



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**ADAPTACIÓN DE UN ALGORITMO DE
OPTIMIZACIÓN BASADO EN REPLICADORES
DINÁMICOS APLICADO AL CONTROL DE
ILUMINACIÓN DE RECINTOS CON PRESENCIA
DE INDIVIDUOS**

WILLIAM ANDRÉS ARÉVALO TERÁN

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Maestría en Ingeniería Eléctrica convenio UDENAR
Manizales, Colombia
2020

ADAPTACIÓN DE UN ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN BASADO EN REPLICADORES DINÁMICOS APLICADO AL CONTROL DE ILUMINACIÓN DE RECINTOS CON PRESENCIA DE INDIVIDUOS

WILLIAM ANDRÉS ARÉVALO TERÁN

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería - Ingeniería Eléctrica

Director:

Ph.D JUAN BERNARDO GOMEZ MENDOZA

Codirector:

Ph.D. ANDRÉS DARÍO PANTOJA BUCHELI

Línea de Investigación:

SISTEMAS DE CONTROL

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigación Percepción y Control Inteligente

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Maestría en Ingeniería Eléctrica convenio UDENAR
Manizales, Colombia
2020

*Dedicado a mis padres Medardo Arévalo y
Teresa Terán, a mis hermanos, mis
sobrinos, a mi esposa Paula Salas y a Isa,
que siempre estuvieron a mi lado
brindándome su apoyo con amor.*

Agradecimientos

A Dios por brindarme la bendición de poder estudiar y culminar esta importante etapa en la misión de ser mejor cada día para el servicio de los demás.

A mis padres y hermanos, y en especial a mi esposa Paula Salas y a Isa, por siempre estar a mi lado alentando y apoyando este proceso tan arduo e importante.

Al doctor Juan Bernardo Gómez y al doctor Andrés Pantoja, por guiarme en la realización de la presente tesis de maestría, sus aportes, voluntad, tiempo, y apoyo fueron un soporte fundamental en el desarrollo y culminación de este trabajo.

A los magíster Christian Vega y John Barco por todos sus consejos y orientación, que como buenos amigos me brindaron en varios momentos durante el desarrollo de la tesis.

A la Universidad Nacional de Colombia y la Universidad de Nariño, por brindar la oportunidad de hacer esta maestría en convenio, opción que permitió cumplir este sueño que de otra forma no se habría podido alcanzar.

A todas aquellas personas que aportaron al feliz término de esta etapa.

Resumen

ADAPTACIÓN DE UN ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN BASADO EN REPLICADORES DINÁMICOS APLICADO AL CONTROL DE ILUMINACIÓN DE RECINTOS CON PRESENCIA DE INDIVIDUOS

El uso eficiente de la energía es un tema de interés mundial que invita a la comunidad científica a buscar técnicas, métodos y procedimientos que permitan el buen uso de la energía disponible. Actualmente, el 48.7% de consumo de energía eléctrica mundial depende de las dinámicas de uso de los sectores residencial y comercial, y a nivel de Colombia, dicha participación aumenta al 64.6%, convirtiendo a estos sectores en un nicho interesante de investigación hacia la eficiencia energética. Al hacer un análisis más detallado de esta participación, se tiene que el consumo destinado a iluminación en estos sectores está entre los más altos, siendo superado solo por usos como calefacción y refrigeración. Esto se debe en gran parte a que, en la zona urbana, la presencia de grandes edificios de apartamentos, barrios residenciales, grandes centros comerciales, hospitales y centros educativos, entre muchos otros, requieren de la iluminación a diario y por varias horas consecutivas.

En este contexto, el término *iluminación inteligente* asume un papel interesante en la búsqueda de alternativas que permitan hacer un mejor uso de la energía eléctrica empleada en luz artificial. Estos métodos usan estrategias de control que permiten la optimización del recurso, tomando relevancia esquemas no centralizados como el adaptado de los Replicadores Dinámicos, que inspiran el trabajo de la presente investigación.

Los replicadores dinámicos solucionan problemas de optimización distribuida de recursos basados en dinámicas poblacionales, que llevados al contexto de iluminación, permiten gestionar la asignación de potencia en un sistema de lámparas y sensores interconectado, minimizando la energía utilizada. La principal característica de esta estrategia de control es que solo necesita información local para lograr su objetivo de control. Los trabajos realizados actualmente, demuestran que el sistema de replicadores permite el seguimiento de referencias de iluminación de forma adecuada, pero no contempla en su estructura la posibilidad de prescindir del uso de luminarias dependiendo de detectores de presencia. La inclusión de este parámetro en el sistema de replicadores dinámicos distribuidos aplicado a gestión de iluminación y su comparación con otras estrategias, constituyen el aporte principal de esta investigación.

En este trabajo se plantea una adecuación del algoritmo de optimización basado en dinámicas poblacionales, para seguir referencias de iluminación de recintos con

múltiples zonas, teniendo en cuenta la presencia o ausencia de individuos y solventando los inconvenientes que esta adecuación genera en el normal funcionamiento del sistema. Para validar el desempeño del nuevo algoritmo de control, se realiza un análisis comparativo de desempeño de éste con un grupo de controladores base dado por un controlador MPC, un LQR y un PID. Los resultados del análisis ante cuatro diferentes escenarios de prueba, demuestran que el algoritmo planteado es una solución óptima distribuida con un desempeño similar al obtenido por controladores óptimos centralizados como el MPC y el LQR, y que al mismo tiempo solventa limitantes que se presentan en estrategias de control descentralizadas como el controlador PID.

Palabras clave:

Replicadores dinámicos, control de iluminación, control distribuido, optimización distribuida de energía.

Abstract

ADAPTATION OF AN OPTIMIZATION ALGORITHM BASED ON REPLICATOR DYNAMICS APPLIED TO ROOMS LIGHTING CONTROL WITH INDIVIDUALS PRESENCE

Energy efficiency is a worldwide interest topic that invites the scientific community to search for techniques, methods and procedures to look for the appropriate use of the available energy. Currently, a 48.7% of global electricity consumption depends on the dynamics of residential and commercial sectors, and in Colombia, this participation increases to 64.6%, making these sectors an interesting research to promote a good energy use. When making a detailed analysis of this participation, the consumption for lighting in these sectors is one of the highest, being surpassed only by heating and cooling systems. The high consumption is supported given that in the urban area, the presence of large apartment buildings, residential neighborhoods, large shopping centers, hospitals and educational centers, among others, require lighting on a daily basis for several consecutive hours.

In this context, the term of intelligent lighting assumes an interesting role in the search for alternatives that make better use of the electrical energy used in artificial light. These methods use control strategies that allow the resource's optimization, where the non-centralized schemes have an especial relevance such as the Replicators Dynamics, which inspire the work of the present investigation.

Replicators Dynamics are used to solve problems of distributed optimization of resources based on population dynamics, which led to the lighting context allows managing the power allocation in an interconnected lamp system, minimizing the used energy. The main good thing about this control strategy is that only need local information to achieve the control objective. Related works show that the replicator system allows the monitoring of lighting references in an adequate way, but does not contemplate in its structure the possibility to dispense with use of luminaires depending on the need for lighting given by the presence of individuals; the inclusion of this parameter in the distributed replicators dynamic system applied to lighting management is the main contribution of this research.

In this master's thesis, an adaptation of the optimization algorithm based on replicators dynamics applied to lighting control of room is planned, this algorithm is tested using a case study (classroom with eight led luminaires with lighting and presence sensors) by simulation using MATLAB software. Finally, a comparative analysis of the performance of this algorithm in relation to three control systems (MPC mimo, LQR mimo and PID) is made, demonstrating the benefits of the algorithm develop

Keywords:

Replicator Dynamics, Lighting Control, Distributed Control, Distributed Energy Optimization

Contenido

Resumen	V
Lista de Figuras.....	XII
Lista de Tablas	XIV
1. Introducción	15
2. Referentes Teóricos.....	21
2.1. Modelo de iluminación. Conceptos preliminares	21
2.2. Modelo matemático de iluminación	22
2.3. Replicadores Dinámicos	23
2.4. Adaptación de la Ecuación de Replicador Local (ERL) a sistemas de iluminación	28
3. Metodología.....	31
3.1. Descripción del caso de estudio	31
3.1.1. Función de transferencia Lámpara	34
3.1.2. Función de transferencia Sensor	34
3.1.3. Topologías de conexión:.....	36
3.2. Control local basado en Replicadores Dinámicos sensibles a presencia de individuos	36
3.2.1. Inclusión de parámetro presencia de individuos en la Ecuación de Replicador Local.....	38

3.2.2.	Restricción de potencia mínima en agentes reales	40
3.2.3.	Histéresis en restricción de potencia mínima	40
3.2.4.	Estructura de conexión entre agentes dirigida a una solución local implementable	42
3.2.5.	Discretización del modelo de Replicador Dinámico Local	46
3.2.6.	Implementación de restricción de potencia mínima en agentes ficticios...	50
4.	Resultados y Análisis	52
4.1.	Definición de controladores para comparación.....	53
4.1.1.	MPC multivariable MIMO	53
4.1.2.	LQR multivariable MIMO	59
4.1.3.	PID descentralizado.....	60
4.2.	Escenarios de comparación	63
4.2.1.	Descripción de Escenarios	63
4.2.2.	Régimen de homogeneidad en iluminación.....	66
4.2.3.	Condiciones de Disponibilidad de Energía	67
4.3.	Indicadores de Desempeño	68
4.4.	Ejecución de pruebas.....	71
4.4.1.	Análisis comparativo Escenario 1. Pérdida de presencia en zonas adyacentes.....	75
4.4.2.	Análisis comparativo Escenario 2. Pérdida de presencia en zonas no adyacentes.....	81
4.4.3.	Análisis comparativo Escenario 3. Activación momentánea de zonas adyacentes.....	87
3.2.1	Análisis comparativo Escenario 4. Ocupación progresiva.	92

5. Conclusiones y trabajo futuro.....	99
5.1. Conclusiones	99
5.2. Trabajo futuro	101
BIBLIOGRAFÍA	102
Anexo 1. Gráficas de respuestas temporales	106
Anexo 2. Gráficas de barras apiladas.....	115
Anexo 3. Código de Matlab Utilizado.....	124

Lista de Figuras

Figura 1 Participación de consumo final mundial por sector en PJ y su participación en porcentaje. Fuente: Adaptado de IEA 2017 [1].....	15
Figura 2 Participación de consumo eléctrico final en Colombia por sector (PJ). Adaptado de informe BECO - UPME 2018 [4]	16
Figura 3 Uso final energía eléctrica sectores Residencial y Comercial/Público en Colombia (PJ) – Adaptado de BECO-UPME 2018 [4].....	17
Figura 4. Diagrama distribución espacial aula de clase caso de estudio	32
Figura 5 Conexión en anillo.....	36
<i>Figura 6. a) Comportamiento de potencia en lámparas ante evento pérdida de presencia zonas 2 y 4, b) Comportamiento iluminación de lámparas ante pérdida de presencia zonas 2 y 4</i>	<i>39</i>
Figura 7 Grafo de conexión agente ficticio único.....	43
Figura 8 Comportamiento del sistema con un solo agente, ante pérdidas de presencia cercanas y lejanas	44
Figura 9. Grafo de conexión agente ficticio asociado a cada agente real	45
Figura 10 Respuesta del sistema con agentes ficticios individuales, ante la pérdida de presencia en zona 2.	46
Figura 11. Respuesta temporal controlador PI.....	62
Figura 12 Nomenclatura de Zonas de Iluminación	63
Figura 13 Gráfica de Rada Ejemplo	72
Figura 14 Gráfica de respuesta temporal Ejemplo	73
Figura 15 Gráfica de barras apiladas Ejemplo	74
Figura 16 Diagramas de radar de desempeño controladores Escenario 1 con energía suficiente.	75
Figura 17 Repuesta temporal Prueba 1. Iluminación Homogénea	76
Figura 18 Respuesta temporal Prueba 6. Iluminación no Homogénea	76
Figura 19 Diagramas de radar de desempeño controladores Escenario 1 con energía insuficiente.	77
Figura 20 Grafico de barras apiladas Escenario 1 Perdida de presencia en zonas adyacentes. Condiciones de energía insuficiente e Iluminación homogénea.	78
Figura 21 Grafico de barras apiladas Escenario 1 Perdida de presencia en zonas adyacentes. Condiciones de energía insuficiente e Iluminación no homogénea.	79
Figura 22 Respuesta temporal Prueba 9. Iluminación Homogénea	79
Figura 23 Respuesta temporal Prueba 13. Iluminación no Homogénea	80
Figura 24 Diagramas de radar de desempeño controladores Escenario 2 con energía suficiente.	81
Figura 25 Respuesta temporal Prueba 2. Iluminación Homogénea	82
Figura 26 Respuesta temporal Prueba 6. Iluminación no Homogénea	82

Figura 27 Diagramas de radar de desempeño controladores Escenario 2 con energía insuficiente.	83
Figura 28 Grafico de barras apiladas Escenario 2 Perdida de presencia en zonas no adyacentes. Condiciones de energía insuficiente e Iluminación homogénea.	84
Figura 29 Grafico de barras apiladas Escenario 1 Perdida de presencia en zonas no adyacentes. Condiciones de energía insuficiente e Iluminación no homogénea.	84
Figura 30 Respuesta temporal Prueba 10. Iluminación Homogénea	85
Figura 31 Respuesta temporal Prueba 14. Iluminación no Homogénea	86
Figura 32 Diagramas de radar de desempeño controladores Escenario 3 con energía suficiente.	87
Figura 33 Respuesta temporal Prueba 3. Iluminación Homogénea	88
Figura 34 Respuesta temporal Prueba 7. Iluminación no Homogénea	88
Figura 35 Diagramas de radar de desempeño controladores Escenario 3 con energía insuficiente.	89
Figura 36 Respuesta temporal Prueba 11. Iluminación Homogénea	90
Figura 37 Respuesta temporal Prueba 15. Iluminación no Homogénea	91
Figura 38 Diagramas de radar de desempeño controladores Escenario 4 con energía suficiente.	92
Figura 39 Respuesta temporal Prueba 4. Iluminación Homogénea	93
Figura 40 Respuesta temporal Prueba 8. Iluminación no Homogénea	93
Figura 41 Grafico de barras apiladas Escenario 4 Ocupación progresiva. Condiciones de energía suficiente e Iluminación homogénea.	94
Figura 42 Grafico de barras apiladas Escenario 4 Ocupación progresiva. Condiciones de energía suficiente e Iluminación no homogénea.	95
Figura 43 Diagramas de radar de desempeño controladores Escenario 4 con energía insuficiente.	95
Figura 44 Respuesta temporal Prueba 12. Iluminación Homogénea	96
Figura 45 Respuesta temporal Prueba 16. Iluminación no Homogénea	97

Lista de Tablas

Tabla 1. Dimensiones de matrices que componen $\Delta u(ki)$	57
Tabla 2. Escenario 1	64
Tabla 3. Escenario 2	64
Tabla 4. Escenario 3	65
Tabla 5. Escenario 4	65
Tabla 6. Referencia de iluminación en luxes por Zona.....	66
Tabla 7 Descriptivo de pruebas para evaluación de desempeño	71
Tabla 8 Resumen Gráfico de Resultados de Desempeño – Gráficos de Radar ..	98

1.Introducción

Actualmente el uso eficiente de la energía es un tema de importancia mundial, donde las políticas de eficiencia energética son consideradas mecanismos cuya aplicación busca asegurar el abastecimiento energético de los países mediante la adopción de buenos hábitos de consumo. Una de las herramientas es el uso de nuevas tecnologías y técnicas que permitan un mejor aprovechamiento de los recursos energéticos disponibles, buscando mitigar el impacto ambiental asociado al proceso.

Según datos estadísticos de la International Energy Agency en la última versión disponible al público [1] del año 2017, el consumo de energía total en el mundo en dicho año fue de 406.841 PJ, de los cuales el 18.9% corresponde al consumo de energía eléctrica. Esta fuente es la segunda con mayor consumo, siendo superada solo por los energéticos derivados del petróleo y estando por encima de fuentes como gas natural, carbón, y biocombustibles. Si a su vez se hace una caracterización del consumo de energía eléctrica por sector (Figura 1), se encuentra que a nivel mundial el 48.7% del consumo total se debe al sector residencial y comercial/público, siendo éste aún más grande que el consumo del sector industrial.

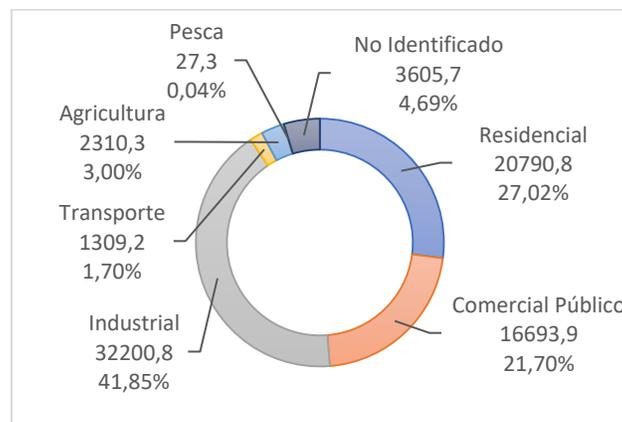


Figura 1 Participación de consumo final mundial por sector en PJ y su participación en porcentaje. Fuente: Adaptado de IEA 2017 [1]

El sector residencial, así como el comercial/público son ambientes en los que el uso de la energía eléctrica depende directamente de las actividades propias de una familia, una oficina o un local comercial. Conociendo que el 55,7% de la población mundial vive en áreas urbanas según [2] (Informe estadístico Banco Mundial 2018)

en las cuales se concentra el uso de la energía eléctrica, se encuentra en estos sectores un potencial de trabajo importante en relación a la implementación de estrategias de uso eficiente de la energía que dependan no de una acción centralizada sino de un trabajo distribuido aplicado a nivel de espacios domiciliarios, académicos, empresariales, institucionales, etc.

Al analizar la participación de consumo de energía eléctrica en Colombia (Figura 2), se encuentra que el sector residencial y el sector comercial/público fueron responsables del 64.6% del consumo total de energía eléctrica del país en el año 2018, según la información estadística disponible en el Balance Energético Colombiano de la UPME [3]

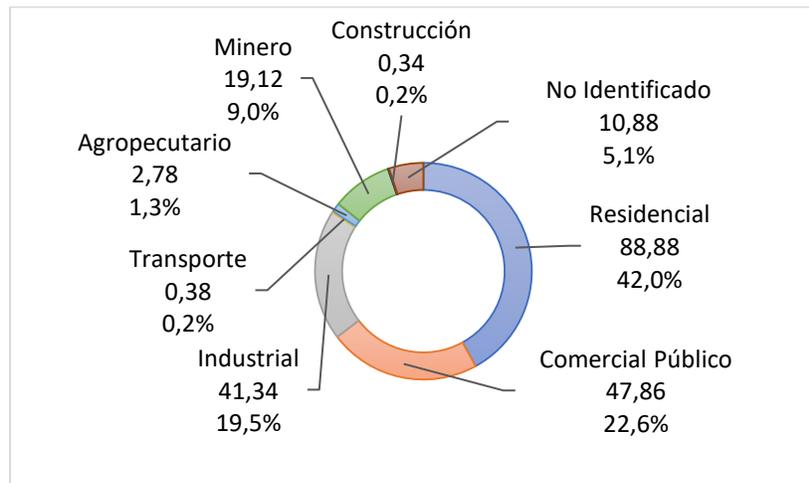


Figura 2 Participación de consumo eléctrico final en Colombia por sector (PJ). Adaptado de informe BECO - UPME 2018 [4]

Una caracterización de consumo en estos dos sectores, definida por uso final de la energía eléctrica, evidencia que la iluminación ocupa un lugar importante dentro de los múltiples usos presentes. Como se muestra en la Figura 3, la iluminación es el tercer uso con mayor consumo a nivel residencial y el segundo a nivel comercial/público, con participaciones del 14.1% y 35.5% respectivamente.

