura y profundidad en la fachada ventilada.

Tipo de sensor	Nº de sensores
Radiación global vertical	1
Temperatura en circuito	74
Caudal	11
Variador	4
Estado de las válvulas	10
Potencia	3
Consumo de gas	2
Humedad relativa	2
Velocidad del aire	1
Variables de estado	412
Total	520

Tabla 3.5. Sensores en la instalación de frío solar [38].

Actuadores. Descripción y localización

Las ventanas y cortinas de dos recintos característicos están completamente automatizadas para estudiar cómo estos elementos influyen en la refrigeración activa y en las condiciones de iluminación. Más concretamente, los recintos seleccionados para realizar esta acción son la sala de reuniones y uno de los laboratorios con orientación norte. Para la automatización de las ventanas se utiliza motores lineales, el Olly-E, véase figura 3.16.



Figura 3.16. Motor instalado para apertura/cierre de ventanas.

Por otra parte, para la domotización de los estores de los recintos seleccionados, se utiliza motores para persianas venecianas y cortinas verticales de la marca SOMFY. Este tipo de motores están especialmente diseñados para adaptarse a sistemas de venecianas de aluminio, plegables, plisadas, celulares, montadas en cabezal de 25 *mm* o sistemas de riel velcrado, véase figura 3.17



Figura 3.17. Motor instalado par apertura/cierre de cortinas.

3.3.2 Descripción de la arquitectura hardware y software de la red de actuadores y sensores para la sala de juntas

Para poder llevar a cabo el control del confort lumínico se necesita de un complejo entramado de sensores y actuadores, que como se ha mencionado anteriormente, para el edificio donde se ubica la sala de juntas empleada en este trabajo fin de grado son gobernados mediante los módulos de National Instruments, Compact Fieldpoint (cFP).

En este apartado, se realiza una descripción del acondicionamiento que se ha realizado en la sala de juntas. Asimismo, se describirán los sensores utilizados ya que son clave para el desarrollo del proyecto y punto crítico debido a las características tan particulares de la variable a medir, la luz. A continuación se detallarán las propiedades y configuraciones tanto de los actuadores, persianas motorizadas y telerruptores, como de los relés utilizados para obtener la información sobre el estado de las luminarias. Y además de todo esto se explicarán las tarjetas utilizadas para cada uno de los dispositivos antes mencionados, sus configuraciones y características principales. En esta última parte se mostrará también la conversión de la señal original a la magnitud de interés utilizada mediante el software específico de adquisición de datos.

- **Luxómetro LP PHOT 01**

Se han instalado tres luxómetros LP PHOT 01, uno en garita y dos en el interior de la sala de juntas, repartidos uno para la zona de las ventanas y otro para la zona del proyector, con el fin de medir el nivel de iluminación en dos puntos representativos de toda la sala.

La serie LP de Delta Ohm permite la medición de cantidades fotométricas y radiométricas tales como la iluminancia (lux), la irradiancia (W / m^2) a través de las regiones espectrales VIS-NIR, UVA, UVB, UVC, así como el número de fotones recibidos por unidad de tiempo en una unidad de superficie.

Más concretamente, el sensor LP PHOT 01, presenta la forma característica de un cilindro cuyas dimensiones son un diámetro de 40 mm y 38 mm de alto, véase figura 3.18.



3.18. Luxómetro LP PHOT 01.

La particular geometría del sensor LP PHOT 01 con su difusor permite tener un rango de visión de 180 grados. La tendencia de la respuesta del sensor depende del ángulo de incidencia de la luz en el difusor permitido por la ley del coseno.

El sensor está compuesto:

- Un fotodiodo de silicio.
- Un filtro para adaptar la curva de la respuesta del fotodiodo a la curva $V(\lambda)$.
- Un difusor.
- 5 m de cable para conectar el sensor al instrumento de medida.
- Una carcasa.

Este sensor mide la iluminancia (*lux*) definida como la relación entre el flujo luminoso (*lumen*) que pasa a través de una superficie y el área de superficie (m^2).

La curva de respuesta espectral de una sonda fotométrica es similar a la curva ojo humano, conocida como curva fotópica estándar $V(\lambda)$ (véase la figura 3.20). La diferencia en la respuesta espectral entre LP PHOT 01 y la curva fotópica estándar $V(\lambda)$ se calcula por medio del error f'_1 . Las principales características de estos sensores se pueden observar en la tabla 3.6.

Sensibilidad	0,431 mV/kLux
Rango de medida	0-200000 Lux
Rango espectral	De acuerdo con la curva estándar fotópica $V(\lambda)$
Incertidumbre de calibración	<4%
f'_1 (de acuerdo con $V(\lambda)$)	<8%
f_2 (respuesta como la ley del coseno)	<3%
f_3 (linealidad)	<1%
f_5 (fatiga)	<0,5
Temperatura de trabajo	0-50 °C
Impedancia de salida	1k Ω

Tabla 3.6. Características técnicas de los luxómetros.

Este tipo de sensores no necesitan una fuente de alimentación externa. Además, proporcionan una señal de salida en mV , que se administra a través de una resistencia de derivación de los extremos del fotodiodo (véase figura 3.19). La fotocorriente generada por el fotodiodo cuando es golpeado por la luz, se convierte en una diferencia de potencial, que es leído por un voltímetro. Una vez que la DDP (Diferencia De Potencial) se ha leído, el valor medido se puede calcular a través del factor de calibración. Todas las sondas son calibradas individualmente y el factor de calibración se muestra tanto en el propio sensor como en el manual de usuario y es específico de cada sonda.

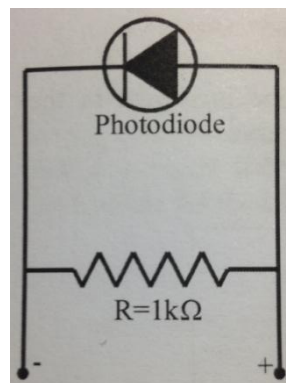


Figura 3.19. Esquema eléctrico del luxómetro.

El difusor está hecho habitualmente de material acrílico o teflón por lo que son adecuadas para aplicaciones de interior que requiere el monitoreo constante de las cantidades especificadas. La señal de salida se puede amplificar o convertirla en una medida acotada entre 4-20mA ó 0-10Vdc mediante el uso de un convertidor de la serie HD978TR3 (4-20 mA) y HD978TR4 (0-10 Vdc) para DIN, o el tipo de montaje HD978TR5 pared (4-20 mA) y HD978TR6 (0-10 Vdc).

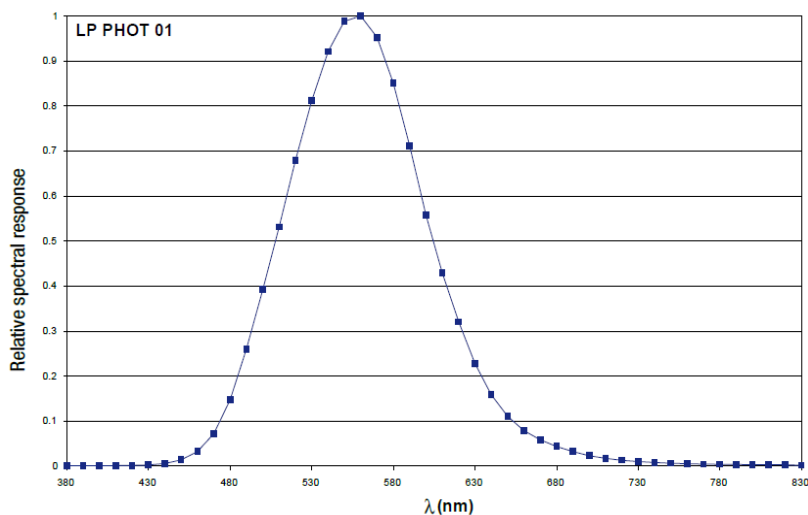


Figura 3.20. Curva Fotópica Estándar.

Instalación de las sondas

Como se ha indicado los sensores se colocan en el lugar donde se quiere medir el nivel de iluminación, esto será lo más cerca posible de los módulos de National Instruments para que la influencia de la longitud del cable sea despreciable, como es en el caso de este proyecto. En la figura 3.21 se muestra uno de los luxómetros utilizados, en este caso el del exterior.



Figura 3.21. Luxómetro en el exterior.

Una vez instalado el sensor, véase Figura 3.22, se realiza la conexión entre el sensor y el voltímetro; el voltímetro debe tener escalas apropiadas de medición. En el caso de este proyecto, las tarjetas de adquisición de los módulos de National Instruments harán las funciones de voltímetro para recopilar los valores de diferencia de potencial proporcionados por el luxómetro.

Para el almacenamiento de la información dada por el luxómetro se ha destinado la tarjeta cFP-AI-110 cuyas características se detallan más profundamente en el apartado siguiente. Esta tarjeta se caracteriza por entradas analógicas, en concreto trabaja en 8 rangos de entrada en tensión y 3 en corriente, siendo en corriente el rango del orden de los mA, haciendo estas configuraciones mas optimas, para el rango que nos proporciona el convertidor a la salida del sensor.

Debido a que esta tarjeta tiene unos rangos en tensión demasiados grades (del orden de voltios) con respecto al voltaje de salida del sensor (decenas de mV) se decide por esta última configuración, haciendo necesario un convertidor o adaptador que pase los mV de salida del sensor al rango de 4-20 mA (véase figura 3.22).

Si bien el sensor no necesita de una fuente de alimentación externa, es un sistema pasivo, el convertidor si necesita de alimentación.

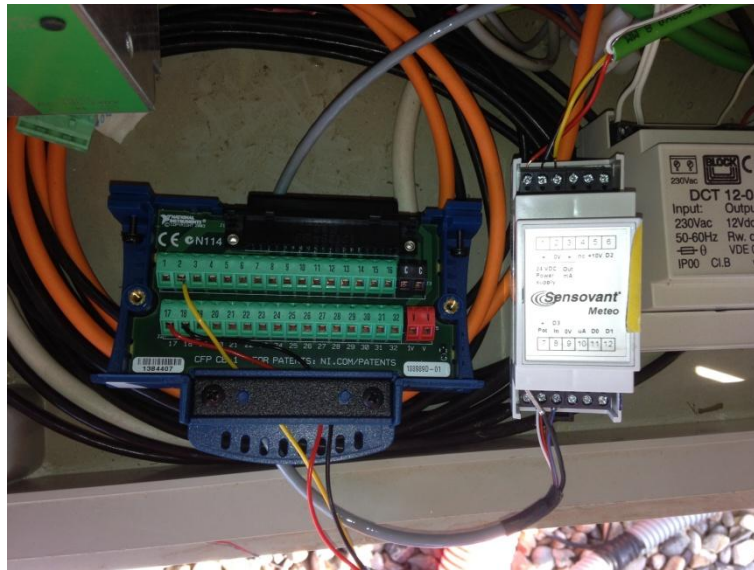


Figura 3.22. Montaje tarjeta de adquisición con convertidor.

- **cFP-AI-110**

Se trata de una de las tarjetas de National Instruments con entradas analógicas FieldPoint con las siguientes características:

- 8 canales analógicos de entrada de tensión o corriente.
- 8 rangos de entrada en tensión: 0-1 V, 0-5 V, 0-10 V, ± 300 mV, ± 1 V, ± 5 V, y ± 10 V.
- 3 rangos de entrada en corriente: 0-20, 4-20, y ± 20 mA.
- 16 bits de resolución.
- 3 configuraciones de filtros: 50, 60, 500 Hz.
- 250 V_{rms} CAT II continuo aislamiento de canal a tierra, verificado para 2300 V_{rms} de prueba de resistencia dieléctrica.
- Opera desde -40 a 70 °C
- Intercambiable en caliente.

El cableado para este tipo de tarjetas y para el uso dado en este proyecto es el siguiente:

La tarjeta cFP-AI-110 se utiliza para la adquisición de la información captada por los luxómetros, estos como se ha explicado anteriormente tiene un rango de salida de 4 a 20 mA, por lo que quiere decir que se utilizará la configuración en fuente de corriente con fuente de alimentación externa (véase la figura 3.23). Donde V_{SUP} irá al terminal del convertidor del luxómetro, y la salida del convertidor irá al I_{IN} .

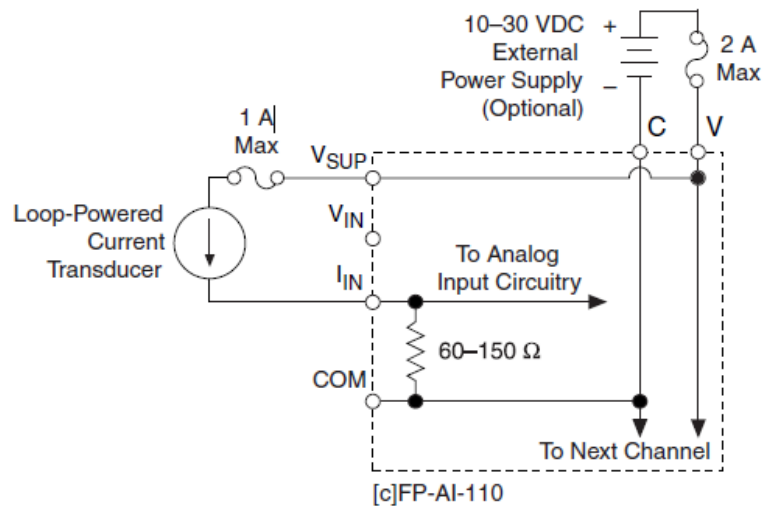


Figura 3.23. Fuente de corriente con fuente de alimentación externa.

El módulo tiene conexiones para cada uno de los ocho canales de entrada y de una fuente de alimentación externa a los equipos de campo de energía. Cada canal tiene terminales de entrada separados para la tensión (V_{IN}) y para la corriente (I_{IN}). Voltaje y entradas de corriente están referenciadas a los terminales COM, que están conectados internamente entre sí y a los terminales C. Todos, los ocho terminales, cuentan V_{SUP} conectado internamente entre sí y a los terminales V.

Puede utilizar una alimentación externa de 10-30 VCC a los dispositivos de campo de energía.

La tabla 3.7 enumera las asignaciones de terminales para las señales asociadas a cada canal.

Canal	Números de los terminales			
	V_{IN}	I_{IN}	V_{SUP}	COM
0	1	2	17	18
1	3	4	19	20
2	5	6	21	22
3	7	8	23	24
4	9	10	25	26
5	11	12	27	28
6	13	14	29	30
5	15	16	31	32

Tabla 3.7. Asignación de terminales de la tarjeta cFP-AI-110.

Las tarjetas se montan en una base de FieldPoint terminal (FP-TB-x), que proporciona potencia de funcionamiento al módulo. La instalación en un plano posterior con alimentación no interrumpe el funcionamiento del banco de FieldPoint. Para la instalación de la nueva tarjeta se realizaron los siguientes pasos, véase figura 3.24:

1. Se alinearon los tornillos del módulo con los orificios de la placa posterior. Las teclas de alineación del módulo impiden la inserción hacia atrás.
2. Se presiono firmemente para asentar el módulo en el panel posterior.
3. Con un destornillador número 2 con un mango de por lo menos 64 mm de longitud, se apretaron los tornillos de sujeción.

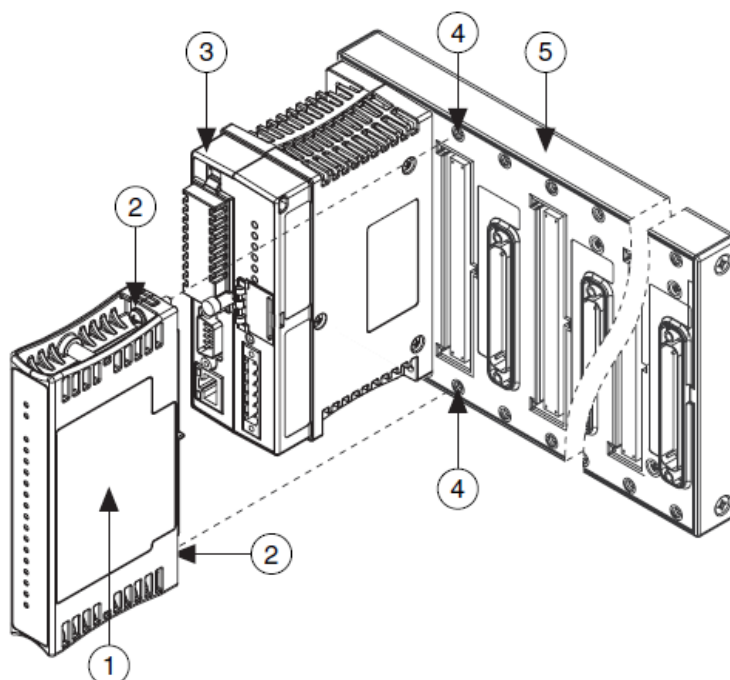


Figura 3.24. Instalación de los módulos de adquisición.

Como se ha indicado, el convertidor a la salida del luxómetro transforma la diferencia de potencial en mA, por tanto queda por hacer la última conversión para obtener la iluminancia que capta el sensor. Esta conversión se realiza mediante la regresión lineal de la ecuación 3.1 por software, a través de la aplicación instalada en el ordenador que recoge todos los datos, donde y es la iluminancia para x , que los Amperios a la salida del convertidor que esta unido al luxómetro. Para desarrollar la ecuación 3.1 se introduce en la ecuación los pares de datos proporcionados por el fabricante, 4 mA de salida del convertidor equivalen a 0 lux, y 20 mA a 200000 lux.

El software que se ha utilizado para convertir la intensidad que sale del convertidor en lux ha sido la aplicación de Labview®

$$4 \text{ mA} \rightarrow 0 \text{ Lux}$$

$$20 \text{ mA} \rightarrow 200000 \text{ Lux}$$

$$y = a \cdot x + b \quad (3.1)$$

$$0 = a \cdot 4 \cdot 10^{-3} + b$$

$$200000 = a \cdot 20 \cdot 10^{-3} + b$$

$$a = 125 \cdot 10^3$$

$$b = -50000$$

Por lo tanto, la conversión software queda:

$$y = 125 \cdot 10^3 \cdot x - 50000$$

- **Telerruptores**

Por otro lado, el control automático de las luces de la sala de juntas, se ha realizado mediante la colocación de dos telerruptores en la instalación eléctrica ya existente. La decisión de usar este tipo de dispositivos se tomó tras un estudio detallado de las especificaciones que queríamos alcanzar y de las distintas alternativas que se ofrecen en el mercado.

La principal especificación que se requería era el uso de un dispositivo que permitiera el encendido y apagado automático mediante corriente continua desde los módulos de National Instruments, y que además no interfiriera en el control manual que ya se realiza mediante interruptores en la propia sala.

En primer lugar, se pensó en la utilización de relés pero se descartaron debido que para que la luminarias se mantuvieran en un estado deberían estar continuamente en tensión, es decir, el gasto de energía sería elevado y podría dar lugar a posibles roturas por sobre calentamiento. Por este motivo, se optó por buscar un dispositivo que cambiara de estado por pulsos de corriente continua, los telerruptores.

Una vez se decidió por un tipo de dispositivo, se hizo un estudio de mercado se ajustaba a las características técnicas que requería para ser controlable por la tarjeta cFP-DO-403, que es la encargada de mandar los pulsos a los telerruptores, gracias a la configuración que se muestra en la figura 3.25.

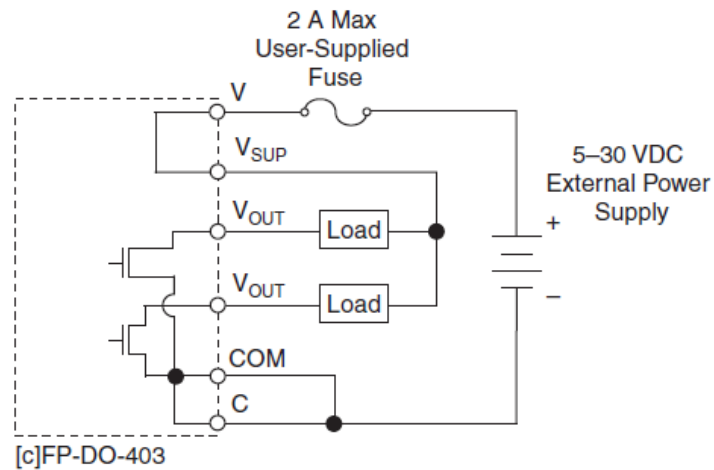


Figura 3.25. Cableado de los telerruptores con la tarjeta cFP-DO-403.

Para el proyecto se escogió el telerruptor de Schneider Electric, A9C30115 (véase figura 3.26). Más concretamente, se trata de un telerruptor iTLI de dos polos (1 normalmente abierto y 1 normalmente cerrado) capaz de soportar una demanda de 16 A. La forma de controlarlo es con pulsos, que bien pueden ser de 24 V a 50 ó 60 Hz en alterna o 12 V en corriente continua.



Figura 3.26. Telerruptor Schneider.

- **cFP-DO-403** (véase figura 3.27)

Se trata de una de las tarjetas de National Instruments con salidas digitales FieldPoint con las siguientes características:

- 16 canales digitales de salida.
- Salidas de 2 A por canal como máximo.
- Compatible con tensiones de 5 a 30 VDC.
- ON/OFF Indicadores LED.
- 250 V_{rms} CAT II continuo aislamiento de canal a tierra, verificado para 2300 V_{rms} de prueba de resistencia dieléctrica.
- Opera desde -40 a 70 °C
- Intercambiable en caliente.

El cableado para este tipo de tarjetas y para el uso dado en este proyecto es el que se puede observar en la figura 3.25. Como se puede observar en dicha figura, los telerruptores (Load) van conectados por unos de sus polos a la fuente externa de 12 V de corriente continua, y por el otro polo a la tarjeta (Vout), la fuente por su parte, por el otro polo va conectada al terminal COM de la tarjeta.

La tabla 3.8 enumera las asignaciones de terminales para las señales asociadas a cada canal.

CANALES	Números de los terminales			CANALES	Números de los terminales		
	V _{OUT}	V _{SUP}	COM		V _{OUT}	V _{SUP}	COM
0	1	17	18	8	9	25	26
1	2	17	18	9	10	25	26
2	3	19	20	10	11	27	28
3	4	19	20	11	12	27	28
4	5	21	22	12	13	29	30
5	6	21	22	13	14	29	30
6	7	23	24	14	15	31	32
7	8	23	24	15	16	31	32

Tabla 3.8. Asignación de terminales de la tarjeta cFP-DO-403.



Figura 3.27. Tarjeta cFP-DO-403 de National Instruments.

- **Relés**

Con el principal objetivo de disponer de una realimentación del estado de las luminarias en el interior de la sala de juntas, se han instalado dos relés convencionales de la marca Sassin. Estos relés tienen dos polos normalmente cerrados, que al paso de la corriente de la red eléctrica para mantener encendidas las luminarias permitirán el paso de una señal de control procedente de la fuente externa del módulo 8 a la tarjeta cFP-DI-330 (véase figura 3.28).

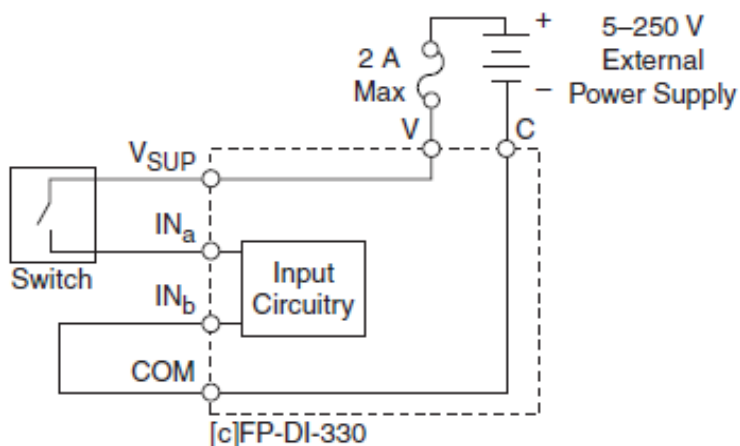


Figura 3.28. Montaje del relé con la tarjeta cFP-DI-330.

En la figura 3.28 se observa como es el circuito de montaje de uno de los relés (véase figura 3.29), de nuevo, al igual que con los telerruptores la señal continua es de 12 V, obtenidos de la fuente externa que tiene el modulo, esta señal será la que pase por el relé cuando este accionado gracias al paso de la corriente alterna que enciende las luminarias. La señal continua tras pasar por el relé llegará al terminal IN_a . Como indica la figura en la tarjeta se ha unido mediante un cable los terminales IN_b y COM.

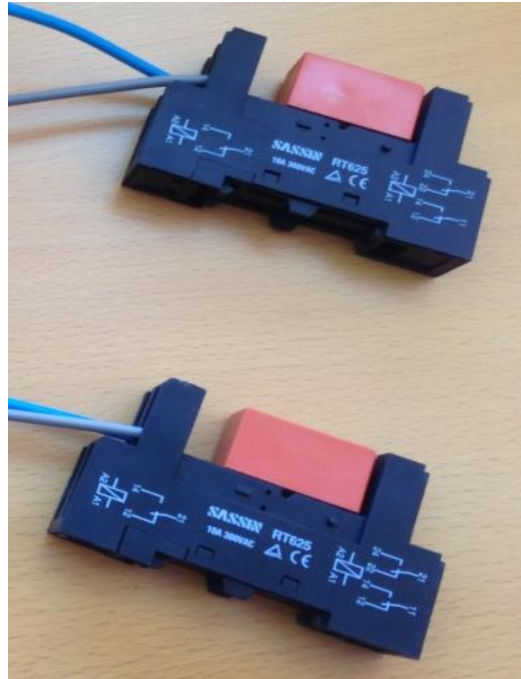


Figura 3.29. Relés utilizados en la instalación.

- **cFP-DI-330**

Esta tarjeta es ideal para la función que desempeña, ya que se trata de una de las tarjetas de National Instruments con 8 canales universales de entradas digitales, véase figura 3.30.

Como se ha explicado en el apartado de relés, esta es la tarjeta que se ha destinado para obtener la información sobre el estado de las luminarias, la corriente que sale de la fuente externa del modulo cuando las luminarias estén encendidas volverá pasando por el relé a esta tarjeta, el circuito de esto se observa en la figura 3.28.



Figura 3.30. Tarjeta cFP-DI-330.

Sus principales características son las siguientes:

- 8 canales digitales de entrada.
- Entradas universales que trabajan con un voltaje desde 5 V TTL hasta 250 VDC/VAC.
- Compatible con 'sourcing' (proporcionar una vía para dejar entrar la fuente (+)), 'sinking' (proporcionar una vía para dejar entrar el común (-)), o aplicaciones con sensores de potencia.
- ON/OFF Indicadores LED.
- 250 V_{rms} CAT II continuo aislamiento de canal a tierra, verificado para 2300 V_{rms} de prueba de resistencia dieléctrica.
- Opera desde -40 a 70 °C
- Intercambiable en caliente.

La tabla 3.10 enumera las asignaciones de terminales para las señales asociadas a cada canal.

Canal	Números de los terminales			
	IN _a	IN _b	V _{SUP}	COM
0	1	2	17	18
1	3	4	19	20
2	5	6	21	22
3	7	8	23	24
4	9	10	25	26
5	11	12	27	28
6	13	14	29	30
5	15	16	31	32

Tabla 3.9. Asignación de terminales de la tarjeta cFP-DI-330.

Finalmente, el esquema de montaje de los telerruptores y relés se ha colocado anclado al techo del despacho de dirección, en una caja de registro, ya que ese lugar está cerca de los interruptores manuales de la sala de juntas y del módulo 8, véase figura 3.30.

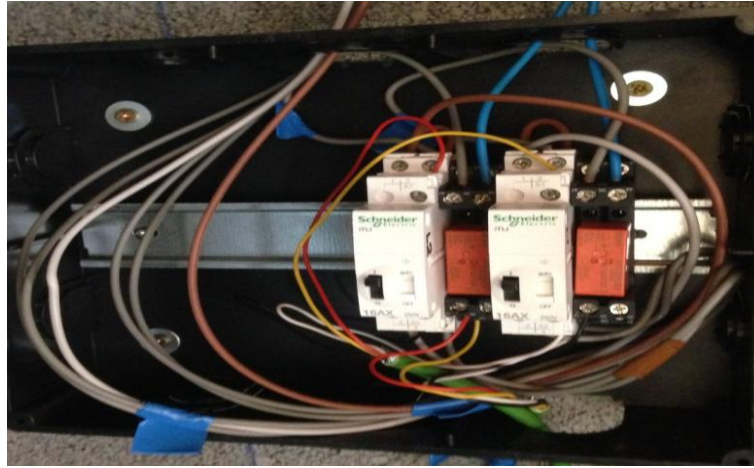


Figura 3.31. Caja de registro donde se ubican telerruptores y relés.

Como ya se ha mencionado en apartados anteriores, la sala cuenta con tres persianas motorizadas. Estas serán controladas automáticamente por una tarjeta cFP-DO-403. Más concretamente, para un correcto control de las mismas se necesita un canal para bajar, otro para subir y otro para parar. A continuación se muestra una tabla resumen con toda la información de la distribución hardware y software:

Módulo	Slot	Tarjeta	Canal	Nombre en archivo
10	4	cFP-AI-110	0	Lux_Garita
8	2	cFP-AI-110	5	Lux_SalaReuniones01
8	2	cFP-AI-110	6	Lux_SalaReuniones02
8	6	cFP-DO-403	0	Tlr_SalaReuniones01
8	6	cFP-DO-403	1	Tlr_SalaReuniones02
8	7	cFP-DI-330	0	Std_SalaReuniones01
8	7	cFP-DI-330	1	Std_SalaReuniones02
8	5	cFP-DO-403	0	P1_Bajar
8	5	cFP-DO-403	1	P1_Parar
8	5	cFP-DO-403	2	P1_Subir
8	5	cFP-DO-403	3	P2_Bajar
8	5	cFP-DO-403	4	P2_Parar
8	5	cFP-DO-403	5	P2_Subir
8	5	cFP-DO-403	6	P3_Bajar
8	5	cFP-DO-403	7	P3_Parar
8	5	cFP-DO-403	8	P3_Subir

Tabla 3.10. Tabla resumen de la distribución hardware.

Capítulo 4. Diseño del sistema SCADA

4.1 Situación actual de los sistemas SCADA

Este capítulo se comienza con una breve introducción a los sistemas SCADA, (Supervisory Control And Data Adquisition) [40, 41, 42, 43, 44, 45], es decir, supervisión, control y adquisición de datos. Al principio este tipo de sistemas se encargaban de proporcionar informes periódicos de la planta de procesamiento, por lo que sólo ofrecían tareas de monitorización y control muy simples. Posteriormente, con el avance de la tecnología, los ordenadores se encargaban de realizar las tareas de adquisición de datos, para las cuales disponían de una serie de comandos y mostraban la información sobre una pantalla CRT.

Seguidamente, fueron apareciendo los primeros sistemas SCADA automatizados, en los que los ordenadores tomaron un papel fundamental, ya que agregaron la capacidad de programar el sistema para realizar tareas de control más complejas. Actualmente, los sistemas SCADA se diseñan pensando en las necesidades de las industrias con módulos de software específicos, como por ejemplo, para el procesamiento del papel, gaseoductos, empresas hidroeléctricas,... Este tipo de sistemas se están convirtiendo en una parte integral de la gestión de este tipo de empresas, ya que no sólo operan con sobre la planta, sino que también son un recurso bastante importante de información.

En resumen, los sistemas SCADA son aplicaciones informáticas con acceso a la planta del proceso mediante comunicación digital con los instrumentos y actuadores, y con una interfaz gráfica de alto nivel con el usuario, capaz de proveer de toda la información necesaria a distintos tipos de usuarios, desde supervisores a trabajadores de cualquier nivel dentro de una empresa. Por lo general, un sistema SCADA se compone de una serie de ordenadores que se encuentran distribuidas en un determinado ámbito geográfico, recogiendo medidas y enviando órdenes a sus dispositivos de campo asociados, los cuales se comunican a su vez con su sistema de supervisión remoto.

En la actualidad, existen una gran variedad de sistemas SCADA en el mercado que se encargan de la supervisión y el control de procesos de fabricación (véase Figura 4.1). Como se ha mencionado anteriormente, la mayoría de las empresas que se encargan del desarrollo de sistemas SCADA son las mismas que se dedican a la instalación de la planta, por lo que la mayoría de estos sistemas son propietarios y no se pueden adaptar a otros procesos.

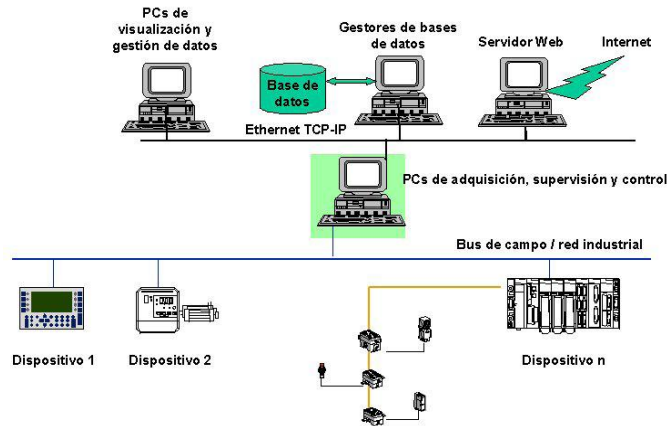


Figura 4.1. Herramienta SCADA en el ámbito empresarial

En la tabla 4.1 se describen los principales requisitos y funciones que debe cumplir todo sistema SCADA.

Los sistemas SCADA [40-45] están formados por una serie de módulos, los cuáles permiten realizar las actividades de adquisición, supervisión y control. Esos módulos son los que se especifican a continuación:

Configuración: permite al usuario definir el entorno de trabajo de su SCADA, adaptándolo a la aplicación particular que se quiere desarrollar.

Interfaz gráfico del operador: proporciona al operador las funciones de control y supervisión de la planta. El proceso se representa mediante sinópticos gráficos que se encuentran almacenados en el ordenador de proceso y generados desde un editor incorporado en el SCADA o importados desde otra aplicación durante la configuración del paquete.

Modulo de proceso: ejecuta las acciones de mando preprogramadas a partir de los valores actuales de variables leídas.

Gestión y archivo de datos: se encarga del almacenamiento y procesado ordenado de los datos, de forma que otras aplicaciones o dispositivos puedan tener acceso a ellos.

Comunicaciones: se encarga de la transferencia de información entre la planta y la arquitectura hardware que soporta el SCADA, y entre esta y el resto de los elementos informáticos de gestión.

REQUISITOS DE UN SISTEMA SCADA	Tener una arquitectura abierta, es decir, poder adecuarse a las necesidades futuras de la planta del proceso.
	Deben permitir la adquisición de datos de todo tipo de equipos.
	Deben tener una fácil instalación, con requisitos hardware accesibles y utilización sencilla, incluyendo interfaces de usuario amigables
	Todo sistema SCADA debe contar una interfaz de usuario que muestre un esquema básico y real de la planta del proceso.
FUNCIONES DE UN SISTEMA SCADA	Supervisión remota de instalaciones y equipos, cuyo principal objetivo es el de asegurar la calidad y homogeneidad del producto, asegurando el funcionamiento adecuado del proceso incluso en situaciones anómalas.
	Control remoto de dispositivos, ya que este sistema permite enviar órdenes a los controles de los distintos elementos para que hagan una operación específica, ya sea de manera automática o manual, pero siempre en tiempo real.
	La mayoría de los sistemas SCADA son capaces de ofrecer imágenes en movimiento que representa el comportamiento del proceso, lo que hace que el usuario se haga una idea de lo que realmente está ocurriendo en la planta.
	Representan señales de alarma por las que se alerta al usuario de un fallo o una condición anormal del sistema. Estas señales pueden ser sonoras o visuales, y por lo general también se almacenan en un fichero de incidencias.
	Otra opción que suelen tener los sistemas SCADA es la de almacenar los datos adquiridos, esta información puede analizarse posteriormente por el usuario del programa para sacar las conclusiones que se estimen necesarias

Tabla 4.1. Requisitos y principales funciones de un sistema SCADA

Y por supuesto debe estar dentro del entorno normativo, si bien a nivel internacional no ha habido hasta ahora una línea clara a seguir a cerca del diseño de las interfaces HMI existen varias iniciativas que pretenden cubrir necesidades concretas de diseño:

Acronimo	Nombre
ANSI	American National Standards Institute
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization
CEPT	European Conference of Postal and Telecommunications Administration
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
IEEE	Institute of Electronic and Electrical Engineers
ISO	International Standards Organization
JIS	Japanese Standards Association
NUREG	Nuclear Regulatory Commission
SAE	Society of Automotive Engineers

Tabla 4.2. Organismos reguladores del diseño de interfaces HMI.

Además obtenida de la norma europea EN 29241, la Asociación Española de Normalización (AENOR) ha publicado su equivalente bajo la denominación: UNE-EN 29241 [46]. Inicialmente se refiere al trabajo de oficina con utilización de equipos de visualización pero es también de aplicación en cualquier ambiente de trabajo en el cual aparezca este tipo de equipamiento.

Estas normas establecen los requisitos ergonómicos que deben cumplir los equipos con PVD, para asegurar que los usuarios puedan desempeñar sus tareas de forma segura y eficiente, y también contemplan los aspectos relativos a la ergonomía del puesto y de las aplicaciones que se utilizaran.

Por último comentar que a la hora de diseñar la interfaz de usuario de un sistema SCADA [40-45], se tiene que tener en cuenta que éste debe respetar una serie de “normas” para que sea interpretable fácilmente y amigable. Esas normas son las que se especifican a continuación:

- En la aplicación se deben de identificar de forma inmediata los elementos del proceso mediante una representación gráfica, que recibe el nombre de sinóptico. Esta representación se realizará además de acuerdo con la distribución física de la planta del proceso.
- Las pantallas o ventanas que se creen para la aplicación tienen que tener una apariencia consistente, con zonas diferenciadas para el sinóptico, botoneras, menús, mensajes,...
- La presencia de elementos intermitentes llama la atención del supervisor, pero dificulta su lectura, por lo que se utilizarán en partes gráficas y no en textos.
- Se deben utilizar unos colores (véase Figura 4.2) apropiados para la representación de los elementos. En la siguiente figura se muestran los colores que se deben utilizar para cada grupo de objetos:

ROJO	AMARILLO	VERDE	AZUL	PÚRPURA	BLANCO	GRIS	NEGRO
Peligro, Gas o líquido inflamable. Positivo en fuentes de alimentación. Carreteras, Líneas telegráficas. Señalización de aro.	Circuitos de calefacción. Agentes oxidantes y elementos radioactivos. Precaución, aviso de peligro. Canalización de gas.	Rejas y jaulas de prot. eléct. Nitrógeno. Gas compr. Señalización de marcha y limpieza. Canalización de aceite. Permiso.	Colector de transistores. Precaución reparación. Material de protección en tuberías. Agua, mar.	Negativo en fuentes de alimentación. Radiaciones. Materiales valiosos.	Regulación de tráfico.	Líneas de alimentación alterna. Canalización de vapor.	Masas y referencias en sistemas eléctricos. Materiales corrosivos. Contornos geográficos.

Figura 4.2. Representación de colores para el desarrollo de un sistema SCADA

Las herramientas SCADA más conocidas actualmente son: Aimax, Wincc, Quick SPC, RSView32, LabVIEW, Visual Logic Controller LVC,...En [40] se puede encontrar una comparativa de las herramientas SCADA actuales.

Con la realización del SCADA en este proyecto se ha intentado aportar las siguientes prestaciones:

- Monitorización

Representación de datos en tiempo real (iluminancia de las zonas del interior de la sala, iluminancia del exterior, estado de las luminarias,...) a los operadores del laboratorio. Se leen los datos de las tarjetas de adquisición (los módulos de National Instruments, Compact Fieldpoint).

- Supervisión

Supervisión, mando y adquisición de datos del proceso (nivel de iluminación y estado de los actuadores) y herramientas de gestión para la toma de decisiones.

Tiene además la capacidad de ejecutar programas que puedan supervisar y modificar el control establecido y, bajo ciertas condiciones, anular o modificar tareas.

- Adquisición de datos

Son múltiples los sensores instalados, con el SCADA se ha podido almacenar la información extraída de estos, para su posterior procesado, bien con otro programa o desde el mismo SCADA.

- Visualización de alarmas y eventos

Se dota de un reconocimiento de eventos excepcionales acaecidos en la planta y su inmediata puesta en conocimiento del usuario, para que bien este tome las medidas pertinentes o se hagan de forma automática bajo su consentimiento.

- Mando

Posibilidad de que los usuarios puedan cambiar consignas y otros datos claves del proceso directamente desde el ordenador (marcha, paro, modificación de parámetros, etc.). Se escriben datos sobre los elementos de control.

- Perfiles de actuación

Se permite el desarrollo de perfiles de usuario o de actuación, tal que con un clic de ratón se ejecute una serie de acciones, como por ejemplo el desarrollo de un modo proyector, que consiste en establecer de forma fija la referencia del nivel de iluminación en 300 lux, o el modo automático o manual, que consiste en que la actuación sobre las variables de control las haga el controlador o el usuario respectivamente.

Este SCADA presenta unas especificaciones marcadas:

Debe recoger sobradamente lo anteriormente expuesto en este apartado de forma que permita un control tanto manual como automático. El SCADA deberá tener como mínimo la representación en tiempo real de las variables del sistema (estado de las luces, estado de las persianas, iluminancia de sala y del exterior) en todos los modos (manual o automático).

Por su parte en modo manual debe proporcionar un acceso rápido al control de los actuadores, encender y apagar las luces, abrir y cerrar persianas, y orientar lamas.

En el modo automático, el SCADA con la ayuda de otros programas tendrá que ser capaz, de forma autónoma, de mantener una referencia que bien será introducida por el usuario (consigna variable) o actuar en modo 'Uso de proyector', en este modo la consigna será fija, como indica la norma citada en apartados anteriores de 300 Lux y un UGR de 22.

4.2 Descripción del entorno de programación Labview

LabVIEW [47-52] es un moderno entorno de desarrollo de aplicaciones, que se diferencia de los entornos tradicionales en que utiliza un lenguaje gráfico, llamado G, para crear programas a través de diagramas de bloques, frente a los lenguajes tradicionales basados en texto.

Además, se puede considerar como un sistema de programación de propósito general, ya que contiene una amplia variedad de librerías para casi cualquier tarea de programación, desde adquisición de datos, análisis y representación de datos, control de instrumentación a través del puerto serie, etc. hasta opciones de depuración como la ejecución paso a paso.

La paleta de Controles (figura 4.3 b) es propia del "Front Panel", y contiene los controles e indicadores que se usan para crear la interfaz de usuario. Por otro lado, la paleta de Funciones (figura 4.3 a) que es propia del "Block Diagram" y contiene los objetos que se usan para construir el VI, como aritmética, operaciones de entrada / salida de archivos, operaciones de adquisición de datos, etc.

Los programas en LabVIEW reciben el nombre de "Virtual Instruments (VIs)" ya que aunque son similares a las funciones en los lenguajes tradicionales, su apariencia y forma de actuar imitan a los instrumentos actuales. Más concretamente, los VIs están formados por los siguientes elementos:

- Una interfaz de usuario interactiva, que recibe el nombre de “front panel” (véase figura 4.4) ya que simula el panel de un instrumento físico. Puede contener desde botones, gráficos, indicadores,...y permite introducir información a través del teclado y del ratón.
- Un diagrama de flujo construido con código G y que actúa como código fuente de la aplicación (véase figura 4.4)
- LabVIEW se caracteriza por ser jerárquico y modular, por ello todo VI cuenta con un icono dotado de una serie de conexiones que permite llamar al VI desde niveles superiores.

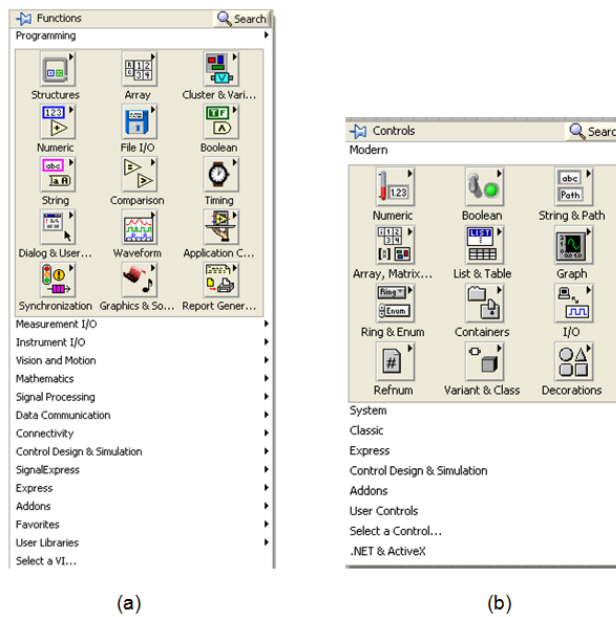


Figura 4.3. Librerías de funciones del Block Diagram (a) y del Front Panel (b)

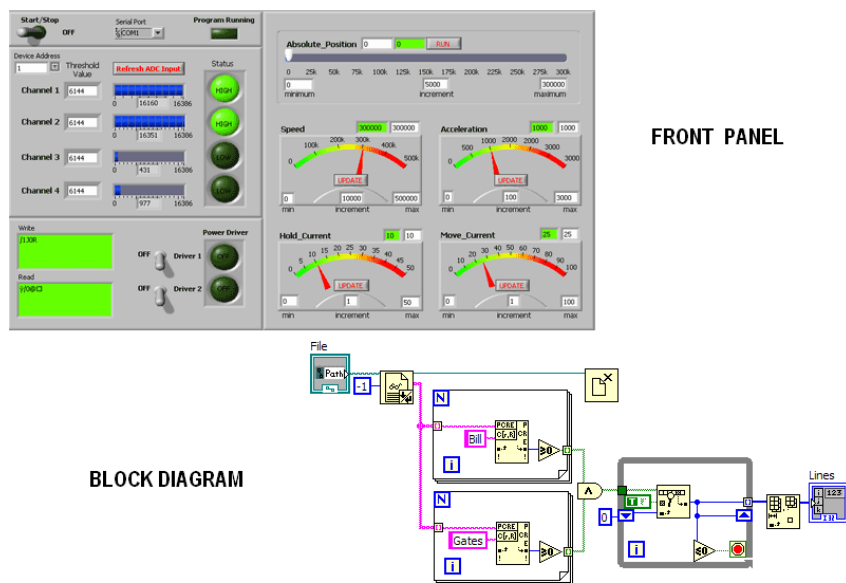


Figura 4.4. Ejemplo de Pantallas de “Front Panel” y de “Block Diagram”

LabVIEW es por tanto un claro representante de la programación modular, que consiste en dividir una aplicación en una serie de tareas que posteriormente, que se pueden ir dividiendo recursivamente, hasta que la aplicación queda descompuesta en una serie de subtareas simples.

Otra de las principales características de este programa es que al ser modular, las tareas de depuración son mucho más fáciles. En ocasiones, los VIs de más bajo nivel pueden desempeñar una serie de tareas comunes a varias aplicaciones, por lo que es posible desarrollar una serie de librerías especializadas que se puedan usar con diversas aplicaciones.

Esta herramienta puede comunicarse también con otras aplicaciones, a través de los protocolos de cada plataforma, LabVIEW soporta entre otras cosas los protocolos TCP y UDP.

4.2.1 Programación con LabVIEW

Con esta herramienta se comienza a programar en el panel frontal, colocando primero todos los controles (entradas al sistema) y todos los indicadores (salidas del sistema). Ejemplos de controles pueden ser los botones, los diales,..., mientras que los indicadores pueden ser LEDs y otros displays.

En resumen, los controles simulan las entradas de los dispositivos y proporcionan datos al diagrama de bloques del VI. Los indicadores simulan la salida de los dispositivos y muestran los datos que el diagrama de bloques adquiere o genera.

Una vez que se han colocado todos los elementos que hacen falta, se tiene que pasar a la ventana del diagrama de bloques, dónde se realizará la programación propiamente dicha. En ella se encuentran situados los elementos terminales que se han colocado anteriormente. El siguiente paso es colocar las estructuras y funciones que hacen falta para el desarrollo del programa, las cuales se unen con los elementos terminales mediante cables.

Finalmente, cuando se ha terminado de programarlo, se pasa a ejecutarlo. Para ejecutar un VI, simplemente en la ventana del panel frontal se pulsa el botón de ejecutar que aparece señalado en la figura 4.5.

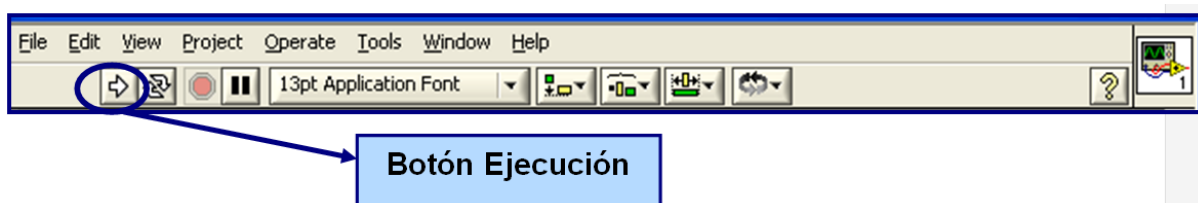


Figura 4.5. Captura del botón de ejecución en Labview

4.3 Arquitectura del sistema SCADA

Una vez que se han comentado brevemente las consideraciones que se deben tener a la hora de diseñar un sistema SCADA, se procede a explicar detalladamente el diseño y desarrollo de la interfaz de la aplicación desarrollada para el control del confort visual de la sala de juntas en el interior del edificio CDdl-CIESOL-ARFRISOL. El principal objetivo del sistema de monitorización es la validación de simulaciones y análisis de las desviaciones entre el comportamiento real del CDdl-CIESOL-ARFRISOL y el simulado, como consecuencia de las hipótesis asumidas en su construcción y otras incertidumbres. Otros objetivos del sistema SCADA desarrollado son:

- Adquisición de datos para su posterior análisis: Iluminancia exterior, iluminancia interior (dos zonas), estado de las luminarias, uso de la sala, número de personas en el interior. Y otras variables del confort térmico y calidad del aire que no intervienen en este proyecto.
- Identificación de malos hábitos de los usuarios respecto al funcionamiento energético del edificio, dando recomendaciones sobre el uso de la vivienda que mejoren el uso racional de la energía.
- Estudios de confort visual. Relación entre el grado conseguido de confort por los usuarios y el consumo energético necesario para obtenerlo.
- Análisis de la eficacia de las estrategias pasivas de acondicionamiento implementadas en el edificio.
- Estudio experimental de componentes singulares que presenten interés respecto a la implementación de estrategias de ahorro energético.

Generalmente los sistemas SCADA se componen de varios módulos, los cuáles permiten realizar las tareas de adquisición, supervisión, análisis y control [54]. En el caso de la aplicación desarrollada, se han implementado los módulos de adquisición, supervisión, configuración y control. Como se ha comentando anteriormente, para el desarrollo de la herramienta se utiliza el software de propósito específico para este tipo de aplicaciones LabVIEW® [53] de National Instruments, que permite aportar la interfaz, las comunicaciones y la gestión de la información, mientras que para la implementación de los algoritmos de control se usa MATLAB® debido a su potencia matemática.

Como se puede apreciar en la figura 4.6, el edificio cuenta con varios Compact FieldPoint, para recolectar los datos de la instalación, en concreto para el trabajo realizado en este proyecto se usan dos, el módulo 8 de la sala de juntas y el módulo 10 de garita, que están conectados al sistema SCADA desarrollado con LabVIEW® mediante Ethernet industrial. Por último, el mecanismo para acceder a los datos del edificio desde fuera de él consiste en conectarse vía red privada virtual (VPN acrónimo del inglés Virtual Private Network) a un ordenador dentro de la red privada del edificio CDdl-CIESOL-ARFRISOL y, una vez dentro de dicha red privada, acceder mediante Ethernet al sistema SCADA para ver los datos deseados.

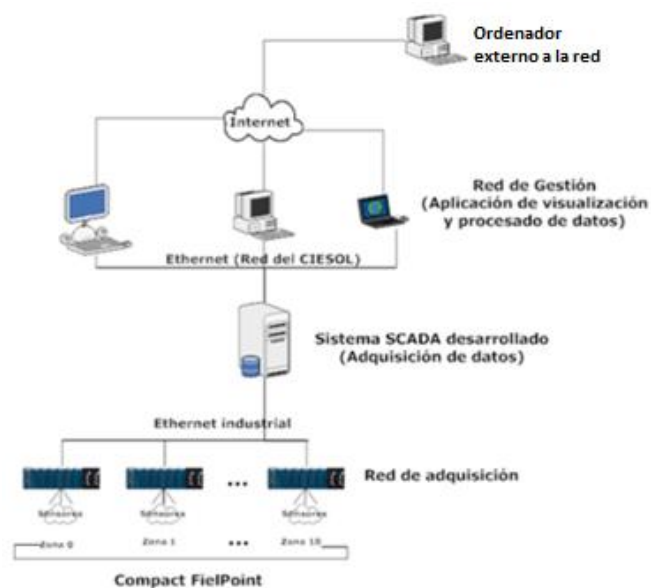


Figura 4.6. Esquema del sistema SCADA implementado en el C-Ddl-CIESOL-ARFRISOL (con permiso de [55])

Módulo de adquisición

Esta aplicación se comunica vía Ethernet con los módulos de adquisición de datos. De esta forma la aplicación realiza la adquisición conectándose al módulo 10 para obtener las variables del exterior, y al módulo 8 para obtener la información de la iluminancia interior (dos zonas), y estado de las luminarias (dos zonas) almacenando los valores de los distintos sensores en una base de datos; luego por medio de una interfaz permite enviar dichos datos a la aplicación de supervisión para que los muestre en sus diferentes pantallas. Algunas de las características que han sido impuestas a la hora de desarrollar el motor de adquisición son la fácil configuración de canales y adición de nuevas medidas.

Módulo de supervisión

La aplicación de supervisión se encarga de visualizar los datos monitorizados por medio de un entorno amigable para el usuario del sistema. Para conseguir que dicha visualización de los datos sea lo suficientemente legible para el usuario del sistema se han desarrollado dentro de la aplicación una pestaña para ese propósito 'Monitorización'. En la pantalla se muestran todas las medidas de interés de la sala, además de la iluminancia exterior.

Módulo de control

Con la aplicación creada se ha dotado de un control sobre las variables de interés para este trabajo, como lo son las posiciones de las persianas, el estado de las luminarias. Para ello dentro de la pestaña Monitorización existe una sección de control que permite encender manualmente las luminarias por zonas y abrir y cerrar las cortinas, y orientar sus lamas. Si se trabaja de modo automático, el usuario puede introducir la referencia de nivel de iluminación que desee o si por el contrario está trabajando con el proyector esta consigna se introduce automáticamente, para la visualización del estado de las cortinas además de poder hacerlo en la pestaña de Monitorización, se puede hacer desde la pestaña de control.

Módulo de configuración

Esta aplicación es poco configurable, el usuario solo tiene acceso a elegir los modos de uso, que se desarrollaran a continuación.

Por otro lado, para facilitar el diseño de otros usos o ampliación de la aplicación se ha dotado a esta de una pestaña de configuración donde aparecerán las direcciones de las variables de control y a controlar.

4.4 Diseño y desarrollo de la interfaz de usuario

4.4.1 Arquitectura, distribución de pantallas y navegación

Tras la instalación de los sensores y actuadores en la sala de reuniones se ha diseñado el SCADA, para monitorizar la planta. El SCADA desarrollado está pensado para que el usuario tenga en todo momento el control de las variables de control y a controlar.

El sistema SCADA se ha diseñado para que cumpla una serie de funcionalidades que permiten un total control de los actuadores instalados para un correcto control del confort visual así como para lograr los objetivos propuestos. Las funcionalidades básicas que debe proporcionar son las que se muestran a continuación y, por lo tanto, la interfaz debe recoger cada una de estas funcionalidades.

Controlar cada uno de los actuadores instalados en la sala de juntas permitiendo que el usuario seleccione el estado de las luces, apertura de persianas, graduación de las lamas, etc.

Permitir el acceso remoto al laboratorio, así como poder observar en tiempo real lo que está ocurriendo sin necesidad de estar físicamente en el mismo.

El primer paso ha consistido en distribuir los distintos elementos del sistema SCADA agrupando aquellos que tengan una función similar. Más concretamente, se agruparán en cinco grupos distintos, véase figura 4.7.: "Monitorización", "Control", "Gráficas", "Garita" y "Configuración". A continuación se realiza una breve descripción de cada grupo:

- **Monitorización**

Este grupo, el más importante, recoge el estado de las variables de control y a controlar. En este grupo con un simple vistazo se puede observar la iluminancia en las dos zonas de la sala y la exterior, además del estado de las persianas, tanto su porcentaje de apertura como la orientación de las lamas.

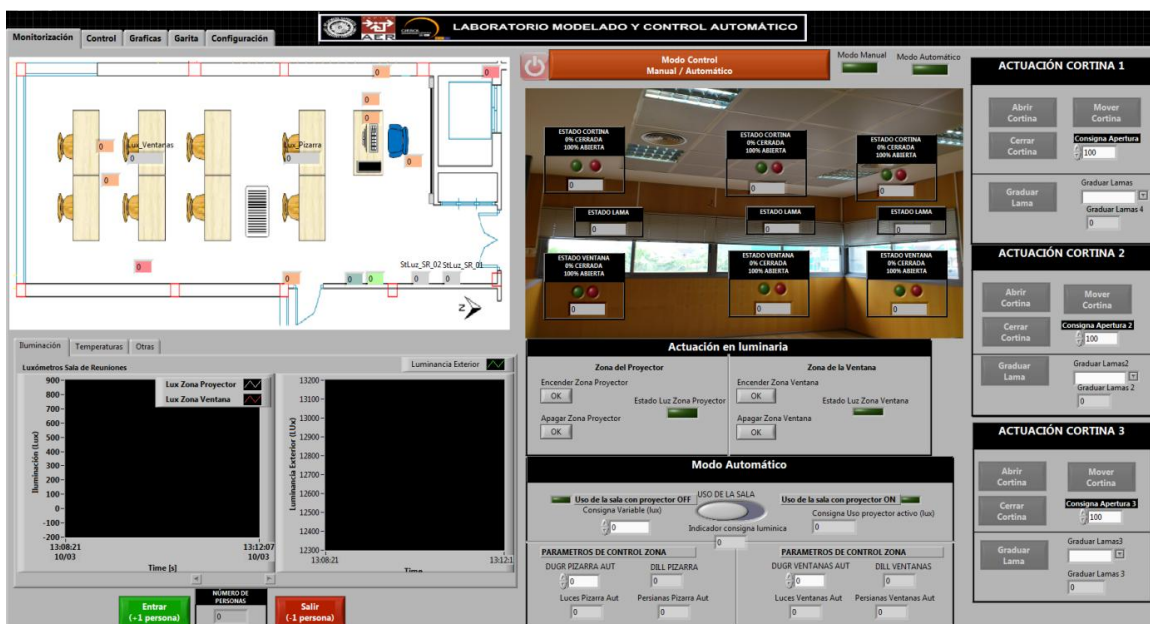


Figura 4.7. Monitorización del SCADA de la sala de juntas.

En la esquina superior izquierda se encuentra un plano orientativo de la planta de la sala, donde se muestran en su posición los sensores que hay en esta. Para el desarrollo de este proyecto podemos encontrar el estado de las luminarias, y los valores de iluminancia para las dos zonas.

Debajo del plano, en la esquina inferior derecha, se muestran dos graficas, una para la representación de las iluminancias interiores y otra para la iluminancia exterior, debajo de estas se muestra el número de personas que hay dentro de la sala. Por lo tanto, la mitad izquierda de la pestaña de monitorización es solo de representación.

En la parte central de esta pestaña, se divide en dos funciones principales, en la parte superior de esta se encuentra el botón de apagado y el de selección de modo automático o manual, además la parte superior muestra el estado de las persianas (apertura y orientación) y la parte inferior dedicada al control. Esta parte está dividida en función del tipo de control, manual para actuar sobre las luminarias por zonas y automático para establecer la referencia del nivel de iluminación. En el modo automático se cuenta con la posibilidad de establecer de manera manual la referencia, al gusto del usuario, o automáticamente para el trabajo con proyecto, que se fija en 300 lux. Además en esta zona se observan los valores de las variables que participan en el controlador (DILL y DUGR), que serán definidos en el capítulo 6.

Y por último, en la parte derecha de esta pestaña se observa los botones de actuación manual sobre las persianas, con los cuales podemos abrir y cerrar las persianas (100 ó 0)%, y por otro lado mover las persianas al porcentaje de apertura y orientación, la orientación solo es posible cuando se tenga la persiana cerrada completamente, solo se podrá colocar a 90°(100%) ó 45°(50%).

- **Control**

Como se explica más detalladamente en el capítulo 5, para el control automático de las persianas, se han diseñado 6 estados. Estos estados implican diferentes combinaciones de posiciones para las persianas.

Esta pestaña (véase figura 4.8), muestra el estado en el cual se encuentra el sistema, además de mostrar si las luces están encendidas o apagadas y si se está controlando con los estados de la mañana o de la tarde.

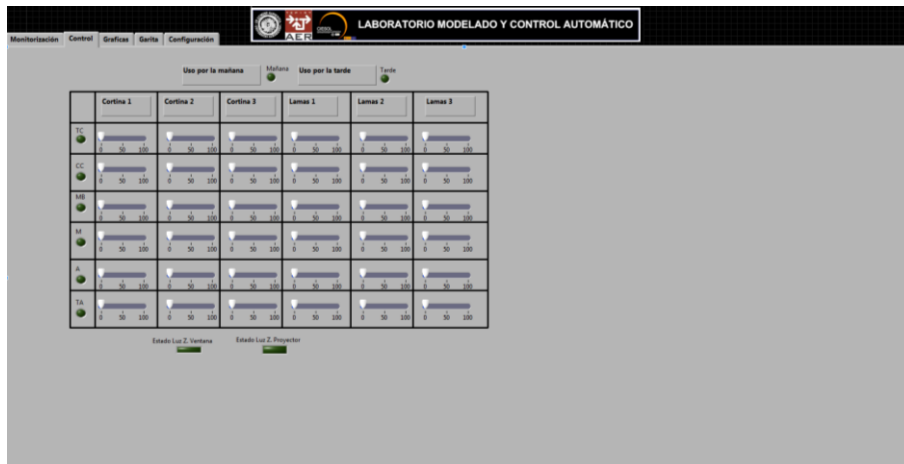


Figura 4.8. Pestaña de control del SCADA de la sala de juntas.

- **Gráficas**

En esta pestaña (véase figura 4.9) se compone de dos pestañas a su vez, una para las graficas destinadas para el estado de las persianas y número de personas en el interior, y otra para el estado fancoil, esta queda fuera de este proyecto, pero ha sido ubicada para los futuros trabajos de confort térmico.

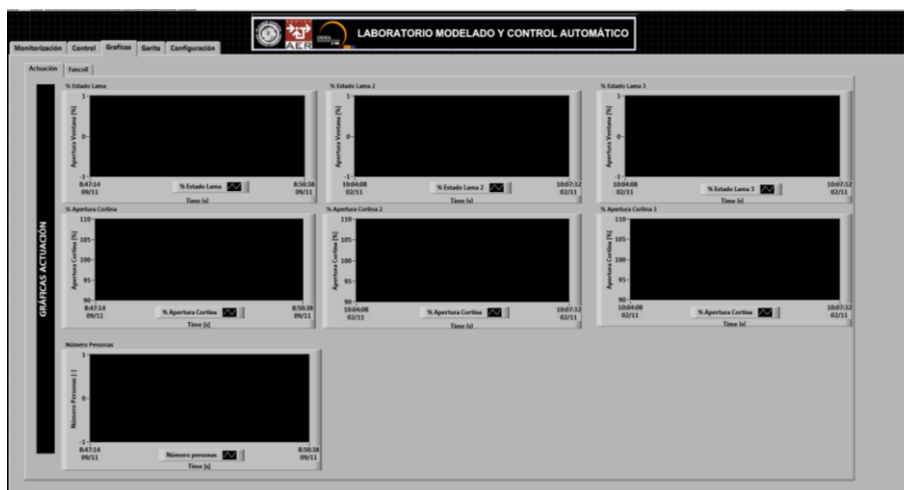


Figura 4.9. Pestaña gráficas del SCADA de la sala de juntas.

- **Garita**

Esta pestaña muestra a la izquierda una imagen real de la garita y las variables que ahí se miden: Radiación Difusa, Radiación Directa, Iluminancia Exterior, Temperatura, Humedad y Presión (véase figura 4.10).

A la derecha se observa las graficas de las variables del exterior (Temperatura, Concentración de CO2 y Humedad Relativa).

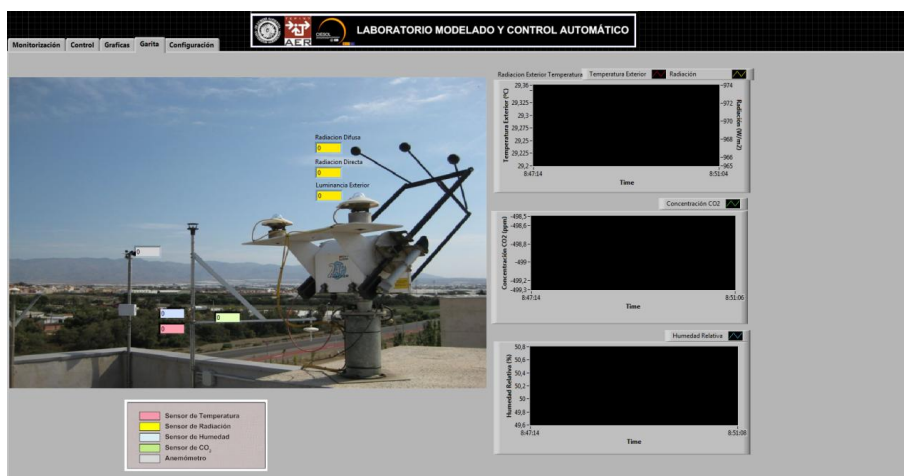


Figura 4.10. Pestaña gráfica del SCADA de la sala de juntas

- **Configuración**

Y la última pestaña sirve para la configuración de las direcciones de los canales, divididos por secciones: de actuación, de adquisición de datos, conexión instalación frio solar, configuración modo automático, y para las luminarias (véase figura 4.11).

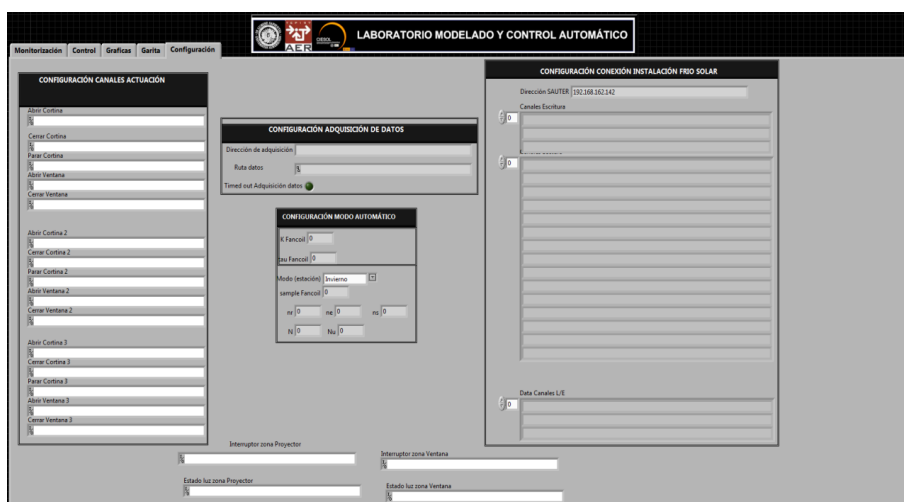


Figura 4.11. Pestaña configuración del SCADA de la sala de juntas.

4.5 Descripción de los modos de operación

El sistema SCADA desarrollado tiene por lo tanto varios modos de funcionamiento, los cuales se van a comentar en este apartado. El desarrollo de los distintos modos permitirá a los futuros usuarios de la sala de juntas mantener el confort visual en el interior de la misma.

La aplicación al arrancar comenzará funcionando en modo manual, y cuando el usuario presione el botón 'Modo Control' cambiará a modo automático y si se volviera a pulsar cambiaría de nuevo de modo, y así sucesivamente. Para tener conocimiento del modo en el que se está trabajando se iluminará el led de dicho modo (véase figura 4.12).



Figura 4.12. Botón de control e indicación del modo de trabajo.

4.5.1 Modo manual

El usuario cuando se esté trabajando en modo manual tendrá acceso directo sobre la apertura de las persianas, orientación de las lamas y el estado de las luminarias por zonas.

En la figura 4.13 se observa dentro de la pestaña Monitorización la sección de control manual de las persianas de forma individual. Donde el usuario podrá abrir y cerrar las persianas completamente con solo pulsar el botón 'Abrir Cortina' o 'Cerrar Cortina' respectivamente. Si por el contrario no se quiere aplicar estas opciones y se quiere abrir un porcentaje determinado, se puede hacer insertando el porcentaje de apertura en 'Consigna Apertura' y pulsar mover cortina.

Por otro lado, cuando las persianas estén completamente cerradas, el usuario puede orientar las lamas a 45° o 90°, para ello tendrá que desplegar las opciones de 'Orientar Lamas', seleccionar una de las opciones y pulsar el botón 'Graduar Lama'

Además del control de las persianas, el usuario podrá manualmente desde la aplicación encender y apagar las luminarias de las dos zonas ('Zona del Proyector', 'Zona de la Ventana'), véase figura 4.14. Para ello solo tendrá que pulsar los botones de encender zona proyector o apagar zona proyector si se quiere encender o apagar las luminarias de la zona del proyector respectivamente, y de la misma manera para las luminarias de la zona de las ventanas.

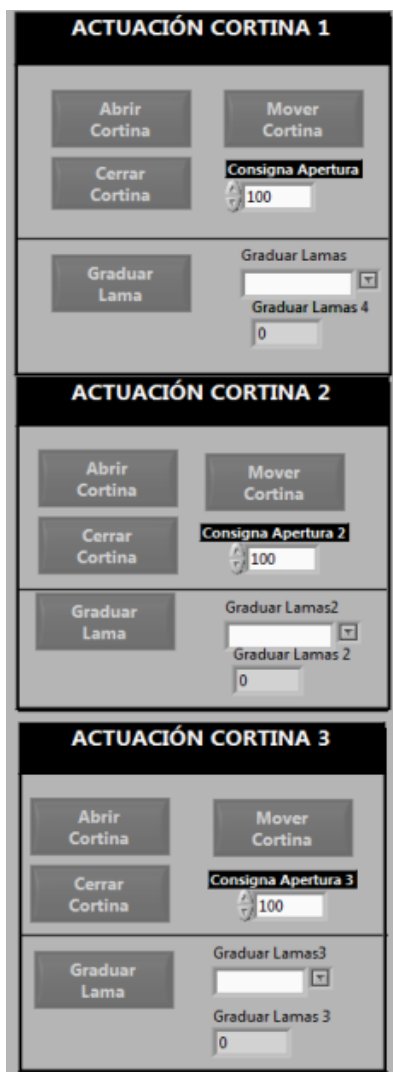


Figura 4.13. Actuación manual sobre las cortinas.

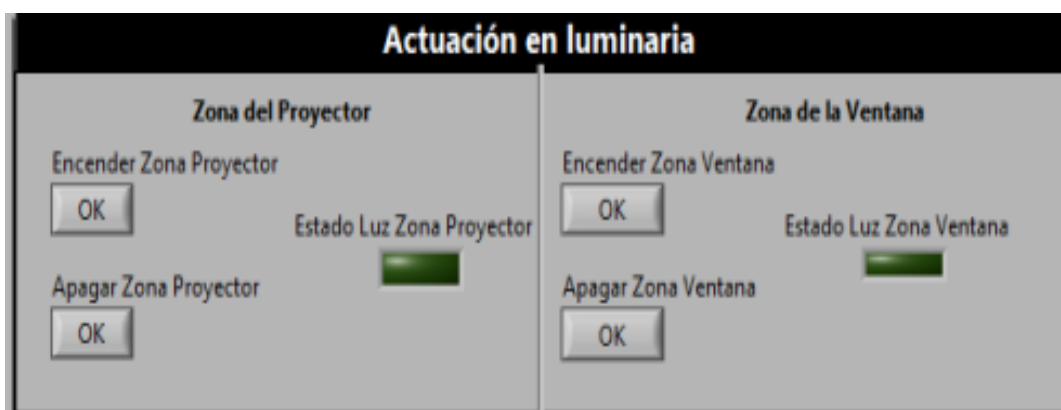


Figura 4.14. Actuación manual sobre las luminarias.

4.5.2 Modo automático

Dentro del modo automático se puede trabajar en dos modos: 'Uso de la sala con proyector OFF' o 'Uso de la sala proyector ON', véase figura 4.15.

Una vez el usuario active el modo automático como se ha indicado anteriormente, se iniciará este modo con el uso en modo sin el proyector, para seleccionar el modo de uso con el proyector se tendrá que pulsar el switch 'USO DE LA SALA'.

El modo de uso implica la selección de la consigna lumínica, si se hace en modo 'Uso de la sala con proyector OFF' la consigna se introduce por el usuario pero si el modo es 'Uso de la sala con proyector ON' la consigna se fija en 300 lux sin posibilidad de ser cambiada. Cada uno de estos modos muestra su consigna en 'Consigna Variable (lux)' y 'Consigna Uso proyector activo (lux)', pero será la indicada en 'Indicador consigna luminica' la que entre en el controlador.

Para cada zona, en tiempo real, se podrá ver las variables de entrada al controlador 'DUGR PIZARRA AUT', 'DILL PIZARRA', 'DUGR VENTANAS AUT' y 'DILL VENTANAS'. Además se observa como también en tiempo real aparecen las variables de salida sin pasar por el proceso de fuzzificación (será explicado en el capítulo 6), 'Luces Pizarra Aut', 'Persianas Pizarra Aut', 'Luces Ventanas Aut' y 'Persianas Ventanas Aut'.

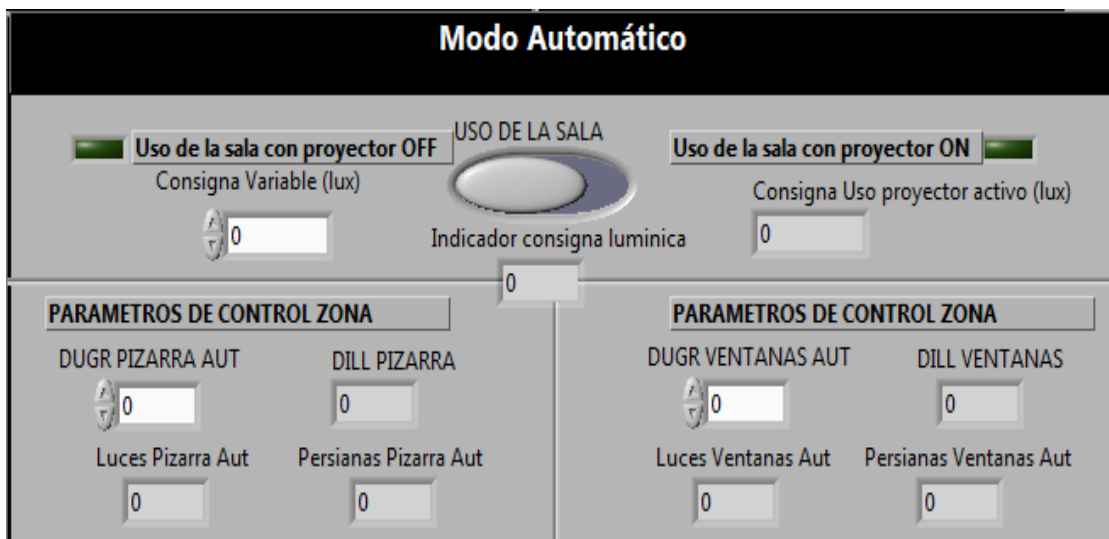


Figura 4.15. Modo Automático

Capítulo 5. Modelado iluminancia

5.1 Introducción

En general, los usuarios necesitan un nivel de iluminación adecuado para llevar a cabo cualquier actividad. Para ello, la utilización de la luz natural en lugar de luz artificial puede suponer un ahorro de energía considerable, pero puede causar deslumbramiento y problemas de contraste. Por lo que estos inconvenientes pueden hacer que se utilice la luz artificial.

Por otro lado, un mal diseño de la iluminación artificial en la sala podrá causar deslumbramiento, o problemas para identificar los colores adecuadamente. También una mala distribución, y selección de las luminarias puede hacer que en determinadas situaciones, como en trabajos sobre papel u ordenador, que el usuario sienta cansancio o malestar de forma anormal. Por este motivo se considera útil el diseño de controladores que proporcionen un sistema de iluminación eficiente sin renunciar a mantener unas condiciones óptimas de trabajo.

Como se ha detallado en el capítulo 2 el confort visual es un estado generado por la armonía o equilibrio de una elevada cantidad de variables. Pero debido a que el diseño de la instalación lumínica ha sido realizado con anterioridad a este proyecto, no es posible cambiar el tipo de iluminación, solo se posee el control sobre su estado, encendidas o apagadas. Es por ello que variables como la propiedad de color, sombreado, y ergonomía del puesto de trabajo queda fuera del alcance de este proyecto. Si bien será posible controlar el nivel de iluminación y deslumbramiento.

En este capítulo se muestra un modelo de la sala de juntas cuyo propósito específico es el de controlar el nivel de iluminación y deslumbramiento. Sin embargo, hay que tener en cuenta que este proyecto se ha desarrollado durante el periodo estival, y por lo tanto, solo se ha podido modelar dicha sala para este intervalo de tiempo.

Como se ha descrito en capítulos anteriores el edificio tiene orientación Norte-Sur, dos de las tres ventanas de la sala donde se realiza este trabajo tienen orientación Sur, es por ello que durante los meses de verano, cuando la radiación del sol es más perpendicular al Hemisferio Norte y gracias al retranqueo de las ventanas, la luz solar casi no tiene incidencia directa sobre estas ventanas.

Por otro lado, los obstáculos en forma de edificios contiguos hace aumentar este fenómeno, dando lugar a que solo unas horas del día existe incidencia directa de la radiación solar, donde la mayor parte ocurre por la tarde a través de la ventana con orientación Oeste. Por este motivo, el grado de deslumbramiento ocasionado por la luz natural no es crítico para este periodo del año.

La iluminancia (E), que deriva de la irradiancia, se define como el flujo luminoso que incide por unidad de área en una superficie dada. Se mide en *lux* ($lux=lm/m^2$). En general, cuando se mide la iluminancia sobre el plano de trabajo o iluminancia horizontal, se fija una altura de 0,85m. Cuando se necesita especificar la iluminancia sobre paredes o pantallas de video, las mediciones se hacen sobre planos verticales, lo que se conoce como iluminancia vertical. Su aplicación es cuantificar la cantidad de luz que llega a una superficie y por la simplicidad de su medición es la magnitud que más se usa. La iluminancia sigue la ley universal de los cuadrados, que en el caso de una fuente puntual toma la forma:

$$E = I/d^2 \quad (5.1)$$

Donde I es la intensidad luminosa definida como el flujo emitido por unidad de ángulo sólido en una dirección específica, y d es la distancia desde la fuente luminosa a la superficie a la que llega el flujo luminoso siendo dicha superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación incidente. Cuando la superficie no es perpendicular a la dirección de propagación del flujo luminoso la ecuación debe ser modificada tal y como se puede observar en la ecuación (5.2).

$$E = \left(I/d^2 \right) \cdot \cos (\theta) \quad (5.2)$$

En la ecuación anterior θ representa al ángulo de inclinación de la superficie.