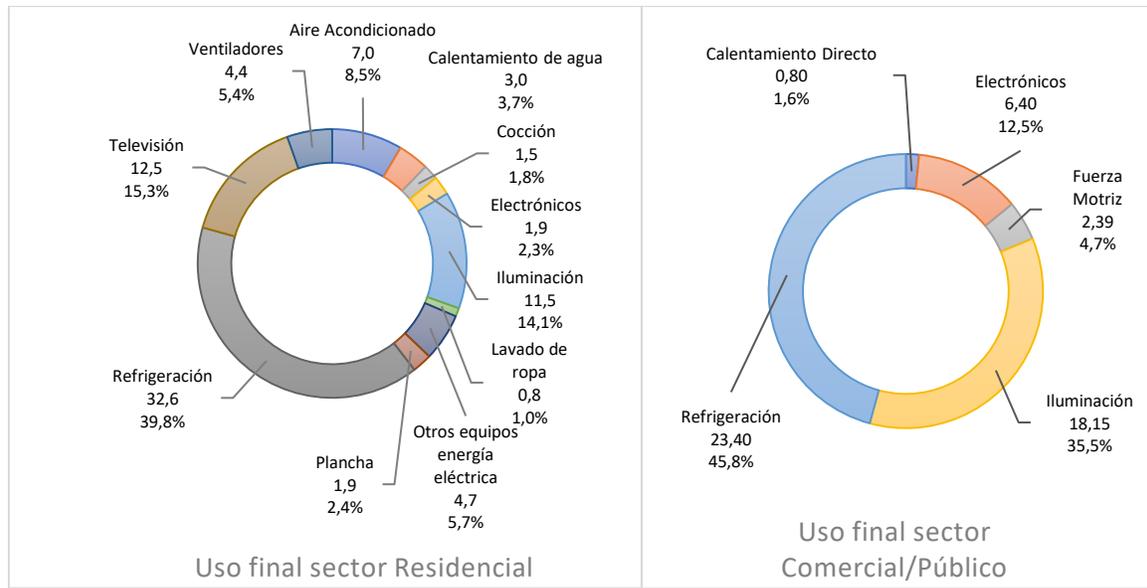


Figura 3 Uso final energía eléctrica sectores Residencial y Comercial/Público en Colombia (PJ) – Adaptado de BECO-UPME 2018 [4]

Teniendo en cuenta este panorama, se encuentra que hay una oportunidad de aporte importante frente al mejoramiento de condiciones de consumo y uso eficiente de la energía en estos sectores, siendo la iluminación el nicho de trabajo sobre el cual se adelanta la presente investigación.

Ahora, si se analiza la forma en que se utiliza la iluminación en el sector residencial, y en el sector comercial/público, se encuentra a nivel urbano, que toda esta carga se concentra en sistemas de iluminación de edificios de apartamentos, barrios residenciales, centros de oficinas o locales comerciales, centros educativos, hospitales, iluminación de calles, entre otros. Estas aplicaciones, en conjunto o de manera particular, pueden ser entendidas como sistemas interconectados de gran escala, ya que se plantea optimizar los sistemas de iluminación haciendo control a cada una de las luminarias (o zonas de luminarias), obteniendo una gran cantidad de variables. Además, esta conexión requiere información de sensores y actuadores en cada locación, por lo que se necesita una conexión entre dispositivos mediante una red de comunicación.

En sistemas interconectados de gran escala, el conseguir una solución óptima frente a un objetivo en específico se convierte en un problema cuando cada elemento del sistema solo tiene información parcial proveniente de sus vecinos en una red de comunicación. Una aplicación interesante y de mucho impacto que presenta estas dinámicas son los sistemas de iluminación en edificaciones de gran tamaño; en ellos se busca mantener una iluminación adecuada en todos los espacios, minimizando el consumo de energía en busca de una mejora en la eficiencia energética.

Teniendo en cuenta que la cantidad de fuentes de luz que puede haber en un edificio es muy grande, pensar en estrategias de control que resuelvan este problema de forma centralizada se convierte en un cuello de botella cuando la cantidad de

elementos a controlar aumenta, debido a que el volumen de información que se debe manejar en tiempo real es demasiado grande, retrasando y complicando la respuesta del sistema.

Soluciones a este tipo de problemas han sido abordadas desde muchos frentes a nivel de control. Por ejemplo, estrategias de control óptimo han sido trabajadas en [5] al usar un controlador PSO (Particle Swarm Optimization) en un sistema de iluminación interconectado que busca el seguimiento de referencia adecuado dentro de un museo de arte, demostrando que este tipo de implementaciones logra un ahorro del 40% en relación a un sistema de iluminación convencional. Por su parte, los autores en [6] presentan un sistema de control predictivo que utiliza lámparas dimerizables utilizando información local en una vecindad, trabajando con un algoritmo de retroceso distribuido con información de ocupación de espacios y consiguiendo un seguimiento de referencia adecuado. En el área de control inteligente, el trabajo en [7] describe la utilización de un controlador Fuzzy usando sensores de iluminación y presencia de individuos; mientras que [8] muestra un sistema de control con capacidad de autoaprendizaje mediante redes neuronales que puede ser utilizado para determinar el nivel de dimerización de luminarias con el fin de cumplir el seguimiento adecuado de referencias. Al considerar un sistema de iluminación, claramente se tienen múltiples variables de entrada y salida, como se muestra en [9]. Aquí, los autores utilizan un sistema de control óptimo MIMO que demuestra una reducción significativa en el consumo energético de una oficina, dependiendo directamente de las zonas a utilizar durante una jornada de trabajo.

Este problema ha sido solucionado también con técnicas de control realimentado clásicas como las presentadas en [10] y [11], cuyos resultados se concentran en el seguimiento de referencias de iluminación por lámpara en una estructura totalmente independiente. Cabe destacar que incluso el control on/off es una alternativa de ahorro de energía cuando su coordinación se realiza teniendo en cuenta sensores de iluminación, presencia y temperatura [12].

En cuanto a técnicas basadas en dinámicas poblacionales, los trabajos [13] y [14] presentan una solución de control óptimo distribuida basada en replicadores dinámicos. Esta técnica, aplicada a sistemas de iluminación de gran escala (en simulación e implementación en modelos), demuestra que estas estrategias permiten conseguir un seguimiento adecuado de referencias de iluminación haciendo uso únicamente de información local disponible en una red de comunicación entre luminarias. Al analizar con más detalle estas propuestas, se encuentra que el uso eficiente de la energía destinada a iluminación no solo requiere un buen seguimiento de referencias ajustado a las necesidades de cada espacio iluminado, sino también a la adaptación a fuentes de luz externa en los espacios, tal como lo han descrito varios de los autores anteriormente citados. La necesidad de adecuación de los ambientes ante los usuarios presenta una oportunidad de mejora relacionada con la inclusión de un parámetro asociado a la presencia de individuos que permita al algoritmo definir qué zonas requieren ser iluminadas y cuáles no, con el fin de gestionar mejor la energía utilizada en iluminación. Así, en esta investigación se adapta el algoritmo de optimización distribuida en [13], a un

algoritmo que contempla las condiciones de presencia de individuos, realizando una asignación dinámica de los recursos disponibles y los liberados por zonas sin personas.

Una comparación entre un sistema de control totalmente descentralizado y un sistema de control óptimo centralizado se presenta en [15], demostrando que con ajustes adecuados del sistema descentralizado se pueden lograr resultados de seguimiento de referencia muy similares a los que obtiene el sistema de control óptimo centralizado. Teniendo en cuenta que gran parte de los trabajos revisados frente al control de iluminación en edificios optan por el control óptimo centralizado, en la presente investigación se compara el desempeño del algoritmo propuesto con dos controladores óptimos centralizados (un controlador MPC y un controlador LQR) aplicados al caso de estudio. De igual forma al encontrar que soluciones de control clásicas o incluso ON/OFF presentan resultados importantes en el proceso de control de iluminación, también se incluye en el conjunto de controladores a comparar, un esquema PID descentralizado implementado en cada lámpara del sistema. El ejercicio de comparación se realiza mediante simulación usando el software MATLAB, en varios escenarios de estudio y definiendo indicadores de desempeño sobre el error de seguimiento, la velocidad del control y la energía empleada por el sistema.

De esta manera la presente investigación contempla los siguientes objetivos:

Objetivo General:

Adaptar un algoritmo de optimización distribuida aplicado a iluminación basado en replicadores dinámicos que incluya el factor de presencia individuos.

Objetivos Específicos:

- Determinar los efectos que tiene la inclusión de individuos en el desempeño del algoritmo basado en replicadores dinámicos objetos de estudio.
- Adaptar la función de aptitud (fitness) de tal forma que se incluya el parámetro de presencia de individuos.
- Evaluar el desempeño del nuevo algoritmo mediante simulación.

La investigación utiliza el modelo de iluminación descrito en [13] para el proceso de adaptación del algoritmo, y se limita a la medición y comparación de desempeño del algoritmo modificado en comparación a tres tipos de controladores (MPC, LQR y PID). Se espera que los resultados de esta investigación permitirán hacer un aporte en relación al uso eficiente de la energía eléctrica utilizada con fines de iluminación en el sector residencial y comercial/público, con miras a que próximos trabajos puedan probar el uso de este tipo de alternativas de control en un entorno real.

En resumen, el documento presenta a continuación en el Capítulo 2, los referentes teóricos. Este apartado describe el modelo de iluminación utilizado, realiza una

descripción del sistema de replicadores dinámicos locales y cómo se adapta éste a un sistema de iluminación. El Capítulo 3 explica la metodología utilizada, proponiendo el caso de estudio a trabajar, y describiendo la adaptación propuesta al algoritmo de replicadores dinámicos locales. Se muestran en particular los diferentes ajustes a nivel de restricciones y modificaciones del grafo de conexión del sistema. El Capítulo 4 está dedicado a la fase de pruebas y análisis de resultados, describiendo los diferentes controladores usados para el proceso de comparación. Se definen 4 escenarios de actividad de usuarios en el caso de estudio, los cuales se trabajan en 2 regímenes de requerimientos de iluminación (iluminación homogénea y no homogénea) y a su vez dos condiciones de disponibilidad de energía, generando pruebas que cubren gran parte de las posibles situaciones en entornos reales como aulas de clase. En el Capítulo 5 se presentan las principales conclusiones de la investigación y los trabajos que pueden ser realizados a futuro. Finalmente, se comparte información completa sobre resultados, simulaciones y diagramas a modo de anexos.

2.Referentes Teóricos

En este capítulo se presentan los conceptos base que el lector requiere conocer para la adecuada interpretación del trabajo realizado, de esta manera se presentan algunas definiciones de términos utilizados, el modelo de iluminación a utilizar, y una síntesis de modelo de replicadores dinámicos y su adaptación al sistema la aplicación de sistema de iluminación.

2.1. Modelo de iluminación. Conceptos preliminares

Para tener mayor claridad frente al modelo utilizado, es necesario definir inicialmente algunos conceptos referentes a la medición del efecto luminoso.

Intensidad luminosa: se simboliza normalmente como I_v y se define como la cantidad de flujo luminoso que emite una fuente puntual en una dirección determinada (unidad de ángulo solido). La unidad básica de medida en el sistema internacional es la candela (cd).

Flujo luminoso: se simboliza normalmente con la letra F , siendo una medida de potencia total de luz visible emitida por una fuente radiante, es decir la potencia luminosa percibida por el ojo humano. El flujo luminoso brinda una medida cuantitativa global de la cantidad de luz que la fuente luminosa emite en todo el espacio que la rodea. La unidad derivada de medida en el sistema internacional es el lumen (lm)

$$1 \text{ lumen} = 1 \text{ cd} \cdot \text{sr}$$

donde sr se conoce como estereorradián, la unidad que se utiliza para la medición de ángulos sólidos. Es el equivalente tridimensional del radian.

Iluminancia: normalmente se simboliza con la letra E , también llamada nivel de iluminación, que se define como el flujo de luz que incide en una superficie plana. Físicamente, según el sistema métrico internacional, la unidad derivada de medida asignada a la iluminancia es el Lux (lx).

$$1 \text{ lux} = 1 \text{ lumen/m}^2$$

Organizaciones internacionales como IESNA (Illuminating Engineering Society of North America) y nacionales como el Ministerio de Minas y Energía, mediante documentos como The IESNA lighting handbook [16] o el Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público RETILAP [17], respectivamente, utilizan la iluminancia como el factor a controlar para asegurar niveles de iluminación adecuados en un recinto dependiendo de la finalidad del mismo, de tal forma que se asegure siempre la salud visual de sus ocupantes.

Eficacia luminosa de una fuente: Se simboliza como η_v y representa la relación entre el flujo luminoso total emitido por una fuente luminosa (bombilla, panel led) y la potencia de la misma. La eficacia de una fuente se expresa en lúmenes/vatio (lm/W) [18], [19]. En el pasado se usaba también el término eficiencia luminosa. El cálculo de este parámetro está dado por:

$$\eta_v = \frac{\varphi_v}{P} \quad (1)$$

Donde φ_v es el flujo luminoso de la lámpara en lúmenes y P la potencia eléctrica en vatios que consume la lámpara. El valor máximo de eficacia luminosa de una fuente de luz blanca sin pérdidas de conversión entre la potencia eléctrica y la potencia óptica es de 414 lm/W según [18]. Sin embargo, no hay razones físicas fundamentales por las cuales este valor con el tiempo no pueda superarse al mejorar la tecnología de iluminación.

Cuando la fuente de luz es tipo LED, el efecto de la dimerización en las lámparas, según [20], presenta una relación lineal entre flujo de luz y potencia eléctrica consumida por la lámpara. Por esto, la eficacia luminosa η_v se puede asumir como una constante para este tipo de luminarias, tal como se especifica en las hojas de datos de las lámparas.

Una vez definidas las principales unidades de medición, es necesario plantear un modelo matemático que permita simular el comportamiento de la iluminación en un recinto, esto con el fin de poder evidenciar los efectos del algoritmo de control objeto de estudio. La descripción del modelo de iluminación utilizado se presenta a continuación.

2.2. Modelo matemático de iluminación

Teniendo en cuenta referentes como [13] y [14], en el presente trabajo se utiliza un modelo simplificado de iluminación de una habitación, en la cual cada zona iluminada está compuesta por una lámpara y un sensor de iluminación que se asume ubicado en la mitad de la zona iluminada. Vale aclarar que se utiliza la palabra “asume” ya que, para efectos de implementación, el sensor no se encuentra debajo de la lámpara de forma perpendicular a la altura de la zona de trabajo, si no a un lado de la lámpara. Se puede calibrar la medida de iluminancia del sensor de iluminación mediante la utilización de un factor de acoplamiento que relaciona la

iluminancia percibida a un lado de la lámpara con la que se está midiendo debajo de la lámpara sobre la zona de trabajo. Esto se logra utilizando un fluxómetro para medir la iluminancia en cada punto mencionado y calculando un factor lineal de ajuste.

Para efectos de simulación, el modelo asume que entre las lámparas no existe ningún tipo de muro o división que obstruya el paso de la luz y se propone una disposición de lámparas y sensores homogénea en todo el recinto. El modelo propuesto tiene la siguiente forma:

$$E_i(p) = \sum_{j=1}^N E_{ij} = \sum_{j=1}^N \frac{n_j p_j}{d_{ij}^2} \quad \text{para todo } i = 1, \dots, N, \quad (2)$$

donde i y j representan a los sensores y lámparas, respectivamente, E_{ij} es la iluminación percibida por el i -ésimo sensor por el efecto de la j -ésima lámpara, p_j es la potencia eléctrica aplicada a la j -ésima lámpara, N es el número total de lámparas presentes en el recinto, d_{ij} es la distancia entre el i -ésimo sensor y la j -ésima lámpara, y n_j es un factor de proporcionalidad que depende de las características de la lámpara. Este parámetro posteriormente se incluye dentro de la función de transferencia de cada lámpara, por lo que $E_i(p)$ sería la iluminación total percibida por el i -ésimo sensor, correspondiente a la sumatoria de los aportes individuales de todas las lámparas de acuerdo a su posición.

Este modelo permite definir la interacción de aportes estáticos de ganancias entre lámparas, pero se complementa con las dinámicas de la generación de luz (dependiente de la tecnología de las luminarias) y el sensado de iluminación de la lámpara dada por el sensor en cada zona. Para efectos del proyecto, estas dinámicas se asumen como sistemas lineales de primer orden.

El plantear un sistema de iluminación en el que no hay elementos que obstaculicen el paso de luz entre zonas, hace que el nivel de acoplamiento entre variables sea muy alto, por lo que se convierte en un escenario de experimentación desafiante e interesante.

2.3. Replicadores Dinámicos

Los replicadores dinámicos (RD) describen la forma en que evoluciona el comportamiento de un grupo de individuos dentro de una población vía selección natural a través de su interacción mutua en la búsqueda de un bienestar relativo común; esto convierte a los RD en un mecanismo apropiado para modelar la forma en que una población se distribuye en un entorno, donde los individuos buscan hábitats que satisfagan unas determinadas necesidades en pro de mejorar su bienestar. El nivel de bienestar percibido por la población ubicada en un cierto hábitat se mide mediante una función de aptitud la cual depende de las

características del hábitat y de la distribución de los individuos en el ambiente. La importancia del resultado de este juego evolutivo radica en que al final se logra un equilibrio social en el cual cada individuo ha solventado todas sus necesidades y por ende percibe el mismo nivel de bienestar que los demás, es decir las funciones de aptitud de todos los individuos de la población alcanzan el mismo valor.