Por lo tanto, en este proyecto se va a considerar como variables de estudio del confort visual el nivel de iluminación o iluminancia horizontal y el grado de deslumbramiento provocado por las luminarias.

El eje de rotación terrestre tiene una inclinación de 23° sobre el cual gira la Tierra en un movimiento de rotación sobre sí misma dando lugar al día y la noche según las partes expuestas al Sol. Al mismo tiempo la Tierra gira alrededor del Sol dentro de una órbita elíptica dando lugar a las estaciones del año según la forma de incidir las radiaciones solares en la superficie terrestre que varían en función de la oblicuidad con que se producen dada la inclinación del eje de rotación terrestre y la situación del planeta a lo largo de su traslación alrededor del Sol.

En la figura 5.1 se puede observar como en el hemisferio norte es verano porque los rayos solares inciden más perpendicularmente sobre esta parte del planeta concentrándose más la radiación solar, lo cual produce un aumento de las temperaturas. En cambio, en el hemisferio sur es invierno porque la incidencia de los rayos solares sobre la Tierra es más oblicua haciendo que se disperse más su energía y calor, produciéndose un descenso de las temperaturas. Cuando la Tierra se sitúe en el otro extremo de su elíptica ocurrirá justamente lo contrario.

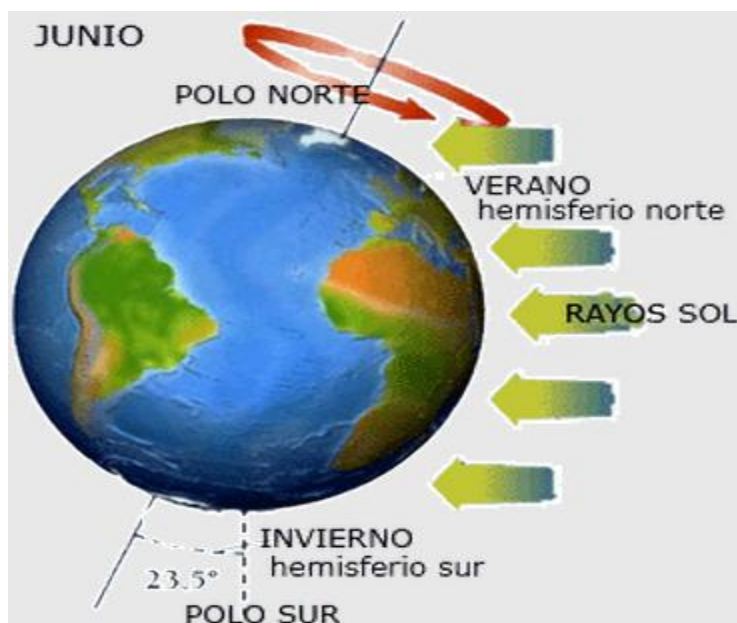


Figura 5.1. Inclinación del sol.

5.2 Modelado de la habitación

Como se ha mencionado anteriormente, este apartado propone un modelo del nivel de iluminación y grado de deslumbramiento ocasionado por las luminarias para la sala de juntas durante el periodo de verano.

El modelado ha sido realizado mediante dos métodos claramente diferenciados en función del tipo de iluminación. En primer lugar, para obtener una valoración previa de la instalación de luminarias se ha realizado un modelo de la habitación mediante una herramienta de propósito específico. Por otro lado, se ha obtenido un modelo de la influencia de la radiación exterior en el nivel de iluminación de la sala juntas. Para se han realizado una serie de ensayos a partir de los cuales se ha determinado la relación entre la apertura de las persianas y la iluminancia interior en función de la radiación exterior.

5.2.1 Modelado de la iluminación artificial

Un factor prioritario en este proyecto es conocer la influencia de las luminarias en el nivel de iluminación y deslumbramiento, con el fin de saber si las necesidades lumínicas están cubiertas bajo condiciones adversas, como por ejemplo en los casos donde la iluminancia exterior sea insuficiente (días nublados, durante la noche, etc.), además de poder valorar la confortabilidad de la instalación existente.

Para ello, se ha desarrollado un modelo mediante el programa *DIALux evo 3* [56].

DIALux evo 3 es un software completo y gratuito de *DIAL* para crear proyectos de iluminación profesionales, está abierto a las luminarias de todos los fabricantes.

Con *DIALux*, se pueden crear entornos virtuales tanto de exterior como de interior de forma simple e intuitiva.

Además permite la documentación de los resultados de sus diseños de iluminación en visualizaciones fotorrealistas.

Permite como base los datos CAD de otros programas arquitectónicos y exportar cómodamente sus resultados de nuevo al programa original. O utilizar, si lo desea, modelos 3D.

DIALux determina en paralelo el consumo energético de su solución de iluminación, apoyando así en el cumplimiento de las directrices vigentes a nivel nacional e internacional.

En primer lugar se ha importado el plano en *autocad* [57] del edificio (véase la figura 5.1) y a partir de ahí se ha construido el edificio y más detalladamente la sala de juntas.

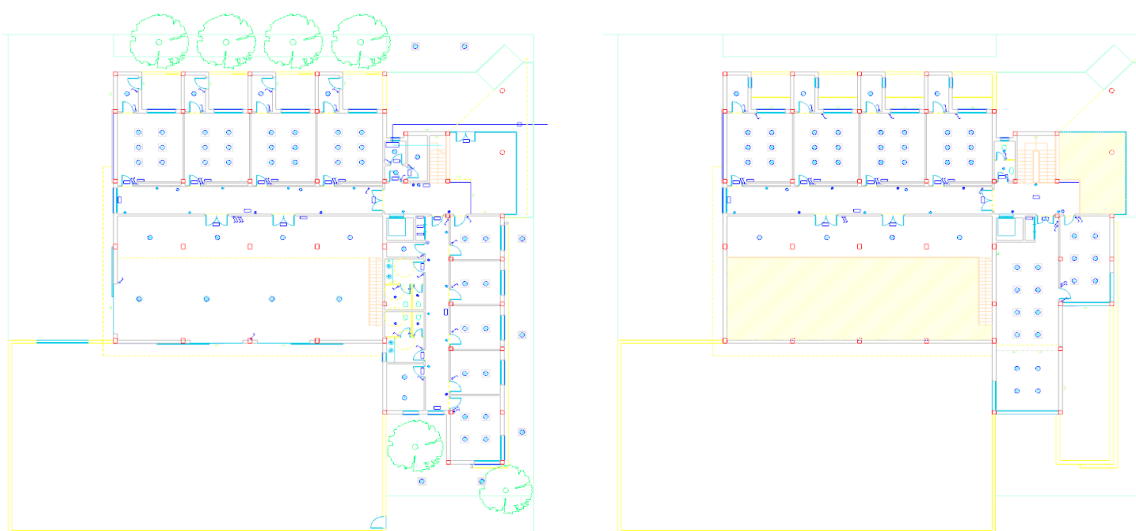


Figura 5.2. Plano de la planta baja (izquierda) y primera planta (derecha) del C-DdI-CIESOL-ARFRISOL en Autocad.

Como se puede observar en la figura 5.2, se ha diseñado el edificio sin tener en cuenta las propiedades y detalles del exterior para este edificio, debido fundamentalmente a las limitaciones de dicha herramienta, que cuenta con un número limitado de librerías con respecto a la edificación y mobiliario, además estos detalles carecen de importancia para el trabajo que aquí se realiza. Además, en la figura 5.2 se aprecia para ambas plantas la fachada con orientación Sur, donde se ubica la sala de juntas en la que se ha desarrollado este trabajo. El principal inconveniente de esta herramienta es que resulta imposible determinar el efecto de la luz natural sobre el interior de la sala. Por este motivo, carece de importancia la ubicación de ventanas y puertas. No obstante, han sido dispuestas en su posición para dotar de mayor realismo a la maqueta del edificio.



Figura 5.3. Construcción del edificio C-Ddl-CIESOL-ARFRISOL mediante la herramienta DIALux evo 3.

Para la obtención del modelo del efecto de las luminarias sobre el nivel de iluminación de la sala mediante esta herramienta no se ha tenido en cuenta la influencia del sol, por lo tanto se obtendrá una distribución de iluminancias calculadas automáticamente por el programa, para el cual los factores que afectan a dicha medición son los coeficientes de reflexión de los materiales de la sala, las características de las luminarias, la disposición de estas, y si están encendidas (100%) o apagadas (0%).

A continuación se muestra una descripción pormenorizada de las características de la sala, en las figuras 5.3 y 5.4 se pueden observar el interior de la sala de juntas desde dos perspectivas diferentes, con el fin de mostrar las características que definen a la misma. Para el diseño del interior de la sala se han utilizado los siguientes elementos de las librerías disponibles:

Para dotar de mayor realismo al modelo de la sala, se han seleccionado de las librerías disponibles el recubrimiento de paredes y suelo más similar a los proporcionados por el libro del edificio. Más concretamente, se ha diseñado con el suelo de madera con un tono claro de marrón con un grado de reflexión del 24% y un reflejo del 4% y las paredes en madera con un tono más oscuro de marrón con un grado de reflexión 11% y reflejo del 18%.

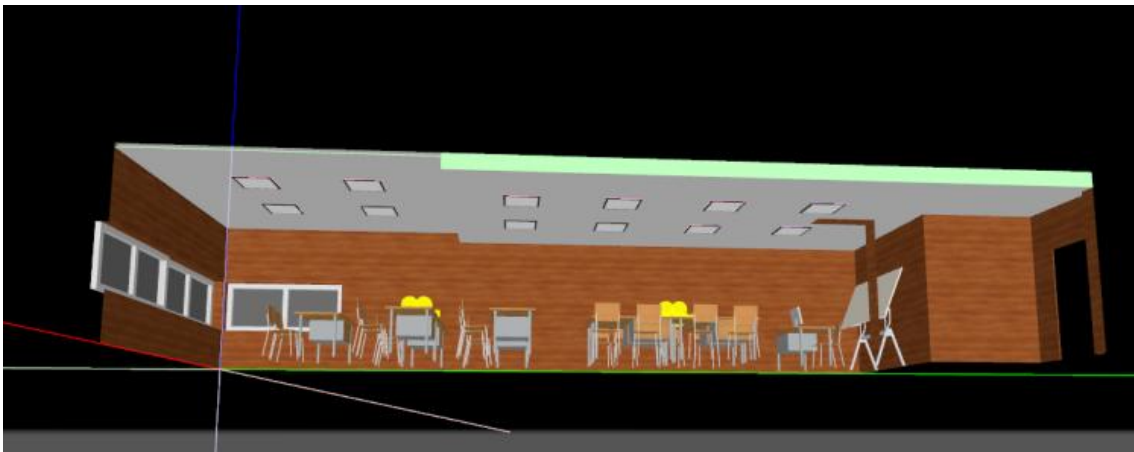


Figura 5.4. Vista desde el lado Este de la sala de juntas.

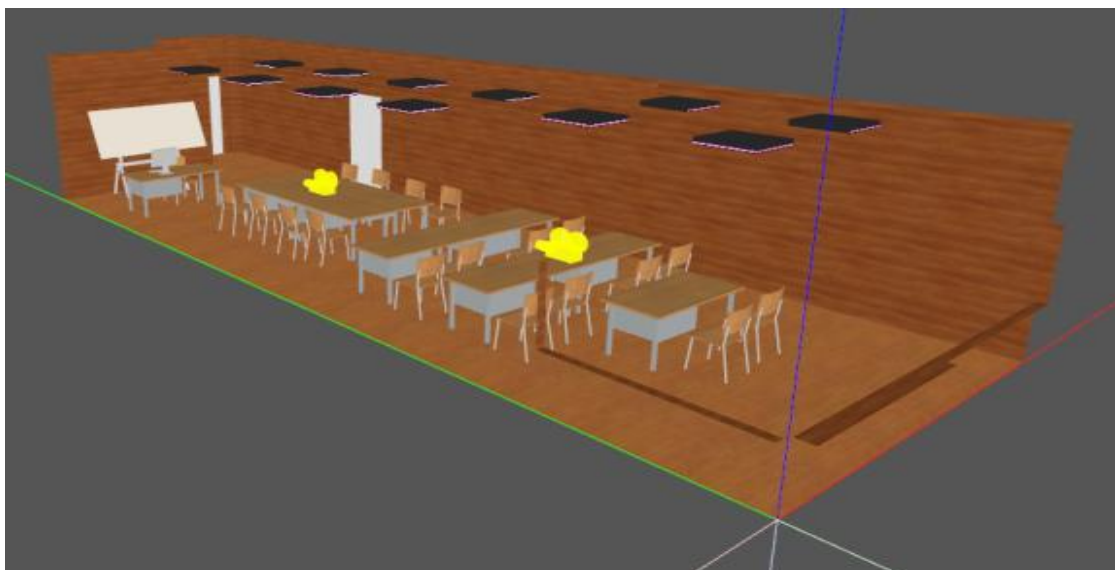


Figura 5.5. Vista desde el lado Oeste de la sala de juntas.

Además de su disposición en la sala explicada en el capítulo 3 las luminarias se ha diseñado con las características que tienen en la instalación real: montaje en bandeja (modelo Impala TBS160 de Philips) integrada en el falso techo, cada montaje cuenta con 4 fluorescentes de 18 W de potencia cada uno, un flujo luminoso de 1050 lm y una temperatura de color de 6200 K, por otro lado las características de las luminarias han sido extraídas de la librería del programa con las siguientes propiedades que se observa en las figuras 5.5 y 5.6, donde se puede observar el tipo de montaje y las características citadas.

Con todo lo expuesto el programa es capaz de realizar una simulación y mostrar las iluminancias en la sala, como se observa en la figura 5.8 y una tabla de valores del índice de deslumbramiento unificado (UGR) en la tabla 5.2.

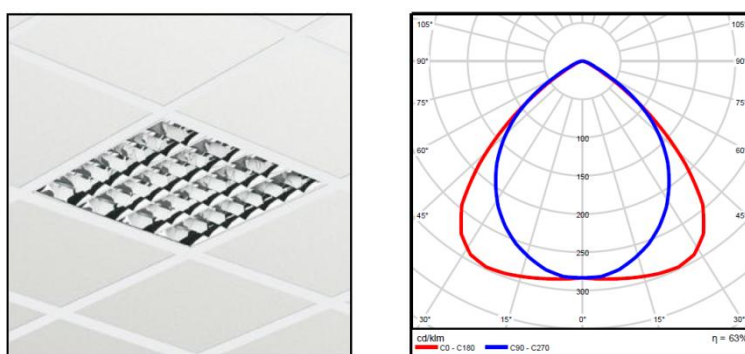


Figura 5.6. Montaje (izquierda) y diagrama polar de intensidad de flujo luminoso (derecha) de las luminarias.

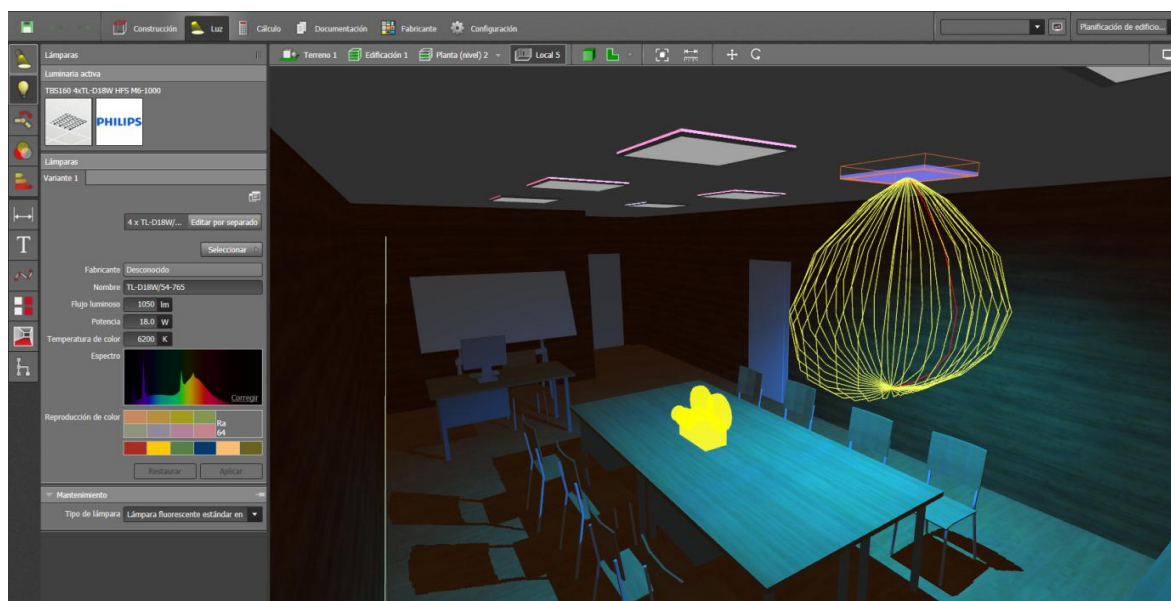


Figura 5.7. Representación 3D del diagrama de la intensidad del flujo luminoso y características de un fluorescente.

En la figura se simula para obtener los niveles de iluminación horizontal a una altura 0,80 m del suelo para poder apreciar la iluminación al nivel de la mesa, medida en la sala de juntas. Se observa como a la entrada de la sala la iluminación disminuye considerablemente y que la zona central de las luminarias alcanzan los máximos. En el perímetro de la sala hay una media de 300 lux.

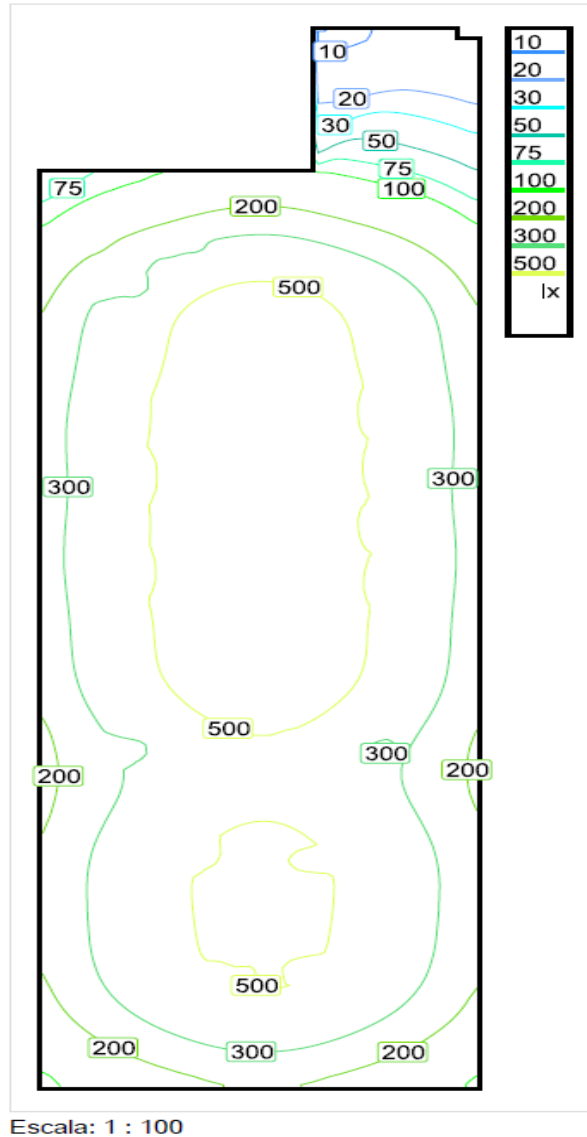
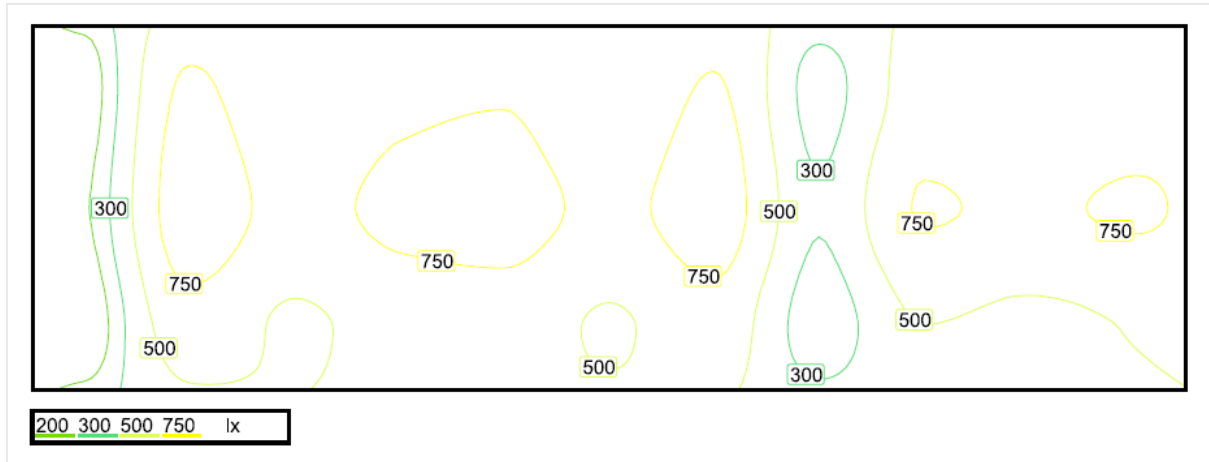


Figura 5.8. Intensidad lumínica perpendicular para una altura de trabajo 0,80 m desde el nivel del suelo de la sala de juntas sin influencia de la luz natural proporcionado por DIALux.

Para poder comparar el efecto de la altura de medición a continuación se muestra los resultados obtenidos mediante la herramienta para una altura de 0,85 (altura a la que se coloca la parte superior del sensor), además se acota la superficie de cálculo a la zona donde se trabaja, descartando así la entrada a la sala y el perímetro.

Las grandes diferencias entre la figura 5.8 y 5.9 y por tanto en la altura de medición, es que a mayor altura se alcanzan máximos más altos.



Escala: 1 : 75

Figura 5.9. Iluminancia horizontal en la zona de trabajo en la sala de juntas para una altura de trabajo de 0,85 m proporcionado por DIALux evo 3.

En la tabla 5.1 se resumen los datos obtenidos por la simulación del programa, como se observa, existe unos valores máximos de casi 900 lux, estos son justo debajo las luminarias, los mínimos de 133 lux se encuentra al fondo de la sala, cerca de las ventanas. Esto es debido que el diseño de la instalación de iluminación considera el aporte de iluminación natural, por lo tanto se diseño con un mayor número de luminarias en la zona más alejada de las ventanas. Por otro lado, la compensación de altura significa a qué distancia del suelo se toman las medidas, se hace la simulación. En este caso de 0,85 es el valor que propone la norma.

Iluminancia horizontal. Compensación de altura: 0,85 m					
Media	Mínimo	Máximo	Mín./medio	Mín./Máx.	Puntos
574 lx	133 lx	893 lx	0,232	0,149	11x3

Tabla 5.1. Resumen valores iluminancia horizontal para la zona de trabajo en la sala de juntas proporcionado por *DIALux evo 3*.

Por último en la figura 5.10 se representa la iluminación horizontal en 3D, para una mayor comprensión del efecto de las luminarias sobre la iluminancia en la sala.

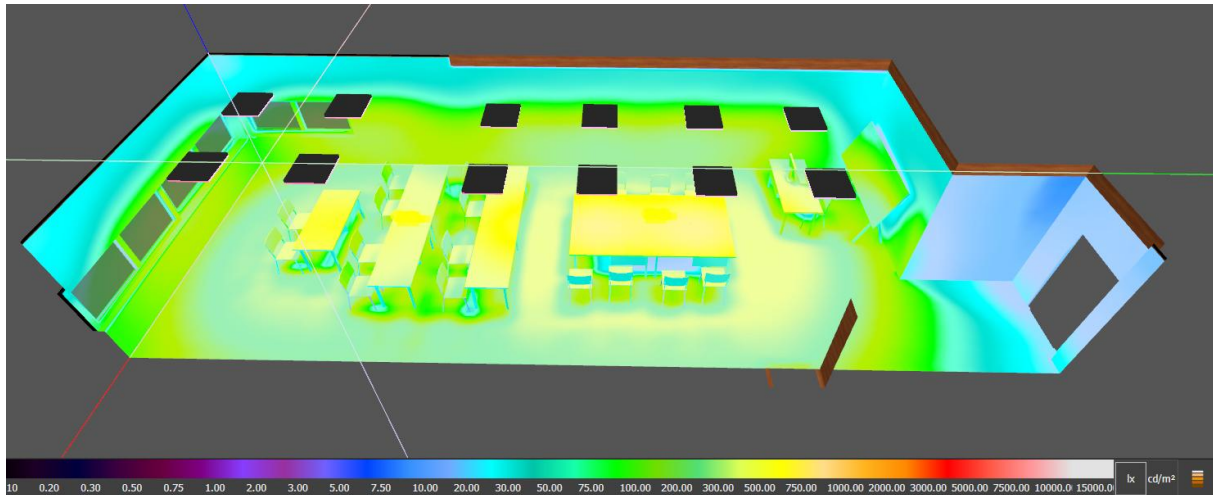


Figura 5.10. Representación en 3D de la iluminancia horizontal en el interior de la sala de juntas proporcionado por DIALux evo 3.

Además de la iluminancia horizontal, se extraen los valores del índice UGR. En la tabla 5.2 se muestran los valores para la superficie mostrada en la figura 5.9. La primera fila la tabla muestra el largo del rectángulo, y la primera columna el ancho, así se tiene los 33 valores.

Como se observa el máximo se encuentra en la esquina inferior derecha, que corresponde en la sala de juntas a la mesa que hay debajo de la luminaria de la zona de ventanas más cercana a la ventana 1. Esto es debido a que esta posición se encuentra de cara con un gran número de luminarias.

m	-5,64	-4,51	-3,39	-2,26	-1,13	0,00	1,13	2,26	3,39	4,51	5,64
1,30	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
0,00	<10	22	16	19	20	16	21	10	22	19	23
-1,30	<10	24	17	21	21	16	23	<10	21	18	21

Tabla 5.2. Tabla de valores de UGR para la zona de trabajo en la sala de juntas proporcionado por DIALux evo 3.

5.2.2 Modelado de la luz natural

Por otro lado, para obtener la influencia en la iluminancia interior de la iluminancia exterior se han realizado diferentes ensayos en la sala de juntas. Más concretamente, el sistema se va a modelar en función de los siguientes parámetros:

- Variables a controlar

Las variables a controlar (véase figura 5.3) son los niveles de iluminación o iluminancias. Como se ha descrito en capítulos anteriores, la sala de juntas cuenta con dos luxómetros de interior que se encuentran situados en dos zonas de trabajo diferenciadas y que se han definido anteriormente. El rango de medida proporcionado por dichos sensores es de 0 lux hasta 200.000 lux. En el siguiente capítulo se detallará en los niveles aceptables que se quiere mantener la iluminación en la sala.

Variables a controlar		
Nombre	Rango	Observaciones
Iluminancia zona ventanas	[0 - 200.00] lux	Nivel de iluminación en el interior de la sala, luxómetro colocado en la zona de las ventanas.
Iluminancia zona proyector.	[0 - 200.00] lux	Nivel de iluminación en el interior de la sala, luxómetro colocado en la zona del proyector.

Tabla 5.3. Variables a controlar.

- Variables de control

Las variables de control (véase figura 5.4) hacen referencia a aquellas variables que se pueden manipular. Más concretamente, en este caso son el estado de las luminarias por zonas, la apertura de las persianas y la orientación de las lamas.

El control sobre las luminarias es todo o nada, encendidas (100%) o apagadas (0%). Por otro lado, la apertura de las persianas se puede desplazar por el rango [0 - 100]% siendo 0% totalmente cerradas y 100% totalmente abiertas. Finalmente, para la orientación de las lamas se han definido tres posiciones: (100%), 45°(50%), 0°(0%). Sin embargo, las lamas solo se pueden orientar cuando la persiana se encuentre totalmente cerrada(0%).

- Perturbaciones

Se trata de la iluminancia exterior, es por lo tanto una perturbación medible, se dispone de un luxómetro en la garita del exterior, que da cuenta del nivel de iluminación del exterior, en el tejado del edificio. Para la época del año en el que se ha realizado este proyecto, la radiación exterior afecta al interior solo con su componente difusa.

Variables de control		
Nombre	Rango	Observaciones
Estado del grupo de luminarias zona ventanas.	0% ó 100%	Dos estados: Apagadas o encendidas.
Estado del grupo de luminarias zona proyector.	0% ó 100%	Dos estados: Apagadas o encendidas.
Apertura persiana 1 (AP1).	[0 - 100]%	Apertura desde el 0% (totalmente cerrada) hasta el 100% (totalmente abierta)
Apertura persiana 2 (AP2).	[0 - 100]%	Apertura desde el 0% (totalmente cerrada) hasta el 100% (totalmente abierta)
Apertura persiana 3 (AP3).	[0 - 100]%	Apertura desde el 0% (totalmente cerrada) hasta el 100% (totalmente abierta)
Orientación lama 1 (OL1).	0% 50% ó 100%	Orientación de 0°, 45° ó 90°
Orientación lama 2 (OL2).	0% 50% ó 100%	Orientación de 0°, 45° ó 90°
Orientación lama 3 (OL3).	0% 50% ó 100%	Orientación de 0°, 45° ó 90°

Tabla 5.4. Variables a controlar.

- Variables/entradas de decisión (véase figura 5.5)

Estas variables se utilizarán a la hora de controlar el sistema, es decir, son variables que ofrecen información sobre el estado de la sala de juntas. Específicamente, son el estado del proyector que podrá ser en encendido (100%) o apagado (0%), el número de personas en la sala (nº de personas) y la franja horaria en la que se está usando la sala (mañana o tarde).

Variables/entradas de decisión		
Nombre	Rango	Observaciones
Uso del proyector.	0% ó 100%	Dos estados: Apagado o encendido
Número de personas.	Unidades.	Número de personas en el interior de la sala.
Franja horaria.	Mañana o Tarde.	[00:00-12:00] franja horaria de mañana. [12:00-23:59] franja horaria de tarde.

Tabla 5.5. Variables o entradas de decisión.

A continuación se muestran dos de los ensayos realizados, con el fin de obtener la relación entre las posiciones de las persianas, la iluminancia exterior y la iluminancia en el interior de la sala en las dos zonas definidas anteriormente.

Debido a que hay dos ventanas con orientación sur y una con orientación oeste se realizan los ensayos diferenciados en mañana y tarde, ya que para las horas de mañana se debe bloquear la incidencia directa de la luz del sol que entra por la ventana 1, situada más al este, y por la tarde se debe bloquear la incidencia directa de la luz del sol sobre la ventana 3, con orientación oeste.

Las siguientes figuras pertenecen a ensayos característicos de verano, durante este se han realizado diferentes ensayos para alcanzar la relación entre las posiciones de las persianas y su efecto en el nivel de iluminación, y para las luminarias se han realizado los ensayos para su validación con respecto a lo ofrecido por *DIALux evo 3*.

Para simplificar los resultados se han definido 6 estados para la mañana:

- Totalmente Abierto (TA), consiste en la apertura al 100% de todas las persianas.
- Abierto (A), consiste en la orientación de las lamas de la persiana 1 y 2 al 100% (90°) y mantener la persiana 3 abierta al 100%
- Medio (M), consiste en la ubicación de la apertura de las 3 persianas al 50%
- Medio Bajo (MB), la persiana 1 cerrada completamente (0%) y las persianas 2 y 3 al 50% de apertura.
- Casi Cerrado (CC), las persianas 1 y 2 cerradas por completo (0%) y la persiana 3 con una orientación de las lamas del 50% (45°).
- Totalmente Cerrado, las 3 persianas completamente cerradas.

Y otros 6 estados para la tarde:

- Totalmente Abierto (TA), consiste en la apertura al 100% de todas las persianas.
- Abierto (A), consiste en la orientación de las lamas de la persiana 2 y 3 al 100% (90°) y mantener la persiana 1 abierta al 100%
- Medio (M), consiste en la apertura al 100% de la persiana 1 y la orientación de las lamas de la persiana 3 al 100% (90°), la persiana 2 completamente cerrada (0%).
- Medio Bajo (MB), la persianas 1 y 2 al 50% la apertura y la orientación de las lamas de la persiana 3 al 50% (45°).
- Casi Cerrado (CC), las persianas 2 y 3 cerradas por completo (0%) y la persiana 1 con una orientación de las lamas del 50% (45°).
- Totalmente Cerrado, las 3 persianas completamente cerradas.

Las principales diferencias que se observan entre los estados de la tarde y de la mañana son que por la tarde existe más incidencia directa, ya que la ventana 3 tiene orientación oeste. Las persianas 1 y 2 al tener orientación sur no se ven muy afectadas por la incidencia directa por la mañana.

➤ **Modelado de la iluminancia en el interior de la sala para las mañanas de verano.**

Aquí se muestra uno de los ensayos característicos de una de las mañanas de verano. En la figura 5.11 se muestra la iluminancia exterior, típica de un día claro, como la mayoría de los días para esta estación en Almería. Se observa cómo no existe ninguna perturbación en forma de nube u otra obstrucción en el luxómetro de exterior. El nivel de iluminación va aumentando progresivamente desde 40000 lux hasta casi 65000 lux.

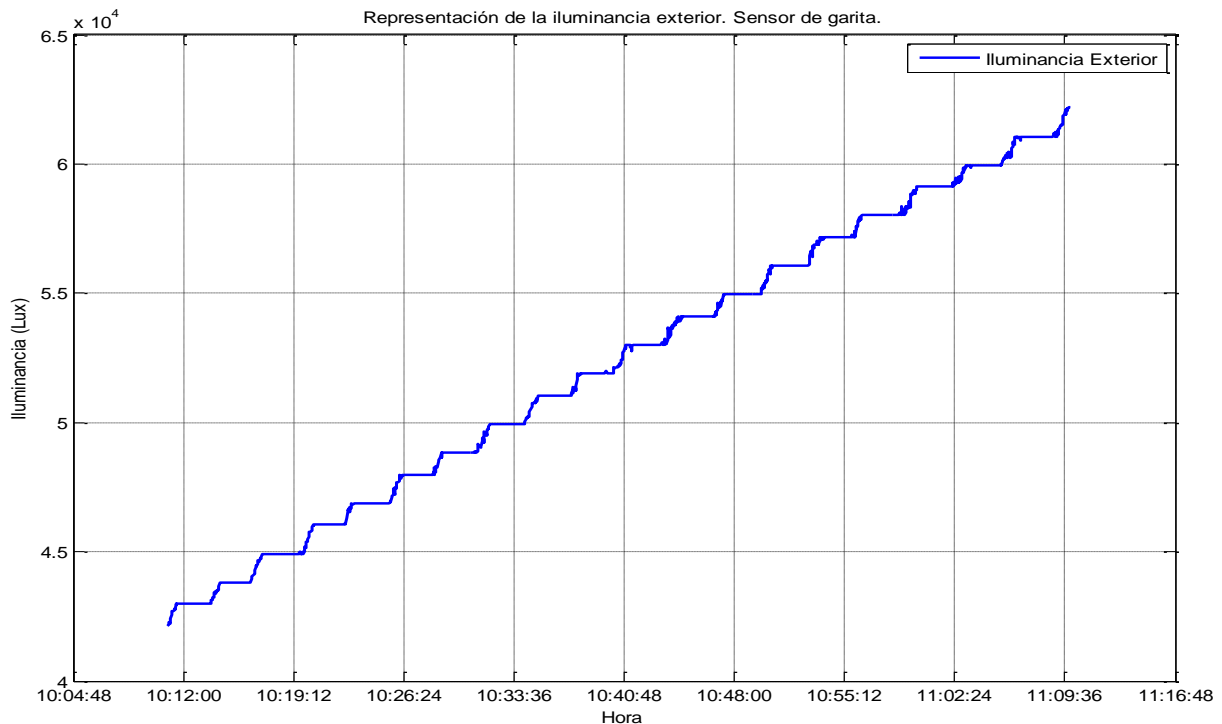


Figura 5.11. Representación de la iluminancia exterior.

En la figura 5.12 se representa los niveles de iluminación para todo el ensayo, frente a la iluminancia exterior, con el fin de obtener una visión cuantitativa de qué cantidad de iluminancia consigue acceder a la sala a través de la ventana y persiana en sus diferentes estados.

Como se observa para esta diferencia de iluminancia exterior [40000-60000] lux no hay diferencia de nivel de iluminación en el interior.

Lo primero que se observa es que la iluminancia exterior no afecta a la iluminancia de la zona de proyector. Por lo tanto de aquí en adelante se trataran por separado ya que como se observará en figuras siguientes las luminarias de cada zona solo afectan a su zona.

En la figura 5.13 se demuestra la independencia por zonas del nivel de iluminación, se observa como la iluminancia de la zona proyector solo es distinto de 0 cuando se enciende las luminarias para dicha zona, alcanza un valor de 500 lux aproximadamente.

Por lo tanto se está en posición de poder comentar el efecto de los estados en el nivel de iluminación para la zona de ventanas, para ello es necesario las figuras 5.14, 5.15, 5.16 y 5.17

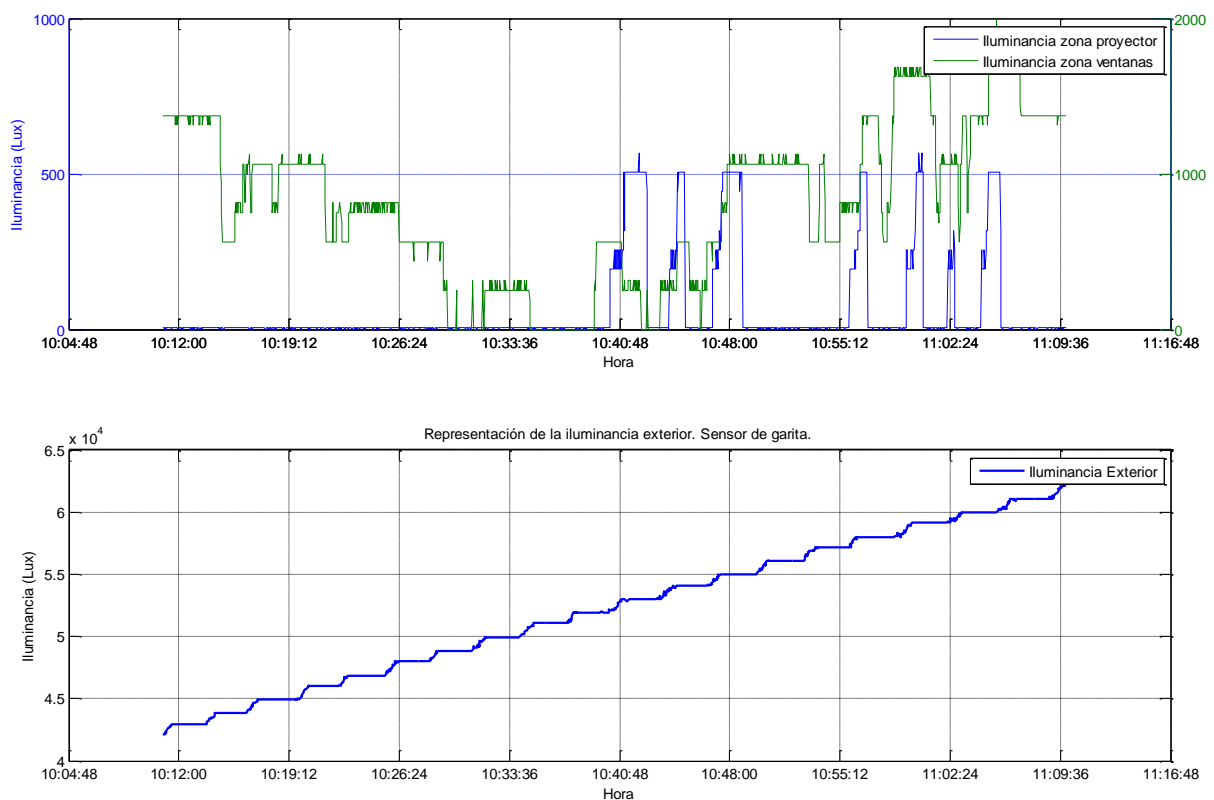


Figura 5.12. Representación de las iluminancias en el interior de la sala frente a la iluminancia exterior.