El modelamiento de RD según [13] se hace teniendo en cuenta un grafo $\mathcal{G} \triangleq (\mathcal{D}, \mathcal{A})$, donde $\mathcal{D} = \{1, 2, \dots, N\}$ es el conjunto de nodos, agentes o estrategias puras, N es el número total de hábitats, \mathcal{A} denota el conjunto de arcos entre nodos, $x_i(t) \geq 0$ es la cantidad relativa de individuos que están jugando la estrategia i , y $x = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$ es el vector de estados de la población. En este caso $x(t) \in \Delta$ para todo t , tal que,

$$\Delta = \left\{ x \in \mathbb{R}_+^N : \sum_{i \in \mathcal{D}} x_i = X_T \right\} \quad (3)$$

Donde X_T es la población total. Si se asume que el número de jugadores en la población que juegan una cierta estrategia es lo suficientemente grande como para ser considerado una variable continua, la ecuación del replicador estaría dada por [21],

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= x_i \left(f_i(x) - \bar{f}(x) \right) \quad \text{para todo } i \in \mathcal{D} \\ \bar{f}(x) &\triangleq \frac{1}{X_T} \sum_{j=1}^N x_j f_j(x) \end{aligned} \quad (4)$$

$f_i(x)$ representa la función de aptitud percibida en el i -ésimo hábitat, y $\bar{f}(x)$ es la función de aptitud promedio. De acuerdo a esto, los hábitats cuya función de aptitud esté por encima de la función de aptitud promedio tienden a aumentar su población, mientras que aquellos hábitats con funciones de aptitud menores al promedio experimentan una disminución de su población.

Una propiedad importante que tienen los RD, es que el conjunto (3) es invariante de acuerdo a (4), haciendo que la población total sea constante en el tiempo, es decir, si el estado inicial de la población $x(0) \in \Delta$, toda las trayectoria de del sistema se mantienen en Δ para $t \geq 0$. El estado de equilibrio del sistema se alcanza cuando

$$x_i^* \left(f_i(x^*) - \bar{f}(x^*) \right) = 0, \quad (5)$$

es decir, el sistema logra un punto de equilibrio solo cuando la función de aptitud en cada hábitat iguala a la función de aptitud promedio, tal que $x^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_N^*]^T \in \Delta$ es el punto de equilibrio. Ahora, es importante resaltar que esta condición se logra

solo si $x_i^* > 0$ para todo i . El caso $x_i^* = 0$ es un estado en el que también se satisface la ecuación, pero éste es un punto de equilibrio trivial no deseado que no permite la evolución posterior de x_i ya que deja de obedecer a las dinámicas comportamentales de la función de aptitud del hábitat y la función de aptitud promedio del sistema, representando ausencia total de individuos en dicho hábitat.

El concepto de invariancia del conjunto Δ y la forma en que los RD alcanzan su punto de equilibrio, son propiedad que se adaptan bien a la solución de problemas de optimización con restricciones en estructuras de red. La forma en que los RD modelan la distribución de una población en un ambiente maximizando funciones de aptitud en cada hábitat, tiene una gran semejanza a la solución que se podría dar a un problema de distribución óptima de recursos en una red de nodos interconectados con disponibilidad de recursos limitada.

Los problemas de optimización con restricciones en estructuras de red se definen según [22] de la siguiente forma

$$\begin{array}{ll} \text{Minimizar} & G(x) = \sum_{i=1}^N g_i(x) \\ \text{sujeto a} & x \in X_T \end{array} \quad (6)$$

Donde $g_i : \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}$ es una función convexa para todo $i = 1, \dots, N$, N es el número total de estrategia puras o nodos en el sistema, $x \in \mathbb{R}^N$ es el vector de variables de decisión y X_T es un conjunto convexo [23]. Cada $g_i(x)$ está asociado a un nodo dentro de una red interconectada, ambiente en la cual se debe solucionar el problema de optimización; la red está definida por un grafo conectado no dirigido (comunicación bidireccional) $\mathcal{G} \triangleq (\mathcal{D}, \mathcal{A})$, donde $\mathcal{D} \triangleq \{1, \dots, N\}$ es el conjunto de nodos en la red, y $\mathcal{A} \subset \mathcal{D} \times \mathcal{D}$ es el conjunto de arcos entre nodos. La comunicación entre nodos se restringe a una relación de adyacencia tal que el i -ésimo nodo solo puede recibir información de una vecindad $\mathcal{N}_i = \{j: (i, j) \in \mathcal{A}\}$. [23]. La principal dificultad que presentan este tipo de problemas radica en que las restricciones se encuentran acopladas para todos los nodos del sistema, mientras que el grafo de conexiones solo permite que cada nodo tenga información parcial.

El problema de asignación óptima de recursos de forma distribuida es uno de los casos definidos por (6), en el cual $g_i(x)$ es la función de costo del i -simo nodo de la red, $G(x)$ es la función de costo total de la red, y X_T la cantidad total de recursos disponibles en el sistema. En problemas de este tipo, los RD permiten la minimización de función objetivo $G(x)$, siempre y cuando la función de aptitud $f_i(x)$ asociada a cada nodo de la red se escoja tal que sea un caso especial de gradiente denominado gradiente de Shahshahani [24]. De esta manera se asegura que la minimización de $G(x)$ se da en el punto de equilibrio que satisfaga la condición (5) respetando todo el tiempo la restricción $x \in \Delta$.

Hasta ahora, la implementación de un sistema de RD como el descrito hasta el momento, requiere conocer la información de todos los nodos (agentes) del sistema para poder realizar el cálculo de la función de aptitud promedio $\bar{f}(x)$, esto implica tener una estructura de red totalmente interconectada o al menos una topología de conexión entre nodos tipo estrella en donde exista un nodo central; esto hace que el proceso de optimización sea ineficiente en la medida que aumenta el número de nodos en el sistema, y a la vez hace que el sistema sea muy sensible a problemas de comunicación entre nodos o a cambios de topología.

La forma de solventar esto es la adaptación del sistema de RD de un modelo centralizado a uno distribuido, pero esto trae consigo principalmente dos dificultades que se deben solucionar; la primera está relacionada con el hecho de que la restricción $x \in \Delta$ no es apropiada para algunos casos, ya que se puede llegar a una solución óptima solo utilizando parte de los recursos disponibles X_T . De esta manera, una definición más apropiada de tal restricción sería

$$\sum_{i \in \mathcal{D}} x_i \leq X_T \quad (7)$$

La definición tradicional de los RD con base en la propiedad de invarianza, requiere que la totalidad de los recursos disponibles se distribuya entre todos los agentes del sistema, por lo que el uso de una cantidad de recursos menor a la total como la descrita en (7) no sería posible, a menos que se cree una variable de holgura, es así como se crea el concepto de **agente ficticio**.

El agente ficticio $x_{N+1} \geq 0$, se define como un nodo imaginario del sistema, de forma tal que ahora se tendría un nuevo vector de estados de población ampliado $x_a = [x_1, x_2, \dots, x_N, x_{N+1}]^T$ con un nuevo simplex invariante dado por

$$\Delta_a = \left\{ x_a \in \mathbb{R}_+^{N+1} : \sum_{i=1}^{N+1} x_i = X_T \right\}. \quad (8)$$

La inclusión de esta nueva variable permite solucionar el problema de optimización respetando (7), de tal forma que los recursos no utilizados se asignan al agente ficticio. Para que el agente ficticio cumpla con la función de atraer los recursos que sobran en el sistema, se necesita que todo el tiempo sea percibido como un nodo cuya función de aptitud es siempre favorable, de esta manera la función de aptitud del agente ficticio se define como $f_{N+1}(x) = B$, donde B es una constante positiva que entre mayor magnitud tenga, sería mas atractiva en el sistema.

La segunda dificultad está relacionada con la topología de conexión en estrella requerida para que el modelo tradicional de RD pueda funcionar, y todos los problemas que este tipo de red presentan a nivel de robustez y sensibilidad a problemas de comunicación cuando el número de nodos es grande. Para solucionar esto se puede adaptar el modelo de RD tal que solo dependa de información local

en una vecindad definida por el grafo de conexión utilizado; a esta estructura se la denomina **Ecuación de Replicador Local (ERL)** [13], la cual trabaja con un grafo aumentado que incluye también al agente ficticio definido como $\mathcal{G}_a \triangleq (\mathcal{D}_a, \mathcal{A}_a)$ donde el nuevo conjunto de nodos es $\mathcal{D}_a \triangleq \{1, \dots, N, N+1\}$, y \mathcal{A}_a es la unión entre \mathcal{A} y el canal de conexión con el agente ficticio, asegurando un grafo conectado.

La adaptación de (4) solo a información local se logra realizando las sumatorias solamente sobre el vecindario de cada agente, obteniendo la siguiente expresión,

$$\dot{x}_i = \frac{x_i}{X_T} \left(\sum_{j \in \mathcal{N}_i} f_i(x_a) x_j - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} f_j(x_a) x_j \right), \quad (9)$$

para todo $i \in \mathcal{D}_a$, donde el punto de equilibrio $x_a^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_N^*, x_{N+1}^*]^T \in \Delta_a$ se logra cuando $f_i(x_a^*) = f_j(x_a^*)$. Se debe hacer énfasis en que \mathcal{N}_i es la vecindad de i , representando los nodos que están conectados al i -ésimo nodo, identificando a los individuos vecinos a agente i con el subíndice j . Entonces, ahora la función de aptitud promedio se calcula solo con la información de los nodos que pertenecen a \mathcal{N}_i , donde esta a su vez, depende de la topología de conexión utilizada en el sistema.

De esta manera se podría entonces representar la Ecuación de Replicador Local (ELR) (9) de forma condensada de la siguiente manera [23],

$$\dot{x}_i = \frac{x_i}{X_T} (g_j - \bar{g}_j) \quad (10)$$

Donde,

$$g_j = f_i(x_a) \sum_{j \in \mathcal{N}_i} x_j$$

$$\bar{g}_j = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} f_j(x_a) x_j$$

2.4. Adaptación de la Ecuación de Replicador Local (ERL) a sistemas de iluminación

Inicialmente se adapta el modelo de RD centralizado al sistema de iluminación, para ello se asume una red de nodos interconectados definida por un grafo $\mathcal{G} \triangleq (\mathcal{D}, \mathcal{A})$, donde $\mathcal{D} \triangleq \{1, \dots, N\}$ es el conjunto de nodos reales o agentes reales del sistema, y \mathcal{A} el conjunto de arcos entre nodos; cada nodo real en el sistema de iluminación está compuesto por una lámpara led que ilumina el área debajo del nodo, un sensor de iluminancia, un sistema embebido de procesamiento y un sistema de comunicación que permite la conexión con otros nodos, $p_i \geq 0$ es la potencia asignada a cada nodo del sistema, $p = [p_1, \dots, p_N]^T$ es el vector de estados de potencia, y P_{Tot} es la potencia máxima disponible en el sistema. Para este caso $p(t) \in \Delta$ para todo t , tal que,

$$\Delta = \left\{ p \in \mathbb{R}_+^N : \sum_{i \in \mathcal{D}} p_i = P_{Tot} \right\}$$

Como el problema a trabajar es un caso de asignación óptima de recursos, es necesario contar entonces con un agente ficticio, el cual funcionaría como un repositorio de energía que no esté siendo utilizada por los agentes reales en el proceso. Cabe aclarar que este agente no es un nodo real que transforma la potencia asignada a él en luz a través de una lámpara, siendo entonces solo una variable que guarda el valor de la potencia asignada a él dentro de uno de los sistemas embebido del agente real al que esté conectado. Por lo tanto, el conjunto \mathcal{D} , que contiene solo agentes reales, se debe unir al agente ficticio generando un nuevo conjunto de nodos denominado $\mathcal{D}_a \triangleq \{1, \dots, N + 1\}$. Así mismo, el vector de estados p también se ampliaría a un vector $p_a = [p_1, \dots, p_{N+1}]^T$ que incluya la potencia asignada al agente ficticio., y por ende el nuevo simplex estaría dado por,

$$\Delta_a = \left\{ p_a \in \mathbb{R}_+^{N+1} : \sum_{i \in \mathcal{D}_a} p_i = P_{Tot} \right\}$$

Esto permite que se respete todo el tiempo la restricción

$$\sum_{i \in \mathcal{D}_a} p_i \leq P_{Tot}$$

Por otra parte, el problema de optimización a resolver en este trabajo, se plantea como la minimización del error cuadrático total de seguimiento de referencia de iluminación en el sistema descrito como,

$$\begin{aligned} \text{Minimizar} \quad & F(p_a) = \sum_{i \in \mathcal{D}_a} (S_i - E_i)^2 \\ \text{Sujeto a} \quad & p_a \in P_{Tot} \end{aligned}$$

Donde S_i es la referencia de iluminancia deseada en la zona i , mientras que E_i es la iluminancia sensada en la misma zona. Para asegurar que el problema de optimización tiene una solución al usar RD, se debe elegir las funciones de aptitud para cada uno de los nodos del sistema, tal que sean un caso de gradiente de Shahshani; de esta manera y según [13] las funciones de aptitud que permiten resolver el problema propuesto son,

$$f_i(p) = S_i - E_i + B$$

$$f_{N+1}(p) = B$$

El termino B es una constante positiva lo suficientemente grande para asegurar que el conjunto $f_i(p)$ sea mayor que cero todo el tiempo, este es un requerimiento del gradiente de Shahshani para asegurar convergencia.

Por ende, el sistema de RD centralizado estaría dado por,

$$\begin{aligned} \text{Replicador:} \quad & \dot{p}_{i=p_i} (f_i(p) - \bar{f}(p)) \\ \text{Función de aptitud:} \quad & f_i(p) = S_i - E_i + B \\ \text{Función de aptitud promedio:} \quad & \bar{f}(p) = \frac{1}{P_{Tot}} \sum_{j \in \mathcal{D}_a} f_j(p) p_j, \end{aligned}$$

En donde, $f_i(p)$ es la función de aptitud percibida en el i -ésimo nodo, y $\bar{f}(p)$ la fusión de aptitud promedio del sistema.

Ahora, cuando la información disponible solo puede ser conseguida a nivel local, cada nodo puede comunicarse solo con los nodos de su vecindad \mathcal{N}_i . Dicho esto, el la Ecuación de Replicador Local (ELR) aplicado al problema de iluminación se define como

$$\dot{p}_{i=p_i} = \frac{\beta p_i}{P_{Tot}} \left(f_i(p_a) \sum_{j \in \mathcal{N}_i} p_j - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} f_j(p_a) p_j \right), \quad (11)$$

donde $f_i(p_a)$ es la función de aptitud percibida del i -ésimo nodo, $f_j(p_a)$ son las funciones de aptitud percibidas en los nodos pertenecientes a la vecindad \mathcal{N}_i del i -ésimo nodo. De manera similar p_j son las potencias entregadas a las lámparas de

la vecindad \mathcal{N}_i , y p_i la potencia entregada a la lámpara del i -ésimo no. El factor $\beta > 0$ es un parámetro que permite sintonizar la velocidad de respuesta en el modelo según lo expuesto en [14].

Finalmente, la expresión condensada que representará la Ecuación de Replicador Local aplicada a un sistema de iluminación sería la siguiente,

$$\dot{p}_i = \frac{\beta p_i}{P_{Tot}} (g_j - \bar{g}_j) \quad (12)$$

Donde,

$$\bar{g}_j = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} f_j(p_a) p_j$$

$$g_j = f_i(p_a) \sum_{j \in \mathcal{N}_i} p_j$$

Con los conceptos anteriormente descritos, se espera brindar al lector una visión general de las bases teóricas que permitirán contextualizar la propuesta de adaptación del modelo de Replicador Dinámico Local objeto de estudio, la cual se desarrollará en el siguiente capítulo.

3. Metodología

Los trabajos realizados hasta el momento en torno al uso de RD en el problema de gestión del recurso energía en sistemas de iluminación [14][23], han demostrado que el modelo tanto centralizado como distribuido es capaz de solventar el problema de control de seguimiento de referencia de iluminación, optimizando el uso de energía en un sistema con una estructura de comunicación en red. Sin embargo, en una aplicación real, se podría obtener un ahorro adicional de energía en el sistema si éste pudiera decidir qué zonas activar dependiendo de la distribución espacial de usuarios en las zonas iluminadas. La inclusión de esta habilidad al sistema de RD es el propósito del presente trabajo.

En este capítulo se presenta el proceso mediante el cual se logra la incorporación de un parámetro de presencia de individuos que permite la desactivación de zonas de iluminación en relación a la necesidad del recurso luz; por otra parte, el desactivar zonas de iluminación presenta un reto adicional relacionado con el riesgo de que los nodos del sistema de RD caigan en el estado de equilibrio trivial de cero (0), lo que trae consigo problemas de desconexión del grafo; la forma en que se soluciona este problema también se describe en el presente capítulo.

3.1. Descripción del caso de estudio

El caso de estudio planteado es un aula de clase cuyas dimensiones son 4 m de ancho, 6 m de largo y 2.3 m de alto, recinto en el cual se encuentran ocho lámparas dimerizables dispuestas de manera homogénea como se indica en la Figura 4.

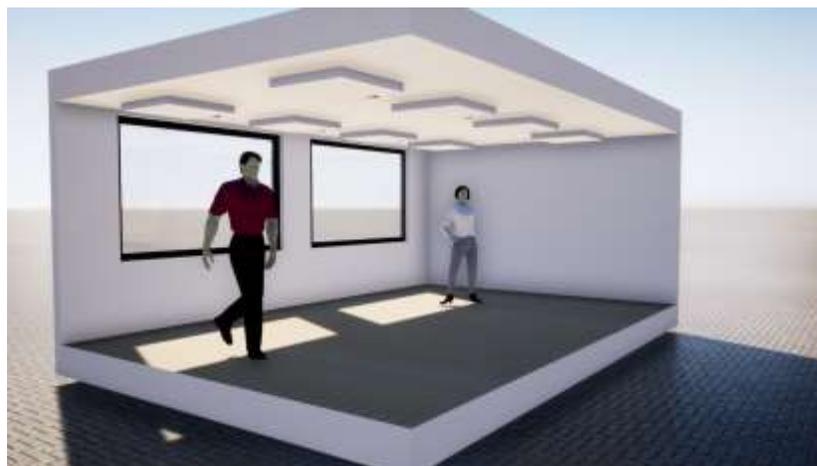
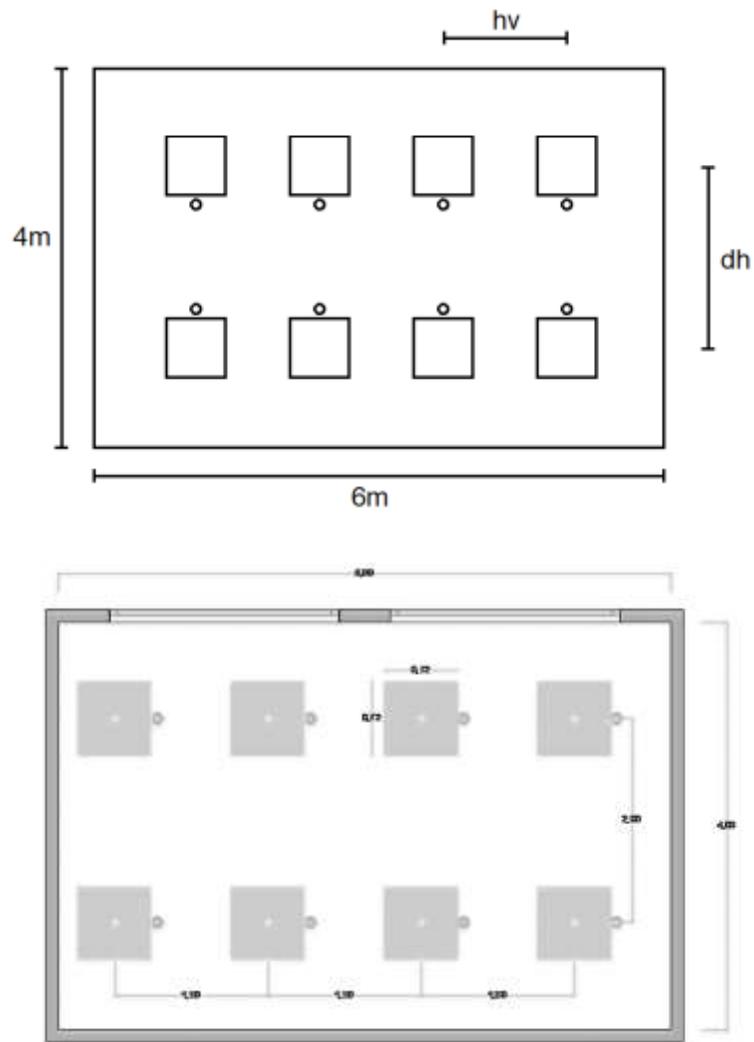


Figura 4. Diagrama distribución espacial aula de clase caso de estudio

En una implementación real, cada lámpara dimerizable estaría acompañada de un sensor de iluminancia, un sensor de movimiento infrarrojo pasivo (PIR), y un sistema microcontrolado encargado de interpretar la información de los sensores, actuar sobre el dimmer de la lámpara de acuerdo a la potencia asignada a la misma, generar la red de comunicación con la lámpara vecinas, y ejecutar el algoritmo de control. El sensor se ubicaría a un lado de la lámpara y se calibraría de tal forma que la información sensada se aproxime a la iluminación percibida en la zona de trabajo.