En ellas se muestran respectivamente el nivel de iluminación de la zona ventanas, el porcentaje de apertura de las persianas, el porcentaje de apertura de las lamas (orientación) y el estado de las luminarias.

Como es necesario la revisión de todas las figuras en conjunto se van a comentar en conjunto.

El ensayo arranca a las 10:10 con todas las persianas abiertas (TA) y las luces apagadas, y como se ha dicho en el exterior hay una iluminancia de aproximadamente 40000 lux. Para este estado la iluminancia en la zona de ventanas es de 1375 lux.

A las 10:15 se colocan las persianas en el estado A obteniendo una iluminancia de 1125. A las 10:23 para el estado M se tiene una iluminancia en la zona de ventanas de 812. Con el estado MB a las 10:26 la iluminancia en la zona de ventanas es de 562 lux, a continuación a las 10:29 para el estado CC se obtiene una iluminancia en la zona de ventanas de 312 lux. Y por ultimo cuando se cierra completamente se alcanzan 0 lux.

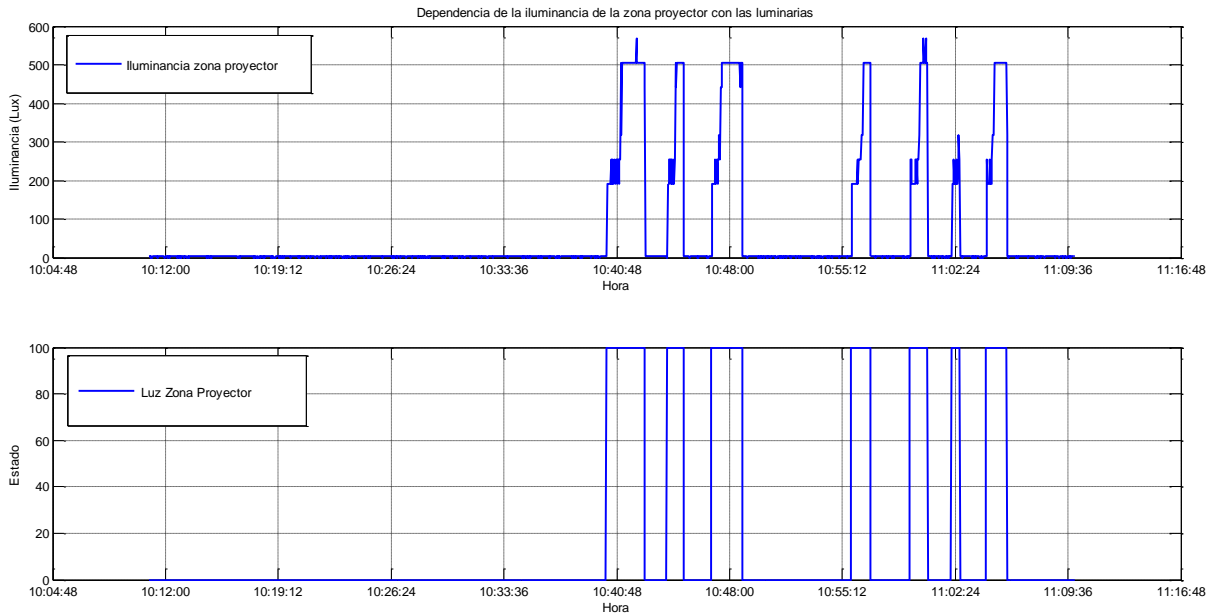


Figura 5.13. Iluminancia en la zona de proyector frente al estado de las luminarias.

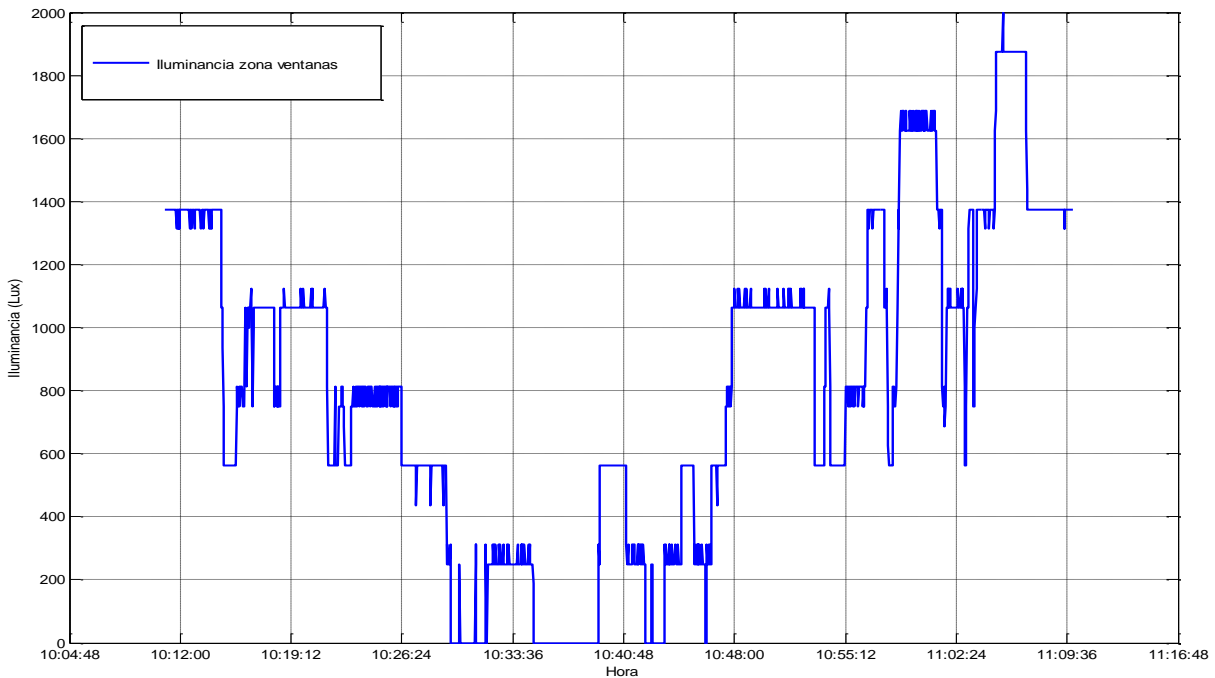


Figura 5.14. Iluminancia en la zona de ventanas.

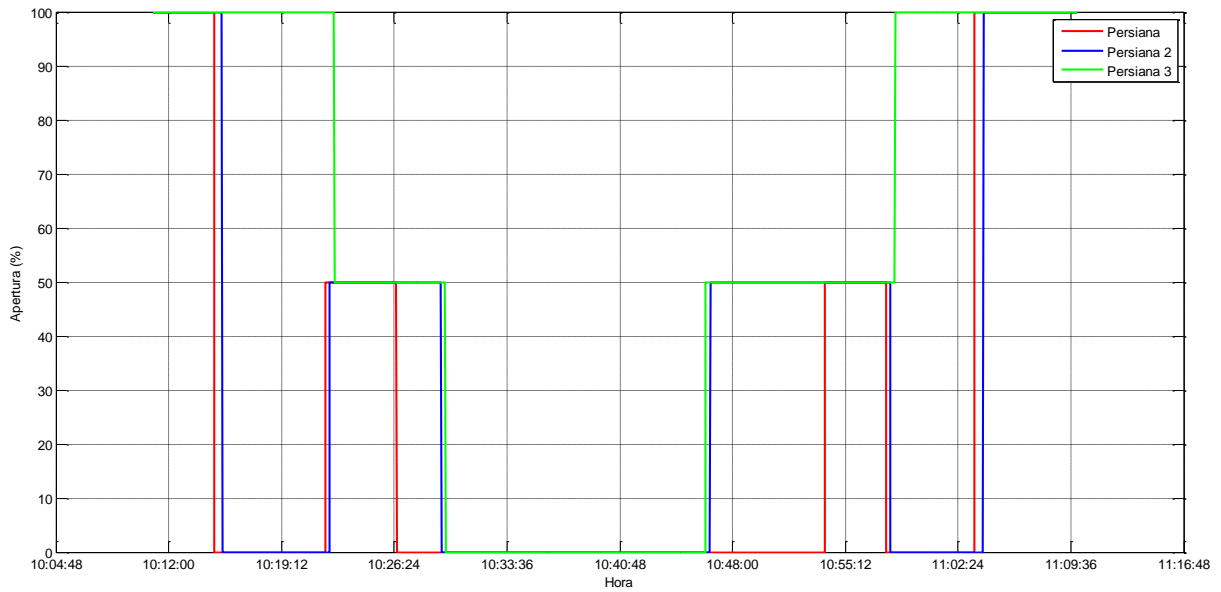


Figura 5.15. Estado de la apertura de las persianas.

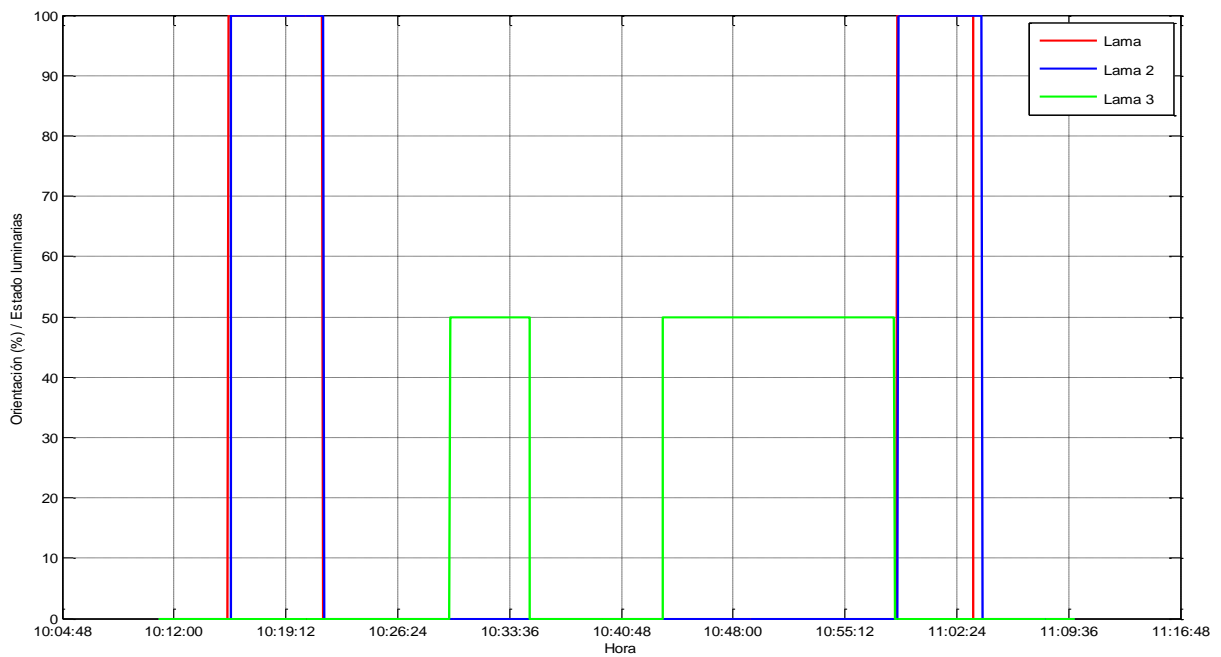


Figura 5.16. Porcentaje de orientación de las lamas.

Por lo tanto el modelo para las mañanas de verano son los resultados obtenidos en las figuras anteriores y resumidas en la tabla 5.6. Donde AP significa apertura de la persiana y OL orientación de las lamas, el numero define la persiana en cuestión.

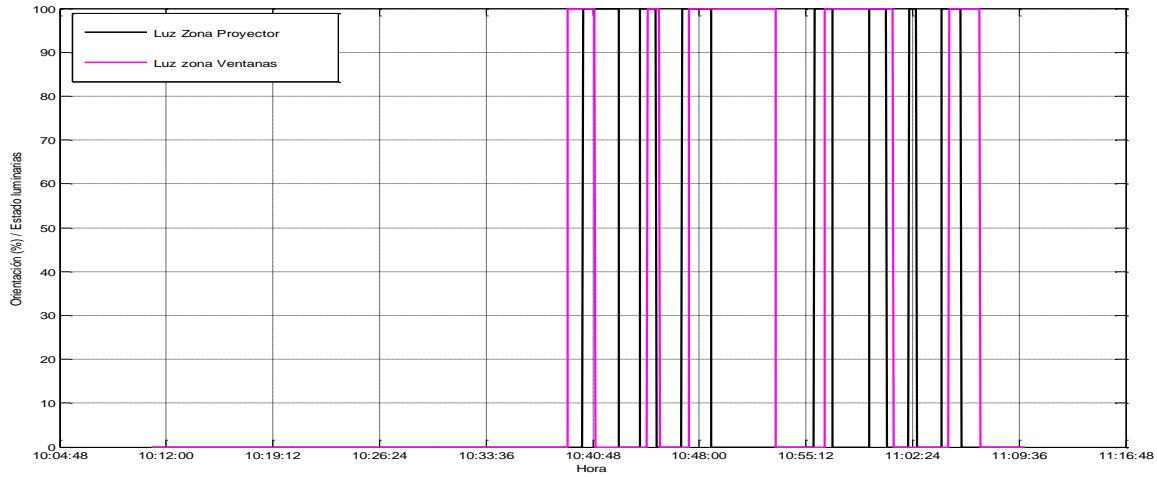


Figura 5.17. Estado de las luminarias.

Estado	AP1	AP2	AP3	OL1	OL2	OL3	Iluminancia zona Ventanas (lux)
TA	100%	100%	100%	-	-	-	1375
A	0%	0%	100%	100%	100%	-	1125
M	50%	50%	50%	-	-	-	812
MB	0%	50%	50%	0%	-	-	562
CC	0%	0%	0%	0%	0%	50%	312
TC	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0

Tabla 5.6. Resumen iluminancias en la zona de ventanas para los estados del modelo de mañana.

Como es lógico la iluminancia exterior varía a lo largo de la mañana, por lo que el modelo obtenido es la relación de cómo afecta en la disminución del nivel de iluminación exterior a la interior las posiciones de las persianas. Por lo que para otros valores de iluminancia es obvio que variarían en el interior de los presentados aquí.

Esta primera parte del ensayo sirve como se ha explicado para obtener el modelo de la relación entre los estados de las persianas con la diferencia de nivel de iluminación entre el exterior y el interior, pero el ensayo aporta más información, después de este tramo, a partir de las 10:39 'se retrocede' en los estados para observar cómo afecta la iluminación en dichos estados, es decir, se vuelve a colocar las persianas en los seis estados y se encienden las luminarias.

En la tabla 5.7 se muestra cómo afecta encender las luminarias en sus tres combinaciones las dos zonas encendidas (LVLP ON), solo encendida la de la zona de ventanas (LV ON) y por último solo encendida las luminarias de la zona proyector (LP ON).

De nuevo se observa cómo no existe influencia de las luminarias de la zona de proyector sobre las zona de las ventanas. Además se observa también como el encendido de las luminarias hace que incremente 500 lux el nivel de iluminación, esto se cumple siempre excepto en el estado CC.

Estado	Estado Luminarias	Iluminancia zona ventanas(LUX)
TA	LV ON	1874
	LVLP ON	1874
	LP ON	1375
A	LV ON	1624
	LVLP ON	1624
	LP ON	1125
M	LV ON	1374
	LVLP ON	1374
	LP ON	812
MB	LV ON	1124
	LVLP ON	1124
	LP ON	562
CC	LV ON	562
	LVLP ON	562
	LP ON	312
TC	LV ON	562
	LVLP ON	562
	LP ON	0

Tabla 5.7. Resumen del efecto de las luminarias en los seis estados para el modelo de mañana.

➤ Modelado de la iluminancia en el interior de la sala para las tardes de verano.

Aquí se muestra uno de los ensayos característicos de una de las tardes de verano. En la figura 5.18 se muestra la iluminancia exterior, típica de un día claro. Se observa cómo no existe ninguna perturbación en forma de nube u otra obstrucción en el luxómetro de exterior. El nivel de iluminación va disminuyendo progresivamente desde 20000 lux hasta casi 6000 lux.

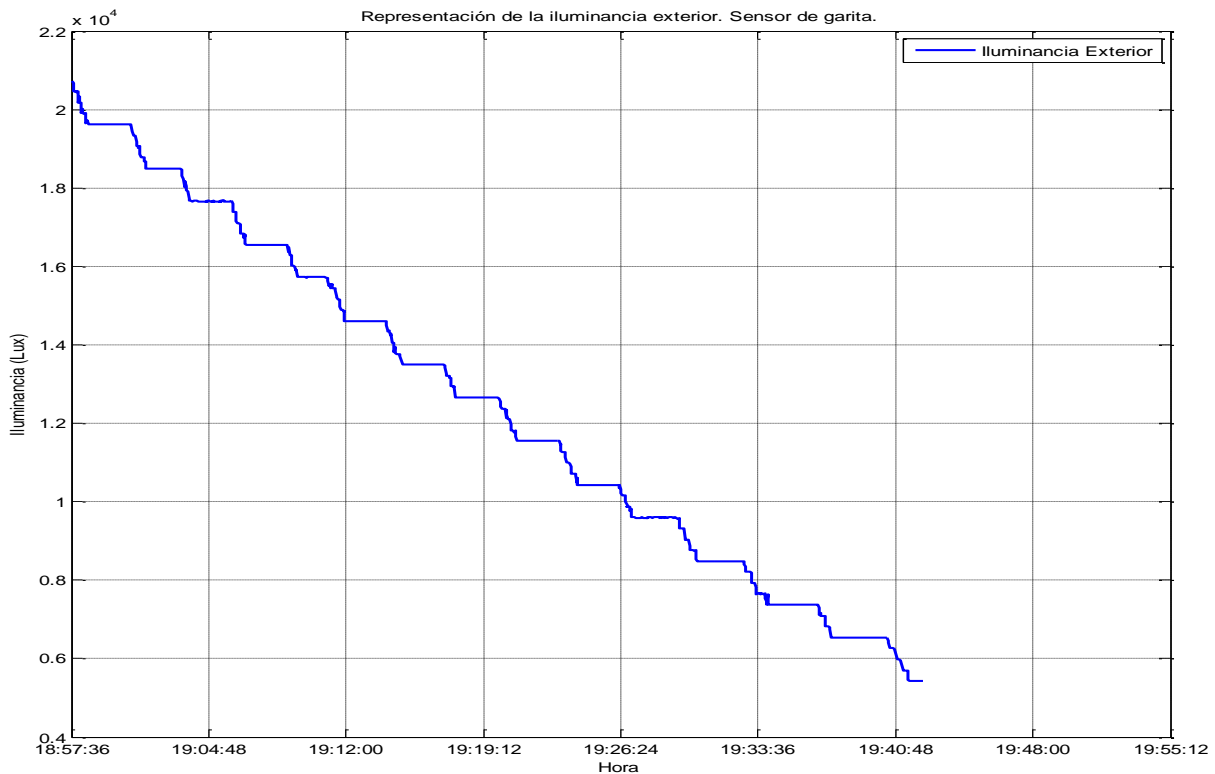


Figura 5.18. Representación de la iluminancia exterior.

En la figura 5.19 se representa los niveles de iluminación para todo el ensayo, frente a la iluminancia exterior, con el fin de obtener una visión cuantitativa de qué cantidad de iluminancia consigue acceder a la sala a través de la ventana y persiana en sus diferentes estados.

Como se observa para esta diferencia de iluminancia exterior [20000-6000] lux no hay diferencia de nivel de iluminación en el interior, para estas horas de la tarde se puede apreciar que cada vez más el nivel de iluminación en el interior tiende a disminuir.

De nuevo se observa que la iluminancia exterior no afecta a la iluminancia de la zona de proyector.

De nuevo se demuestra la independencia por zonas del nivel de iluminación en la figura 5.20, se observa como la iluminancia de la zona proyector solo es distinto de 0 cuando se enciende las luminarias para dicha zona, alcanza un valor de 500 lux aproximadamente.

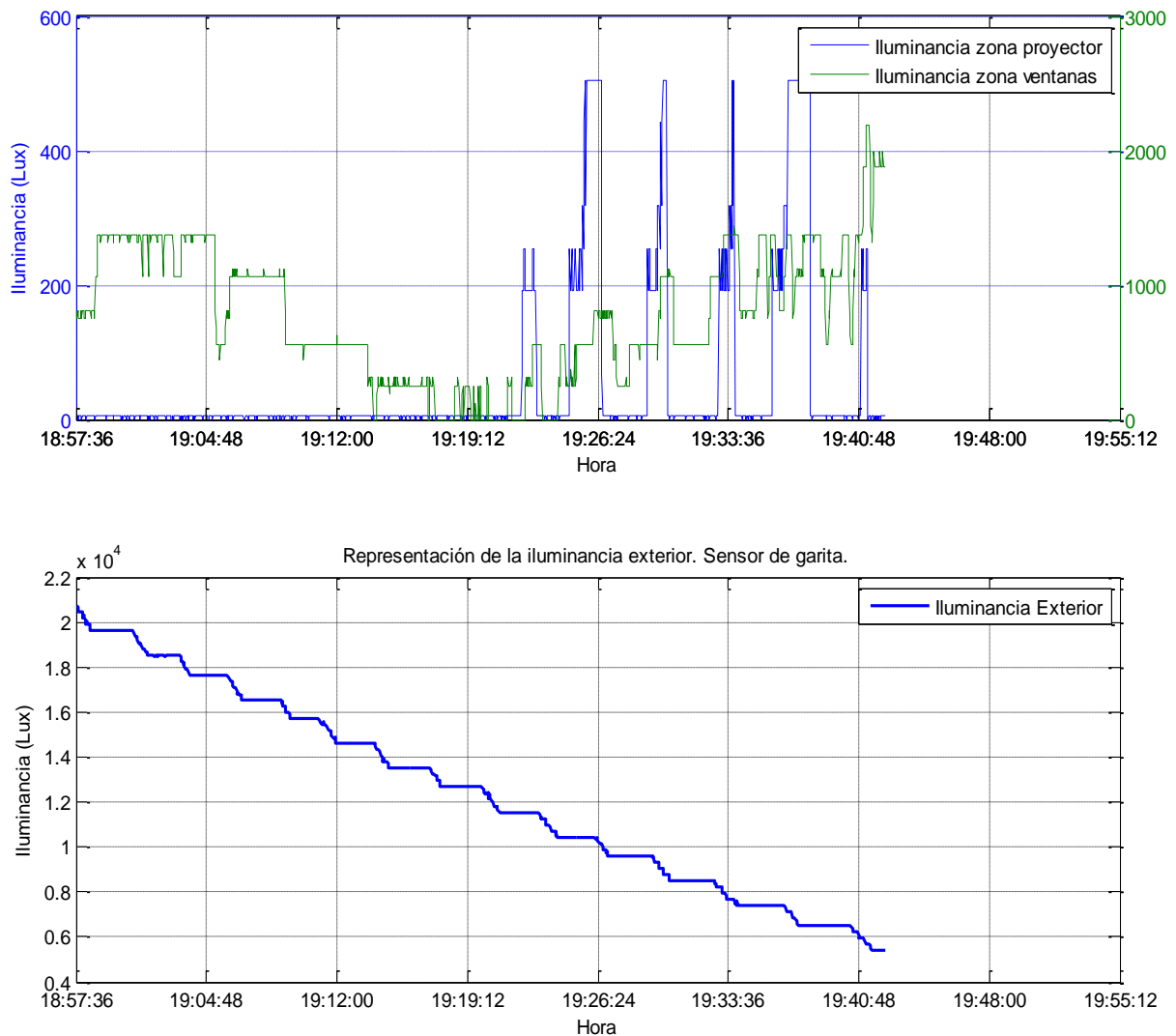


Figura 5.19. Representación de la iluminancias en el interior de la sala frente a la iluminancia exterior.

Para comentar el efecto de los estados en el nivel de iluminación para la zona de ventanas para una tarde característica de verano, para ello es necesario las figuras 5.21, 5.22, 5.23 y 5.24.

En ellas se muestran respectivamente el nivel de iluminación de la zona ventanas, el porcentaje de apertura de las persianas, el porcentaje de apertura de las lamas (orientación) y el estado de las luminarias.

Como es necesario la revisión de todas las figuras se van a comentar en conjunto.

El ensayo arranca a las 18:57 con todas las persianas abiertas (TA) y las luces apagadas, y como se ha dicho en el exterior hay una iluminancia de aproximadamente 20000 lux. Para este estado la iluminancia en la zona de ventanas es de 1375 lux.

A las 19:05 se colocan las persianas en el estado A obteniendo una iluminancia de 1125. A las 19:07 para el estado M se tiene una iluminancia en la zona de ventanas de 1062 lux. Con el estado MB a las 19:10 la iluminancia en la zona de ventanas es de 624/562 lux, a continuación a las 19:15 para el estado CC se obtiene una iluminancia en la zona de ventanas de 312/249 lux. Y por último cuando se cierra completamente a las 19:17 se alcanzan 0/249 lux.

Por lo tanto el modelo para las tardes de verano son los resultados obtenidos en las figuras anteriores y resumidas en la tabla 5.6. Donde AP significa apertura de la persiana y OL orientación de las lamas, el numero define la persiana en cuestión.

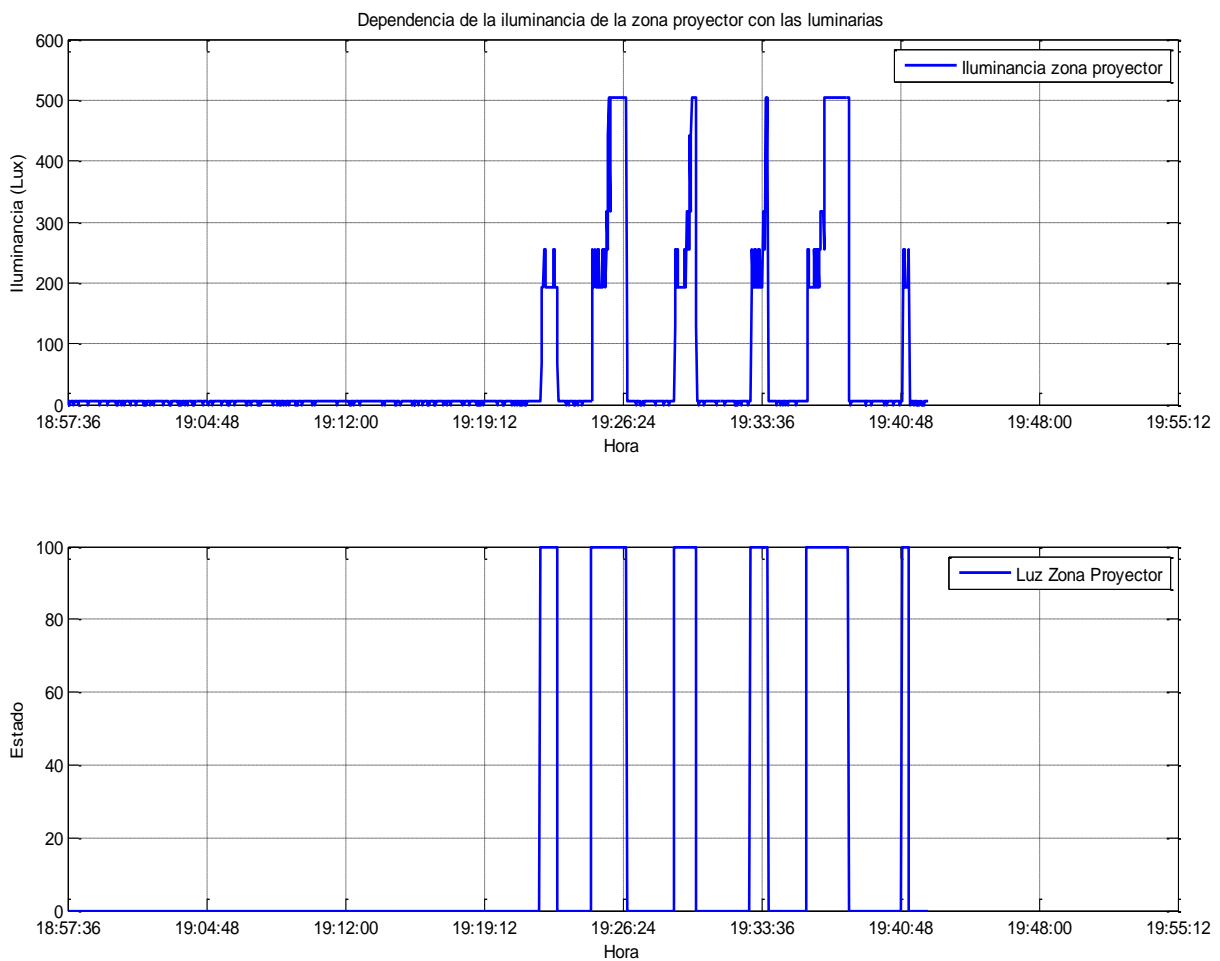


Figura 5.20. Iluminancia en la zona de proyector frente al estado de las luminarias.

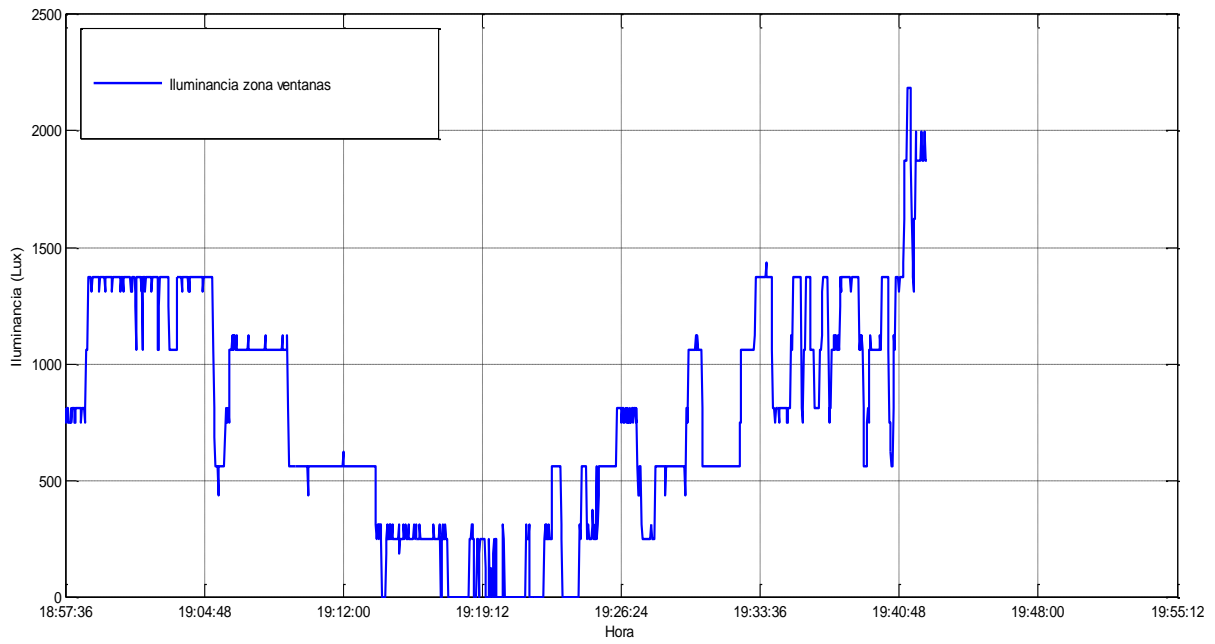


Figura 5.21. Iluminancia en la zona de ventanas.

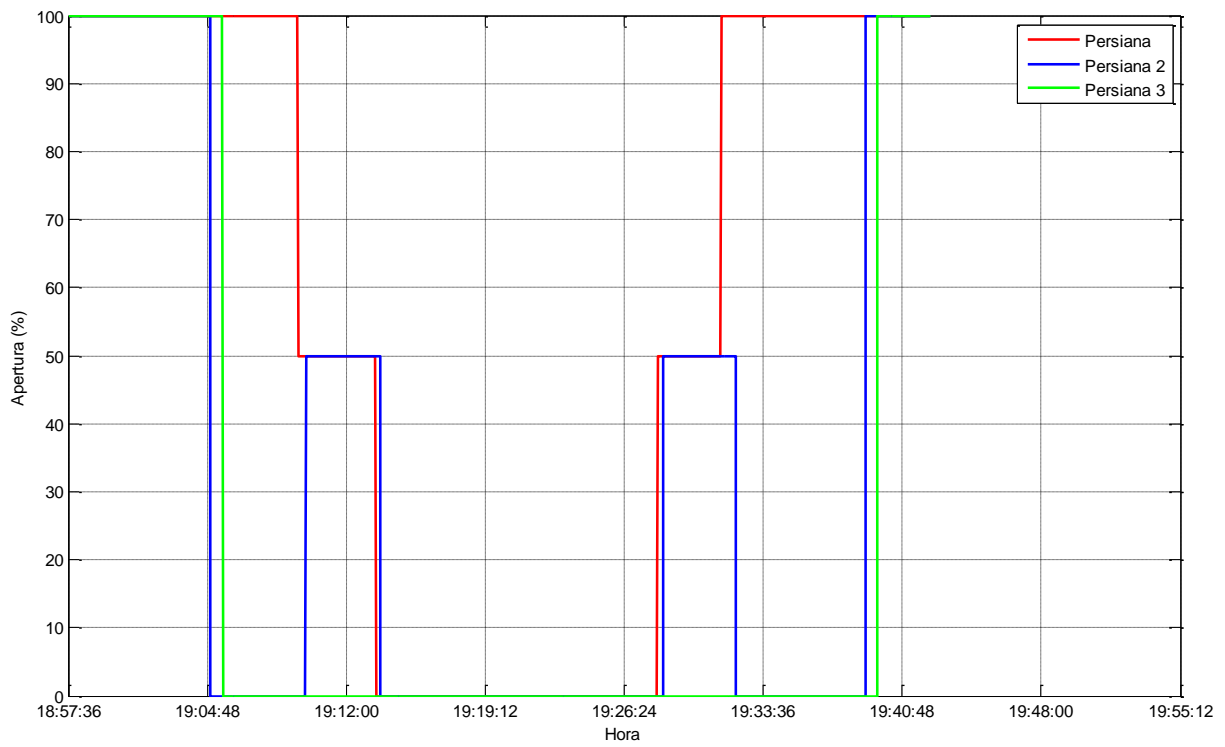


Figura 5.22. Estado de la apertura de las persianas.

Diseño de un sistema de control del confort lumínico en el interior de edificios basado en lógica difusa.

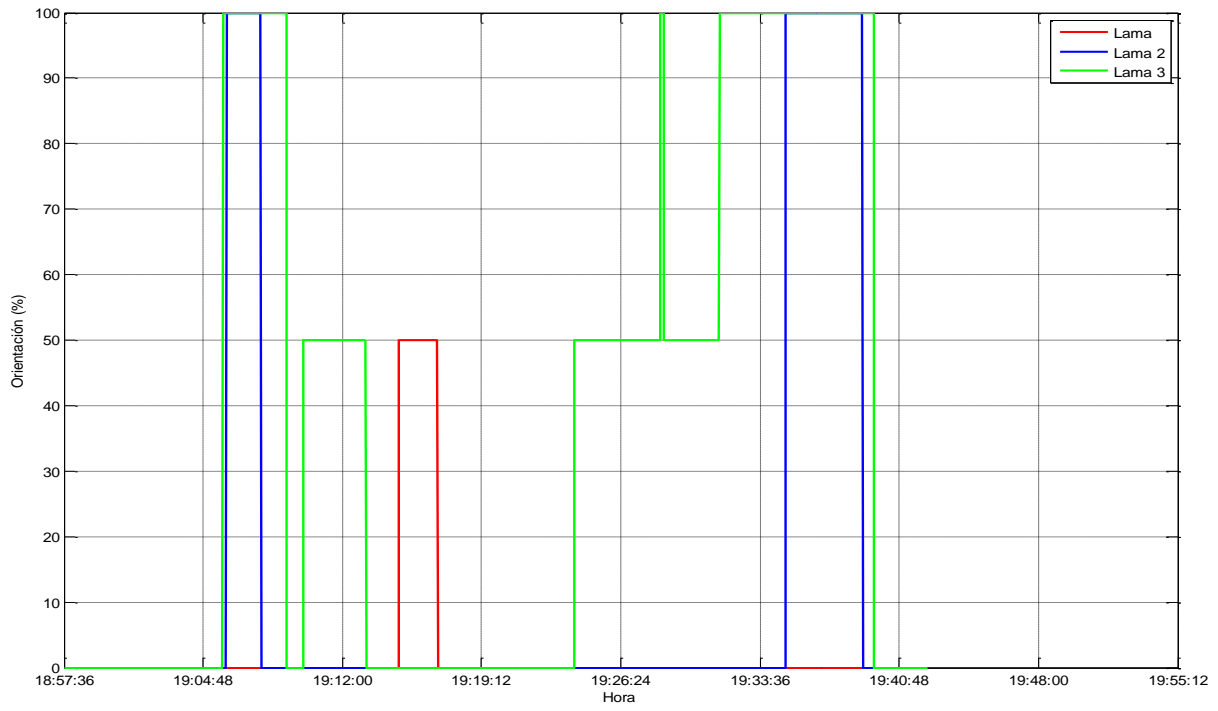


Figura 5.23: Porcentaje de orientación de las lamas.

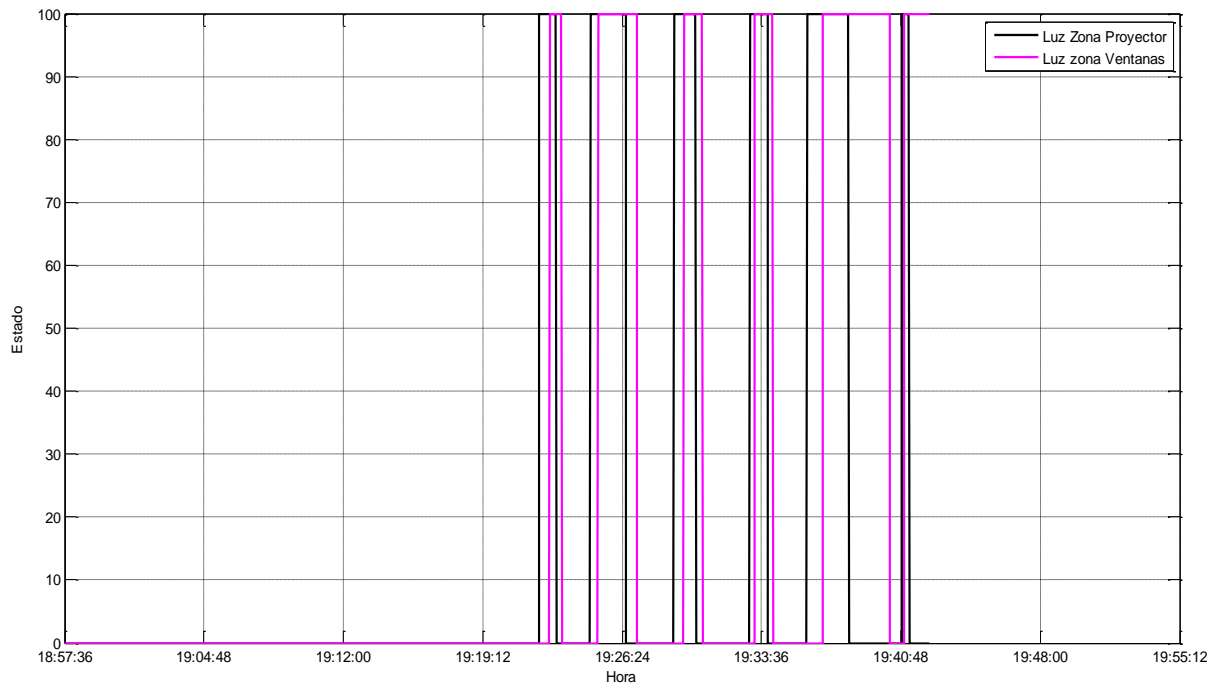


Figura 5.24: Estado de las luminarias.

Estado	AP1	AP2	AP3	OL1	OL2	OL3	Iluminancia zona Ventanas (lux)
TA	100%	100%	100%	-	-	-	1375
A	100%	0%	0%	-	100%	100%	1125
M	100%	0%	0%	-	0%	100%	1062
MB	50%	50%	0%	-	-	50%	562
CC	0%	0%	0%	50%	0%	0%	312
TC	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0

Tabla 5.8: Resumen iluminancias en la zona de ventanas para los estados del modelo de tarde.

De igual modo que para la mañana, en este horario se ha demostrado la influencia de las luminarias sobre el nivel de iluminación en los 6 estados, con la misma nomenclatura se observa una influencia parecida con algunas ligeras diferencias en la tabla 5.9.

En este caso a excepción de los estados A y M, en los demás sí que suma aproximadamente unos 500 lux.

Estado	Estado Luminarias	Iluminancia zona ventanas(LUX)
TA	LV ON	1874
	LVL P ON	1874
	LP ON	1375
A	LV ON	1374
	LVL P ON	1374
	LP ON	1062
M	LV ON	1374
	LVL P ON	1374
	LP ON	1062
MB	LV ON	1062
	LVL P ON	1062
	LP ON	562
CC	LV ON	812
	LVL P ON	812
	LP ON	249
TC	LV ON	562
	LVL P ON	562
	LP ON	0

Tabla 5.9: Resumen del efecto de las luminarias en los seis estados para el modelo de tarde.

5.3 Calibración y validación del modelo

Para realizar la calibración y validación del modelo de influencia de la luz natural se han realizado diversos ensayos en diferentes franjas horarias llevando a cabo los ajustes necesarios. En este apartado se representarán los resultados obtenidos para uno de los ensayos realizados por la mañana y otro por la tarde con el fin de validar los modelos del apartado anterior.

5.3.1 Validación del modelo de la iluminancia en el interior de la sala para las mañanas de verano.

Para la validación del modelo de la iluminancia en el interior de la sala para las mañanas de verano se han realizado diferentes ensayos durante las mañanas, en este apartado se muestra uno de ellos con la intención de demostrar que los estados son válidos para las condiciones citadas.

De nuevo se comienza contextualizando el ensayo representando la iluminancia exterior en la figura 5.25.

Se observa una vez más un día claro donde la iluminancia asciende progresivamente, pero en este caso si sufre ligeras perturbaciones, que pueden ser el paso de alguna nube o algún tipo de obstáculo entre el sensor y el sol.

Este ensayo presenta el horario en el cual la sala tiene mayor uso, desde las 9:00 de la mañana hasta las 11:10 aproximadamente. La iluminancia exterior, para la franja horaria en la que se lleva a cabo, alcanza valores máximos de 75.250 lux. Sin embargo entre las 9:50 y las 10:04 y entre las 11:00 y 11:10 el nivel de iluminación exterior sufre una disminución brusca debida posiblemente al paso de nubes.

En la figura 5.26 se muestra una comparación entre los niveles de iluminancia exterior e interior. Más concretamente, se puede observar y por tanto validar como la iluminancia en la zona del proyector no se ve afectada por el nivel de iluminación exterior.

Para validar los estados se observan las figuras 5.27, 5.28, 5.29 y 5.30 donde se muestra el nivel de iluminancia, el estado de las persianas, el estado del luminarias y el estado de las luminarias respectivamente.

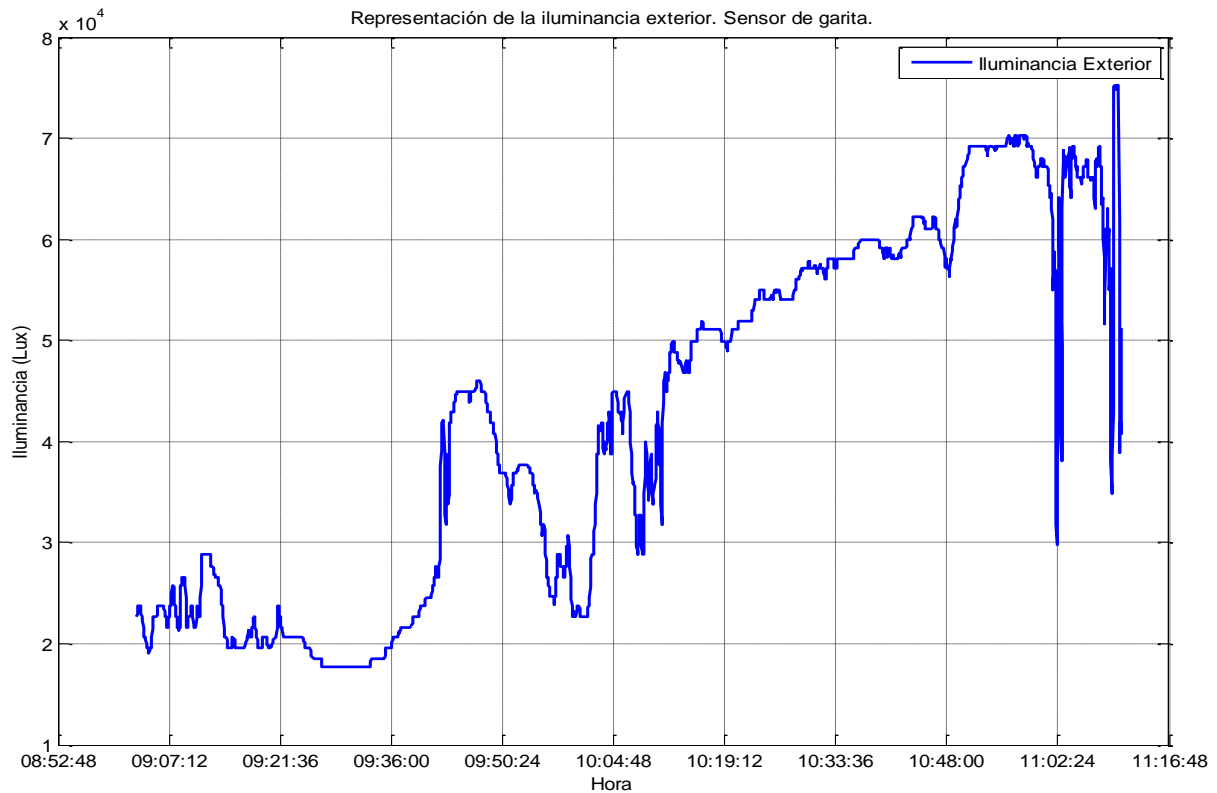


Figura 5.25. Representación de la iluminancia exterior.

El ensayo arranca a las 9:05 con todas las persianas abiertas (TA) y las luces apagadas, y como se ha dicho en el exterior hay una iluminancia de aproximadamente de 40000 lux (como en el caso del apartado anterior). Para este estado la iluminancia en la zona de ventanas es de 1375 lux.

A las 9:48 se colocan las persianas en el estado A obteniendo una iluminancia de 1125. A las 10:02 para el estado M se tiene una iluminancia en la zona de ventanas de 1374. Con el estado MB a las 10:40 la iluminancia en la zona de ventanas es de 562 lux, a continuación a las 10:50 para el estado CC se obtiene una iluminancia en la zona de ventanas de 562 lux. Y por ultimo cuando se cierra completamente a las 10:54 se alcanzan 312 lux. Aunque a priori puede parecer que se obtengan valores de iluminancia ligeramente diferentes con respecto al modelo, esto es debido a que en el ensayo de validación se le encendió y apagó las luminarias en el transcurso de la prueba de estados, y el fotodiodo que tiene el luxómetro, que es un semiconductor, y se ha comprobado que tarda cierto tiempo en polarizarse, por lo que es posible que al excitarlo con la luz con tantos cambios en una franja pequeña de tiempo no reaccione tan rápido y quede polarizado un tiempo.

Diseño de un sistema de control del confort lumínico en el interior de edificios basado en lógica difusa.

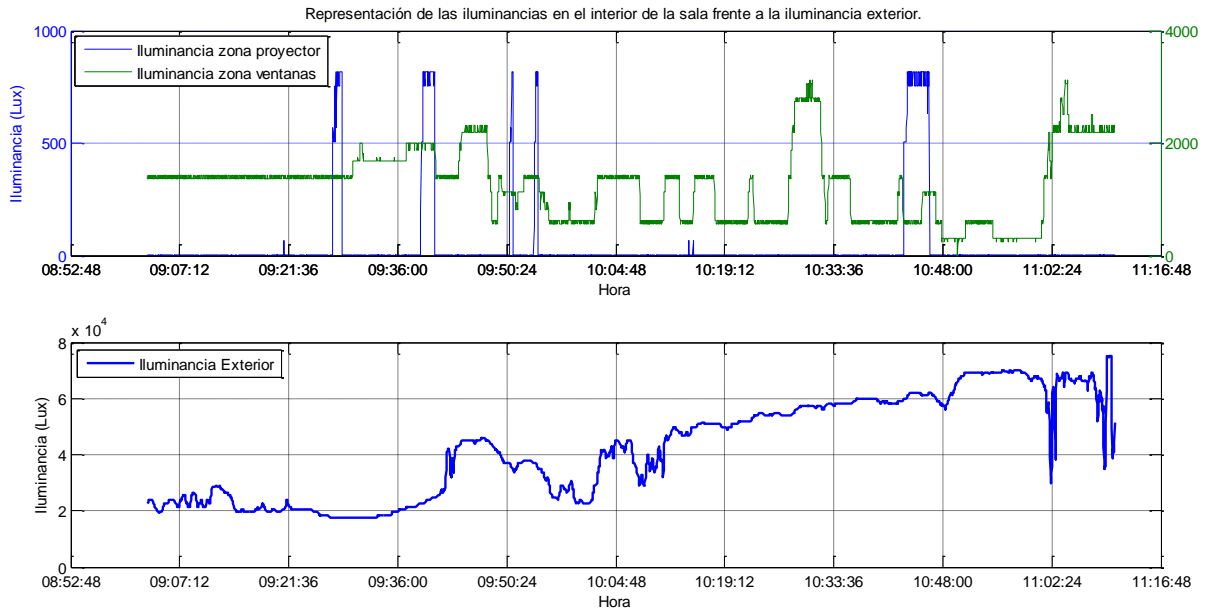


Figura 5.26. Representación de las iluminancias en el interior de la sala frente a la iluminancia exterior.

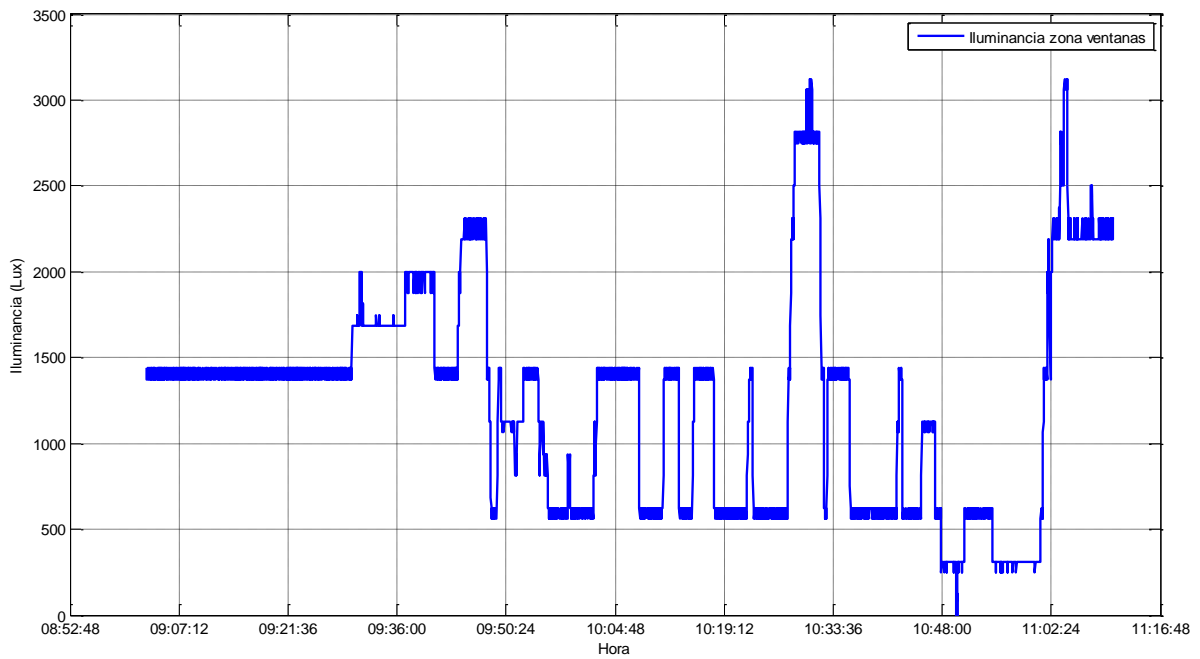


Figura 5.27. Iluminancia en la zona de ventanas.

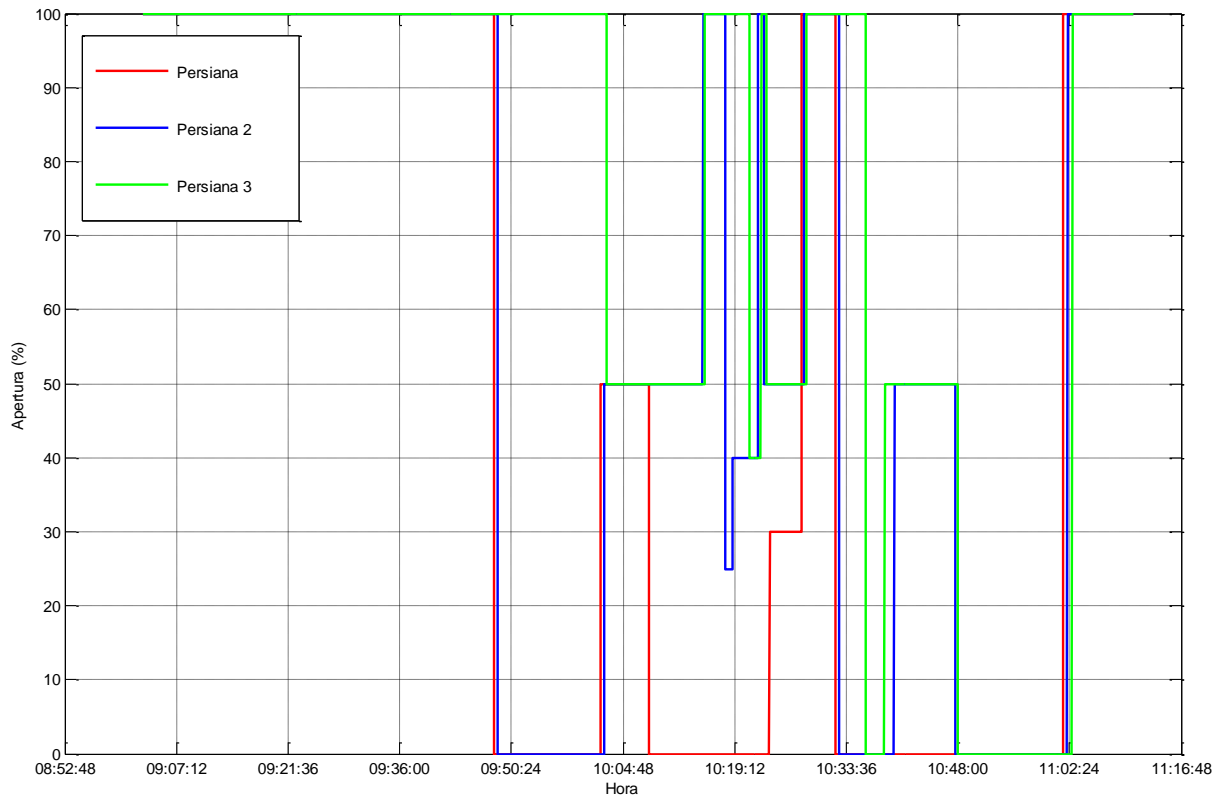


Figura 5.28. Estado de la apertura de las persianas.

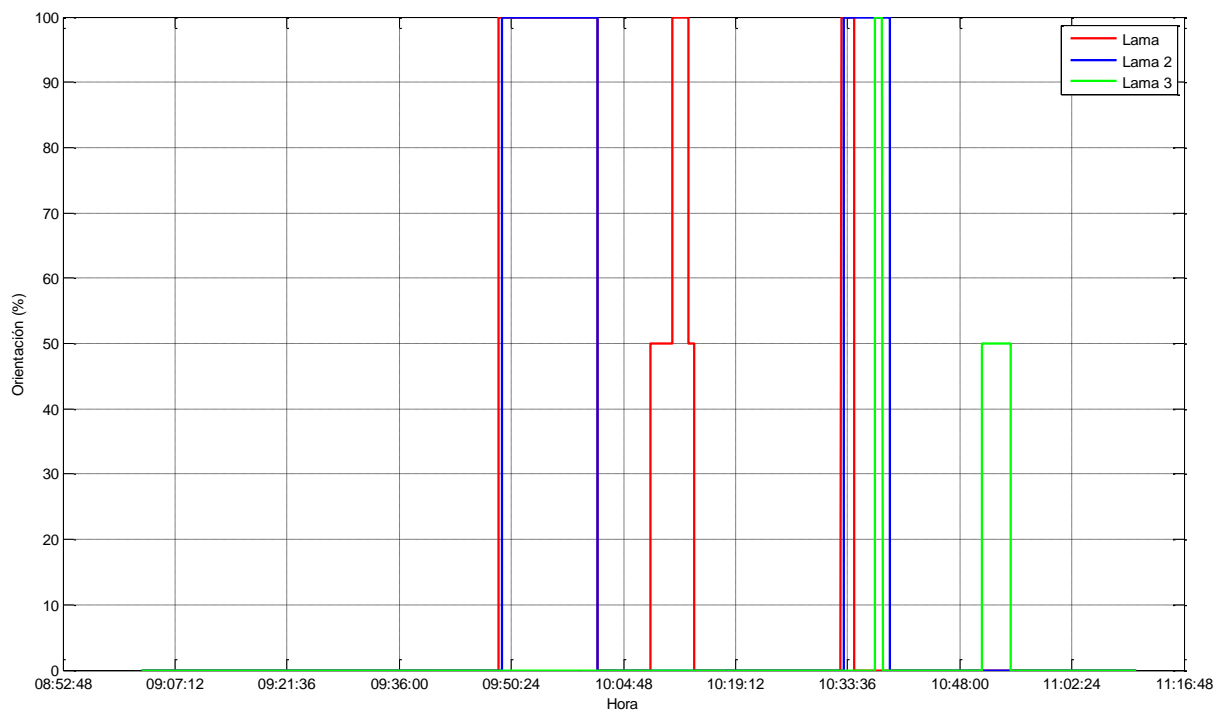


Figura 5.29. Porcentaje de orientación de las lamas.

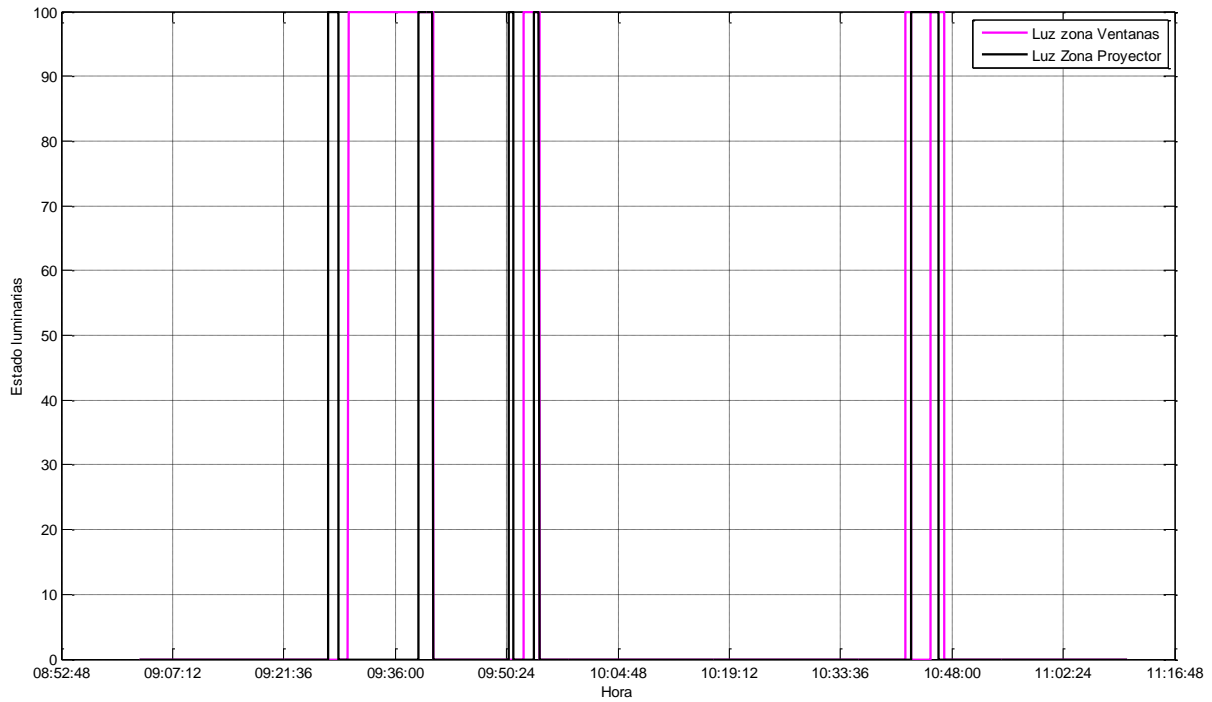


Figura 5.30. Estado de las luminarias.

Por lo tanto, en la tabla 5.10 se recoge el resumen de los valores de las iluminancias para los estados de mañana, se puede comprobar que en términos generales se validan los estados propuestos en el modelado, a excepción de los estados que están afectados por una polarización del semiconductor (fotodiodo) del luxómetro ante ráfagas de luces en poco espacio de tiempo.

Estado	AP1	AP2	AP3	OL1	OL2	OL3	Iluminancia zona Ventanas (lux)
TA	100%	100%	100%	-	-	-	1.375
A	0%	0%	100%	100%	100%	-	1125
M	50%	50%	50%	-	-	-	1374*
MB	0%	50%	50%	0%	-	-	624
CC	0%	0%	0%	0%	0%	50%	562/312
TC	0%	0%	0%	0%	0%	0%	312/0

Tabla 5.10. Descripción de los estados y nivel de iluminación en la zona de ventanas.

5.3.2 Validación del modelo de la iluminancia en el interior de la sala para las tardes de verano.

Para la validación del modelo de la iluminancia en el interior de la sala para las tardes de verano se han realizado diferentes ensayos durante estas, en este apartado se muestra uno de ellos con la intención de demostrar que los estados son válidos para las condiciones especificadas en el modelado.

De nuevo se comienza contextualizando el ensayo representando la iluminancia exterior en la figura 5.31.

De nuevo se cuenta con un día claro donde la iluminancia desciende progresivamente, al igual que el caso anterior cuenta con una perturbación al inicio del ensayo pero después transcurre sin perturbaciones de ningún tipo.

Este ensayo transcurre desde las 19:10 de la tarde hasta las 19:35 aproximadamente. La iluminancia exterior, para la franja horaria en la que se lleva a cabo, alcanza valores máximos de 28810 lux.

Para validar los estados se observan las figuras 5.33, 5.34, 5.35 y 5.36 donde se muestra el nivel de iluminancia, el estado de las persianas, el estado de las luminarias y el estado de las luminarias respectivamente.

Como es necesario la revisión de todas las figuras en conjunto se van a comentar en conjunto.

El ensayo arranca a las 19:05 con todas las persianas abiertas (TA) y las luces apagadas, y como se ha dicho en el exterior hay una iluminancia de aproximadamente 28000 lux. Para este estado la iluminancia en la zona de ventanas es de 1375 lux.

A las 19:15 se colocan las persianas en el estado A obteniendo una iluminancia de 1125. A las 19:17 para el estado M se tiene una iluminancia en la zona de ventanas de 1125 lux. Con el estado MB a las 19:23 la iluminancia en la zona de ventanas es de 624/562 lux, a continuación a las 19:30 para el estado CC se obtiene una iluminancia en la zona de ventanas de 312/249 lux. Y por último cuando se cierra completamente a las 19:32 se alcanzan 0/249 lux.

Diseño de un sistema de control del confort lumínico en el interior de edificios basado en lógica difusa.

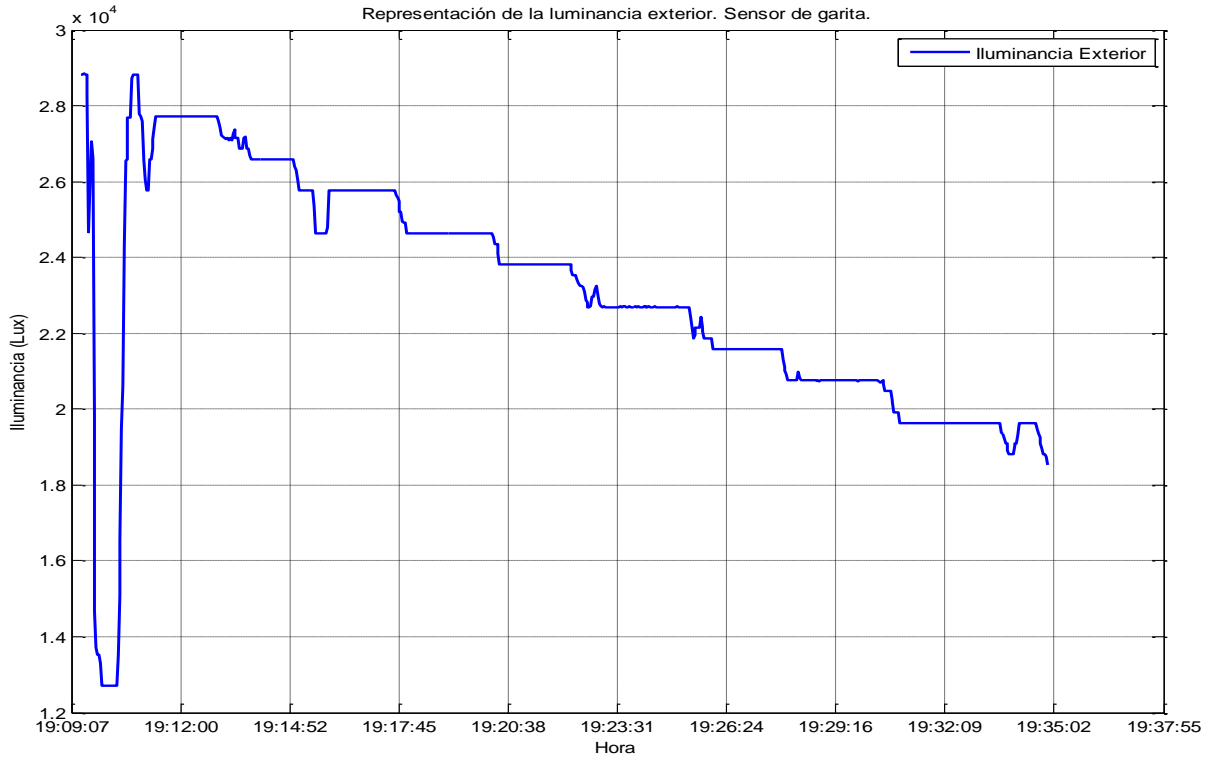


Figura 5.31. Representación de la iluminancia exterior.

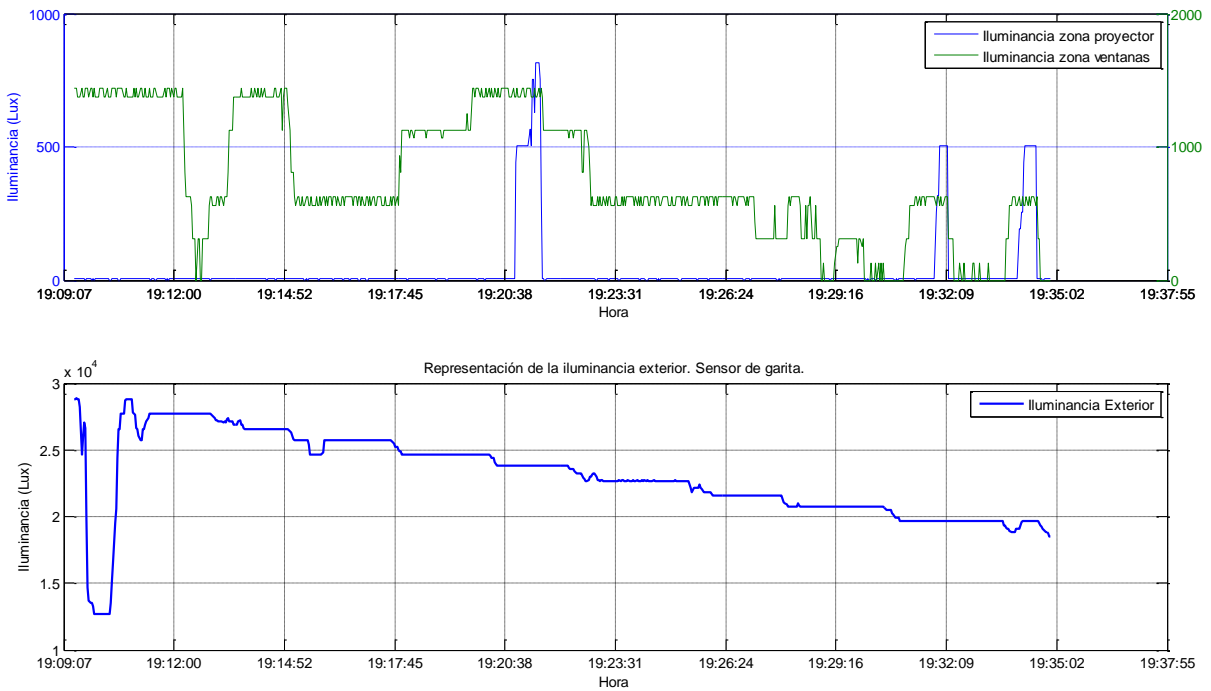


Figura 5.32. Representación de las iluminancias en el interior de la sala frente a la iluminancia exterior.

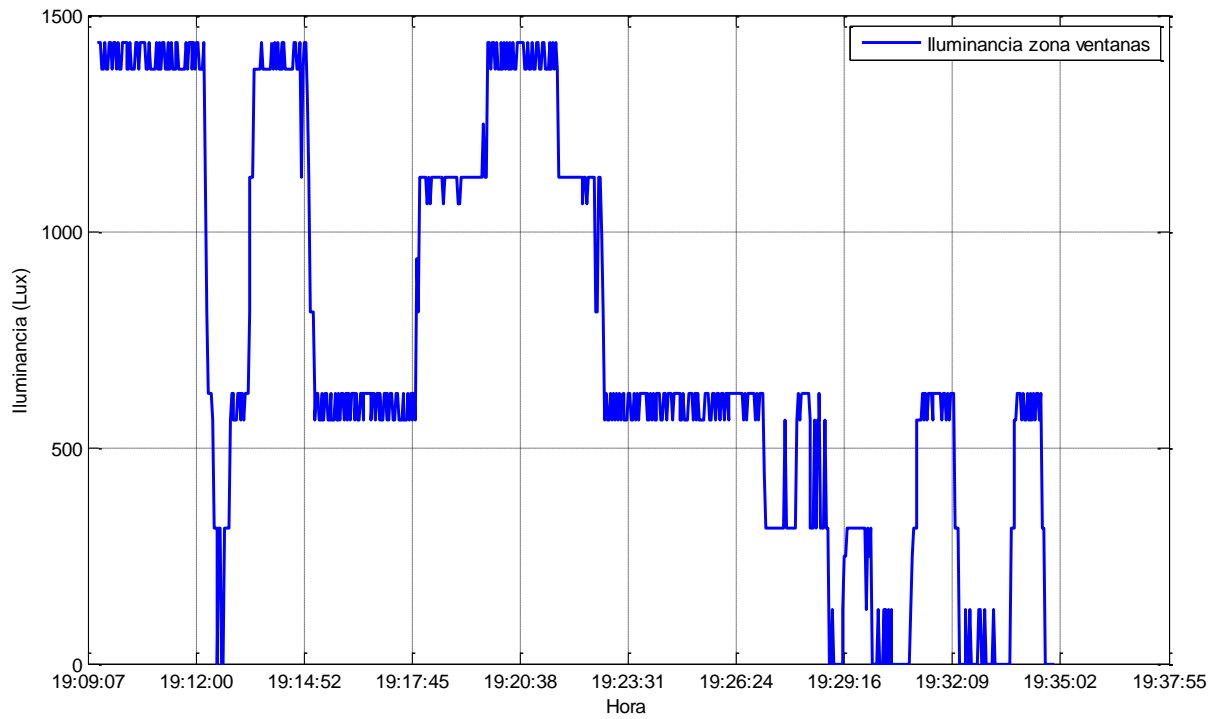


Figura 5.33. Iluminancia en la zona de ventanas.

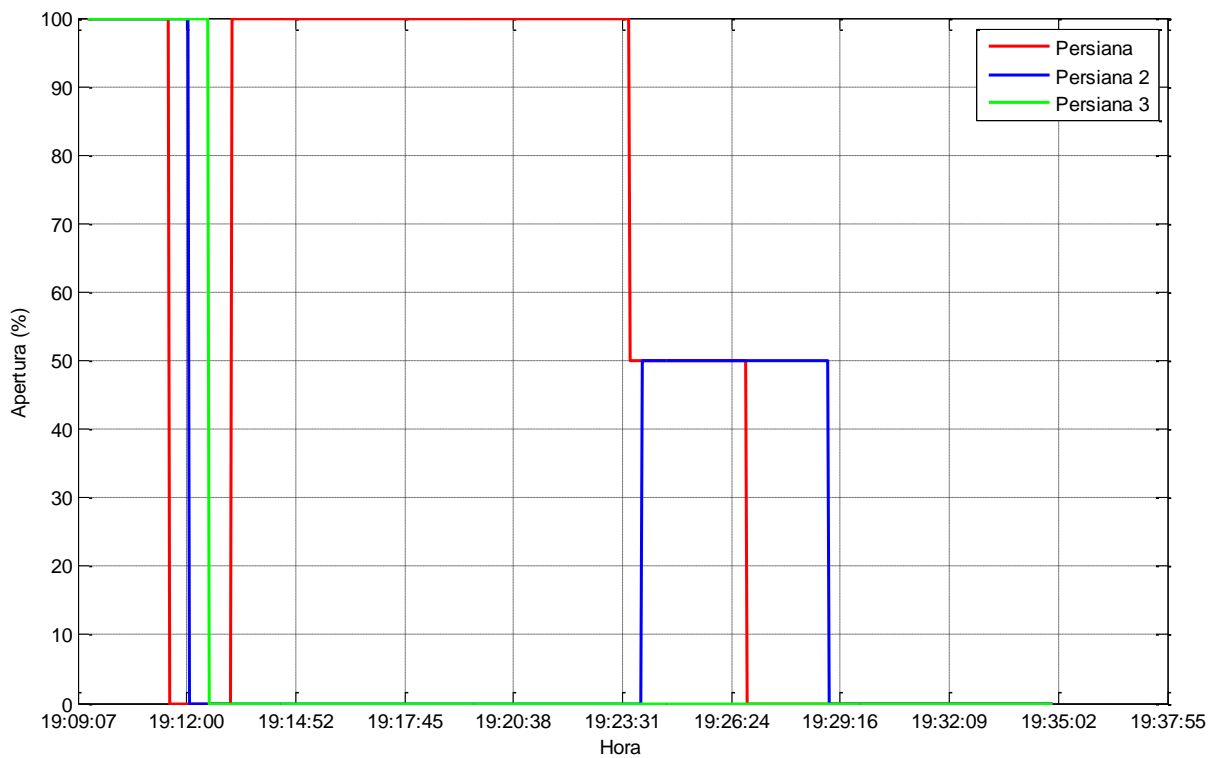


Figura 5.34. Estado de las persianas.

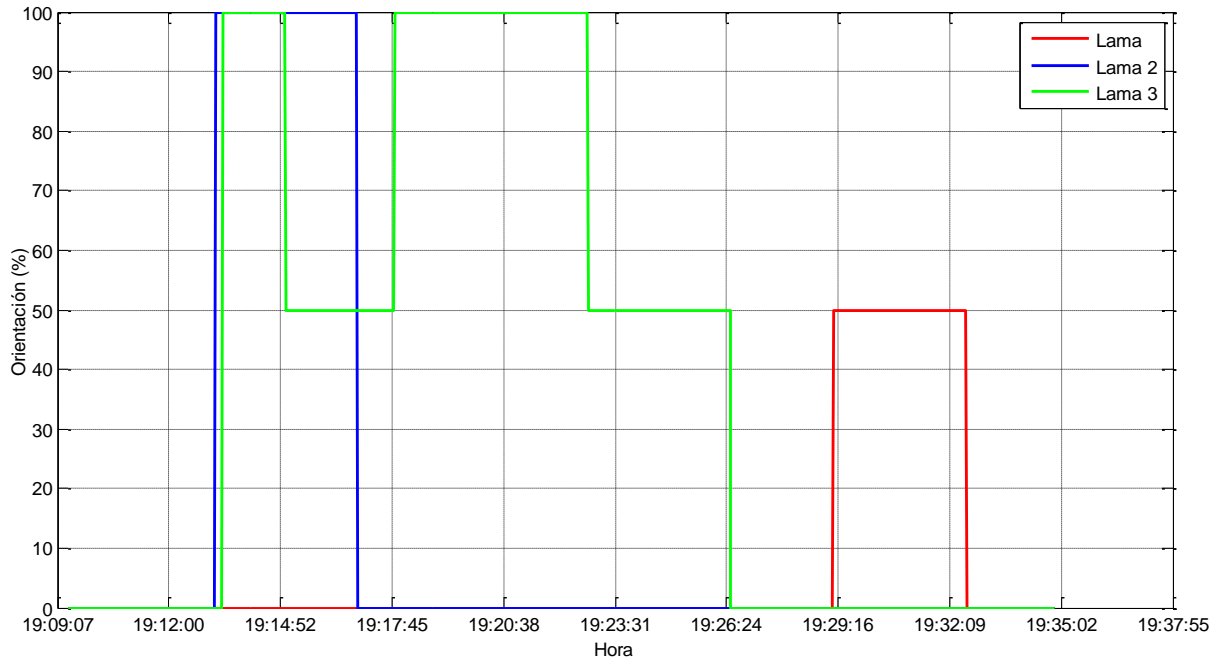


Figura 5.35. Estado de las lamas.