En la Figura 4, dh y dv son las distancias entre los centros de las lámparas, tanto de forma lateral como frontal, do es la distancia entre el centro de la lámpara i y el punto de medida de iluminación perpendicular a la lámpara sobre la zona de trabajo. El dimensionamiento de las lámparas se basa en el diseño de iluminación interior sugerido por RETILAP [17] aplicado a salones de clase. Para este caso en específico, por tratarse de un aula de clases, los niveles de iluminación que exige la norma son

Mínimo	Medio	Máximo
300 lux	500 lux	750 lux

Con base en esto, se hace el diseño de iluminación interior del aula siguiendo los lineamientos descritos en el Capítulo 4 de RETILAP [17], dando como resultado un sistema de ocho lámparas tipo LED con un flujo lumínico de 2995.2 lum, trabajando con el nivel máximo de iluminación exigido. Se aproxima dicho resultado al panel led comercial más cercano, que para efectos de la investigación se escoge una luminaria LED de la marca ASD Lighting, referencia ASD-DLP22D2250HE con las siguientes características

Potencia	Lúmenes	Dimensiones	Eficacia luminosa
22 W	2650	72 cm x 72 cm x 2.5 cm	110 lm/W

De acuerdo a esto, los valores para dh , dv y do son:

$$\begin{aligned} dv &= 1.5\text{m} \\ dh &= 2\text{m} \\ do &= 1.45\text{m} \end{aligned}$$

El comportamiento dinámico de lámparas y sensores se modelan con sistemas lineales de primer orden.

3.1.1. Función de transferencia Lámpara

Se describe como la relación entre la potencia eléctrica entregada a la lámpara y el flujo luminoso generado por la misma. El comportamiento dinámico de la lámpara se asume con una función de transferencia

$$F_L(s) = \frac{Lum(s)}{p_{in}(s)} = \frac{K_L}{\tau_L s + 1}, \quad (13)$$

donde K_L es la relación entre la potencia de entrada de la lámpara y el flujo lumínico producido por la misma en estado estacionario. Esta relación, por definición, es la eficacia luminosa (η_v) de la lámpara tal como se describe en (1). Para el caso en particular de la lámpara LED del caso de estudio, y de acuerdo con su hoja de datos, dicho parámetro tiene un valor de

$$K_L = \eta_v = 110 \frac{\text{lm}}{\text{W}}.$$

Con respecto a τ_L se asume un tiempo de estabilización de la lámpara de 80 ms, valor típico para este tipo de luminarias. De este modo la función de transferencia que define el comportamiento de la lámpara es

$$F_L(s) = \frac{Lum(s)}{p_i(s)} = \frac{110}{0.02s + 1} = \frac{5500}{s + 50}.$$

3.1.2. Función de transferencia Sensor

El comportamiento del sensor se describe de igual forma como un sistema de primer orden que relaciona el flujo lumínico aplicado a un área de trabajo con la iluminancia percibida por el sensor.

$$F_S(s) = \frac{Lux(s)}{Lum(s)} = \frac{K_S}{\tau_S s + 1} \quad (14)$$

Para determinar los parámetros de esta función de transferencia es necesario tener en cuenta el modelo de iluminación especificado en (2), esto con el fin de incluir en la ganancia el efecto de la distancia a la cual el sensor está realizando la medida de iluminación sobre la zona de trabajo. Para esto se analiza el caso particular de aporte en iluminación que tiene la lámpara i con respecto a su propio sensor, es decir

$$E_i(p) = \frac{n_i p_i}{d_{ii}^2} = \frac{n_i p_i}{d_o^2}. \quad (15)$$

El factor n_i , al momento de hacer la descripción del modelo de iluminación, se había definido como una ganancia propia de la dinámica de la lámpara. En este contexto, se puede interpretar dicha ganancia como K_S en la función de transferencia del sensor, siendo definido de la siguiente manera a partir de (15) y (1)

$$K_S = \frac{E_{p_{max}} d_o^2}{P_{max} \eta_v} \quad (16)$$

P_{max} es la potencia máxima de la lámpara y $E_{p_{max}}$ su iluminación máxima; teniendo en cuenta que el dimensionamiento de cada lámpara se hizo con el valor máximo de iluminación exigido por la norma, se podría calcular la iluminancia máxima producida por cada lámpara de la siguiente manera [17]

$$E_{p_{max}} = \frac{\Phi_{L_{max}} CU F_M}{A/n}$$

Donde

$E_{p_{max}}$	= Iluminancia promedio máxima de una lámpara
$\Phi_{L_{max}}$	= Flujo luminoso máximo requerido por lámpara
F_M	= Factor de mantenimiento
A	= Área total del recinto a iluminar en m^2
n	= Número de lámparas utilizadas
CU	= Coeficiente de utilización

Los valores de U , F_M , y CU los define en diseño de iluminación según RETILAP.

De esta manera el valor de K_S sería

$$K_S = \frac{663.56 \text{ lux } (1.45\text{m})^2}{22\text{W } 110 \text{ lm/W}} = 0.5765 \frac{\text{lux m}^2}{\text{lm W}}$$

Con respecto a τ_s , se asume un tiempo de estabilización típico de un sensor de 20ms, obteniendo la función de transferencia que define el comportamiento de sensor

$$F_S(s) = \frac{\text{Lux}(s)}{\text{Lum}(s)} = \frac{0.5765}{0.05s + 1} = \frac{11.53}{s + 20}$$

3.1.3. Topologías de conexión:

El algoritmo de replicadores dinámicos distribuidos basa su actividad en la interacción entre nodos interconectados bajo un grafo de conexión. Para el presente caso de estudio, cada par lámpara-sensor representa un nodo real en el sistema de replicadores (agente real); y se analizará el comportamiento del sistema en una topología de anillo bidireccional como se muestra en la Figura 5.

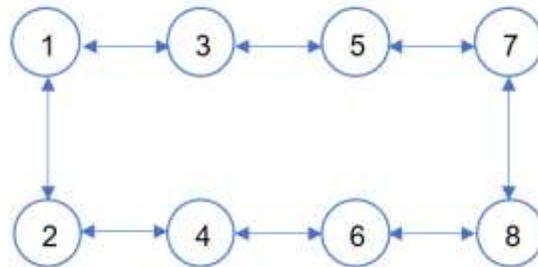


Figura 5 Conexión en anillo

Se escoge esta topología porque es la distribución en la cual se reduce al mínimo la distancia de comunicación entre agentes, asegurando un grafo de conexión cerrado [25]. Cabe aclarar que esta topología está referida solo a la conexión entre agentes reales; más adelante se presentará la propuesta de conexión con agentes ficticios utilizada.

A continuación, se describirá la propuesta de solución planteada como aporte del trabajo realizado, la cual contempla la detección de presencia de individuos en una zona de iluminación como un factor que busca mejorar el uso de potencia en un sistema de iluminación basado en replicadores dinámicos.

3.2. Control local basado en Replicadores Dinámicos sensibles a presencia de individuos

El ahorro energético en hogares u oficinas por uso de luminarias aumenta cuando los sistemas de control de iluminación (SCL) incluyen en su operación sensores o sistemas que permiten determinar la necesidad de uso de este recurso. Trabajos como los descritos en [26] demuestran que el incluir la detección de presencia en un SCL, permite reducir el consumo de energía entre un 15% y 55%.

Los trabajos preliminares de SCL que utilizan algoritmos de optimización basados en replicadores dinámicos [13], [14] evalúan el desempeño en un caso de estudio similar al utilizado en este trabajo, pero se enfocan únicamente en el seguimiento de referencias de iluminación dentro de una habitación. Sin embargo, se debe tener en cuenta que para efectos de implementación no basta solo con asegurar condiciones de iluminación adecuadas, sino que la necesidad de iluminación de una zona también depende de si hay o no individuos en el área. Al tener en cuenta este

factor, se podría reducir el consumo de energía al disminuir la potencia de lámparas en zonas que no estén siendo utilizadas dentro de un espacio más grande e incluso apagarlas. Cabe destacar que esta condición se debe cumplir siempre asegurando un nivel de iluminación definido por una referencia en aquellas zonas donde sí haya presencia de usuarios.

En un sistema de replicadores dinámicos, el algoritmo busca en todo momento equilibrar las funciones de aptitud de todos sus agentes de tal manera que sean iguales en un estado estable. Para que esto sea posible, el grafo de conexión entre agentes siempre debe ser conectado; es decir, que de alguna manera siempre se pueda definir una trayectoria continua entre un agente y cualquier otro agente en el sistema [25]. Cuando un grafo no asegura esta condición, el sistema se divide y genera islas, situación en la cual el algoritmo trata de cumplir con su objetivo de optimización, pero cada isla posee una fracción de la población total haciendo que el objetivo de optimización no cumpla con su cometido de forma adecuada.

Para un sistema de asignación de recursos, un nodo se considera truncado o eliminado si no hay recursos en ese nodo. Entonces, para el caso de iluminación, la ruptura del grafo en una estructura de conexión tipo anillo es muy probable, dado que es una condición que se presenta cuando al menos dos lámparas no consecutivas se apagan por la no presencia de individuos debajo de ellas. Esto presenta un primer reto de diseño, ya que siempre se debe asegurar un cumplimiento de la referencia de iluminación en aquellas zonas que si poseen individuos.

Por otra parte, cuando en un sistema de replicadores dinámicos un agente o zona presenta una función de aptitud no atractiva, puede ésta quedarse sin individuos que jueguen la estrategia de esa zona y alcanzar un estado estable de población cero. Este estado no es deseable ya que es un punto de equilibrio trivial del agente según (4), y a partir del cual dicha zona ya no cambia.

Teniendo en cuenta lo anterior, no se podría permitir entonces que una lámpara se apague totalmente ya que entraría en el estado no deseado. Evitar esta situación representa el segundo reto de diseño a tener en cuenta en el desarrollo de la investigación. De esta manera a continuación se presenta el trabajo de adaptación realizado sobre el algoritmo de replicadores dinámicos que solventa los problemas ya descritos, permitiendo la inclusión de un parámetro de presencia de individuos en la aplicación particular de control de iluminación.

3.2.1. Inclusión de parámetro presencia de individuos en la Ecuación de Replicador Local

La inclusión de un factor booleano que defina si bajo una lámpara existe o no individuos es similar al efecto que puede llegar a tener un generador eólico o solar en una microrred cuando las condiciones ambientales no son económicamente atractivas. En esos instantes, se llega incluso a que el generador deje de aportar al sistema para evitar sobrecostos de generación. Con base en esto, y teniendo como referencia el trabajo realizado en [27] y [23] se propone una función de aptitud en el sistema LRE con la siguiente forma

$$f_i(p) = S_i - E_i + B - (1 - \gamma_i) S_i, \quad (17)$$

tal que γ_i es una variable booleana que representa la presencia o ausencia de individuos bajo la i -ésima lámpara. Este dato provendría de un sensor de presencia tipo PIR (Passive Infrared), o de cualquier otro tipo identificando la presencia con un valor de "1" y la ausencia de individuos con un "0". El término $(1 - \gamma_i) S_i$ funciona como un penalizador de la función de aptitud que reduce su valor cuando no se detectan individuos bajo una lámpara. Esto, dentro de la dinámica poblacional, hace que dicha zona sea menos atractiva y por ende la potencia tiende a reubicarse en aquellas zonas donde la función de aptitud sea más alta. El valor de la penalización simula un cambio de referencia a cero, lo que hace que el sistema trate de buscar la nueva referencia disminuyendo la potencia en la lámpara que experimenta la pérdida de presencia.

Al probar esta nueva función de aptitud, se puede evidenciar que el sistema reduce la potencia de la lámpara que experimenta la pérdida de presencia al punto de apagarla, condición que como ya se explicó, no es un estado deseable. A modo de ejemplo, en la

Figura 6 se presenta la respuesta del sistema ante una pérdida de presencia de 10 segundo en las zonas 2 y 4.

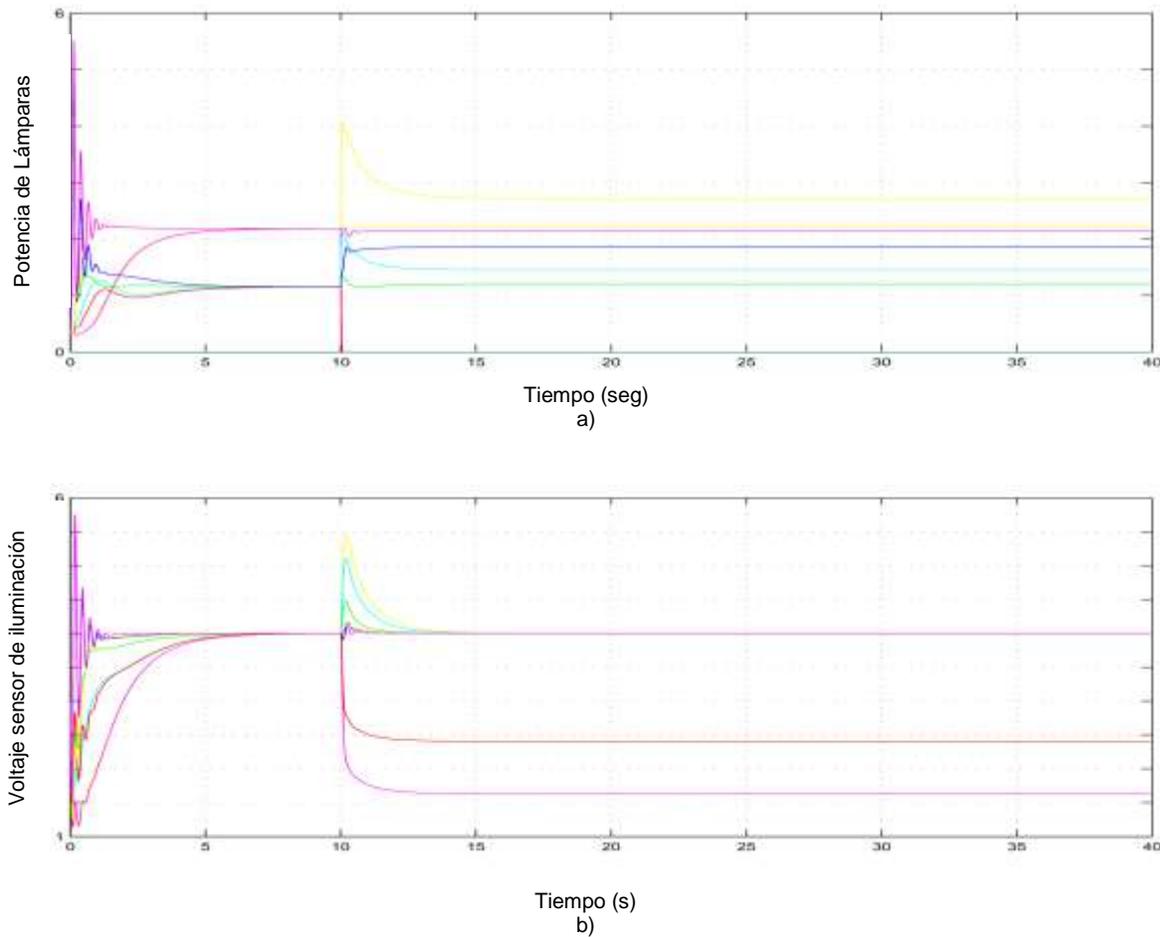


Figura 6. a) Comportamiento de potencia en lámparas ante evento pérdida de presencia zonas 2 y 4, b) Comportamiento iluminación de lámparas ante pérdida de presencia zonas 2 y 4

Como se puede observar, ante un evento de pérdida de presencia en dos zonas (2 y 4) al segundo 10, el sistema responde disminuyendo la potencia en las lámparas de dichas zonas hasta llevarlas a cero, y por ende la disminuye la iluminación y por ende el voltaje sentido en dichas zonas, sin embargo, cuando se vuelve a detectar presencia en el segundo 30, las lámparas se mantienen apagadas.

Cuando el agente entra en este estado de equilibrio natural del sistema de potencia cero, anula la dinámica del replicador que depende las interacciones entre la función de aptitud del agente y la función aptitud promedio del sistema, esto hace que la lámpara se mantenga apagada aun cuando la zona iluminada detecte presencia de individuos nuevamente. De esta forma a continuación, se describe la solución planteada a este problema en la cual se propone una restricción de potencia mínima en las lámparas que asegura que ningún agente se apaga en su totalidad.

3.2.2. Restricción de potencia mínima en agentes reales

Tomando como base el trabajo realizado en [27], se utiliza una función de aptitud definida a trozos para incluir restricciones de barrera en un sistema de replicadores dinámicos. En este caso, se propone la siguiente función de aptitud adaptada al caso de estudio

$$f_i(p) = \begin{cases} S_i - E_i + B & p_i < p_{i_min} \\ S_i - E_i + B - (1 - \gamma_i) S_i & p_i > p_{i_min} \end{cases} \quad (18)$$

El valor p_{i_min} , para efectos de implementación, se escoge lo suficientemente pequeño, de tal forma que la lámpara físicamente se apague, pero que numéricamente la potencia entregada a la lámpara no sea cero.