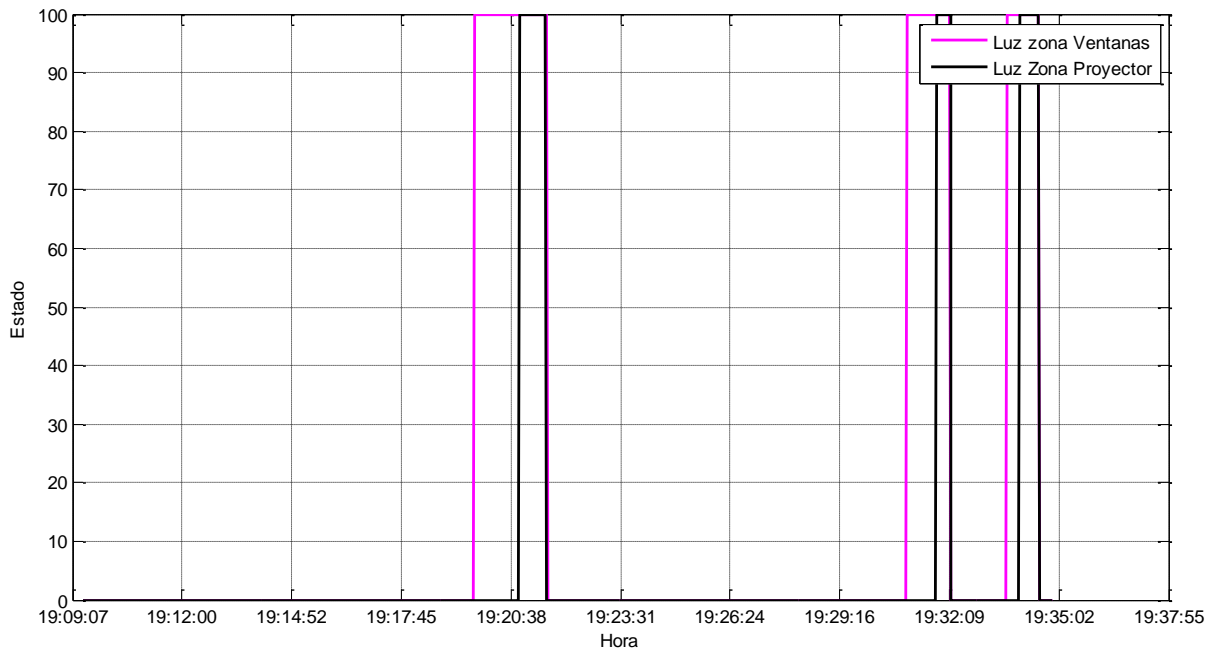


Figura 5.36. Estado de las luminarias.

Por lo tanto se validan los modelos, en la tabla 5.11 se muestra un resumen de los datos de validación, que coinciden con el modelo del apartado anterior.

Estado	AP1	AP2	AP3	OL1	OL2	OL3	Iluminancia zona Ventanas (lux)
TA	100%	100%	100%	-	-	-	1437/1375
A	100%	0%	0%	-	100%	100%	1375/1125
M	100%	0%	0%	-	0%	100%	1125
MB	50%	50%	0%	-	-	50%	624,8/562,3
CC	0%	0%	0%	50%	0%	0%	312
TC	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0

Tabla 5.11. Descripción de los estados y nivel de iluminación en la zona de ventanas.

➤ Validación del modelo de la iluminancia artificial ofrecido por DIALux.

Para la validación del modelo de luz artificial que se ha obtenido mediante el software de propósito específico DIALux evo 3 se han realizado una serie de medidas dentro del plano de trabajo para poder comparar los resultados proporcionados por el software con los almacenados por el SCADA a través de los luxómetros.

En la figura 5.34 se muestra la localización de los sensores para obtener un plano de medidas de la iluminancia, sus medidas corresponden con las marcadas en la figura 5.20. Este ensayo ha sido realizado de noche con las persianas completamente bajadas. Se comprueba por tanto la fidelidad del modelo proporcionado por DIALux evo 3, véase figura 5.21.

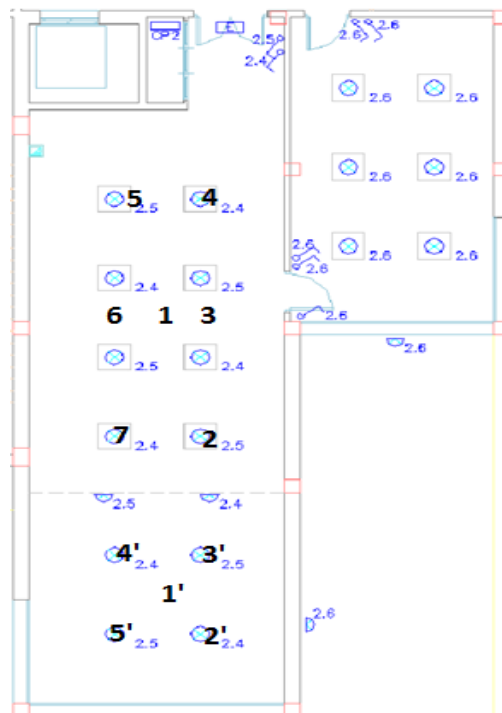


Figura 5.37. Localización de las medidas para validación del modelo obtenido por DIALux evo 3.

Diseño de un sistema de control del confort lumínico en el interior de edificios basado en lógica difusa.

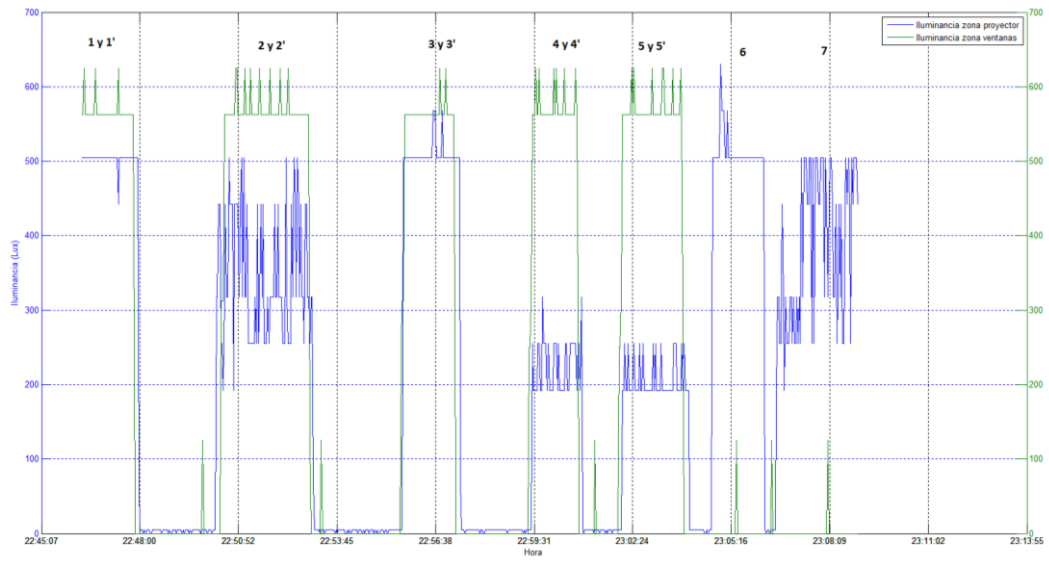
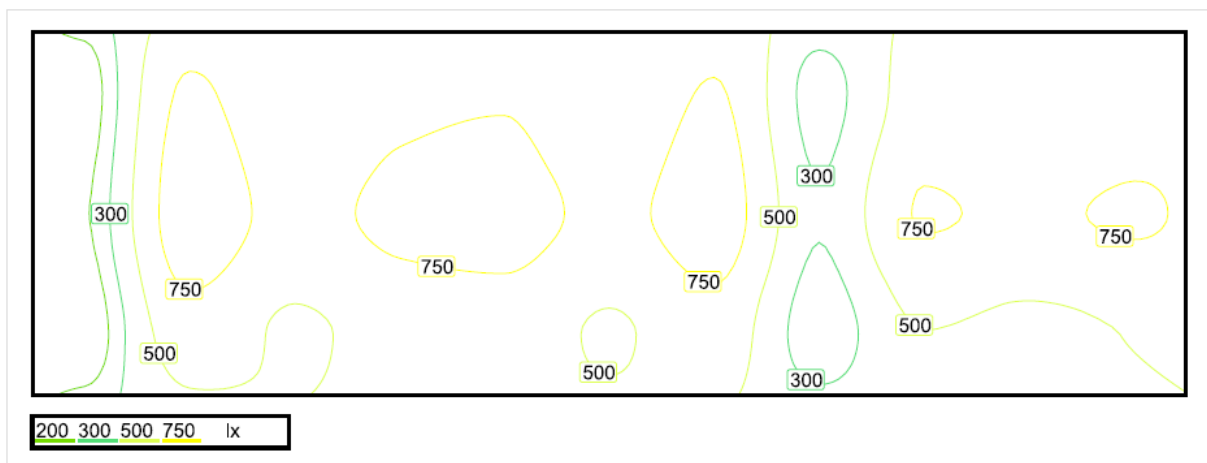


Figura 5.38. Mediciones de la iluminancia para diferentes posiciones de los sensores.



Escala: 1 : 75

Figura 5.39. Modelo de iluminancias proporcionado por DIALux evo 3.

Capítulo 6. Control del confort visual

6.1 Introducción al control del confort visual

Como se ha mencionado anteriormente, uno de los aspectos fundamentales que definen el confort visual dentro de un determinado entorno es el nivel de iluminancia en el interior. Además, el nivel de iluminación dentro de una habitación depende de dos factores diferentes: luz artificial y luz natural. Por lo tanto, es necesario buscar un equilibrio entre ellos para lograr un nivel de iluminación apropiado y, al mismo tiempo, aumentar el ahorro de energía. Es muy común el uso de diferentes elementos de sombreado, como persianas venecianas, que permiten al usuario regular la cantidad de iluminación y el brillo dentro de la habitación, y la regulación de la iluminación artificial mediante el uso de técnicas de control adecuadas. Más concretamente, en la literatura se pueden encontrar varias obras en este campo de investigación que presentan diferentes enfoques de control para mantener el confort visual de una manera eficiente. Estas técnicas de control van desde los enfoques de control clásicos a los controladores inteligentes basados en lógica difusa.

Por ejemplo, en [58] se muestra un enfoque de control para que permite aumentar el confort visual de los usuarios y el ahorro de energía mediante la optimización del uso de la energía solar. Este sistema de control calcula las señales de control más apropiadas para las persianas, una bomba de calor y el sistema de iluminación. Más específicamente, el control de sistema de iluminación se realiza por medio de dos controladores PID en cascada, y la señal de control de las persianas se proporciona mediante un selector.

Sin embargo, la técnica más utilizada para el control del confort visual está basada en lógica difusa. En la literatura se pueden encontrar varios trabajos que hacen uso de este tipo de metodología para mantener el confort visual de los usuarios, ya que dicha técnica permite representar fácilmente el razonamiento humano a través de reglas simples [12] [59-62]. Además, esta técnica se puede utilizar en combinación con técnicas clásicas de control, como en [63], donde un sistema de iluminación inteligente se controla por medio de un controlador difuso centralizado. Este sistema de iluminación inteligente se compone de una red de lámparas LED que pueden regular de forma independiente su nivel de iluminación. Además, cada lámpara LED tiene su propia unidad de control que consta de un controlador PID capaz de generar señales de control apropiadas en función de las referencias proporcionadas por el controlador difuso centralizado. Por otra parte, esta estrategia también tiene en cuenta la ocupación y el nivel de iluminación medido de la habitación.

6.2 Conceptos básicos del control difuso

En este apartado se realiza una breve introducción a los conceptos básicos de lógica difusa que se aplican en control, como por ejemplo conjuntos difusos, funciones de membresía, operaciones borrosas, reglas, inferencia, defuzzificación y los pasos para la toma de decisión.

El control basado en lógica difusa (véase figura 6.1), puede ser expresado mejor como control a través de palabras que interpretan el sentido común, en lugar de números, o bien sentencias en lugar de ecuaciones.

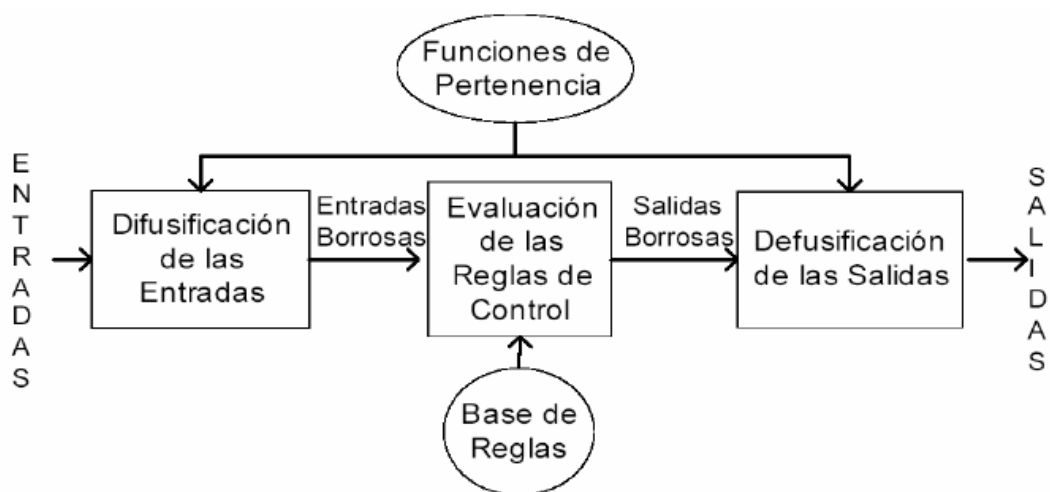


Figura 6.1. Sistema de inferencia difusa.

Conjuntos difusos

Los conjuntos clásicos presentan una serie de limitaciones. Por este motivo, se define un universo de discurso que contiene conjuntos cuyos bordes están bien definidos, es decir, un elemento puede o no pertenecer a un cierto conjunto, o algo es verdadero o falso, no se definen situaciones intermedias. Los conjuntos borrosos son una extensión de los clásicos, donde se añade una función de pertenencia, la cual se define como un número real entre 0 y 1. De esta forma, se introduce el concepto de conjunto o subconjunto borroso y se lo asocia a un determinado valor lingüístico, definido por una palabra o etiqueta lingüística, donde esta es el nombre del conjunto o subconjunto. Por cada conjunto se define una función de pertenencia o membresía denominada $\mu_A(x)$ que indica el grado en que la variable x está incluida en el conjunto representado por A ($0 \leq \mu_A(x) \leq 1$), si esta función es 0 no está incluido en el conjunto A y, por el contrario, si toma el valor 1 el correspondiente valor de x está absolutamente incluido en A .

Funciones de membresía

La función de membresía describe el grado de pertenencia de los diferentes elementos del universo de discurso al conjunto difuso. La elección de la forma de la función de pertenencia es subjetiva y dependiente del contexto. No obstante, por razones prácticas, en la literatura se suelen emplear funciones triangulares, trapezoidales o en forma de campana como las que se muestran en la figura 6.2.

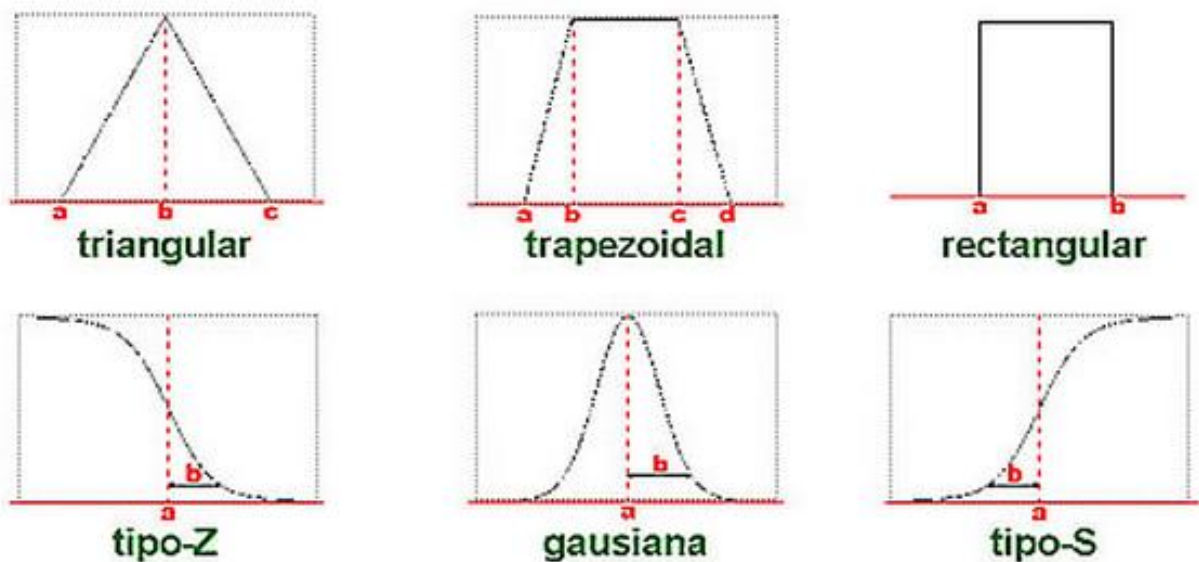


Figura 6.2. Funciones de membresía más habituales.

Un conjunto difuso cuyo soporte contiene un único elemento, a , es denominado singularidad difusa o Fuzzy singleton. Otro tipo de funciones de membresía muy utilizadas son forma singleton, como se puede observar en la figura 6.3. En este tipo de funciones, a diferencia de las anteriores, su valor de membresía es 1 para el punto el valor de ' a ' y 0 para el resto.

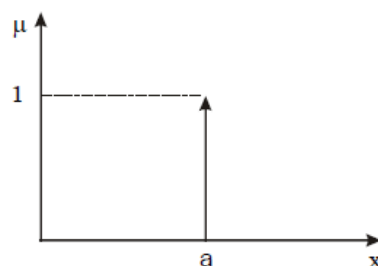


Figura 6.3. Función de membresía forma singleton.

El uso de singularidades difusas simplifica considerablemente el proceso de inferencia y posibilita la implementación electrónica eficiente de los sistemas de inferencia difusos.

Operaciones borrosas

A los subconjuntos se les puede aplicar determinados operadores o bien se puede realizar operaciones entre ellos. Al aplicar un operador sobre un solo conjunto se obtendrá otro conjunto, lo mismo sucede cuando se realiza una operación entre conjuntos.

Las operaciones lógicas que se utilizan en controladores y modelos difusos son necesarias en la evaluación del antecedente de reglas (y otras etapas) que más adelante veremos.

Se definen a continuación 3 operaciones básicas a realizar sobre conjuntos: complemento, unión e intersección. Sean las etiquetas A y B las que identifican a dos conjuntos borrosos asociados a una variable lingüística x, las operaciones se definen como:

- Complemento

El conjunto complementario A de un conjunto difuso A es aquel cuya función característica viene definida por:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (6.1)$$

- Unión. Operador lógico OR de Zadeh (max)

La unión de dos conjuntos difusos A y B es un conjunto difuso $A \cup B$ en U cuya función de pertenencia es:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (6.2)$$

- Intersección. Operador lógico AND de Zadeh (min)

La intersección de dos conjuntos difusos A y B es un conjunto difuso $A \cap B$ en U con función característica:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (6.3)$$

Hay muchas definiciones para las operaciones lógicas, algunas otras definiciones que normalmente también se utilizan son:

- Operador lógico AND del producto

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad (6.4)$$

- Operador lógico OR de Lukasiewicz

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) \quad (6.5)$$

Fuzzificación

El control difuso siempre involucra el proceso de Fuzzificación. Esta operación se realiza en todo instante de tiempo y es la puerta de entrada al sistema de inferencia difusa. Más concretamente, consiste en un procedimiento matemático en el que se convierte un elemento del universo de discurso (variable medida del proceso) en un valor en cada función de membresía a las cuales pertenece.

Reglas borrosas

Los controladores difusos usan reglas, estas combinan uno o más conjuntos borrosos de entrada llamados antecedentes o premisas y le asocian un conjunto borroso de salida llamado consecuente o consecuencia. Involucran a conjuntos difusos, lógica difusa e inferencia difusa. A estas reglas se les llama reglas borrosas o difusas (en inglés, fuzzy rules). Son afirmaciones del tipo SI-ENTONCES. Los conjuntos borrosos del antecedente se asocian mediante operaciones lógicas borrosas AND, OR, etc.

Las reglas borrosas son proposiciones que permiten expresar el conocimiento que se dispone sobre la relación entre antecedentes y consecuentes. Para expresar este conocimiento de manera completa normalmente se precisan varias reglas, que se agrupan formando lo que se conoce como base de reglas, es decir, la edición de esta base determina cual será el comportamiento del controlador difuso y es aquí donde se emula el conocimiento o experiencia del operario y la correspondiente estrategia de control.

La base de reglas suele representarse por tablas. Esta es clara en el caso de 2 variables de entrada y una de salida. En la medida que la cantidad de variables lingüísticas crece, también lo hará la tabla, y más difícil se hará su edición. Junto a cada regla puede estar asociado un valor entre cero y uno que pesa a tal regla, esto puede ser importante cuando una regla tiene menor fuerza que otras de la base de reglas.

Existe una gran variedad de tipos de reglas, dos grandes grupos son los que en general se emplean, las reglas difusas de Mamdani y las reglas difusas de Takagi-Sugeno (TS).

La estructura de las reglas es la misma tanto para controladores como para modelos, simplemente cambiarán las variables implementadas.

- Reglas difusas de Mamdani

$$IF x_1 \text{ is } A \text{ AND } x_2 \text{ is } B \text{ AND } x_3 \text{ is } C \text{ THEN } u_1 \text{ is } D, u_2 \text{ is } E \quad (6.6)$$

Donde x_1 , x_2 y x_3 son las variables de entrada, A, B y C son funciones de membresía de entrada, u_1 y u_2 son las acciones de control en sentido genérico, es decir, son todavía variables lingüísticas (todavía no toman valores numéricos). Finalmente, D y E son las funciones de membresía de la salida, en general se emplean del tipo singleton por su facilidad computacional, y AND es un operador lógico difuso, La primera parte de la sentencia “*IF x1 is A AND x2 is B AND x3 is C*” es el antecedente y la restante es el consecuente.

Entre sus ventajas cuenta con que es intuitivo, tiene una amplia aceptación y está bien adaptado a la incorporación de conocimiento y experiencia.

- Reglas difusas de Takagi-Sugeno

$$IF x_1 \text{ is } A \text{ AND } x_2 \text{ is } B \text{ AND } x_3 \text{ is } C \text{ THEN } u_1=f(x_1,x_2,x_3), u_2=g(x_1,x_2,x_3) \quad (6.7)$$

En principio es posible emplear f y g como funciones no lineales, pero la elección de tal función puede ser muy compleja, por lo tanto en general se emplean funciones lineales.

Entre sus ventajas cuenta con que es computacionalmente eficiente, trabaja bien con técnicas lineales, trabaja bien con técnicas de optimización y control adaptable, tiene garantizada una superficie de control continua y está bien adaptado al análisis matemático.

Inferencia borrosa

Las reglas difusas representan el conocimiento y la estrategia de control, pero cuando se asigna información específica a las variables de entrada en el antecedente, la inferencia difusa es necesaria para calcular el resultado de las variables de salida del consecuente, este resultado es en términos difusos, es decir que se obtiene un conjunto difuso de salida de cada regla, que posteriormente junto con las demás salidas de reglas permite obtener la salida del sistema. Existe una gran cantidad de métodos de inferencia difusa, pero hay cuatro que generan mejores resultados en el campo del control, estos son inferencia de Mamdani por mínimos (Mamdani minimum inference), (RM), la inferencia del producto de Larsen (Larsen product inference), (RL), la inferencia del producto drástico (Drastic product inference) (RDP) y la inferencia del producto limitado (Bounded product inference), (RBP) [64] [65].

En el caso particular en que el conjunto difuso de salida del consecuente es del tipo singleton, todos los métodos de inferencia tienen el mismo resultado, y este se obtiene como el singleton pesado por el valor μ obtenido del antecedente.

Agregado

Cuando se evalúan las reglas se obtienen tantos conjuntos difusos como reglas existan, para defuzzificar es necesario agrupar estos conjuntos, a esta etapa se le llama agregado y existen varios criterios para realizar este paso. Uno de los criterios más utilizados es el de agrupar los conjuntos inferidos mediante la operación máx. (Operador lógico OR de Zadeh).

Defuzzificación

La defuzzificación (*defuzzification*) es un proceso matemático usado para convertir un conjunto difuso en un número real. El sistema de inferencia difusa obtiene una conclusión a partir de la información de la entrada, pero es en términos difusos. Esta conclusión o salida difusa, se obtiene en la etapa de inferencia borrosa. Sin embargo, ésta genera un conjunto borroso pero el dato de salida del sistema debe ser un número real y debe ser representativo de todo el conjunto obtenido en la etapa de agregado. Por este motivo, existen diferentes métodos de defuzzificación los cuales proporcionan diferentes resultados:

- Criterio de máximo (MC). La salida es aquella para la cual la función de membresía alcanza su máximo valor.
- El método de centro de área (COA) o de centro de gravedad (COG)
- El método de la media de máximo (*MOM, middle of maximum*). La salida es el valor medio de los valores cuyas funciones de membresía alcanzan el valor máximo.
- El método del máximo más chico (*SOM, smallest of maximum*). La salida es el mínimo valor de todos aquellos que generan el valor más alto de la función de membresía [66].
- El método del máximo más grande (*LOM, largest of maximum*). La salida es el máximo valor de todos aquellos que generan el valor más alto de la función de membresía.
- Bisector de área. La salida es el valor que separa el área bajo la curva en dos sub-áreas iguales [67].

Tanto la Fuzzificación como la defuzzificación son el nexo del sistema difuso con el mundo real.

6.3 Desarrollo del sistema de control

6.3.1 Especificaciones

Uno de los principales objetivos de trabajo fin de grado consiste en el desarrollo de un sistema de control del confort lumínico para el interior de edificios basado en lógica difusa. Más concretamente, para su correcto desarrollo e implementación en la sala de juntas del edificio CDdI-CIESOL-ARFRISOL se han abordado dos problemas: el diseño del controlador mediante lógica borrosa, y el desarrollo de un sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA), en el cual se integra el controlador. Por lo tanto, a las especificaciones detalladas para el SCADA en el capítulo 4 se les suma las propias del sistema de control que se presentan a continuación.

El sistema de control mantiene unas condiciones óptimas de iluminación en función del trabajo que se esté llevando a cabo en la sala. Como se ha expresado en capítulos anteriores, las variables que definen el confort lumínico a controlar en las condiciones de la sala y estación del año en que se desarrolla son el nivel de iluminación o iluminancia horizontal y el Índice de Deslumbramiento Unificado (UGR). En la tabla 6.1 se muestra las especificaciones que cumple este sistema de control. Más concretamente, cuando en la sala se trabaje con proyector el nivel óptimo de iluminancia se fija 300 lux y un UGR de 22. Sin embargo, cuando se trabaja sin proyector se requiere una iluminancia de 500 lux y un UGR de 19. Además, el controlador se ha diseñado para que cuando no haya nadie en la habitación se apaguen las luces y las cortinas queden quietas aunque no se cumplan las especificaciones de nivel de iluminación puesto que no hay que satisfacer las necesidades visuales de nadie.

Además de dichas especificaciones, que provienen directamente de la definición de confort visual por parte del CTE, se han considerado otras especificaciones de carácter general como por ejemplo que sea un sistema robusto, fiable y estable, donde en todo momento prevalezca la calidad de vida del usuario y se usen las luminarias lo menos posible con la intención de ahorrar energía.

El control se realiza en lazo cerrado, se tiene conocimiento del estado en el cual se encuentra en todo momento, la toma de decisiones se hace en función de las condiciones de confort y el estado en el que se encuentre (posición de las persianas y luces). Es decir, dentro de las entradas que se considera se encuentran también la realimentación del estado o función de membresía de las persianas y de las luces.

Tipo de interior, tarea y actividad.	\overline{E}_{med} [Lux]	UGR _L	R _a	Observaciones
Escritura, escritura a máquina, lectura, tratamiento de datos.	500	19	80	Trabajo en equipo con pantalla de visualización (EPV).
Salas de conferencias y reuniones.	500	19	80	La iluminación debería ser controlable.
Exposición	300	22	80	

Tabla 6.1. Requisitos de iluminación para interiores.

6.3.2 Diseño

El diseño del controlador que se ha desarrollado en el marco de este trabajo final de grado está basado en el trabajo titulado “Building visual comfort control with Fuzzy reasoning” de A. I. Dounis et al. [12]. En la figura 6.4 se observa la arquitectura de control del sistema al completo, como se muestra dentro de los puntos suspensivos tiene el proceso de defuzzificación, toma de decisiones y fuzzificación, las flechas rojas significa el transporte de las ordenes de control (estados de persianas y luces), y las flechas verdes la información de entrada al sistema de control (DILL, DUGR, estado persianas, estado luminarias). En la tabla 6.2 se muestra el resumen del proceso de inferencia difusa, donde se observa en el diagrama de flujo, el recorrido de los datos y su transformación. Posteriormente, se realiza una descripción detallada de cada uno de los pasos que componen el proceso de inferencia difusa.

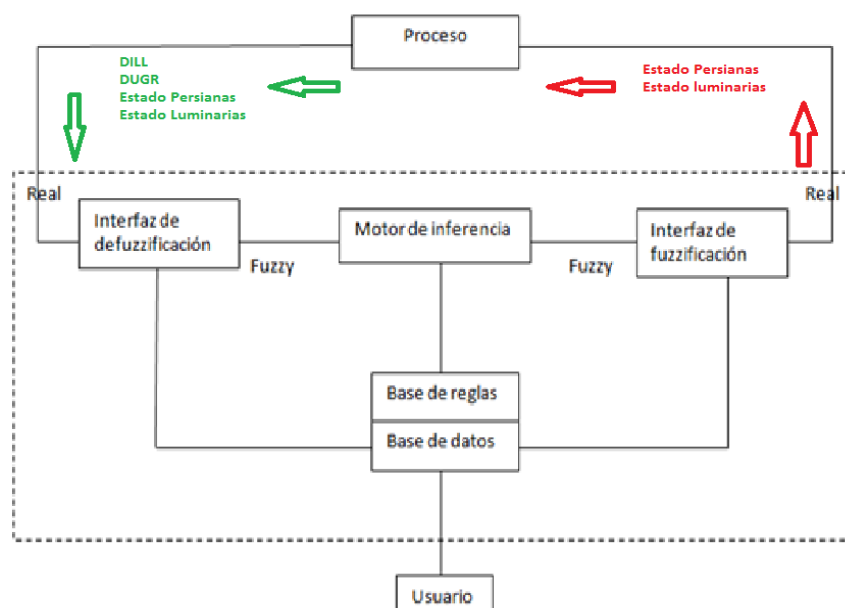


Figura 6.4. Arquitectura de control.

Resumen del proceso de inferencia difusa.	
Diagrama de flujo.	Comentario.
<pre> graph TD A([Dato de entrada]) --> B[Fuzzificación] B --> C[Evaluación de reglas] C --> D[Inferencia] D --> E[Agregado] E --> F[Defuzzificación] F --> G([Dato de salida.]) </pre>	<p>Dato proveniente del sensor que mide la variable del proceso, puede presentar ruido y desviaciones con respecto al valor real.</p>
	<p>Se convierte un número en valores correspondientes a las funciones de membresía a la cual pertenece.</p>
	<p>Las reglas definen la estrategia de control o conocimiento, se realizan operaciones entre los conjuntos.</p>
	<p>Se determina el conjunto de salida de cada regla.</p>
	<p>Se obtiene la función de membresía de la variable de salida a partir de alguna operación entre todos los conjuntos de salida de la etapa de inferencia.</p>
	<p>Definida la función de membresía de la salida, se determina cual dato es el más representativo del conjunto de salida total.</p>
	<p>Es la variable que tomará el actuador para modificar el estado del proceso.</p>

Tabla 6.2. Etapas para la toma de decisión.

En primer lugar, y como se ha comentado anteriormente, el problema se ha dividido en dos zonas: la zona del proyector y la zona de las ventanas. Además, se han seleccionado como variables de control para ambas zonas la iluminancia y el índice UGR. Gracias al trabajo de modelado y sus correspondientes ensayos las variables de interés para el controlador serán las de la zona de las ventanas, pues como se ha demostrado anteriormente el estado de las persianas y las luces de dicha zona no afecta a la zona del proyector.

- **Zona de proyector.**

Por un lado, la zona del proyector será la más sencilla de controlar y, por lo tanto, no es necesario el uso del controlador basado en lógica difusa.

En función de los modelos de las luminarias, que son las variables de control para esta zona, se estima el aporte de estas al nivel de iluminación es equivalente a 500 lux. Por lo tanto, cuando la iluminancia real supere en este valor a la referencia se apagarán las luces de esta zona. Además, la luz artificial de esta zona también se apagará cuando se encienda el proyector o no haya usuarios en la sala.

- **Zona de ventanas.**

Como se ha explicado en los capítulos anteriores, el índice UGR o Índice de Deslumbramiento Unificado depende de las características de las luminarias y su posición. Por este motivo, el índice UGR tiene dos valores fijos, ya que en el caso que se está estudiando en este trabajo fin de grado no se puede variar la potencia de las luminarias ni encender individualmente. Por lo tanto, éste no será determinante para el control en este proyecto, si bien se realiza el diseño del controlador teniéndolo en cuenta con el fin de que en un trabajo futuro se pueda modificar la instalación eléctrica, pero a la hora de realizar los ensayos mantendrá un valor fijo que no afecte al control como se describe a continuación.

En un paso previo a definir las funciones de membresía, hay que decidir las variables de entrada al controlador. Éstas son:

- $$DILL = \frac{ILL_{real} - ILL_{des}}{K} \quad (6.8)$$

Donde ILL_{real} es el nivel de iluminación real y ILL_{des} el deseado o referencia.

$$K = 31 + 15 \cdot \frac{[ILL_{des} - 100]}{50} \quad (6.9)$$

- $$DUGR = \frac{UGR_{real} - UGR_{des}}{0,67} \quad (6.10)$$

Donde UGR_{real} es el índice de deslumbramiento unificado real y UGR_{des} el deseado o referencia.

K se trata de un parámetro desarrollado en [12] que tiene la función de acotar el valor de $DILL$ entre -1 y 10.

Además, y con el principal objetivo de dotar al controlador de mayor robustez evitando que éste esté dando órdenes repetitivas que puedan causar daños en los actuadores se definen dos variables de entrada extra:

- $STPIN$: Estado de las persianas.
- $STLIN$: Estado de las luminarias.

Estas dos participan en la realimentación, es decir aportan la información sobre cómo están las persianas en cada instante de tiempo, para que se decida si actuar o no.

Por otro lado, como salidas del controlador se definen las siguientes variables:

- $PERSIANAS$: El estado de las persianas, formado por 6 funciones de membresía.
- $LUCES$: Estado de las luces, formado por 2 funciones de membresía.

En [12], utilizan como variables de entrada el *DILL* y el *DDGI* (Error entre la referencia y el valor real del índice de deslumbramiento por luz natural), y presentan una función de membresía para cada una de estas.

La forma de las funciones de membresía al final es algo subjetivo en el que la experiencia y conocimiento del sistema permite tomar una elección, a la hora de determinar una función de pertenencia, normalmente se eligen funciones sencillas, para que los cálculos no sean complicados. En particular, en aplicaciones en distintos entornos, son muy utilizadas las triangulares y las trapezoidales.

En este trabajo final de grado se han adaptado las funciones de membresía definidas en [12] y se han diseñado unas funciones de membresía de las variables de entrada triangulares. Más concretamente, en este trabajo final de grado para el valor de entrada de *DUGR* existen 3 funciones de membresía triangulares (Imperceptible, Aceptable e Inconfortable), véase figura 6.5.

Para la entrada *DILL* se tiene, a diferencia de [12], 5 funciones de membresía (Negativo, Pequeño, Medio, Grande, MuyGrande) véase la figura 6.6.

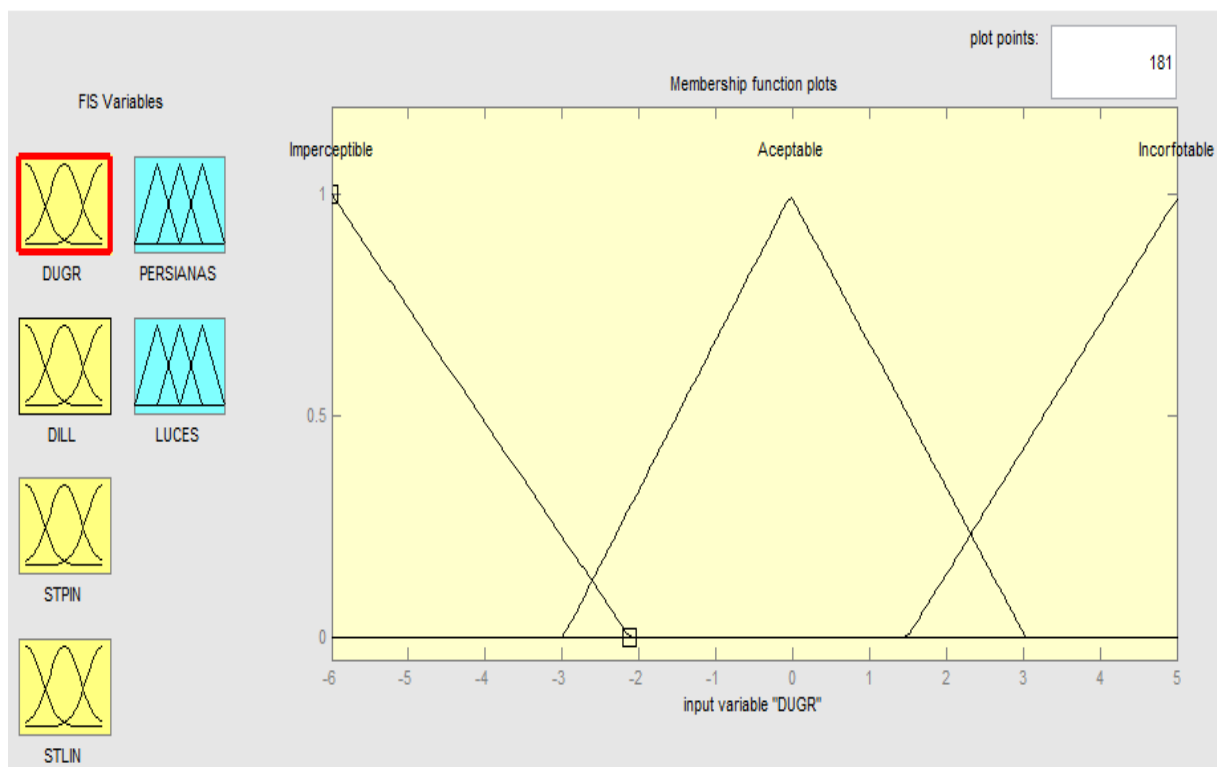


Figura 6.5. Funciones de membresía para DUGR.

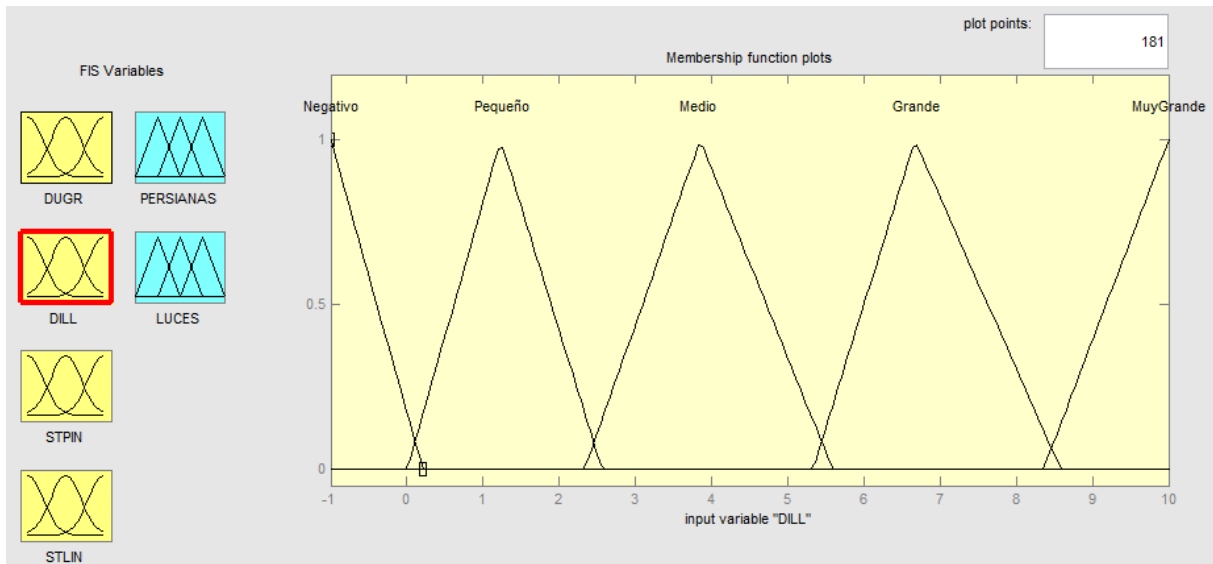


Figura 6.6. Funciones de membresía para los valores de DILL.

Sin embargo, para las salidas se han diseñado con la forma singleton o singularidades difusas para facilitar los cálculos. Como en la herramienta utilizada para el desarrollo del controlador basado en lógica borrosa no existe la forma de singleton se han utilizado triangulares aisladas con una base lo más estrecha posible.

Para la salida PERSIANAS se han definido 6 funciones de membresía (TC, CC, MB, M, A, TA) que coinciden con los estados definidos en el capítulo 5 (véase la figura 6.7). Por otro lado, para la variable de salida LUCES se tiene dos funciones de membresía (ON, OFF) (véase figura 6.8).

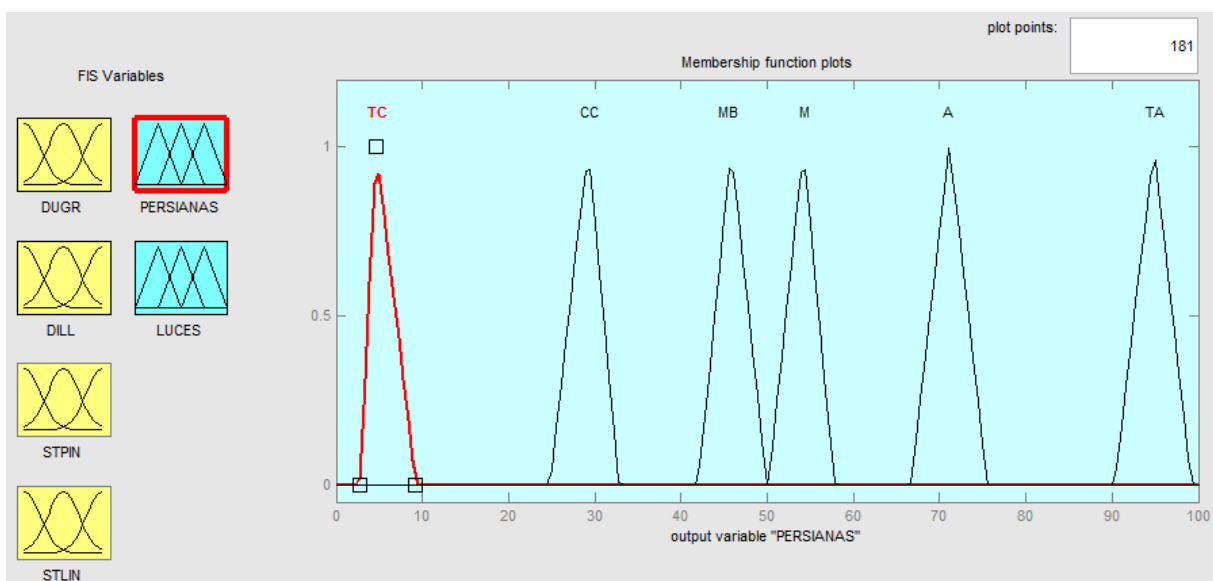


Figura 6.7. Funciones de membresía para los valores de PERSIANAS.

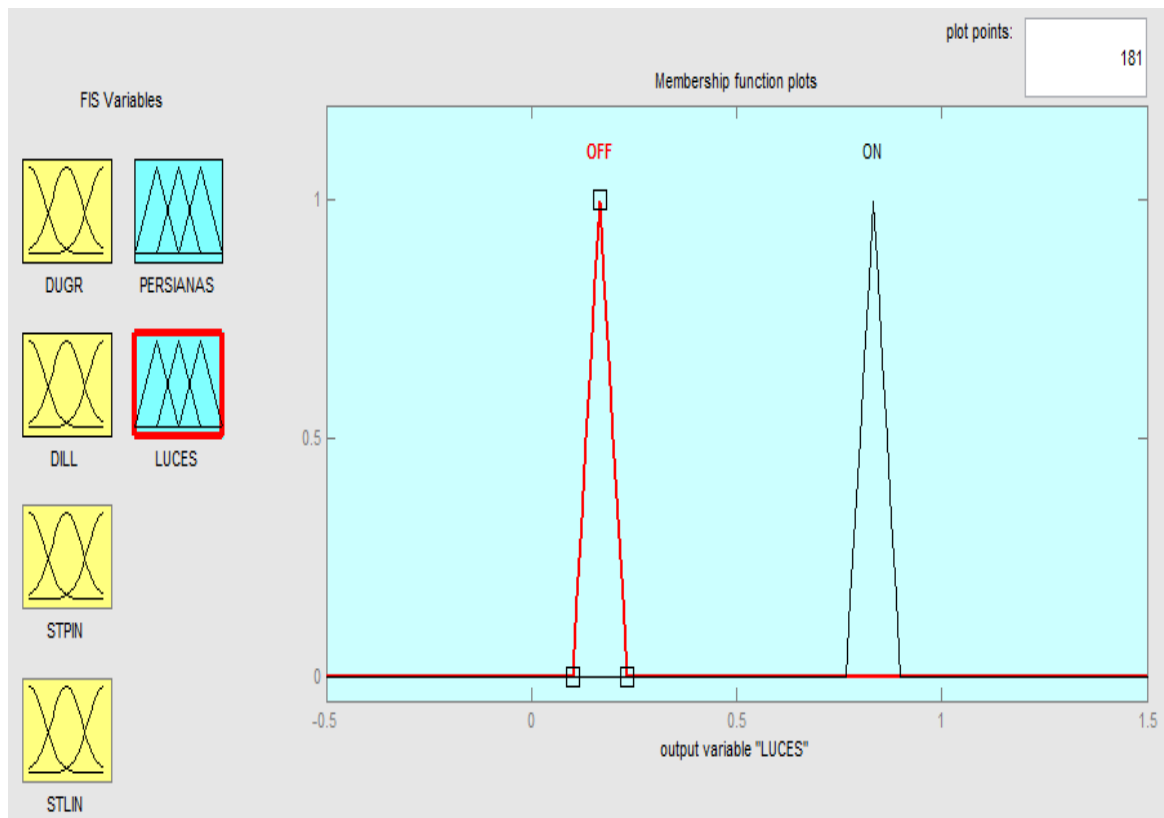


Figura 6.8. Funciones de membresía para los valores de LUCES.

Las entradas *STPIN* y *STLIN* son una réplica de las variables de salida *PERSIANAS* y *LUCES* las cuales se utilizan para conocer el estado en el que se encuentra el sistema, y así, decidir si es necesario actuar o no.

Como se ha explicado en el apartado anterior, una vez que se han definido las funciones de pertenencia para entradas y salidas, se definen las operaciones borrosas. Esta es, para determinar que etiqueta lingüística reciben a la entrada se diseña con el operador lógico OR de zadeh (max), de forma genérica:

$$\mu_{A \cup B} = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (6.11)$$

Es decir, para la evaluación de las reglas se le atribuirá una etiqueta o pertenencia a una función de membresía para la que mayor peso tenga.

Finalmente, el diseño de la base de reglas borrosas utilizadas en el marco de este trabajo final de grado se ha basado en las reglas difusas de Mamdani (estructura "if ... then..."). A continuación se muestra un listado de todas las reglas que se han definido para el proceso de inferencia difusa.

Descripción de las reglas

De la 1-6 y de la 49-54, siempre que DILL sea Negativo asciende un estado excepto en TA que enciende las luces si no están ya encendidas.

De la 7-12 cuando DILL MuyGrande y DUGR no es inconfortable y están las luces apagadas desciende un estado hasta TC que no hace nada.

De la 13-18 si DILL MuyGrande y DUGR no es inconfortable y están las luces encendidas, las apaga y abre las persianas a TA.

De la 19-24 si DILL Grande y DUGR no es inconfortable y luces apagadas desciende un estado las persianas hasta TC

De la 25-30 si DILL Grande y DUGR no es inconfortable y están las luces encendidas, las apaga y abre las persianas a TA.

De la 31-36 si DILL Medio y DUGR no es inconfortable y luces apagadas desciende un estado las persianas hasta TC

De la 37-42 si DILL Medio y DUGR no es inconfortable y están las luces encendidas, las apaga y abre las persianas a TA.

De la 43-48 si DILL Pequeño y DUGR no es inconfortable y luces apagadas entonces deja las persianas como estén.

De la 55-60 si DILL Pequeño y DUGR no es inconfortable y luces encendidas deja las persianas como estén.

De la 61-84 si es DUGR es inconfortable apaga luces ya que es debido a ellas.

Y por ultimo este resultado etiqueta, es decir, este estado o función de membresía de salida se convierte en valores reales, en este caso posiciones de persianas y estado de luminarias.

Reglas

1. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Negativo) and (STPIN is 1) and (STLIN is OFF) then (PERSIANAS is CC)(LUCES is OFF)
2. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Negativo) and (STPIN is 2) and (STLIN is OFF) then (PERSIANAS is MB)(LUCES is OFF)
3. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Negativo) and (STPIN is 3) and (STLIN is OFF) then (PERSIANAS is M)(LUCES is OFF)
4. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Negativo) and (STPIN is 4) and (STLIN is OFF) then (PERSIANAS is A)(LUCES is OFF)

5. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Negativo) and (STPIN is 5) and (STLIN is OFF) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
6. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Negativo) and (STPIN is 6) and (STLIN is OFF) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is ON)
7. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is MuyGrande) and (STPIN is 6) and (STLIN is OFF) then (PERSIANAS is A)(LUCES is OFF)
8. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is MuyGrande) and (STPIN is 5) and (STLIN is OFF) then (PERSIANAS is M)(LUCES is OFF)
9. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is MuyGrande) and (STPIN is 4) and (STLIN is OFF) then (PERSIANAS is MB)(LUCES is OFF)
10. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is MuyGrande) and (STPIN is 3) and (STLIN is OFF) then (PERSIANAS is CC)(LUCES is OFF)
11. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is MuyGrande) and (STPIN is 2) and (STLIN is OFF) then (PERSIANAS is TC)(LUCES is OFF)
12. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is MuyGrande) and (STPIN is 1) and (STLIN is OFF) then (PERSIANAS is TC)(LUCES is OFF)
13. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is MuyGrande) and (STPIN is 6) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
14. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is MuyGrande) and (STPIN is 5) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
15. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is MuyGrande) and (STPIN is 4) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
16. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is MuyGrande) and (STPIN is 3) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
17. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is MuyGrande) and (STPIN is 2) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
18. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is MuyGrande) and (STPIN is 1) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
19. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Grande) and (STPIN is 6) and (STLIN is OFF) then (PERSIANAS is A)(LUCES is OFF)
20. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Grande) and (STPIN is 5) and (STLIN is OFF) then (PERSIANAS is M)(LUCES is OFF)

21. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Grande) and (STPIN is 4) and (STLIN is OFF) then (PERSIANAS is MB)(LUCES is OFF)
22. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Grande) and (STPIN is 3) and (STLIN is OFF) then (PERSIANAS is CC)(LUCES is OFF)
23. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Grande) and (STPIN is 2) and (STLIN is OFF) then (PERSIANAS is TC)(LUCES is OFF)
24. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Grande) and (STPIN is 1) and (STLIN is OFF) then (PERSIANAS is TC)(LUCES is OFF)
25. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Grande) and (STPIN is 6) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
26. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Grande) and (STPIN is 5) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
27. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Grande) and (STPIN is 4) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
28. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Grande) and (STPIN is 3) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
29. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Grande) and (STPIN is 2) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
30. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Grande) and (STPIN is 1) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
31. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Medio) and (STPIN is 6) and (STLIN is OFF) then (PERSIANAS is A)(LUCES is OFF)
32. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Medio) and (STPIN is 5) and (STLIN is OFF) then (PERSIANAS is M)(LUCES is OFF)
33. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Medio) and (STPIN is 4) and (STLIN is OFF) then (PERSIANAS is MB)(LUCES is OFF)
34. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Medio) and (STPIN is 3) and (STLIN is OFF) then (PERSIANAS is CC)(LUCES is OFF)
35. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Medio) and (STPIN is 2) and (STLIN is OFF) then (PERSIANAS is TC)(LUCES is OFF)
36. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Medio) and (STPIN is 1) and (STLIN is OFF) then (PERSIANAS is TC)(LUCES is OFF)

37. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Medio) and (STPIN is 6) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
38. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Medio) and (STPIN is 5) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
39. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Medio) and (STPIN is 4) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
40. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Medio) and (STPIN is 3) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
41. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Medio) and (STPIN is 2) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
42. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Medio) and (STPIN is 1) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
43. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Pequeño) and (STPIN is 6) and (STLIN is OFF) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
44. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Pequeño) and (STPIN is 5) and (STLIN is OFF) then (PERSIANAS is A)(LUCES is OFF)
45. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Pequeño) and (STPIN is 4) and (STLIN is OFF) then (PERSIANAS is M)(LUCES is OFF)
46. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Pequeño) and (STPIN is 3) and (STLIN is OFF) then (PERSIANAS is MB)(LUCES is OFF)
47. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Pequeño) and (STPIN is 2) and (STLIN is OFF) then (PERSIANAS is CC)(LUCES is OFF)
48. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Pequeño) and (STPIN is 1) and (STLIN is OFF) then (PERSIANAS is TC)(LUCES is OFF)
49. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Negativo) and (STPIN is 1) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is CC)(LUCES is ON)
50. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Negativo) and (STPIN is 2) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is MB)(LUCES is ON)
51. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Negativo) and (STPIN is 3) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is M)(LUCES is ON)
52. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Negativo) and (STPIN is 4) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is A)(LUCES is ON)

53. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Negativo) and (STPIN is 5) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is ON)
54. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Negativo) and (STPIN is 6) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is ON)
55. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Pequeño) and (STPIN is 6) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is ON)
56. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Pequeño) and (STPIN is 5) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is A)(LUCES is ON)
57. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Pequeño) and (STPIN is 4) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is M)(LUCES is ON)
58. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Pequeño) and (STPIN is 3) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is MB)(LUCES is ON)
59. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Pequeño) and (STPIN is 2) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is MB)(LUCES is ON)
60. If (DUGR is not Inconfortable) and (DILL is Pequeño) and (STPIN is 1) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is MB)(LUCES is ON)
61. If (DUGR is Inconfortable) and (DILL is MuyGrande) and (STPIN is 6) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
62. If (DUGR is Inconfortable) and (DILL is MuyGrande) and (STPIN is 5) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
63. If (DUGR is Inconfortable) and (DILL is MuyGrande) and (STPIN is 4) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
64. If (DUGR is Inconfortable) and (DILL is MuyGrande) and (STPIN is 3) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is A)(LUCES is OFF)
65. If (DUGR is Inconfortable) and (DILL is MuyGrande) and (STPIN is 2) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
66. If (DUGR is Inconfortable) and (DILL is MuyGrande) and (STPIN is 1) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
67. If (DUGR is Inconfortable) and (DILL is Grande) and (STPIN is 1) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
68. If (DUGR is Inconfortable) and (DILL is Grande) and (STPIN is 2) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)

69. If (DUGR is Inconfortable) and (DILL is Grande) and (STPIN is 3) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is A)(LUCES is OFF)
70. If (DUGR is Inconfortable) and (DILL is Grande) and (STPIN is 4) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
71. If (DUGR is Inconfortable) and (DILL is Grande) and (STPIN is 5) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
72. If (DUGR is Inconfortable) and (DILL is Grande) and (STPIN is 6) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
73. If (DUGR is Inconfortable) and (DILL is Medio) and (STPIN is 1) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
74. If (DUGR is Inconfortable) and (DILL is Medio) and (STPIN is 2) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
75. If (DUGR is Inconfortable) and (DILL is Medio) and (STPIN is 3) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
76. If (DUGR is Inconfortable) and (DILL is Medio) and (STPIN is 4) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
77. If (DUGR is Inconfortable) and (DILL is Medio) and (STPIN is 5) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
78. If (DUGR is Inconfortable) and (DILL is Medio) and (STPIN is 6) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
79. If (DUGR is Inconfortable) and (DILL is Pequeño) and (STPIN is 1) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
80. If (DUGR is Inconfortable) and (DILL is Pequeño) and (STPIN is 2) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is OFF)
81. If (DUGR is Inconfortable) and (DILL is Pequeño) and (STPIN is 3) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is MB)(LUCES is ON)
82. If (DUGR is Inconfortable) and (DILL is Pequeño) and (STPIN is 4) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is M)(LUCES is ON)
83. If (DUGR is Inconfortable) and (DILL is Pequeño) and (STPIN is 5) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is A)(LUCES is ON)
84. If (DUGR is Inconfortable) and (DILL is Pequeño) and (STPIN is 6) and (STLIN is ON) then (PERSIANAS is TA)(LUCES is ON)

6.3.3 Implementación

La implementación del controlador basado en lógica difusa se ha llevado a cabo mediante el uso de las herramientas Labview y Matlab. Más concretamente, como se comentó en el capítulo 4, se ha diseñado e implementado un SCADA de la sala de juntas que permite realizar la adquisición de los datos. Además, se encarga de los cálculos de DILL y DUGR. Estos se introducen haciendo uso de Matlab Scrip Node de Labview utilizando como entradas las funciones definidas con el Toolbox de Matlab Fuzzy Logic (véase la figura 6.9). Además en dicha figura se puede observar el cálculo del DILL y como el DUGR es un valor manual. La llamada al controlador se ejecuta cada minuto, lo cual es tiempo suficiente para poder llevar a cabo la transición de un estado a otro sin que se actualice.

En el SCADA también se ha integrado la tarea de defuzzificación. Para ello, en la figura 6.9 se puede observar la asociada a las luces de la zona ventanas y en la figura 6.10 la de los estados de las persianas.

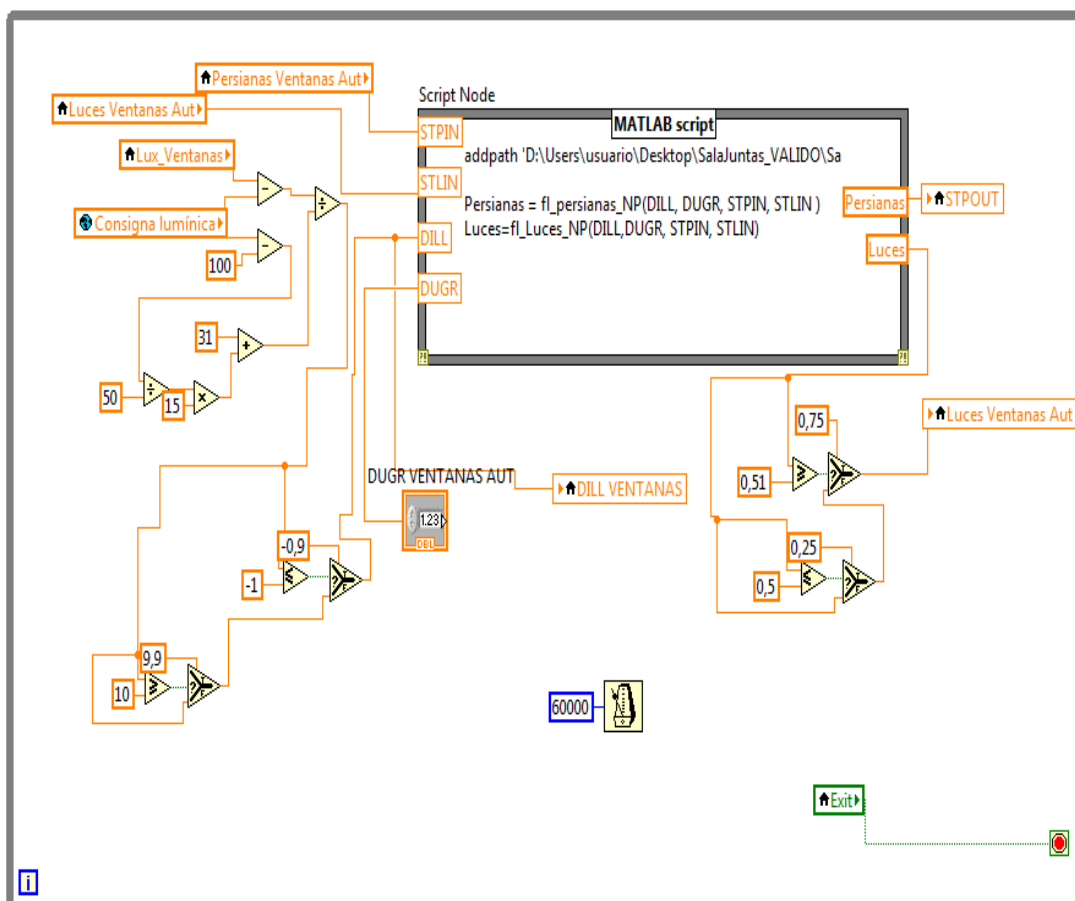


Figura 6.9. Llamada a funciones de Matlab desde Labview.

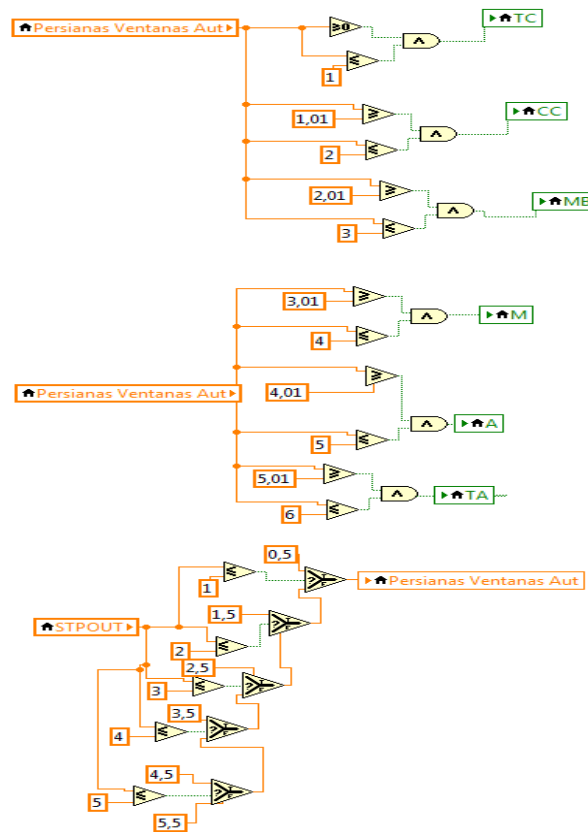


Figura 6.10. Defuzzificación de la salida PERSIANAS.

6.4 Resultados del sistema de control

6.4.1 Ensayo bajo condiciones forzadas

Para probar la estrategia desarrollada en el marco de este trabajo final de grado, se han realizado diversos ensayos reales en el interior de la sala de juntas del edificio CDdi-CIESOL-ARFRISOL bajo distintas condiciones.

En primer lugar se muestran los resultados reales obtenidos durante una mañana de un día laborable. A lo largo de este ensayo, el SCADA se ha utilizado en modo manual y automático, tanto con el uso del proyector como sin él. Además, se han incluido variaciones de las referencias de iluminación según las preferencias de los usuarios.

Por otro lado, se ha realizado diversas simulaciones de diferentes condiciones externas, como puede ser la inclusión de un exceso de radiación directa (simulada con la incorporación de un foco portátil) o la obstrucción de la iluminación que proviene del exterior (usando una semiesfera negra totalmente opaca para cubrir el sensor).

Siguiendo una estructura parecida para el apartado de modelado, en primer lugar se presenta como afecta la iluminancia externa en la zona de las ventanas (véase la figura 6.11), no se ha considerado necesario hacer lo propio para la zona del proyector, pues como se ha obtenido en el capítulo anterior la iluminancia exterior no afecta a esta zona. No obstante, en la figura 6.12 se muestra la iluminancia para esta zona frente a la referencia. En la figura 6.14 se puede observar la iluminancia de la zona de las ventanas. Y a continuación se muestra en tres figuras independientes la apertura de las persianas, la orientación de las lamas y el estado de las luminarias, véase respectivamente las figuras 6.15, 6.16 y 6.17.

A continuación se entra a valorar lo más destacable transcurrido en este ensayo, analizando las gráficas mencionadas anteriormente:

Para el modo automático se ha trabajado con los estados de la franja horaria de la mañana, como se puede observar este ensayo ha sido realizado entre las 12:15 y 13:40 aproximadamente, momento en el que solo la componente difusa de la radiación es la que afecta.

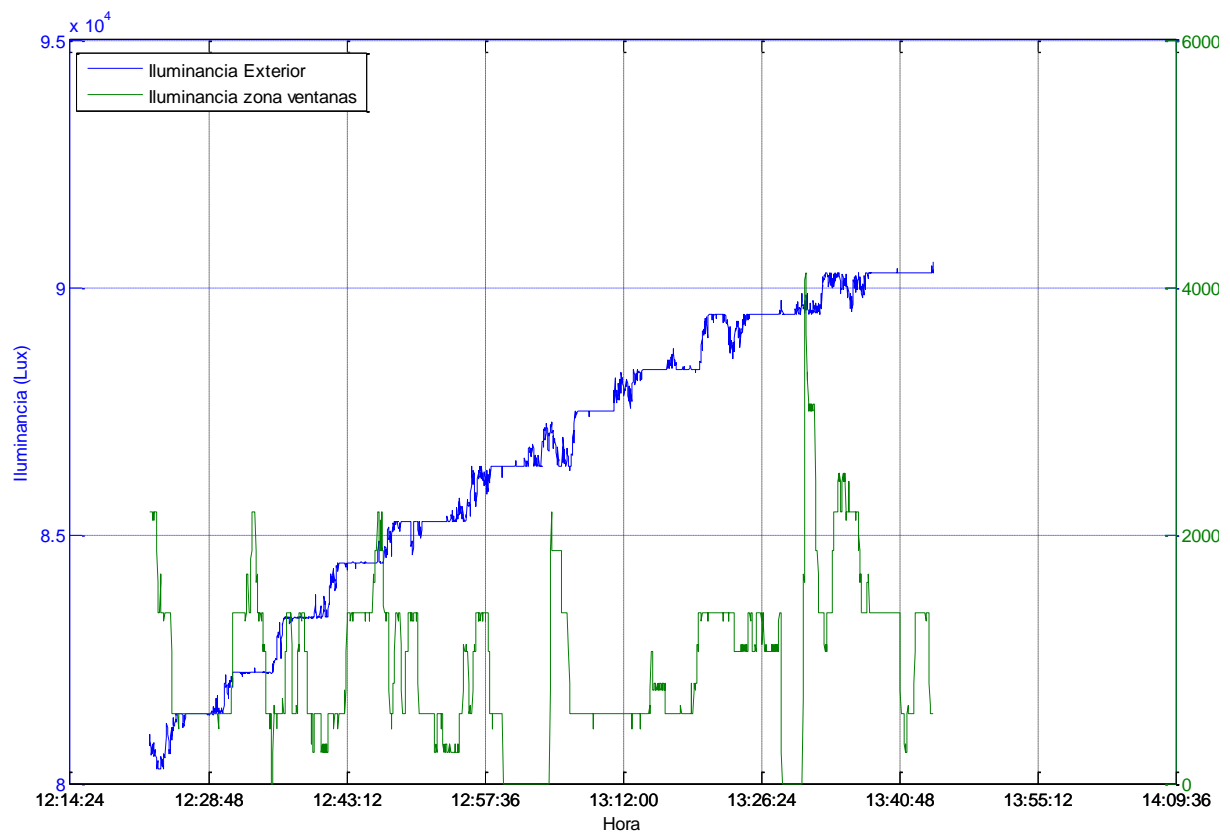


Figura 6.11. Representación de la iluminancia en la zona de las ventanas frente a la iluminancia exterior.

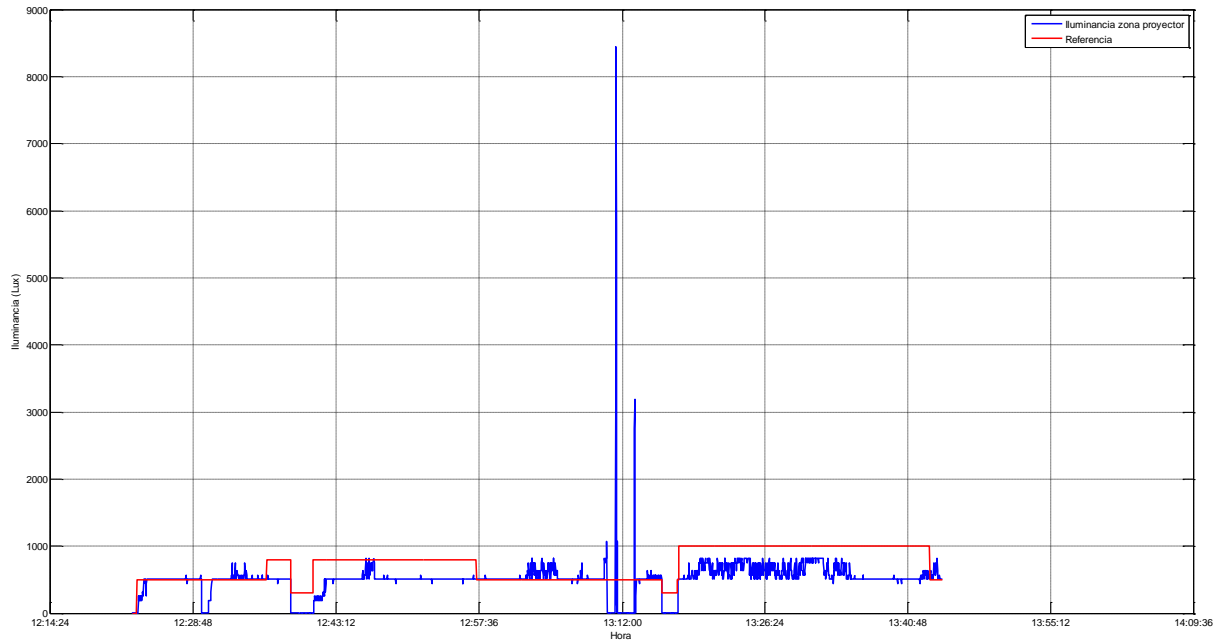


Figura 6.12. Representación de la iluminancia de la zona proyector frente a la referencia.

A las 13:00 se tapa el luxómetro de la zona de ventanas utilizando la semiesfera negra estando en el estado MB, con lo que la iluminancia para dicha zona desciende hasta 0 lux, siendo la referencia de 500 lux. Por este motivo, el controlador hace que las persianas se coloquen al 50% de apertura y pasen a estar en el estado M, como es lógico la semiesfera que tapa el sensor no deja aumentar la iluminancia provocando que el controlador haga que el sistema de persianas vaya pasando desde el estado M al A y luego al TA, para por último encender las luces y mantenerse ahí sin provocar efecto alguno. Posteriormente, estando con las luces encendidas y las persianas completamente abiertas se destapa el sensor a las 13:05 haciendo que exista una enorme diferencia entre la iluminancia real de la zona de ventanas y la referencia, por lo que el controlador mediante las reglas definidas hace que se apaguen las luces y descienda dos estados en único movimiento, pasando a ocupar el estado M. Como de esta manera no es capaz de alcanzar la referencia (500 lux), baja al estado MB alcanzando la referencia, con un error casi imperceptible.

Tras probar el controlador para obstrucciones de la iluminancia (tapando sensor con semiesfera opaca) se procede a realizar el ensayo opuesto, la incorporación del foco portátil como exceso de iluminancia. En primer lugar, a las 13:10 se enciende dicho foco incidiendo directamente sobre el luxómetro de la zona del proyector (véase la figura 6.12), esto provoca que inmediatamente se apaguen las luces de esta zona.

A las 13:13 se comienza a incidir de forma directa sobre el luxómetro de la zona de ventanas (véase la figura 6.13), esto hace que alcance un nivel de iluminación de

812 lux, para el estado MB, por lo que según las reglas definidas para la referencia de 500 lux no hace nada, se mantiene en ese estado. Por el contrario, si se decide trabajar con el proyector (referencia de 300 lux) el controlador ordena pasar al estado CC alcanzando un valor real de 562 lux, por lo que termina por establecerse en el estado TC.

Con el foco en la misma posición se cambia la referencia a 1000 lux, lo que provoca que el controlador vaya ordenando los pasos inversos llevados hasta ese momento, esto es pasa por CC (562 lux), MB (812 lux) y por último M (1374 lux). En este estado, con las tres persianas al 50% de apertura, el luxómetro marca unos 1374, a las 13:21 se pretende simular el paso de una perturbación interponiendo entre el foco y el luxómetro un folio, el resultado ante esto es que no afecta al nivel de iluminación marcado, por lo que hace pensar que ese estado el nivel de iluminación es principalmente debido a la iluminación exterior. Sin embargo al quitar el foco a las 13:24 la iluminación disminuye hasta 1124 lux.



Figura 6.13. Disposición del foco como perturbación en la sala de juntas.

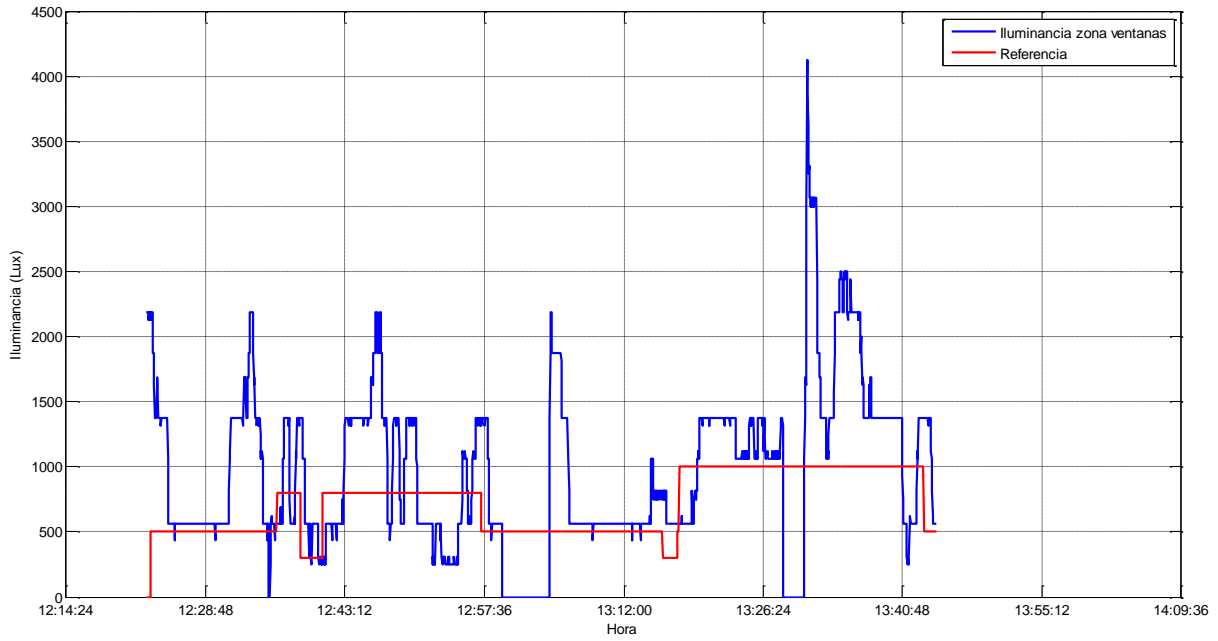


Figura 6.14. Representación de la iluminancia de la zona ventanas frente a la referencia.

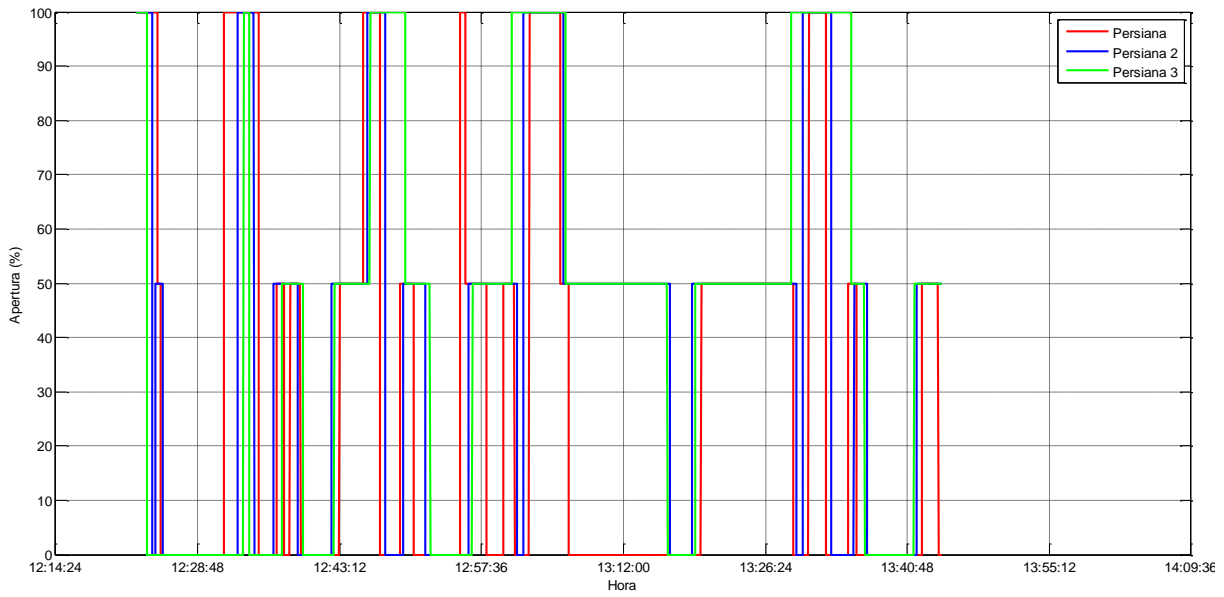


Figura 6.15. Representación de la apertura (%) de las persianas.