De esta manera, cuando la potencia entregada a la lámpara está por encima de la potencia mínima, la penalización de la referencia en caso de ausencia de individuos bajo la lámpara ($\gamma_i = 0$) hace que ésta simule un cambio a cero. Cuando esto ocurre, la función de aptitud decrece con una pendiente alta haciendo de la zona un lugar no atractivo y por ende la lámpara pierde potencia. En este instante, cuando la potencia llega al límite de p_{i_min} , la función de aptitud retira la penalización a la referencia haciendo que la función de aptitud más atractiva y por ende la potencia de la lámpara aumenta nuevamente. Esta adaptación hace que los agentes no entren en la condición de equilibrio trivial de cero, permitiendo que la lámpara al momento de detectar nuevamente presencia de individuos debajo de ella pueda reaccionar buscando nuevamente la referencia especificada.

Ahora, el definir una función de aptitud de esta manera genera un nuevo problema de implementación debido a las oscilaciones producidas alrededor de p_{i_min} , ligadas al tiempo de muestreo del sistema. Para dar solución a esto se propone implementar una restricción de barrera con histéresis como se describe a continuación.

3.2.3. Histéresis en restricción de potencia mínima

La función de aptitud a trozos propuesta en (18) es una función discontinua que presenta un salto brusco entre dos funciones alrededor del valor de restricción de potencia p_{i_min} , situación que no se presentaría si se definiera una función de aptitud que fuese continua en todo el rango de potencia. Sin embargo, la definición de una función de este tipo no es posible debido la naturaleza descentralizada del sistema de replicadores locales, en donde solo se tiene información parcial proveniente de una vecindad de agentes. Para explicar de mejor manera la razón por la cual no es posible definir una función de aptitud continua, se presenta el siguiente análisis.

Teniendo en cuenta que, según el modelo de iluminación utilizado, la estimación de la iluminación en una zona i es

$$E_i(p) = \sum_{j=1}^N \frac{n_j p_j}{d_{ij}^2}.$$

Expresando $E_i(p)$ como un aporte de la lámpara i sumado al aporte de las demás lámparas en el recinto, se tiene

$$E_i(p) = \frac{n_i p_i}{d_o^2} + \left(\sum_{j=1}^N \frac{n_j p_j}{d_{ij}^2} - \frac{n_i p_i}{d_o^2} \right) = E_{lamp\ i} + E_{N-i}.$$

De esta manera la función de aptitud se podría expresar de la forma

$$f_i(p) = \begin{cases} -E_{lamp\ i} - E_{N-i} + S_i + B & p_i < p_{i_min} \\ -E_{lamp\ i} - E_{N-i} + S_i + B - (1 - \gamma_i) S_i & p_i > p_{i_min} \end{cases}$$

En función de la potencia se tiene entonces:

$$f_i(p) = \begin{cases} -\frac{n_i p_i}{d_o^2} - E_{N-i} + S_i + B & p_i < p_{i_min} \\ -\frac{n_i p_i}{d_o^2} - E_{N-i} + S_i + B - (1 - \gamma_i) S_i & p_i > p_{i_min} \end{cases}$$

Como se puede ver, es necesario conocer el valor de E_{N-i} para definir el valor de la función de aptitud en el punto de discontinuidad p_{i_min} . Si esto fuese posible, se podría proponer una función que asegure continuidad luego de este punto de manera precisa, sin embargo, en el sistema de replicadores locales propuesto, la información de iluminación disponible solo se limita a una vecindad de lámparas que tienen comunicación con la lámpara i . Esta condición genera una inexactitud en el cálculo de función de aptitud en el punto de discontinuidad debido a que el valor de iluminación sentido en la lámpara nunca será igual al calculado localmente mediante el modelo de iluminación utilizado. Así, persiste un salto entre dos funciones de aptitud alrededor de la restricción de potencia p_{i_min} , que depende del tiempo de muestreo.

Por esta razón se decide mantener la función de aptitud propuesta en (18), y reducir los cambios bruscos de función de aptitud incluyendo una histéresis. Para ello se define una restricción de ventana de potencia mínima entre $p_{i_min\ 1}$ y $p_{i_min\ 2}$ de la siguiente forma

$$f_i(p) = \begin{cases} S_i - E_i + B & p_i < p_{i_min_1} \\ S_i - E_i + B - (1 - \gamma_i) S_i & p_i > p_{i_min_2} \end{cases} \quad p_{i_min_2} > p_{i_min_1}$$

Con este ajuste, la frecuencia de cambio entre funciones de aptitud al llegar a la banda de restricción de potencia mínima disminuye, y se puede controlar ajustando el ancho de la banda de restricción.

Como se puede observar, una solución local basada en replicadores dinámicos aplicada al presente caso de estudio presenta dificultades muy particulares cuando se piensa en su implementación, todo debido a la limitada información disponible. En una implementación real el nivel de interconexión entre agentes se traduce en un sistema de comunicación que soporte las diferentes conexiones. Para efectos del presente caso de estudio, se busca una estructura de conexión tal que asegure un grafo de conexión cerrado que permita al sistema de replicadores trabajar con el mínimo de conexiones entre agentes. A continuación, se describe la estructura de conexión que mejor se ajusta a lo anteriormente expuesto.

3.2.4. Estructura de conexión entre agentes dirigida a una solución local implementable

Como se explica en el Capítulo 2, un sistema de optimización distribuido basado en replicadores dinámicos utiliza la figura de agente ficticio dentro del grafo de conexiones como una variable de holgura que permite alcanzar una solución óptima al problema de asignación de recursos, sin que éstos se concentren solamente en agentes reales. En el caso de estudio del presente trabajo, el uso de agentes ficticios permite gestionar de mejor manera la potencia total disponible para iluminación en una habitación logrando una solución óptima al problema de iluminación mediante la asignación de potencia a las lámparas (agentes reales) que respeta la restricción

$$\sum_{i=1}^N p_i \leq P_{Tot},$$

donde N es la cantidad de lámparas reales en el sistema. Para compensar, se incluye un conjunto de M agentes ficticios tal que $\mathcal{D}_a \triangleq \{1, \dots, N, N + 1, \dots, N + M\}$ es el conjunto ampliado de nodos en el sistema. Esta inclusión permite cumplir con el simplex

$$\Delta_{P_a} = \left\{ p_a \in \mathbb{R}_+^{N+M} : \sum_{i \in \mathcal{D}_a} p_i = P_{Tot} \right\}.$$

Ahora, toda la potencia que no se utiliza por parte de las lámparas es asignada a los agentes ficticios, permitiendo cumplir con la propiedad de invarianza que

caracteriza a los replicadores dinámicos. El caso de estudio del presente proyecto utiliza una topología de conexión entre lámparas en anillo, siendo ésta la que menor cantidad de arcos entre nodos requiere para generar un grafo cerrado, en donde cada lámpara tiene comunicación bidireccional con dos lámparas adyacentes. En esta propuesta de conexión se probó inicialmente el uso de un solo agente ficticio, como se indica en la Figura 7.

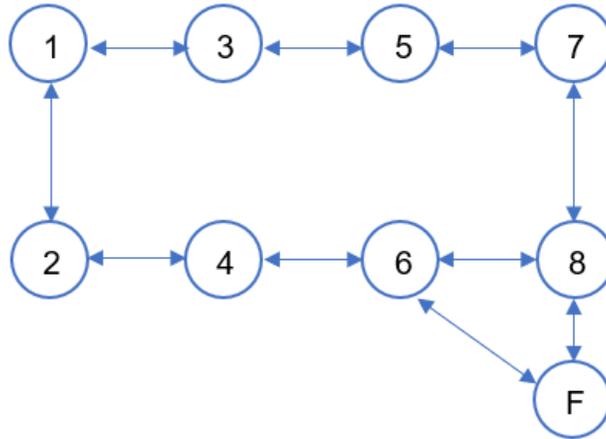
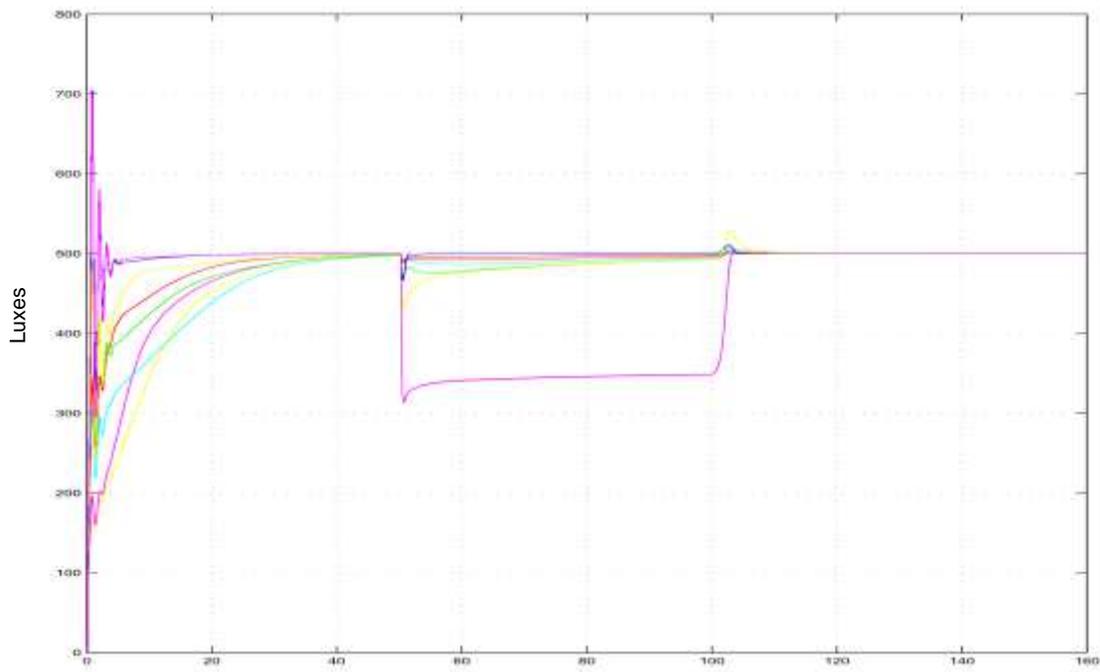
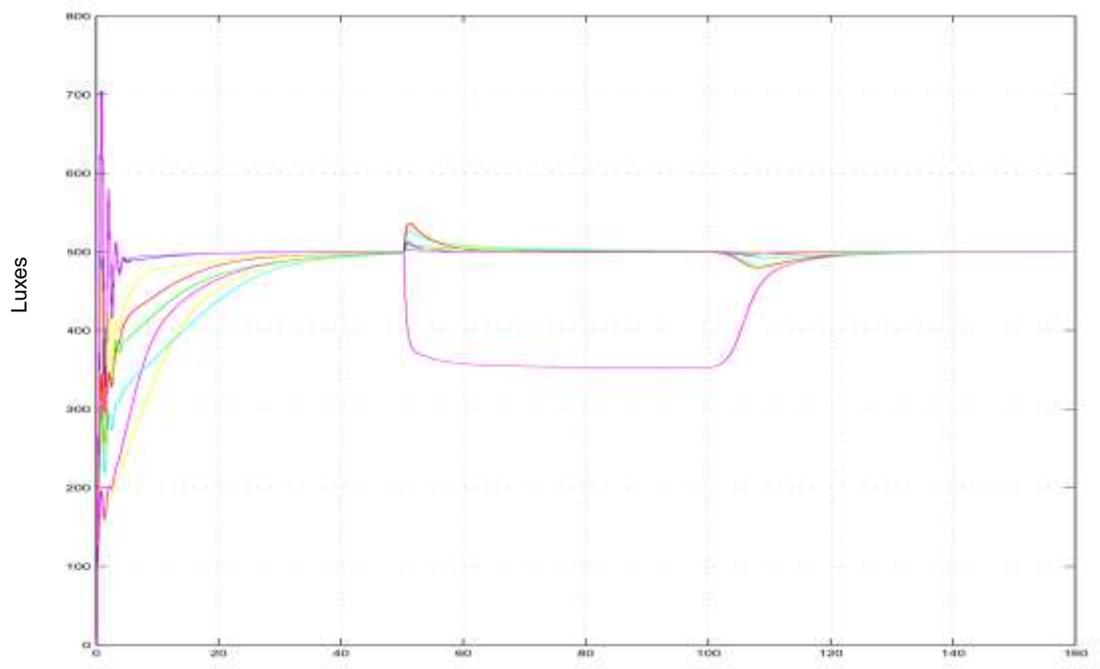


Figura 7 Grafo de conexión agente ficticio único

Sin embargo, la respuesta del sistema se torna lenta al presentar transitorios de hasta 30 segundos, sobre todo cuando una lámpara que experimenta cambios está muy lejos del agente ficticio. Con el fin de ilustrar este comportamiento, a continuación, se presenta la respuesta de iluminación del sistema con un solo agente ficticio conectado como en la Figura 7; el ejemplo simula una pérdida de presencia de 50 segundos en la zona 8, y posteriormente en la zona 2, esto con el fin de evidenciar el efecto que tiene la detección del evento en una zona alejada del agente ficticio.



a) Pérdida de presencia en zona 8.



b) Pérdida de presencia en zona 2

Figura 8 Comportamiento del sistema con un solo agente, ante pérdidas de presencia cercanas y lejanas

En vista de esto se propone el grafo de conexión mostrado en la Figura 9.

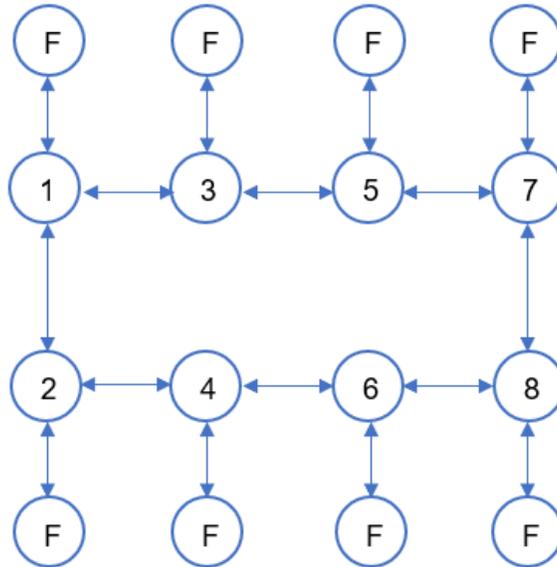


Figura 9. Grafo de conexión agente ficticio asociado a cada agente real

Esta topología no implica una conexión física entre agente real y ficticio, ya que, en una implementación real, cada lámpara tendrá un sistema embebido en el cual se programaría el agente ficticio asociado. La definición de condiciones iniciales del sistema se hace de tal forma que a cada agente real le es asignada una potencia lo suficientemente pequeña para que no represente un encendido físico de la lámpara asociada, y la potencia restante se distribuye entre todos los agentes ficticios. Esta estructura de conexión presenta el mejor desempeño y la mayor practicidad con miras a una implementación. A continuación, se presenta el efecto que tiene este cambio de estructura en el sistema, frente al caso de pérdida de presencia en la zona 2 anteriormente presentado.

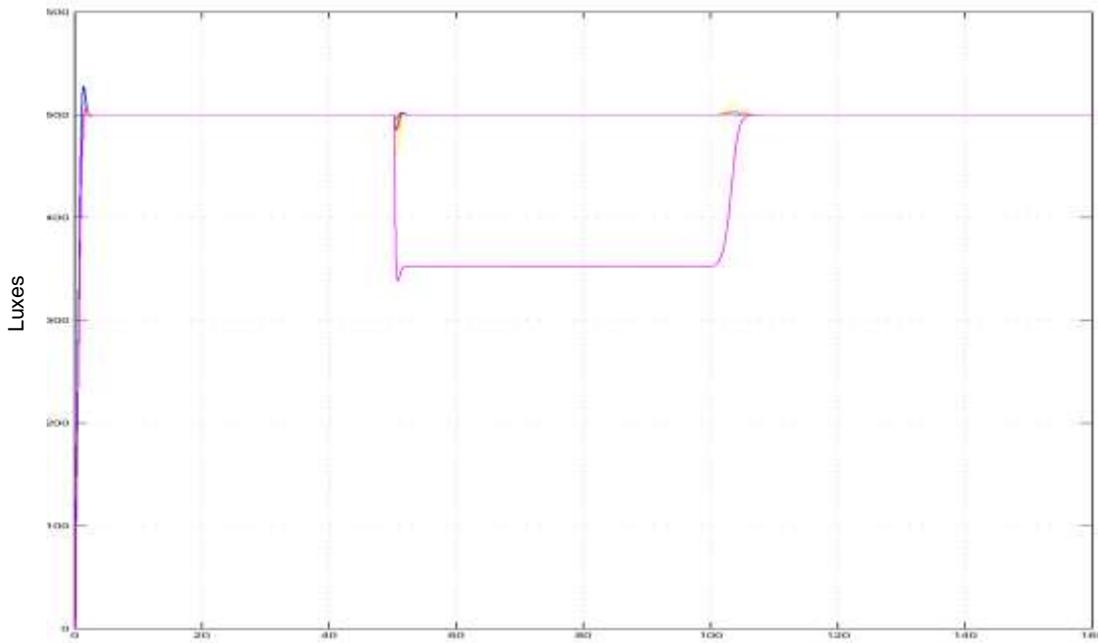


Figura 10 Respuesta del sistema con agentes ficticios individuales, ante la pérdida de presencia en zona 2.

Como se puede observar, la reacción ante el evento es más rápida, siendo esta una cualidad deseable en un sistema distribuido.

Una vez definida la tipología de conexión en el sistema de replicadores dinámicos locales, la implementación requiere que el sistema se encuentre en una estructura discreta que pueda ser programada en un dispositivo digital. A continuación, se describe el trabajo realizado frente a este reto de la discretización.

3.2.5. Discretización del modelo de Replicador Dinámico Local

El algoritmo planteado hasta este momento utiliza la estructura continua de replicador dinámico local presentada en (12), pero si esta solución se desea implementar, es necesario discretizar el sistema de tal forma que un dispositivo digital pueda ejecutar el algoritmo. Una propuesta de replicador dinámico discreto centralizado se presenta en [14] con la ecuación

$$p_i(k+1) = p_i(k) \frac{\alpha + f_i(p)}{\alpha + \bar{f}(p)}$$

Esta estructura respeta la invarianza del simplex

$$\Delta_p = \left\{ p \in \mathbb{R}_+^{N+M} : \sum_{i \in \mathcal{D}_\alpha} p_i = P_{Tot} \right\},$$

al demostrar que

$$\sum_{i=1}^{N+M} p_i(k+1) = \sum_{i=1}^{N+M} p_i(k) \left(\frac{\alpha + f_i(p)}{\alpha + \bar{f}(p)} \right)$$

Cuando se trabaja con replicadores dinámicos locales, la estructura del replicador cambia según (9), y en ésta la propuesta de replicador discreto anteriormente expuesta no cumple con las propiedades de su contraparte continua. Una discretización del replicador de la forma

$$\sum_{i=1}^{N+M} p_i(k+1) = \sum_{i=1}^{N+M} p_i(k) \left(\frac{\alpha + g_j(p)}{\alpha + \bar{g}_j(p)} \right)$$

no cumple con la condición de invarianza del simplex. Por esta razón se propone una nueva estructura de replicador dinámico local discreto basada en la definición de la derivada aplicado a (12). A continuación, se describe el proceso.

$$\dot{p}_i = \frac{\beta p_i}{P_{Tot}} (g_j - \bar{g}_j) \quad \text{Replicador Dinámico local}$$

$$p_i(k+1) = \frac{p_i(k+1) - p_i(k)}{T_m} \quad \text{Definición de derivada discreta}$$

Igualando las dos expresiones se tiene que

$$\frac{\beta p_i(k)}{P_{Tot}} (g_j(k) - \bar{g}_j(k)) = \frac{p_i(k+1) - p_i(k)}{T_m}.$$

Despejando el termino $p_i(k+1)$ se obtiene la expresión de replicador dinámico local discreto propuesta en este trabajo

$$\begin{aligned}
p_i(k+1) &= p_i(k) \left(\frac{T_m \beta}{P_{Tot}} (g_j(k) - \bar{g}_j(k)) + 1 \right), \\
p_i(k+1) &= p_i(k) \left(\frac{T_m \beta}{P_{Tot}} \left(f_i(k) \sum_{j \in \mathcal{N}_i} p_j(k) - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} f_j(k) p_j(k) \right) + 1 \right). \tag{19}
\end{aligned}$$

A continuación, se demuestra como la nueva expresión respeta el criterio de invarianza requerido para el proceso de asignación de recursos.

Proposición 1: El simplex dado por

$$\Delta_p = \left\{ p \in \mathbb{R}_+^{N_a} : \sum_{i \in \mathcal{D}_a} p_i = P_{Tot} \right\}$$

es invariante ante las dinámicas de replicadores discretos dadas en (19).

Demostración:

La invarianza del simplex se presenta cuando la sumatoria de la potencia asignada a cada nodo del sistema tiene como resultado la potencia total disponible todo el tiempo, de esta manera, nótese que al realizar la sumatoria de todas las potencias $p_i(k+1)$ en el sistema, usando en el modelo de replicador dinámico local discreto propuesto en (19), se tiene que,

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^{N_a} p_i(k+1) &= \sum_{i=1}^{N_a} p_i(k) \left(\frac{T_m \beta}{P_{Tot}} \left(f_i(k) \sum_{j \in \mathcal{N}_i} p_j(k) - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} f_j(k) p_j(k) \right) + 1 \right) \\
\sum_{i=1}^{N+M} p_i(k+1) &= \left(\frac{T_m \beta}{P_{Tot}} \sum_{i=1}^{N+M} p_i(k) f_i(k) \sum_{j \in \mathcal{N}_i} p_j(k) \right) - \left(\frac{T_m \beta}{P_{Tot}} p_i(k) \sum_{j \in \mathcal{N}_i} f_j(k) p_j(k) \right) + \sum_{i=1}^{N+M} p_i(k) \tag{20}
\end{aligned}$$

Ahora, basado en la demostración del Lema 3.1 descrito en [27], se pueden definir los vectores

$$\begin{aligned}
P_f &\triangleq [p_1 f_1 \quad p_2 f_2 \quad \dots \quad p_{N+M} f_{N+M}]^T \quad y \\
p &\triangleq [p_1 \quad p_2 \quad \dots \quad p_{N+M}]^T
\end{aligned}$$

y la matriz de adyacencia A para el grafo \mathcal{G}_a , tal que $A = [a_{ij}] \in \{0,1\}^{N_a \times N_a}$ (donde $N_a = N + M$) definida como:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } (i,j) \in \mathcal{A}_a \\ 0 & \text{otros casos} \end{cases}$$

Donde \mathcal{A}_a se entiende como los arcos de conexión presentes en el grafo ampliado \mathcal{G}_a

Esta matriz cumple con la propiedad de que $A = A^T$ gracias a que es un grafo no dirigido.

Con estos elementos se puede expresar (20) como

$$\sum_{i=1}^{N+M} p_i(k+1) = \left(\frac{T_m \beta}{P_{Tot}} P_f^T A p \right) - \left(\frac{T_m \beta}{P_{Tot}} p^T A P_f \right) + \sum_{i=1}^{N+M} p_i(k)$$

Aplicando la propiedad $a^T A b = b^T A^T a = b^T A a$ cuando $A = A^T$, se tiene que

$$P_f^T A p = p^T A^T P_f = p^T A P_f.$$

Entonces, se puede mostrar que (19) cumple con el criterio de invarianza del simplex, ya que

$$\sum_{i=1}^{N+M} p_i(k+1) = \sum_{i=1}^{N+M} p_i(k) = P_{Tot}.$$

De esta manera se discretiza el sistema de replicadores dinámicos locales en una nueva expresión que depende únicamente de información local que puede ser ejecutada por un dispositivo digital.

Una vez simulado el nuevo sistema se encuentra que hasta el momento se cumple la tarea de gestión la potencia de manera óptima, atendiendo al evento de presencia o ausencia de individuos. Sin embargo, se encuentra que el desempeño es adecuado mientras la potencia total disponible en el sistema de replicadores es mayor a la utilizada por el sistema. Cuando la potencia consumida por las lámparas iguala al total de energía disponible en el sistema, la potencia ficticia almacenada en los agentes ficticios se vuelve cero, estado que hace que dichos agentes caigan en un estado de equilibrio no deseado del cual no se recuperan. Este fenómeno hace que el agente ficticio deje de funcionar y por ende el sistema pierde capacidad de respuesta de forma permanente. En vista de esto se hace necesario implementar, adicionalmente, una restricción de potencia mínima en los agentes ficticios de forma local, con el fin de evitar su desactivación.

3.2.6. Implementación de restricción de potencia mínima en agentes ficticios.

Las condiciones iniciales del sistema asumen una distribución de potencia disponible entre todos los agentes del grafo, asignando mayor potencia a los agentes ficticios. De esta manera, cada par agente real – ficticio tiene una potencia igual a P_{Tot}/N .

Ahora, cuando la potencia disponible en el sistema es muy limitada, puede ocurrir que un agente real (lámpara) utilice toda la potencia que había en su agente ficticio asociado para tratar de cumplir con su función de seguimiento de referencia de iluminación. Aun teniendo conexión con otros nodos reales; en este caso, la potencia del agente ficticio se vuelve cero haciendo que el replicador asociado encuentre un punto de equilibrio no deseado dado por:

$$\dot{p}_i = 0 = \frac{\beta p_i}{P_{Tot}} (g_j - \bar{g}_j) \quad \text{Cuando } p_i = 0$$

Esto hace que el agente ficticio deje de cumplir su función y que, una vez la zona real asociada requiera liberar potencia, ésta no pueda ser apropiada por el agente ficticio que está en equilibrio, generando así una falla en el sistema.

La solución a este problema consiste en implementar una restricción de potencia mínima en el agente ficticio, que evite que ésta se vuelva cero. Un método inicial consiste en modificar la función de aptitud del agente ficticio de manera similar a como se hizo anteriormente con los agentes reales, definiendo una histéresis de comparación en la potencia mínima. Aunque el efecto sobre el agente ficticio es favorable y respeta el límite de potencia, la dinámica del conjunto general de agentes se perjudica haciendo que los agentes reales perdieran su objetivo de regulación.

En vista de esto, se propone una estrategia de restricción que consiste en el monitoreo local de potencia en el agente ficticio, de tal forma que, si la potencia del agente ficticio disminuye de un límite establecido, entonces se extrae una porción de la potencia del agente real de la zona a la cual pertenece y se asigna al agente ficticio asociado. Esto evita que la potencia del agente ficticio se convierta en cero, y mantiene la sumatoria de potencia total constante e igual a la potencia total del sistema a nivel general.

Esta solución funciona gracias a la estructura discreta del sistema y a la capacidad de que se tiene de poder definir cada iteración el valor de la potencia $p_i(k + 1)$. De esta manera, la reasignación de potencia se realiza de la forma

Si $p_{f_i}(k+1) \leq p_{f_{min}}$

$$p_{f_i}(k+1) = p_{f_i}(k+1) + p_{add}$$

$$p_{r_i}(k+1) = p_{r_i}(k+1) - p_{add}$$

Donde p_{add} es un valor de potencia muy pequeño.

Al probar esta solución, se encuentra que el sistema respeta la restricción de potencia mínima en los agentes ficticios y que el sistema en general mantiene una dinámica adecuada.

En conclusión, para la implementación de la estrategia de replicadores distribuidos es necesario realizar ajustes en muchos de los aspectos teóricos iniciales, lo que constituye el principal aporte realizados en el presente trabajo. En las siguientes secciones se describen los escenarios de experimentación sobre los cuales se prueba el sistema de replicadores dinámicos locales sensibles a la presencia de individuos y los resultados en desempeño comparativo con otros sistemas de control.

4. Resultados y Análisis

Una vez culminada la etapa de diseño y adaptación del sistema de replicadores dinámicos locales, es necesario evaluar su funcionamiento, en este caso, mediante simulaciones de distintos casos de estudio. Luego de realizar una revisión bibliográfica en relación a soluciones que se han aplicado al control de sistemas de iluminación se encuentra que la gran mayoría de trabajos utilizan sistemas centralizados basados en estrategias como redes neuronales [9],[28], sistemas fuzzy [29], controladores PID [30],[31],[32], y controladores predictivos basados en modelo MPC [33], [34]. Trabajos que abordan el análisis de sistemas de control distribuido para efectos de iluminación contemplan técnicas como Particle swarm optimization PSO [35], sin embargo este tipo de técnicas implican una implementación compleja en relación a la facilidad de implementación que tienen los replicadores dinámicos. Por otra parte, solo algunos trabajos contemplan la presencia de individuos dentro de la estrategia de control.

De esta manera en el presente capítulo se propone una comparación de desempeño entre el algoritmo de replicadores dinámicos planteado y un conjunto de estrategias de control convencionales que pueden ser aplicadas al mismo problema, trabajando con un controlador predictivo basado en modelo MPC multivariable, un controlador por realimentación de estados LQR multivariable y un controlador PI por lámpara.

Se decide utilizar estos tres tipos de controladores con miras a poder evaluar el desempeño de la propuesta en un rango de opciones tal que conceptos como la complejidad del algoritmo, el grado de disponibilidad de información y la facilidad de implementación puedan ser tenidos en cuenta durante la comparación. Los controladores a utilizar, debido a su estructura, procuran cumplir con el requerimiento de seguimiento de referencia, pero en todos los antecedentes que incluyen el factor de presencia de individuos, ninguno contempla la energía disponible en el sistema procurando una adecuada distribución de la misma, cualidad que si tienen los replicadores dinámicos.

Se pretende hacer un análisis tanto cuantitativo como cualitativo del desempeño del algoritmo propuesto. La comparación cuantitativa está basada en el cálculo de seis medidores de desempeño, los cuales serán aplicados a los controladores en cuatro escenarios de prueba diferentes. El objetivo de estos medidores es evidenciar cómo se comportan las diferentes estrategias de control con respecto al error de seguimiento de referencia, el tiempo de respuesta, y el esfuerzo de control.

A nivel cualitativo, se busca calificar al controlador propuesto en términos de complejidad versus facilidad de implementación. Para ello, si se quisiera dar una clasificación a los controladores a utilizar para la comparación, el controlador MPC constituye la opción de mayor complejidad, el LQR una opción de complejidad intermedia y el PI la opción más simple. El fin de esta selección es inicialmente poder calificar al algoritmo de control propuesto en un ranking tal que permita vislumbrar sus bondades o debilidades.

De esta manera, el presente capítulo inicialmente describe el proceso de diseño de los controladores MPC multivariable, LQR multivariable y PI al sistema de iluminación. Posteriormente se describen los escenarios y condiciones de trabajo en los cuales serán probados los diferentes controladores, y se definen los medidores de desempeño a utilizar. Finalmente se realiza el análisis de resultados de desempeño en cada escenario y se hace un resumen de los resultados más relevantes.

4.1. Definición de controladores para comparación

4.1.1. MPC multivariable MIMO

El controlador predictivo basado en modelo - MPC, es una estrategia de control óptimo muy utilizada en el ámbito industrial debido a su carácter intuitivo a nivel de sintonización. Es aplicable a sistemas multivariables tanto lineales como no lineales.

Su funcionamiento radica en el cálculo de una acción de control que optimiza una función de objetivo o de costo basada en el comportamiento futuro de sistema en un horizonte temporal de predicción. Esto es posible gracias al conocimiento que se debe tener del modelo dinámico del sistema.

Para el caso de estudio se utiliza un método de diseño de un MPC con realimentación de estados e integrador embebido. La base conceptual del controlador diseñado tiene su fundamento en [36], pero a continuación se hace una descripción de la aplicación de este proceso de diseño al caso de estudio.

El conjunto lámpara-sensor es un sistema de segundo orden en donde las variables de estado son la iluminancia x_1 y la variación de la iluminancia $x_2 = \frac{dx_1}{dt}$. Su representación en espacio de estados basada en los modelos de primer orden de lámpara y sensor (13) y (14) estaría dado entonces por

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \overbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{\tau_L \tau_S} & -\left(\frac{\tau_L + \tau_S}{\tau_L \tau_S}\right) \end{bmatrix}}^a \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \overbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_L K_S}{\tau_L \tau_S} \end{bmatrix}}^b p_i \quad (21)$$

$$y = \overbrace{[1 \ 0]}^c \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \overbrace{[0]}^d p_i$$

Como el sistema planteado está compuesto por ocho zonas cada una con una lámpara dimerizable y un sensor de iluminancia, se tendrían entonces 16 variables de estado, 8 entradas (potencias asignadas a cada lámpara) y 8 salidas (iluminancia medida en los sensores de cada zona). En términos generales el modelo del sistema en espacio de estados total tendría la forma

$$\dot{x}(t) = A_m x(t) + B_m u(t)$$

$$y(t) = C_m x(t) + D_m u(t),$$

Donde la matriz A_m es una matriz cuadrada de 16x16, la cual para efectos de mejor entendimiento se ha ilustrado como una matriz de 8x8 donde los elementos de la diagonal, descritos con la letra a son matrices cuadradas de 2x2 de la forma:

$$a = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{\tau_L \tau_S} & -\left(\frac{\tau_L + \tau_S}{\tau_L \tau_S}\right) \end{bmatrix}$$

y todos los demás elementos son ceros, de esta manera la matriz A_m estaría dada por:

$$A_{m_{16 \times 16}} = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a \end{bmatrix} \quad (22)$$

La definición de la matriz B_m total está ligada a los aportes de iluminación de cada zona propios del modelo de iluminación. Por esta razón, es necesario definir una matriz de distancias cuyos elementos d_{ij} determinen la distancia comprendida entre el i -ésimo sensor y la j -ésima lámpara en el sistema. Esta matriz, se denomina D_L , y el cálculo de cada uno de sus elementos depende de la relación geométrica existente en coherencia con la ubicación espacial de los sensores y las lámparas descrita en la Sección 3.1. Esta la matriz tiene la siguiente forma

$$D_L = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{17} & d_{18} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{27} & d_{28} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ d_{71} & d_{72} & \dots & d_{77} & d_{78} \\ d_{81} & d_{82} & \dots & d_{87} & d_{88} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_0 & \sqrt{d_0^2 + d_v^2} & \dots & \sqrt{d_0^2 + 9d_h^2} & \sqrt{d_0^2 + 9d_h^2 + d_v^2} \\ \sqrt{d_0^2 + d_v^2} & d_0 & \dots & \sqrt{d_0^2 + 9d_h^2 + d_v^2} & \sqrt{d_0^2 + 9d_h^2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \sqrt{d_0^2 + 9d_h^2} & \sqrt{d_0^2 + 9d_h^2 + d_v^2} & \dots & d_0 & \sqrt{d_0^2 + d_v^2} \\ \sqrt{d_0^2 + 9d_h^2 + d_v^2} & \sqrt{d_0^2 + 9d_h^2} & \dots & \sqrt{d_0^2 + d_v^2} & d_0 \end{bmatrix}$$

De esta manera la matriz B_m se define como

$$B_m = \frac{K_L K_S}{\tau_L \tau_S} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ (1/d_{11}^2) & (1/d_{12}^2) & \dots & (1/d_{17}^2) & (1/d_{18}^2) \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ (1/d_{21}^2) & (1/d_{22}^2) & \dots & (1/d_{27}^2) & (1/d_{28}^2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ (1/d_{71}^2) & (1/d_{72}^2) & \dots & (1/d_{77}^2) & (1/d_{78}^2) \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ (1/d_{81}^2) & (1/d_{82}^2) & \dots & (1/d_{87}^2) & (1/d_{88}^2) \end{bmatrix} \quad (23)$$

Como la salida del sistema son los valores de iluminancia sensados en cada zona, la matriz C_m sería una matriz de 8x16, que para efectos de ilustración se presenta como una matriz cuadrada de 8x8 cuya diagonal está compuesta por sub matrices de $c = [1 \ 0]$, y todos los demás valores son cero, formando así una matriz de 8x16 elementos como la que muestra a continuación:

$$C_{m_{8 \times 16}} = \begin{bmatrix} c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c \end{bmatrix} \quad (24)$$

Finalmente, la matriz D se define como:

$$D_m = 0_{8 \times 8}$$

Siguiendo el proceso de diseño del controlador MPC, es necesario representar el sistema en un espacio de estados discreto ampliado, incluyendo un integrador, donde la nueva representación tiene la forma

$$\begin{aligned} \overbrace{\begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix}}^{x(k+1)} &= \overbrace{\begin{bmatrix} A_m & o_m^T \\ C_m A_m & I_{q \times q} \end{bmatrix}}^A \overbrace{\begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix}}^{x(k)} + \overbrace{\begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix}}^B \Delta u(k) \\ y(k) &= \overbrace{\begin{bmatrix} o_m & I_{q \times q} \end{bmatrix}}^C \overbrace{\begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix}}^{x(k)} \end{aligned}$$

donde $\Delta x_m(k) = x_m(k) - x_m(k-1)$, $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$, y las matrices A , B y C son el producto de un proceso de discretización del espacio de estados continuo del sistema.

Si el sistema tiene m entradas, q salidas y n variables de estado, para el caso de 8 zonas $I_{q \times q}$ es una matriz identidad con dimensión 8×8 en coherencia con el número de salidas del sistema, y o_m una matriz de ceros con dimensión $q \times n$ (8×16); A_m , B_m , y C_m tienen dimensiones $n \times n$ (16×16), $n \times m$ (16×8), y $q \times n$ (8×16), respectivamente. De esta manera el nuevo sistema en espacio de estados aumentado tendría una dimensión $n_a = n + q$ es decir $n_a = 24$.

Entonces el sistema ampliado se describe con

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A x(k) + B \Delta u(k) \\ y(k) &= C x(k) \end{aligned} \quad (25)$$

Basado en modelo lineal del sistema dado por la tripleta A , B , C , se calcula la predicción de las variables de estado y las salidas en una ventana de optimización definida por N_p y N_c , siendo estos el horizonte de predicción y de control, respectivamente, de tal forma que $N_c \leq N_p$.