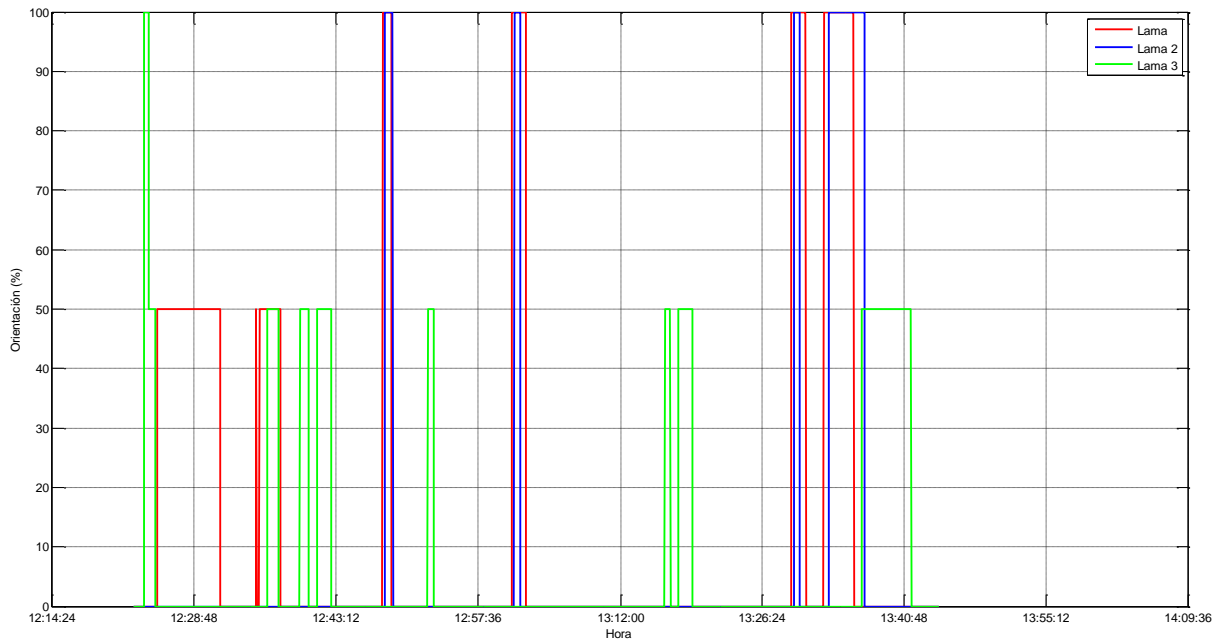


Figura 6.16. Orientación (%) de las lamas para las tres persianas.

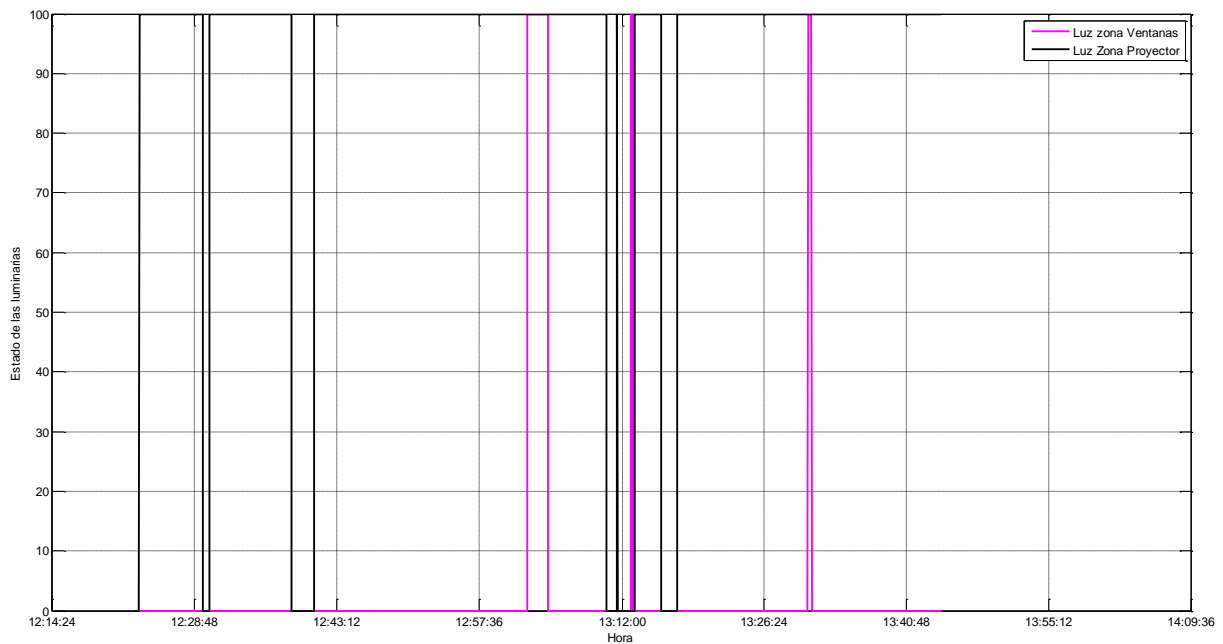


Figura 6.17. Estado de las luminarias de las dos zonas de la sala de juntas.

Para finalizar el ensayo, a las 13:28 se tapa el sensor, para volver a destaparlo con el foco encendido más cerca que anteriormente (véase figura 6.18).



Figura 6.18. Localización más próxima del foco al luxómetro de la zona de ventanas.

Esto hace que el nivel de iluminación para este ensayo alcance un máximo de 4000 lux aproximadamente. La referencia sigue siendo de 1000 lux, al introducir un folio a las 13:33 hace que descienda a 1874 lux en el estado TA, por lo que el controlador intenta alcanzar la referencia haciendo que se desplace por los estados definidos: TA 1874 lux, A 1374 lux.

Al quitar el folio, alcanza 2187 lux en el estado A, por lo que nuevamente baja en la escala de estado al M pero no sufre variación el nivel de iluminación, de la misma para MB (2187 lux), es con el estado CC cuando se acerca considerable a la referencia en ese momento (1000 lux) con un nivel de iluminación de 1374 lux.

Y por último, se prueba con una perturbación entre el foco y el sensor más opaca, cambiando el folio por un cartón, esto hace que se pase de los 1374 lux a 562 lux, por lo que el controlador intenta alcanzar los 1000 lux, llevando el sistema de persianas al estado M, con el que alcanza la referencia sobradamente (1374 lux). En este momento (13:43) se cambia la referencia a 500 lux y el controlador hace que se muevan las persianas al estado MB para alcanzar esta última referencia.

6.4.2 Ensayo de una jornada de trabajo del edificio

El objetivo de este trabajo final de grado es la implementación de un sistema de control del confort lumínico para que en la sala en la que se ha implementado se disponga en todo momento de la solución más eficiente para proveer de la iluminación suficiente y unas condiciones óptimas de trabajo para los usuarios. Para poder observar la solución que ofrece el sistema desarrollado en este trabajo se presenta en este apartado los resultados obtenidos de operar el sistema de iluminación de la sala de juntas a lo largo de un día completo. Como se observa en las figuras 6.19, 6.20, 6.21, 6.22, 6.23, 6.24, 6.25, la jornada en la sala comienza aproximadamente sobre las 9:00 de la mañana, en la figura 6.19 se observa el número de personas que hay en la sala. Se muestra como a las 9:15 entra una persona y sucesivamente llegan dos más. A las 10:30 se van a desayunar y vuelven a las 11:00. A las 13:00 hay programada una exposición y llegan 5 personas más, la exposición termina a las 14:10. A las 14:24 sale toda la gente de la sala para comer y vuelve un usuario a las 15:30. A las 19:20 el usuario sale un momento muy corto y vuelve. La jornada termina sobre las 20:40, cuando el usuario sale de la sala y ésta queda vacía.

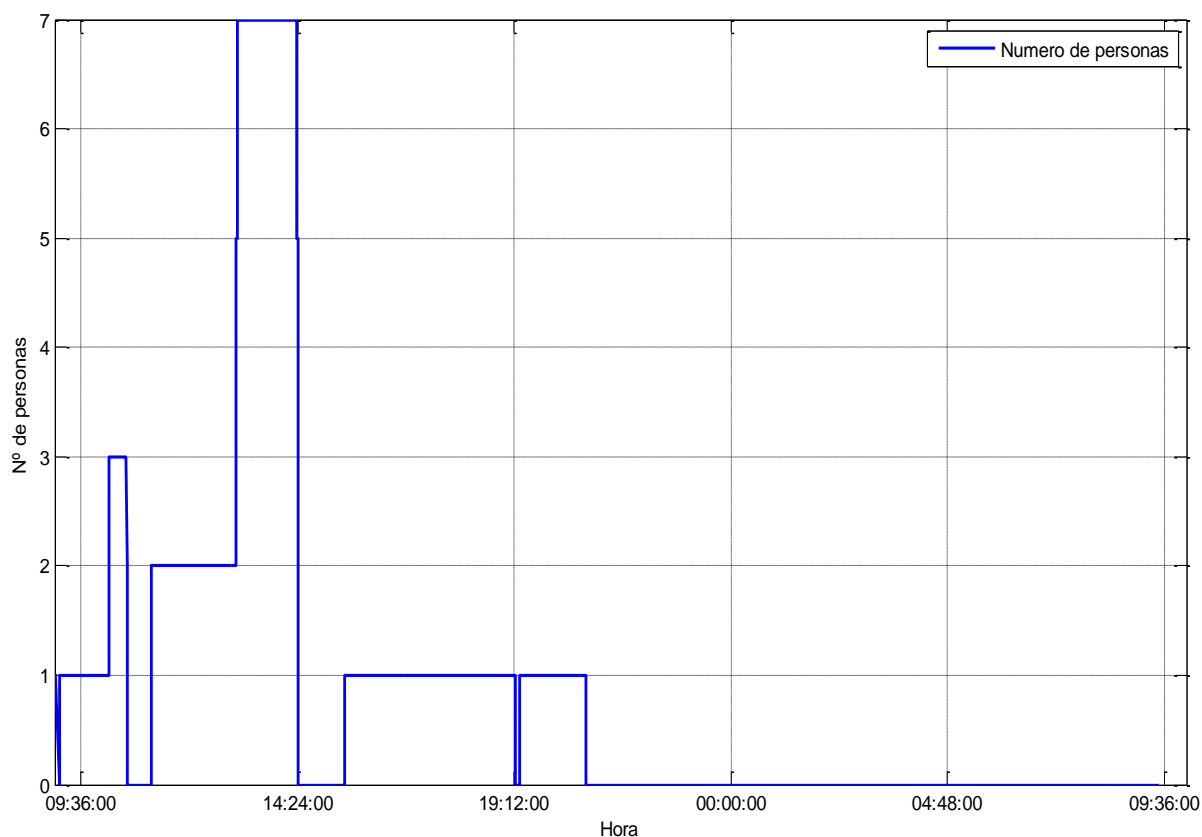


Figura 6.19. Representación del número de personas en la sala.

Este trasiego de gente afecta directamente a las órdenes que se da desde el controlador automático, como se puede observar en la figura 6.25 las luces se apagan cuando no hay usuarios en la sala o cuando se enciende el proyector. También cuando no hay gente en la sala las persianas permanecen quietas, el controlador solo activa las luminarias y persianas para alcanzar la referencia cuando hay gente dentro. Esto se muestra en las figuras 6.23, 6.24 y 6.25 donde se observa la apertura de las persianas, la orientación de las lamas y el estado de las luminarias respectivamente.

En la figura 6.29 se muestra la iluminancia exterior para estas 24 horas que ha permanecido encendido el sistema de adquisición para este ensayo. En esta se observa la curva característica para un día claro alcanzando un máximo de 92430 lux, y como por la noche desciende hasta 0 lux.

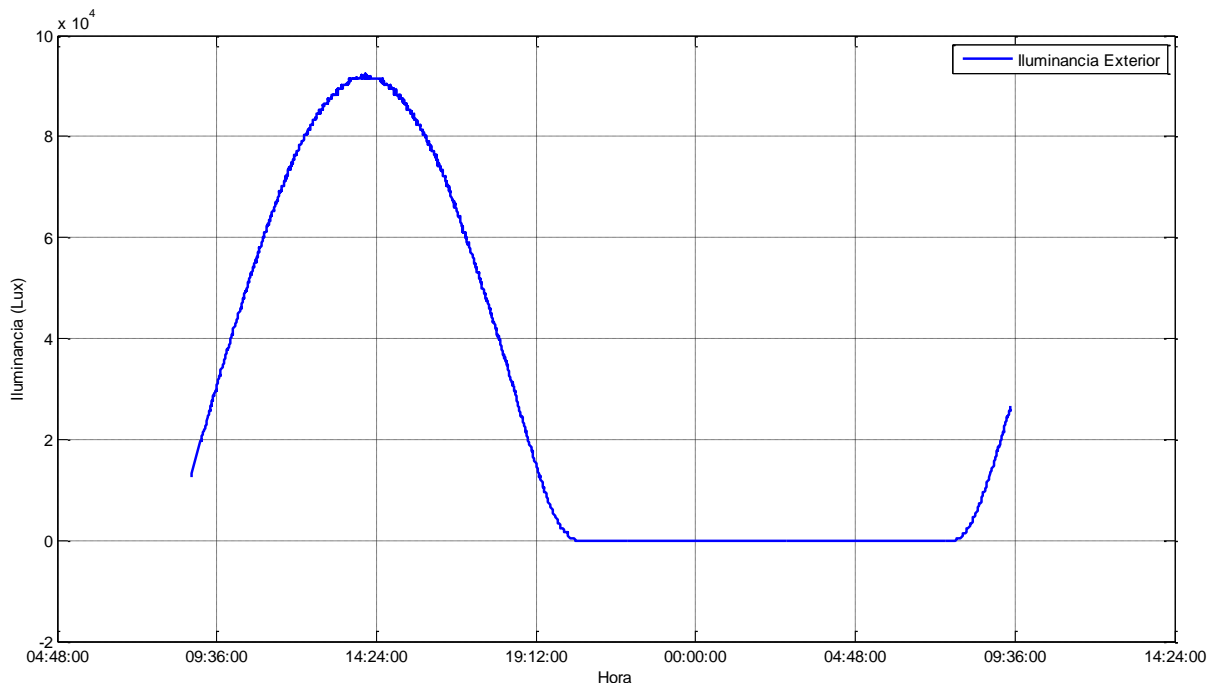


Figura 6.20. Iluminancia exterior.

En las figuras 6.21 y 6.22 se muestra la iluminancia en la zona de las ventanas y en la zona del proyector respectivamente además de la referencia lumínica establecida. En dichas figuras se puede observar como la iluminancia en ambas zonas sigue la referencia perfectamente. Sin embargo, existe una excepción, cuando se activa el proyector, la referencia pasa a ser de 300 lux, la consigna para esta situación que prevalece por encima de las demás es que las luces foco de reflejos molestos para poder ver bien la exposición deben apagarse, y así lo hacen, es por ello que en la zona del proyector no se tenga capacidad para poder mantener esta referencia, ya que solo se cuenta con las luminarias como variables de control para esta zona. Por

otro lado, en la zona de ventanas a esta hora existe incidencia directa sobre las persianas y hace que el sensor marque 500 lux. No obstante el controlador consigue bloquear esta radiación directa y mantener la posición de estas.

Por último, en las últimas horas de la tarde mientras el usuario esta dentro, abre todas las persianas para mantener la referencia y cuando este sale apaga las luces y deja las persianas en la última posición que tienen durante toda la noche.

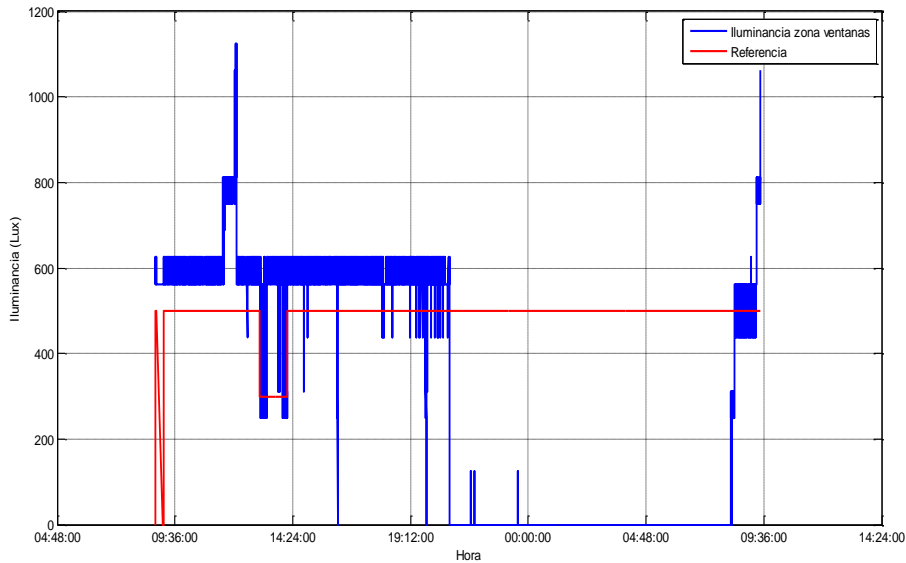


Figura 6.21. Representación de la iluminancia en la zona de ventanas frente a la referencia.

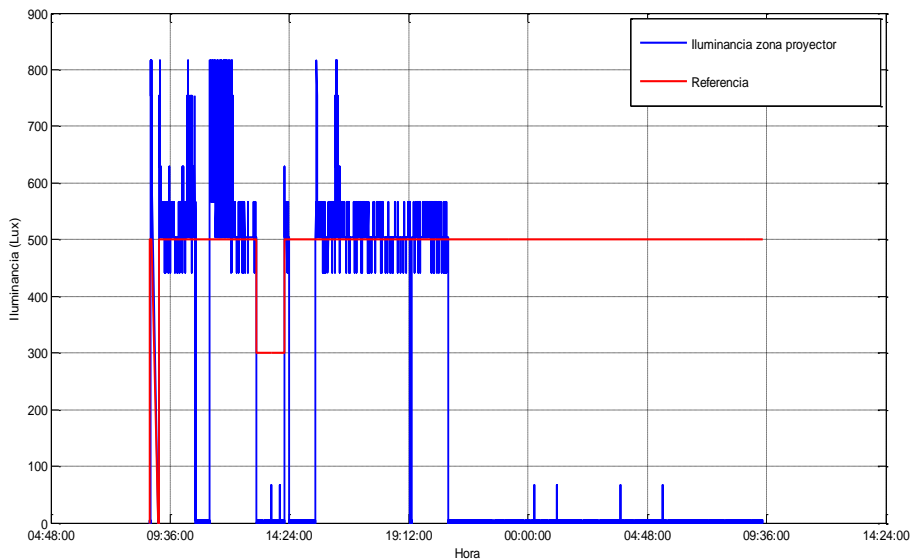


Figura 6.22. Representación de la iluminancia en la zona del proyector frente a la referencia.

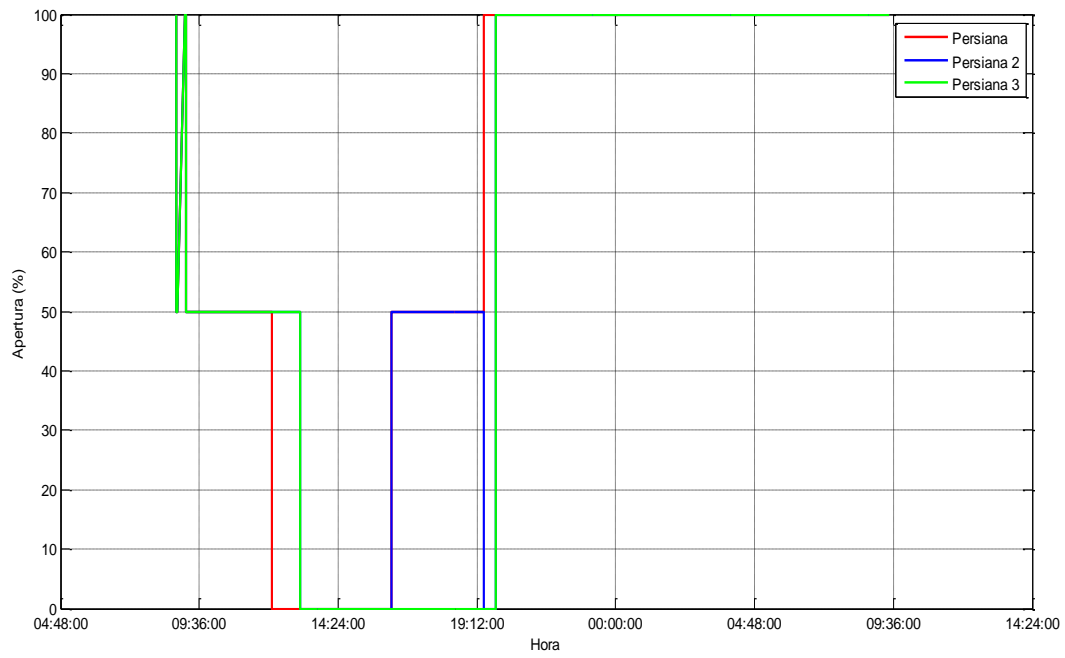


Figura 6.23. Representación del estado de apertura de las persianas.

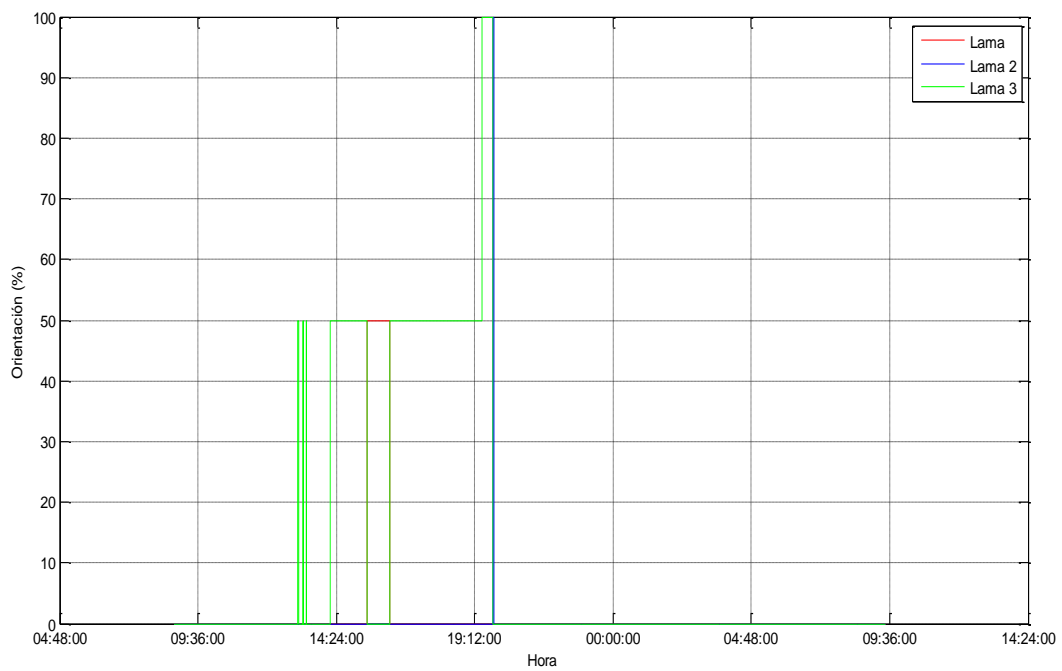


Figura 6.24. Representación del estado de la orientación de las lamas.

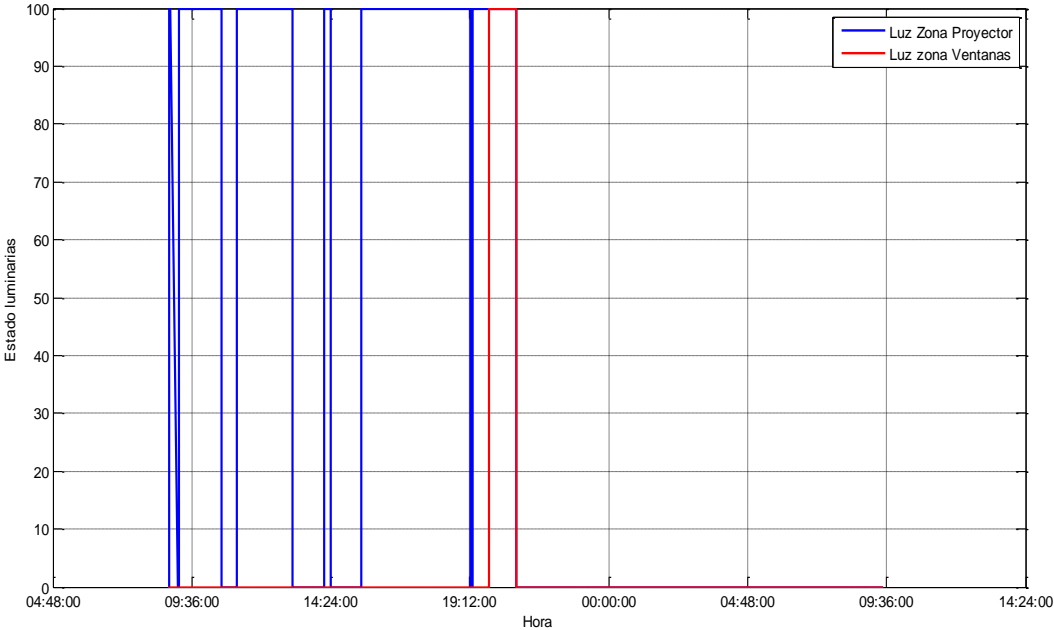


Figura 6.25. Representación del estado de las luminarias por zonas.

Capítulo 7. Conclusiones y futuros trabajos

Como se ha venido tratando a lo largo de este trabajo final de grado, el objetivo final del mismo es el desarrollo de un sistema de control del confort visual en el interior de una habitación del edificio CDdI-CIESOL-ARFRISOL de forma que las condiciones visuales sean óptimas definidas por el CTE.

Los resultados que se han obtenido, muestran la viabilidad y el éxito del sistema de control desarrollado. Además, del cumplimiento de este objetivo han surgido las siguientes aportaciones:

- En el campo de la arquitectura hardware. Se ha adecuado la instalación eléctrica de la sala de juntas, cambiando la configuración de distribución de las luminarias. Además, se ha instalado los luxómetros tanto de exterior como de interior, que han resultado tener una sensibilidad no muy aconsejable para trabajos de interior, ya que ante ligeros cambios de iluminación apreciables por el ojo humano no respondían, y además si se le excita varias veces en un corto periodo de tiempo, no reaccionan ante estos cambios rápidos. Sin embargo, en el exterior funcionan correctamente.
- Se ha desarrollado el sistema SCADA, para facilitar la interacción maquina-hombre.
- En el campo del modelado, con respecto a la iluminación artificial se han obtenido modelos de la influencia de la luz artificial mediante un software de propósito específico y se han validado dichos modelos utilizando datos reales. Por su parte, para el modelado de la luz natural, la principal aportación es la demostración de que con la creación de 6 estados para las posiciones de las persianas se puede barrer un amplio rango de iluminancia interna.
- En el campo del control, para la culminación de este proyecto ha hecho falta la implementación de un controlador basado en lógica difusa, sus principales aportaciones han sido:
 - Proveer de una eficiente y efectiva metodología para desarrollar en forma experimental un controlador no lineal sin usar matemática avanzada. El diseño del controlador difuso ha requerido de una descripción lingüística de la ley de control..
 - Este tipo de técnica de control ha permitido trabajar tanto con sistemas SISO como MIMO sin usar matemática sofisticada.
 - La solución tomada ha conferido de robustez al control del confort lumínico, es decir, no es sensible a cambios cortos de la iluminancia en el

interior, y además no actúa a partir de un valor exacto, si no que tiene un cierto margen en función de a la función de membresía permanezca.

A lo largo del desarrollo del trabajo fin de grado han ido surgiendo nuevas ideas que permitirían realizar algunas mejoras y completar en cierta medida los contenidos del trabajo fin de grado. Se presentan a continuación algunas de las posibles mejoras a añadir a todo lo realizado en este trabajo fin de grado.

- En el campo de la arquitectura hardware
 - Incorporación de tacómetros para los motores de corriente continua que mueven las persianas.
 - La incorporación de una red de sensores (luxómetros) en el interior de la sala más compleja y con mayor sensibilidad, para poder captar más puntos en la sala y con mayor precisión. Esto afectaría directamente al modelado, que podría ser más fiel a la realidad.
 - Implementación de una nueva distribución de las luminarias que permita el acceso individualmente a cada una de ellas así como la regulación del nivel de iluminación proporcionada por cada una de ellas..
- En el campo del modelado.
 - Desarrollar un modelo matemático más detallado de la iluminancia en el interior de la sala.
 - Validar los resultados obtenidos en este proyecto para otras estaciones del año.
- En el campo del control.
 - Desarrollar un control clásico del confort lumínico.
 - Desarrollar un control predictivo de las condiciones exteriores.

Bibliografía

- [1] Kolokotsa, D. et. al. (2000). Advanced fuzzy logic controllers design and evaluation for buildings 'occupant's thermal – visual comfort and indoor air quality satisfaction. *Energy and Buildings* 33, 531–543.
- [2] Morosan, P.D. Bourdais, R., Dumur D. y Buisson J. (2010). Building temperature regulation using a distributed model predictive control. *Energy and Buildings* 42, 1445-1452.
- [3] Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., Pout, C.(2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings* 40, 394–398.
- [4] Yener, A. K. (1999). A method of obtaining visual comfort using fixed shading devices in rooms. *Building and Environment* 34, 285-291.
- [5] Alcalde, E. (2012). Potencial de ahorro y eficiencia energética en instalaciones de iluminación. CIRCE.
- [6] Tarifa de Lámparas y Equipos. Marzo 2009 - España. Philips.
- [7] Nicol, F. y Humphreys, M. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings* 34, 563–572.
- [8] Hernández, A. (1994a). NTP 343: Nuevos criterios para futuros estándares de ventilación de interiores. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales España.
- [9] UNE-EN 12464-1:2003 (2003). Iluminación. Iluminación de los lugares de trabajo. Parte 1: Lugares de trabajo de interiores.
- [10] González, O. P. y Gómez, M. A. Temas de Ergonomía y Prevención. Ergonomía 4 El trabajo en oficinas. Ediciones UPC. Mutua Universal. 2001
- [11] Centro de Investigación en Energía Solar, (2014); Centro Mixto UAL-PSA Ciemat; <http://www.ciesol.es> (última consulta 30 de abril de 2014).
- [12] Dounis, A. I., M.J. Santamouris, C.C. Lefas (1993). Building visual comfort control with fuzzy reasoning. *Energy Conversion and Management* 34, (1) 17-28
- [13] Guasch, J., Forster, R., Ramos, F., Hernandez, A. y Smith, N.A. (2001). *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo: Iluminación*. Organización Internacional del Trabajo. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales.
- [14] Yener, A.K. (1999). A method of obtaining visual comfort using fixed shading devices in rooms. *Building and Environment* 34, 285–291.

- [15] Ministerio de Empleo y Seguridad Social. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (2002). Iluminación en el puesto de trabajo. Criterios para su evaluación y acondicionamiento.
- [16] CEI-IDAE (2001). Guía Técnica de Eficiencia Energética en Iluminación. Oficinas.
- [17] CEI-IDEA-CSCAE (2005). Guía técnica para el aprovechamiento de la luz natural en la iluminación de edificios.
- [18] IESNA-CIE (2000). The lighting handbook. Illuminating Engineering; 9ª edición.
- [19] Linhart, F. y Scartezzini, J. L. Evening office lighting - visual comfort vs. energy efficiency vs. performance? Building and Environment. 46, pp 981-989, 2011.
- [20] Fischer, M., Wu, K. y Agathoklis, P. et. al. (2012). Intelligent Illumination Model-Based Lighting Control. 32nd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, Macau (China).
- [21] Ochoa, C. E. y Capeluto, I. G. (2006). Evaluating visual comfort and performance of three natural lighting systems for deep office buildings in highly luminous climates. Building and Environment. 41, 1128-1135.
- [22] Ochoa, C. E., Aries, M. B. C., Loenen, E. J. y Hensen, J. L. M. (2012). Considerations on design optimization criteria for windows providing low energy consumption and high visual comfort. Applied Energy. 95, 238-245.
- [23] Osterhaus, Werner K. E. (2005). Discomfort glare assessment and prevention for daylight applications in office environments. Solar Energy. 79, 140-158.
- [24] Park, K. W. y Athienitis, A. K. (2003). Workplane illuminance prediction method for daylighting control systems. Solar Energy. 75, 277-284.
- [25] Bellia, L., Cesarano, A., Iuliano, G. F. y Spada, G. (2008). Daylight Glare: A Review Of Discomfort Indexes. Proceedings of visual quality and energy efficiency in indoor lighting: today for tomorrow. Rome (Italy).
- [26] Congradac, V., Prica, M., Paspalj, M., Bojanic, D. y Capko D. (2012). Algorithm for blinds control based on the optimization of blind tilt angle using a genetic algorithm and fuzzy logic. Solar Energy. 86, 2762-2770.
- [27] Fakra, A. H., Miranville, F., Boyer, H. y Guichard. S. (2011). Development of a new model to predict indoor daylighting: Integration in CODYRUN software and validation. Energy Conversion and Management. 52, 2724-2734.
- [28] Luxmate Control; Control fácil de iluminación; Luxmate, S.L. <http://www.luxmate.es> (última consulta 30 de Abril de 2014).

- [29] Velds, M. (2002). User acceptance studies to evaluate discomfort glare in daylight rooms. *Solar Energy*. 73(2), 95-103.
- [30] Ryckaert, W. R., Lootens, Geldof, C. J. y Hanselaer, P. (2010). Criteria for energy efficient lighting in buildings. *Energy and Buildings*. 42, 341-347.
- [31] Čongradac, V. D., Bosko, B. M., Velickovic, J. M. y Prebiracevic B. V. (2012). Control of the Lighting System Using a Genetic Algorithm. *Thermal Science*.16(1), 237-250.
- [32] Leclercq, M., Anthierens, A. C. y Bideaux, E. (2011). Control of visual conditions for open-plan offices. *Mechatronics*. 21, 581-593.
- [33] Pasamontes, M., Álvarez, J. D., Guzmán, J. L. y Berenguel, M. (2009). Hybrid modeling of a solar cooling system. En *IFAC International Conference on Analysis and Design of Hybrid System, ADHS09*. Zaragoza, Spain.
- [34] Bosqued, A., Enríquez, R., Ferrer, J. A., Heras, M. R., San Juan, C., y Soutullo, S. (2008). Informe final del SP1 relativo al SP2. estudios previos relativos al SP2-CIESOL. Inf. téc., Unidad de Eficiencia Energética en la Edificación (UIE3) del CIEMAT
- [35] Climatic. Ventanas. <http://www.climalit.es/>. (última consulta 4 de Mayo de 2014).
- [36 Pasamontes,] M., Guzmán, J. L., Rodríguez, F., Berenguel, M. y Camacho, E. F. (2007). Modelo híbrido de una planta de frío solar. En *Congreso Internacional de Aislamiento Térmico y Acústico - CIATEA*, Oviedo, Spain.
- [37] Pasamontes, M., Jiménez, M. J., Olmedo, R., Pérez, M., Ferrer, J. A., San Juan, C., Rosiek, S., Rodríguez, F., Berenguel, M., Batlles J., y Heras., R. (2007). Monitorización del edificio CIESOL de la Universidad de Almería. En *Congreso Internacional de Aislamiento Térmico y Acústico - CIATEA*, Oviedo, Spain.
- [38] Ferre, J. A. Pasamontes, Castilla, M. M. Berenguel, M. Jiménez, M. Bravo J. D. y Pérez. M. (2010). Desarrollo de un sistema de monitorización y control para edificios bioclimáticos en el marco del proyecto ARFRISOL. En *I Congreso sobre Arquitectura Bioclimática y Frío Solar (PSE-ARFRISOL)*, Roquetas de Mar, Almería, España.
- [39] M. Pasamontes (2012). Estrategias de Control Avanzadas aplicadas a un Sistema de Climatización basado en Energía Solar. Tesis Doctoral, Universidad de Almería.
- [40] *Software de supervisión y control*. Automática e Instrumentación. Octubre 2001, nº 322.

- [41] Bretón, J., Martín, J., Gil, M. y Izurrategui, C.E. (2002). *Planteamiento Docente para el Estudio de la Monitorización y el Control de Procesos*. En XXIII Jornadas de Automática, Santa Cruz de Tenerife, España.
- [42] Otín, A. (2007). *SCADA basado en LabVIEW para el laboratorio de control de ICAI*. Proyecto Final de Carrera. Universidad Pontificia de Comillas. [43] Rodríguez, F., Berenguel, M. y Guzmán J.L. *Monitorización y supervisión de procesos industriales*. Dpto. de Lenguajes y Computación. Universidad de Almería. Curso 2008/2009
- [44] Romagosa, J., Gallego, D. y Pacheco R.(2004). *Miniproyecto Automatización Industrial: Sistemas SCADA*. Dpto. Ingeniería de Sistemas. Universidad Politécnica de Cataluña.
- [45] Rosado, A. *Introducción a SCADA*. Control, instrumentación e instalaciones en Ingeniería Ambiental. Universidad de Valencia. Curso 2007/2008
- [46] UNE-EN 29241 (1996). Pantallas de visualización de datos.
- [47] Elliott, C., Vijayakumar, V., Zink, W. y Hansen, R. (2007). *National Instruments LabVIEW: A Programming Environment for Laboratory Automation and Measurement*. Cytokinetics, Inc., San Francisco, CA
- [48] Lázaro, A.M. (2001). *LabVIEW 6.1: Programación gráfica para el control de instrumentación*, Editorial Paraninfo.
- [49] National Instruments (2000). *Getting Started with LabVIEW*.
- [50] National Instruments (1998). *LabVIEW User Manual*.
- [51] National Instruments. *Using ActiveX with Labview*, <http://spain.ni.com/> (última consulta 2 de Junio de 2014).
- [52] Travis, J. *Internet Applications in LabVIEW*. Editorial: Prentice Hall, 2000.
- [53R. Medina. *LabVIEW User Manual*. National Instruments Corporation, 2002.
- [54] S. A. Boyer. (2004). *SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition*. ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society.
- [55] Ferre, J. A., Pasamontes, Castilla, M. M., Berenguel, M., Jiménez, M., Bravo, J. D. y Pérez, M. (2010). *Desarrollo de un sistema de monitorización y control para edificios bioclimáticos en el marco del proyecto ARFRISOL*. En I Congreso sobre Arquitectura Bioclimática y Frío Solar (PSE-ARFRISOL), Roquetas de Mar, Almería, España.
- [56] <http://www.dial.de/DIAL/es/dialux.html> (última consulta 29 de Mayo de 2014).

- [57] <http://www.autodesk.es> (última consulta 29 de Mayo de 2014).
- [58] Zanolì, S.M. y Barchiesi, D. (2012). Thermal and lighting control system with energy saving and users comfort features. In: 20th Mediterranean conference on control and automation, MED'12, Barcelona, Spain.
- [59] Cziker, A., Chindris, M., Miron, A. (2007). Implementation of fuzzy logic in daylighting control. In: 11th International conference on intelligent engineering systems, Budapest, Hungary.
- [60] Dounis, A.I., Tiropanis, P., Argiriou, A., Diamantis, A. (2011). Intelligent control system for reconciliation of the energy savings with comfort in buildings using soft computing techniques. *Energy and Buildings* 43,66–74.
- [61] Trobec, M., Zupancic, B., Krainer, A. (2005). Fuzzy control for the illumination and temperature comfort in a test chamber. *Building and Environment* 40(12),1626–1637.
- [62] Yifei, C., Huai, L., Xueliang, C. (2009). Venetian blind control system based on fuzzy neural network for indoor daylighting. In: 2nd International conference on computer and electrical engineering, ICCEE'09, Dubai, United Arab Emirates.
- [63] Ciabattoni, L., Freddi, A., Ippoliti, G. (2009). A smart lighting system for industrial and domestic use. In: IEEE International conference on mechatronics, ICM'13, Vicenza, Italy.
- [64] Ambalal, V. P, (2004). Transformation Functions for Trapezoidal Membership Functions, *International Journal of Computational Cognition*, 2(3), 115–135.
- [65] Hao, Y. (1993). The simplest fuzzy controllers using different inference methods are different nonlinear proportional-integral controllers with variable gains. *Automática*, 29(6),1579-1589
- [66] Maria Alice P. Jacques, Matti Pursula, Jarkko Niittymäki, and Iisakki Kosonen. "The impact of different approximate reasoning methods on fuzzy signal controllers".
- [67] J. Jantzen, H. Verbruggen, J.-J. Ostergaard. "Fuzzy control in the process industry: common practice and challenging perspectives".