El vector de salidas predichas con base en las señales de control y el estado actual (medido u observado $x(k_i)$) [36] está dado por

$$Y = Fx(k_i) + \Phi \Delta U,$$

donde

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix}; \quad \Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & 0 & \dots & 0 \\ CA^2B & CAB & CB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & 0 \\ CA^{N_p-1}B & CA^{N_p-2}B & CA^{N_p-3}B & \dots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix}$$

$$Y = [y(k_i+1 | k_i) \quad y(k_i+2 | k_i) \quad y(k_i+3 | k_i) \quad \dots \quad y(k_i+N_p | k_i)]^T$$

$$\Delta U = [\Delta u(k_i) \quad \Delta u(k_i+1) \quad \Delta u(k_i+2) \quad \dots \quad \Delta u(k_i+N_c-1)]^T$$

La función de costo que refleja el objetivo de control de seguimiento de referencia y tamaño de acción de control que se desea minimizar está dada por

$$J = \overbrace{(R_s - Y)^T (R_s - Y)}^{\text{Error de seguimiento}} + \overbrace{\Delta U^T \bar{R} \Delta U}^{\text{Acción de control}},$$

en donde $R_s^T = 1_{1 \times N_p} r(k_i) = \bar{R}_s r(k_i)$, con $r(k_i)$ como la referencia a seguir en k_i , y \bar{R} una matriz diagonal que permite la sintonización del comportamiento del sistema en lazo cerrado definida por $\bar{R} = r_w I_{N_c \times N_c}$. El parámetro r_w permite controlar la penalización de la acción de control, ya que entre mayor sea este valor, la acción de control tiende a ser más pequeña. Luego de varias pruebas de sintonización, para el caso de estudio r_w se fija en un valor de 31050.

El valor de la solución óptima que minimiza la función de costo anteriormente descrita está dado por

$$\Delta U = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (\bar{R}_s r(k_i) - Fx(k_i)).$$

Por el principio de horizontes deslizantes, la acción de control para el instante k_i sería solo el primer elemento de la matriz ΔU , que se define como

$$\Delta u(k_i) = [I_m \ 0_m \ 0_m \ \cdots \ 0_m]_{1 \times N_c} (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} (\Phi^T \bar{R}_s r(k_i) - \Phi^T Fx(k_i))$$

En esta expresión, I_m y 0_m son una matriz identidad y una matriz de ceros de $m \times m$, respectivamente. Para el caso de estudio, se asigna un horizonte de predicción $N_p = 10$ y un horizonte de control $N_c = 5$ teniendo en cuenta el periodo de muestreo y una sintonización simple a prueba y error. Luego, las dimensiones de las matrices que describen la ecuación para hallar $\Delta u(k_i)$ se muestran en la Tabla 1.

Matriz	Dimensión	Valor
$\Phi^T \Phi$	$mN_c \times mN_c$	40×40
$\Phi^T F$	$mN_c \times n_a$	40×24
$\Phi^T \bar{R}_s$	Las últimas q columnas de $\Phi^T F$	40×8
\bar{R}	$mN_c \times mN_c$	40×40

Tabla 1. Dimensiones de matrices que componen $\Delta u(k_i)$

De acuerdo con [36] esta expresión puede ser expresada como una realimentación de estados con una prealimentación de la referencia de la forma

$$\Delta u(k_i) = K_y r(k_i) - K_{mpc} x(k_i),$$

siendo

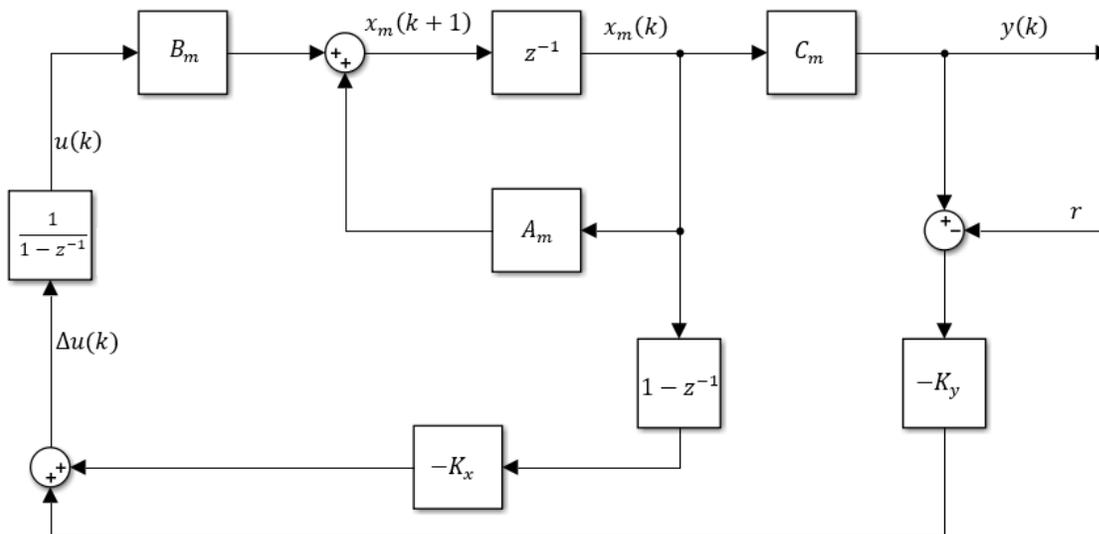
$$K_y = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T \bar{R}_s$$

$$K_{mpc} = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T F$$

Siendo entonces K_y un matriz de constantes 40 filas por 8 columnas, y K_{mpc} una matriz de constantes de 40 filas por 24 columnas; el código de Matlab utilizado para el cálculo se presenta en el Anexo 3.

De esta manera se calcula la acción de control que permite minimizar la función objetivo iteración a iteración bajo el método de control MPC.

El diagrama de bloques que describe el controlador a implementar sería el siguiente:



4.1.2. LQR multivariable MIMO

El controlador planteado en esta sección está basado en un regulador óptimo lineal cuadrático (LQR) servocontrolado [37], con el cual se busca minimizar la función objetivo

$$J = \frac{1}{2} x^T Q x + \frac{1}{2} u^T R u.$$

Donde las matrices Q (definida no negativa) y R (definidas positiva), son los parámetros de sintonía. La naturaleza de servocontrol implica una etapa de control integral antes de la realimentación de estados propia del LQR. La acción de control que minimiza la función objetivo anteriormente descrita está dada por:

$$u(k) = -Kx(k) - K_i v(k),$$

donde $v(k)$ es la integral del error de realimentación del sistema dada por

$$v(k) = v(k - 1) + r(k) - y(k)$$

Para el cálculo de esta acción de control se necesita trabajar con una representación ampliada el sistema de espacio de estados discreto definida de la siguiente manera:

$$x_a(k + 1) = \begin{bmatrix} x(k + 1) \\ v(k + 1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G & 0 \\ -CG & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ v(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H \\ -CH \end{bmatrix} u(k) \quad (26)$$

Donde las matrices G y H son la forma discreta de las matrices A_m y B_m del sistema definidas en (22) y (23), y la matriz C está definida en (26)

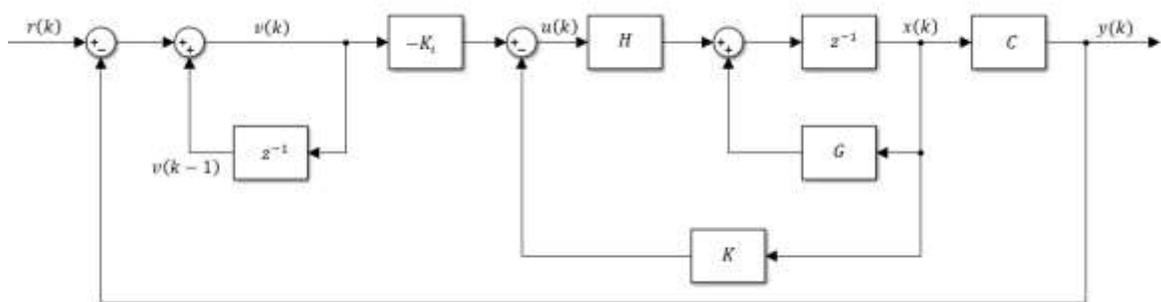
El nuevo vector de estados entonces tendría 24 estados, con los primeros 16 correspondientes a los valores de iluminancia de las 8 zonas y sus correspondientes derivadas, y los 8 último a las integrales de los 8 errores de realimentación del sistema. Por este motivo la matriz de pesos Q asociada a los estados es una matriz diagonal de 24x24, y la matriz de pesos de las señales de control R se considera diagonal de 8x8. Los valores de estas matrices son ajustados de tal forma que la acción de control no supere un sobrepaso mayor al 10% y que el tiempo de estabilización sea el menor posible bajo esta restricción de sobrepaso. Para esto se usa la regla de Bryson [38], dando pesos a los estados más relevantes y ajustando la matriz R en igual proporción para todas las entradas. Para el caso de estudio, la matriz R utilizada es:

$$R = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 100 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 100 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 100 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 100 \end{bmatrix}$$

Para efectos del presente trabajo, la acción de control $u(k)$ se calcula utilizando la función **dlqr()** de Matlab. La ejecución de esta instrucción retorna una matriz de ganancias aumentada

$$K_{a_{8 \times 24}} = [K_{8 \times 16} \ K_{i_{8 \times 8}}].$$

Con este resultado solo basta con aplicar las matrices de ganancia K y K_i en la estructura de realimentación del controlador, la cual se presenta a continuación:



4.1.3. PID descentralizado

El diseño de este controlador se realiza entendiendo a cada zona de iluminación como un sistema independiente, es decir, que la planta a controlar para efectos de diseño es el sistema dinámico compuesto por las funciones de transferencia de la lámpara y del sensor de iluminancia. De esta manera la función total estaría dada por

$$F_T(s) = \frac{K_L K_S / \tau_L \tau_S d_0^2}{s^2 + \left(\frac{\tau_L + \tau_S}{\tau_L \tau_S}\right) s + \left(\frac{1}{\tau_L \tau_S}\right)} = \frac{6.3702 \times 10^6}{s^2 + 70s + 1000}.$$

Como solo se analiza una sola lámpara a la vez, el valor de K_S se define solo teniendo en cuenta la distancia d_0 correspondiente al espacio comprendido entre el foco de luz y el punto de sensado de iluminancia sobre el área de trabajo.

El objetivo de diseño de este controlador es proponer una estructura lo suficientemente simple que permita evaluar el desempeño de una opción de control descentralizada clásica. Por esta razón el controlador propuesto es un Proporcional Integrativo PI que busca continuamente cumplir con el objetivo de seguimiento de referencia de iluminación en la zona. El controlador planteado es de la forma

$$F_C(s) = \frac{K_P \left(s + \frac{1}{T_i} \right)}{s}$$

El método utilizado para el diseño de este controlador es el método analítico del lugar geométrico de las raíces en el cual se busca encontrar los parámetros del controlador propuesto mediante el análisis de cumplimiento de las condiciones de ángulo y magnitud para el sistema de lazo cerrado con controlador [39]. Así, cada sistema lámpara-sensor en lazo cerrado está dado por

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = F(s) = \frac{F_T(s)F_C(s)}{1 + F_T(s)F_C(s)}$$

Los requerimientos de diseño para el controlador están dados por un tiempo de estabilización $t_s = 2$ segundos y un sobrepaso máximo $S_p = 10\%$. Producto de este análisis se definen los valores de K_P y T_i como

$$K_P = 0.0127$$

$$T_i = 0.1065$$

Para el proceso de discretización, se toma un tiempo de muestreo de 0.1s utilizando el criterio de usar un tiempo de muestreo de al menos 1/10 del tiempo de estabilización del sistema, para el caso de estudio el tiempo de estabilización es de alrededor de un segundo, por lo que el tiempo de muestreo según el criterio de diseño expuesto, sería de 0.1 segundos. Este tiempo de muestreo es utilizado para la simulación de todos los sistemas de control a ser evaluados.

Una vez discretizado el sistema, se obtiene la respuesta ante un escalón unitario mostrada en la Figura 11.

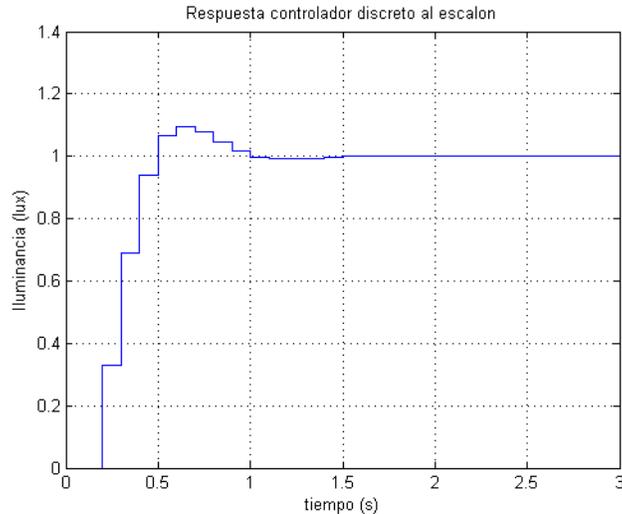


Figura 11. Respuesta temporal controlador PI

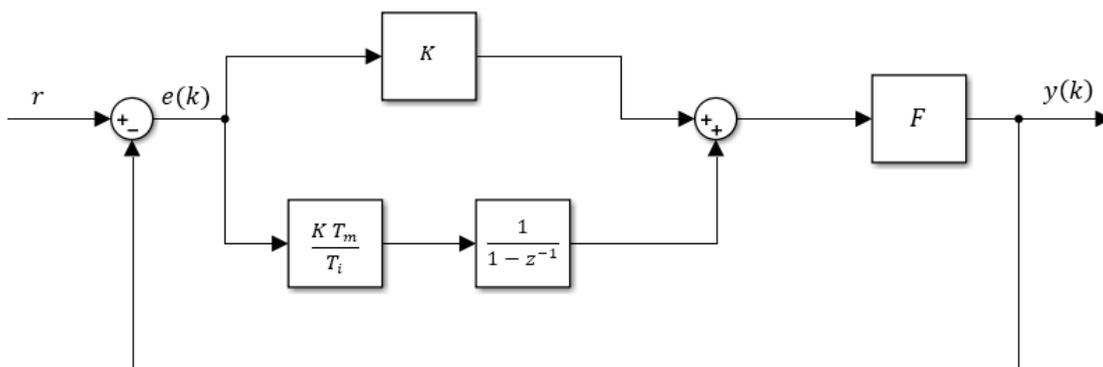
Hasta este momento solo se ha tomado una sola zona, pero al momento de aplicar esta estrategia de control al sistema caso de estudio, los aportes de iluminación que genera la interacción entre zonas, hacen que esta repuesta sea muy oscilante. Así, es necesario hacer un ajuste a los parámetros del controlador buscando una mejora ante la oscilación arriesgando tiempo de estabilización. Además, se hace necesario implementa una estructura anti-windup en cada lazo de control para una mejor respuesta ante la posible saturación de los integradores. Los valores finales de K_p y T_i son:

$$K_p = 25 \times 10^{-6}$$

$$T_i = 15.52 \cdot 10^{-4}$$

El ajuste de estos valores se hizo buscando una repuesta con un sobrepaso no mayor al 10%, obteniendo tiempos de estabilización alrededor de los 10 segundos.

El esquema del controlador utilizado sería el siguiente:



De esta manera se da por terminado el diseño de los controladores para comparar el desempeño del algoritmo de replicadores dinámicos locales sensibles a presencia de individuos. A continuación, se describirán los escenarios en los cuales se pone a prueba cada una de las estrategias de control con fines comparativos.

4.2. Escenarios de comparación

Para efectos de la descripción de los escenarios de prueba, se entenderá como “zona de iluminación” a todo el espacio sobre el cual tiene efecto directo la luz producida por una sola lámpara. Aclarado esto, a continuación, se definen cuatro escenarios de prueba asociados a diferentes dinámicas de ocupación de zonas, y se evalúa cómo responden los sistemas de control diseñados frente a la detección de un evento de ausencia o presencia de individuos.

Cada escenario es evaluado a su vez teniendo en cuenta dos condiciones, la primera relacionada con la homogeneidad de la iluminación requerida, y la segunda relacionada con la cantidad de energía disponible en el sistema para efectos de iluminación.

4.2.1. Descripción de Escenarios

Para una mejor descripción se utilizará la nomenclatura de zonas presentada en la Figura 12.

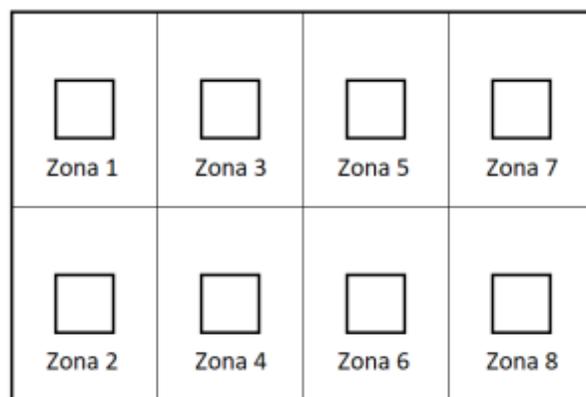


Figura 12 Nomenclatura de Zonas de Iluminación

Todos los escenarios se analizan en tres momentos: Inicio (0 – 30 segundos), Evento 1 (30 – 60 segundos) y Evento 2 (60 – 100 segundos), descritos en las tablas Tabla 2 a Tabla 5. Los escenarios corresponden a situación que pueden ocurrir en la vida real tales como: el uso solo de algunas zonas de iluminación dentro de un aula de clase cuando los estudiantes se reúnen a trabajar en grupo, esto hace que zonas de iluminación adyacentes o no adyacentes se desocupen momentáneamente, las cuales se vuelven a ocupar al terminar el trabajo; esto podría ser más evidente en una biblioteca, donde el uso de zonas de estudio cambia

constantemente durante el día. Otro caso es el uso parcial del aula de clase cuando el grupo de estudiantes es pequeño, o la ocupación gradual de un aula a lo largo del tiempo.

Escenario 1. Perdida de presencia en zonas adyacentes

Momento	Descripción
Inicio 0 – 30 seg	Todas las zonas detectan presencia de individuos, y buscan la referencia de iluminación definida según el régimen de homogeneidad en iluminación analizado.
Evento 1 30 – 60 seg	Las Zonas 3 y 4 detectan ausencia de individuos. Se convierten en zonas no útiles, todas las demás zonas mantienen la referencia de iluminación inicial.
Evento 2 60 – 100 seg	Las Zonas 3 y 4 detectan presencia de individuos nuevamente. Las dos zonas vuelven a ser zonas útiles y buscan la referencia de iluminación inicial.

Tabla 2. Escenario 1

Escenario 2. Perdida de presencia en zonas no adyacentes

Momento	Descripción
Inicio 0 – 30 seg	Todas las zonas detectan presencia de individuos, y buscan la referencia de iluminación definida según el régimen de homogeneidad en iluminación analizado.
Evento 1 30 – 60 seg	Las Zonas 2, 5 y 7 detectan ausencia de individuos. Se convierten en zonas no útiles, todas las demás zonas mantienen la referencia de iluminación inicial.
Evento 2 60 – 100 seg	Las Zonas 2, 5 y 7 detectan presencia de individuos nuevamente. Las dos zonas vuelven a ser zonas útiles y buscan la referencia de iluminación inicial.

Tabla 3. Escenario 2

Escenario 3. Ocupación momentánea de zonas

Momento	Descripción
Inicio 0 – 30 seg	Todas las zonas detectan ausencia de individuos, son zonas que no están siendo utilizadas y por ende no requieren iluminación.
Evento 1 30 – 60 seg	Las Zonas 4 y 6 detectan presencia de individuos. Se convierten en zonas útiles y buscan la referencia de iluminación definida según el régimen de homogeneidad en iluminación analizado. Todas las demás zonas no están siendo utilizadas.
Evento 2 60 – 100 seg	Las Zonas 4 y 6 detectan ausencia de individuos nuevamente. Las dos zonas vuelven a ser zonas no útiles.

Tabla 4. Escenario 3

Escenario 4. Ocupación incremental de zonas

Momento	Descripción
Inicio 0 – 30 seg	Todas las zonas detectan ausencia de individuos, son zonas que no están siendo utilizadas y por ende no requieren iluminación.
Evento 1 30 – 60 seg	Las Zonas 1, 2, 3 y 4 detectan presencia de individuos. Se convierten en zonas útiles y buscan la referencia de iluminación definida el régimen de homogeneidad en iluminación analizado. Todas las demás zonas no están siendo utilizadas.
Evento 2 60 – 100 seg	Las Zonas 5, 6, 7 y 8 detectan también presencia de individuos. Se convierten en zonas útiles y buscan la referencia de iluminación definida según el régimen de homogeneidad en iluminación analizado. Toda el aula está ocupada.

Tabla 5. Escenario 4

4.2.2. Régimen de homogeneidad en iluminación

Si bien un espacio como un aula de clases requiere una iluminación homogénea en toda el área de trabajo, el control propuesto tiene la capacidad de seguir distintas referencias en cada zona, por ejemplo, cuando el docente requiere atenuar la luz en la parte frontal cuando hay una presentación, o cuando se requiere mayor iluminación para una mejor visualización del tablero. Así, se desea evaluar el comportamiento del sistema si en el mismo espacio se requirieran distintos niveles de iluminación. Para esto, cada escenario se evalúa teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

Régimen de iluminación homogénea

Según RETILAP [17], el valor de iluminancia medio requerido para un aula de clases según la norma es 500 lx, con un mínimo de 300 lx y un máximo de 750 lx. Con base en esto en este régimen de evaluación se define una referencia de iluminancia de 500 lux a cada zona en el aula caso de estudio.

Régimen de iluminación no homogénea

Para este caso se asigna una referencia de iluminancia por zonas adyacentes como se propone en la Tabla 6, simulando la necesidad de más iluminación en las zonas cercanas al tablero y menos luz al fondo del aula.

Zonas	Referencia de iluminancia
1 y 2	550
3 y 4	500
5 y 6	500
7 y 8	400

Tabla 6. Referencia de iluminación en luxes por Zona

4.2.3. Condiciones de Disponibilidad de Energía

Teniendo en cuenta que el control basado en replicadores dinámicos es un algoritmo usado en aplicaciones que requieren asignación óptima de recursos, se prueba esta característica limitando la energía disponible en el sistema para iluminación. De esta forma se definen dos condiciones de disponibilidad energética:

Energía disponible Suficiente.

La energía disponible es igual a la sumatoria de potencias máximas consumidas por el conjunto de lámparas. En este caso es de 176 W (cada lámpara tiene un consumo de potencia máxima de 22 W).

Energía disponible Insuficiente.

En este entorno de prueba se limita la energía disponible en el sistema destinada a iluminación a un 25%, es decir a 44 W. Se hace esto con el fin de evaluar la capacidad de asignación de recursos del sistema de replicadores dinámicos.

Es necesario hacer una aclaración en este apartado. El algoritmo de replicadores dinámicos al tener inmerso en su estructura el valor de la potencia máxima disponible, le permite respetar esta restricción todo el tiempo. Ahora los controladores MPC, LQR y PI diseñados no contemplan esta restricción, por lo que se establecen saturaciones en las señales de control donde el límite inferior es 0 W y el límite superior estaría definido por la potencia disponible dividida entre las ocho lámparas.

La disponibilidad de energía en un sistema de iluminación puede llegar a ser limitada en aplicaciones como lo son los sistemas de energización no conectados a la red en los cuales el mayor reto radica en el uso eficiente de la energía disponible en la baterías del sistema; en aplicaciones utilizadas como casos estudio como las descritas en [40], [41], y [42], se encuentra el problema de incrementos de eficiencia en el uso de energía para iluminación se centra por una parte en los sistemas de dimerización y por otra en sistemas de carga y descarga de baterías con menores pérdidas, de esta manera el probar el algoritmo planteado en un escenario con energía limitada, podría aportar al reto de administración de energía en sistemas no interconectados buscando obtener un mayor tiempo de autonomía en el sistema, e incluso los resultados podrían ser extrapolados a otro tipo de cargas dentro del sistema.

Por otra parte, sistemas que utilicen únicamente fuentes de energía renovables para solventar sus necesidades de energización, bajo el concepto de “Zero Energy Consumption Buildings” [43] y [44], tendrían la necesidad de estrategias que permitan gestionar la energía destinada a diferentes aplicaciones dentro del sistema para aprovechar al máximo la energía disponible, incluso se puede pensar en que un sistema de control a nivel de gestión en una capa superior pueda priorizar ciertas cargas de acuerdo a la energía disponible, escenario en el cual contar con sistemas

que a su vez gestionen de forma local la energía teniendo en cuenta un dato de límite de energía disponible para la aplicación, puede llegar a ser de mucha utilidad.

4.3. Indicadores de Desempeño

El objetivo de estos indicadores es evidenciar cómo se comportan las diferentes estrategias de control con respecto al error de seguimiento de referencia, el tiempo de respuesta, y el esfuerzo de control.

Todos los antecedentes de controladores aplicados al sistema de iluminación, centran su análisis de desempeño al seguimiento de referencias, otros a la eficiencia de uso de energía, pero siempre de una forma individualizada y no comparativa con otros sistemas. Por esta razón, y teniendo en cuenta que este tipo de trabajos comparativos no son comunes y que tienen el potencial de aportar mucha información valiosa frente a la aplicación de este tipo de soluciones, se propone utilizar un conjunto de indicadores concentrados en el análisis de tiempo de respuesta, transitorios, y esfuerzo de control, que permitirá hacer una amplia comparación del desempeño de cada tipo de controlador.

Se plantea el uso de varios indicadores, con el fin de poder brindar al lector una visión amplia del desempeño de cada tipo de controlador, y así poder determinar qué tipo de controlador es más adecuado en cierto tipo de ambiente o exigencias de iluminación.

- **Integral del Valor Absoluto del Error (IAE)**

$$IAE = \sum_k^N |e(k)| \quad \text{tal que } N = \frac{T_P}{T_m}$$

Evalúa la capacidad total de seguimiento de referencia en un lapso de tiempo T_P con un tiempo de muestreo T_m ; penalizando el error de seguimiento.

- **Integral del Valor Absoluto del Error ponderado en el Tiempo (ITAE)**

$$ITAE = \sum_k^N t(k) |e(k)| \quad \text{tal que } N = \frac{T_P}{T_m}$$

Evalúa el error de seguimiento de referencia multiplicado por el tiempo en un lapso de tiempo T_P con un tiempo de muestreo T_m . Penaliza la persistencia del error de seguimiento, en especial cuando hay transitorios, y la velocidad de estabilización.

- **Integral del Error Cuadrático (ISE)**

$$ISE = \sum_k^N e^2(k) \quad \text{tal que } N = \frac{T_P}{T_m}$$

Evalúa la capacidad total de seguimiento de referencia que tiene el sistema en un lapso de tiempo T_P con un tiempo de muestreo T_m . Penaliza la presencia de errores grandes.

- **Integral del Error Cuadrático ponderado en el Tiempo (ITSE)**

$$ITSE = \sum_k^N t(k) e^2(k) \quad \text{tal que } N = \frac{T_P}{T_m}$$

Evalúa el error de seguimiento de referencia multiplicado por el tiempo en un espacio temporal T_P con un tiempo de muestreo T_m ; penaliza la persistencia de errores grandes de seguimiento, y la velocidad de estabilización.

La magnitud de estos indicadores define la capacidad de seguimiento de referencia que logra adquirir un sistema al aplicar un determinado controlador. Entre mayor sea el indicador, peor será su capacidad de seguimiento de referencia que tiene el sistema realimentado.

De igual forma se evalúa la velocidad de respuesta del sistema controlado en aquellos casos donde el valor en estado estable de la salida logra alcanzar la referencia. Entre mayor sea la magnitud de los indicadores, más lenta habría sido la repuesta del controlador.

Ahora, en este tipo de sistemas donde la señal de control es relacionada directamente con un consumo energético, también es necesario evaluar el esfuerzo de control realizado. Para esto se utilizarán los siguientes indicadores de desempeño.

- **Integral del Valor Absoluto de la Desviación de la Acción de Control (TVU)**

$$TVU = \sum_k^N |u(k) - u_{ss}| \quad \text{tal que } N = \frac{T_P}{T_m}$$

Este indicador penaliza los sobre esfuerzos de control y el tiempo de respuesta de la acción de control. Aquí, u_{ss} es el valor de la acción de control en estado estable. Para efectos del análisis realizado, este valor se asume como la acción de control medida en la última muestra de cada momento de prueba.

- **Integral del cuadrado de la Variación Total de la Acción de Control (ISU)**

$$ISU = \sum_k^N [u(k) - u(k-1)]^2 \quad \text{tal que } N = \frac{T_P}{T_m}$$

Este indicador penaliza la variación el esfuerzo de control en el tiempo. Por una parte, puede penalizar esfuerzos de control muy agresivos que implican cambios de gran magnitud en intervalos de tiempo pequeños con presencia de transitorios, o puede penalizar una repuesta de control lenta que presenta cambios pequeños en intervalos de tiempo prolongados.

- **Integral de la Acción de Control (IU)**

$$IU = \sum_k^N u(k) \quad \text{tal que } N = \frac{T_P}{T_m}$$

Este indicador busca evaluar el consumo de potencia total realizado por cada lámpara.

4.4. Ejecución de pruebas.

En este apartado se presenta el procedimiento mediante el cual se ponen a prueba los diferentes controladores diseñados. Los controladores serán evaluados en cada uno de los cuatro escenarios de prueba descritos en 4.2.1, donde cada escenario será sometido de igual forma a los dos regímenes de necesidad de iluminación, tanto en condiciones de energía suficiente como insuficiente. Esto implica entonces la realización de 16 pruebas, en las cuales se calculan los 7 indicadores de desempeño para cada controlador. En la

Tabla 7 se define el escenario, el régimen de iluminación y la disponibilidad de energía propia de cada prueba.

Prueba	Disp. Energía	Reg. Iluminancia	Escenario
1	Suficiente	Homogéneo	1
2	Suficiente	Homogéneo	2
3	Suficiente	Homogéneo	3
4	Suficiente	Homogéneo	4
5	Suficiente	No Homogéneo	1
6	Suficiente	No Homogéneo	2
7	Suficiente	No Homogéneo	3
8	Suficiente	No Homogéneo	4
9	Insuficiente	Homogéneo	1
10	Insuficiente	Homogéneo	2
11	Insuficiente	Homogéneo	3
12	Insuficiente	Homogéneo	4
13	Insuficiente	No Homogéneo	1
14	Insuficiente	No Homogéneo	2
15	Insuficiente	No Homogéneo	3
16	Insuficiente	No Homogéneo	4

Tabla 7 Descriptivo de pruebas para evaluación de desempeño

En cada prueba, el cálculo de indicadores se realiza utilizando como insumo el registro de variables de iluminación sensada, iluminación de referencia, y potencia entregada a cada lámpara. Es necesario resaltar que todos los indicadores a utilizar son de penalización, por esta razón se debe entender que un buen desempeño se refleja en una menor magnitud del indicador analizado.

Con el fin de poder visualizar el desempeño de los controladores en cada una de las pruebas planteadas, se presentan a continuación los tipos de graficas que se utilizaran en el proceso de análisis comparativo a describirse más adelante.

Gráfica de Radar de Indicadores de desempeño (ejemplo en Figura 13):

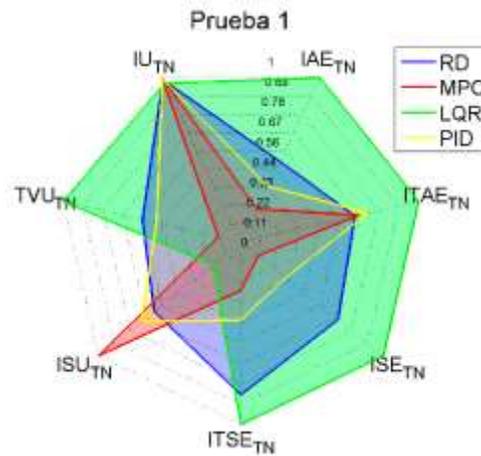


Figura 13 Gráfica de Rada Ejemplo

Está compuesto por una serie de ejes radiales que comparten el mismo origen y que utilizan una escala estándar de representación con fines de comparación. En cada eje se muestra el valor de un indicador específico mediante un punto, de tal forma que al unir todos los puntos entre ejes se forma un polígono irregular que se convierte en el perfil del controlador en relación a los indicadores analizados. El color del polígono representa el tipo de controlador, que por convención, el controlador basado en Replicadores Dinámicos se representa con color azul, el controlador MPC con rojo, el controlador LQR con verde y el controlador PID con amarillo.

Esta gráfica utiliza el valor acumulado de cada uno de los indicadores (sumatoria de las magnitudes de indicador obtenidos en cada zona), pero debido que cada indicador trabaja en un orden de magnitudes diferente, se decide optar por la normalización con el fin de conseguir una representación estándar de cada indicador. La normalización se realiza teniendo en cuenta el mayor valor de indicador alcanzado en cada prueba, permitiendo escalar el comportamiento de cada uno de los indicadores a un rango de cero a uno.

De esta manera, el desempeño de cada controlador en una determinada prueba puede ser analizado teniendo en cuenta el área del perfil obtenida, donde el perfil con menor área representaría entonces el controlador con mejor desempeño en términos generales.

Gráfica de respuesta temporal (ejemplo en Figura 14):

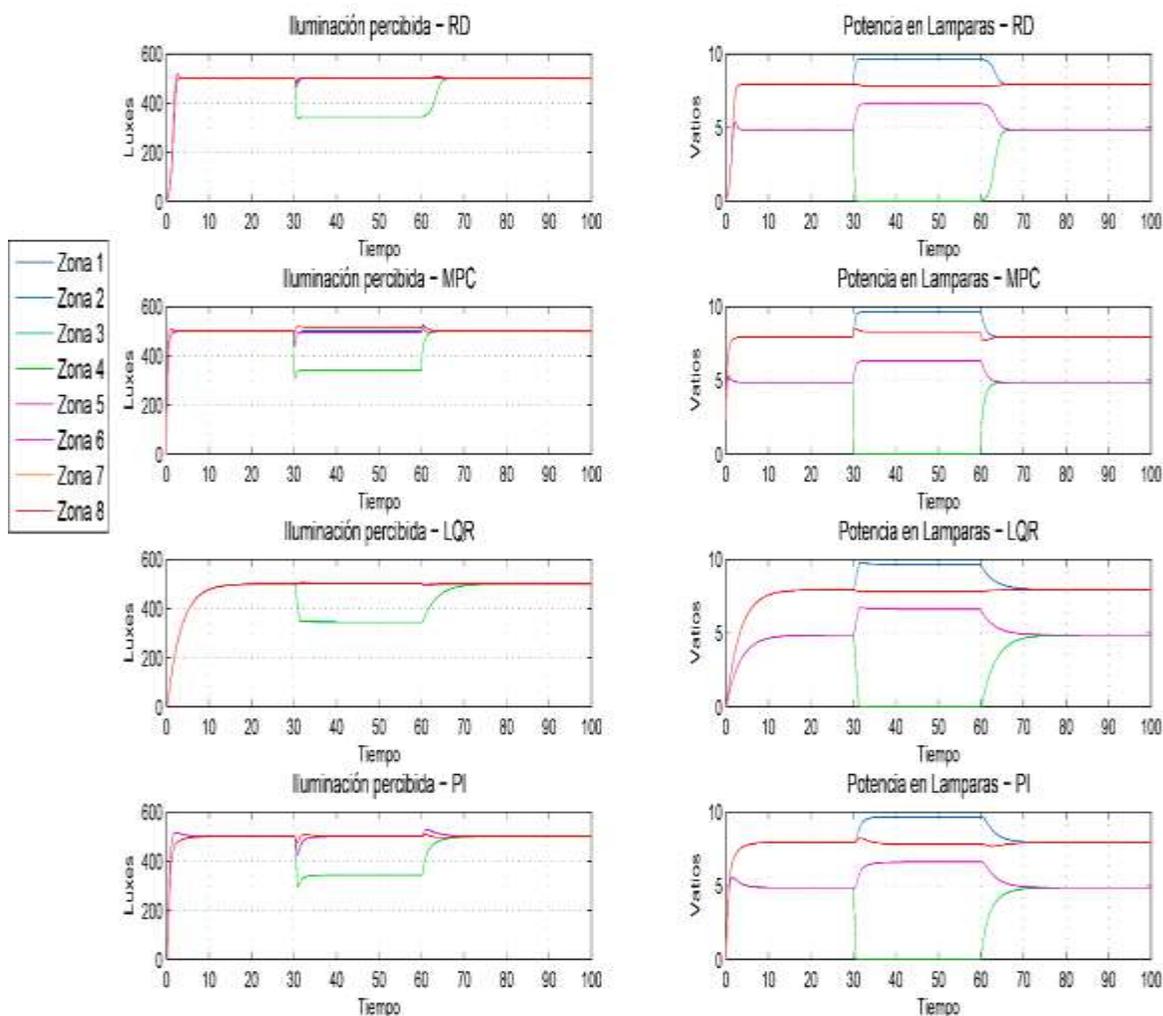


Figura 14 Gráfica de respuesta temporal Ejemplo

Este tipo de gráficas se utilizarán para evidenciar el comportamiento de la acción de control y la iluminación sensada en cada una de las zonas del caso de estudio durante cada prueba. Las gráficas se presentan en dos columnas y cuatro filas, donde la primera columna hace referencia a la iluminación percibida en cada zona, mientras que la segunda columna presenta el comportamiento de la potencia asignada a cada lámpara. Los colores utilizados mantienen la escala de colores descrita en las gráficas de barras acumuladas buscando facilitar la relación entre gráficas.

Gráfica de barras apiladas (ejemplo en Figura 15):

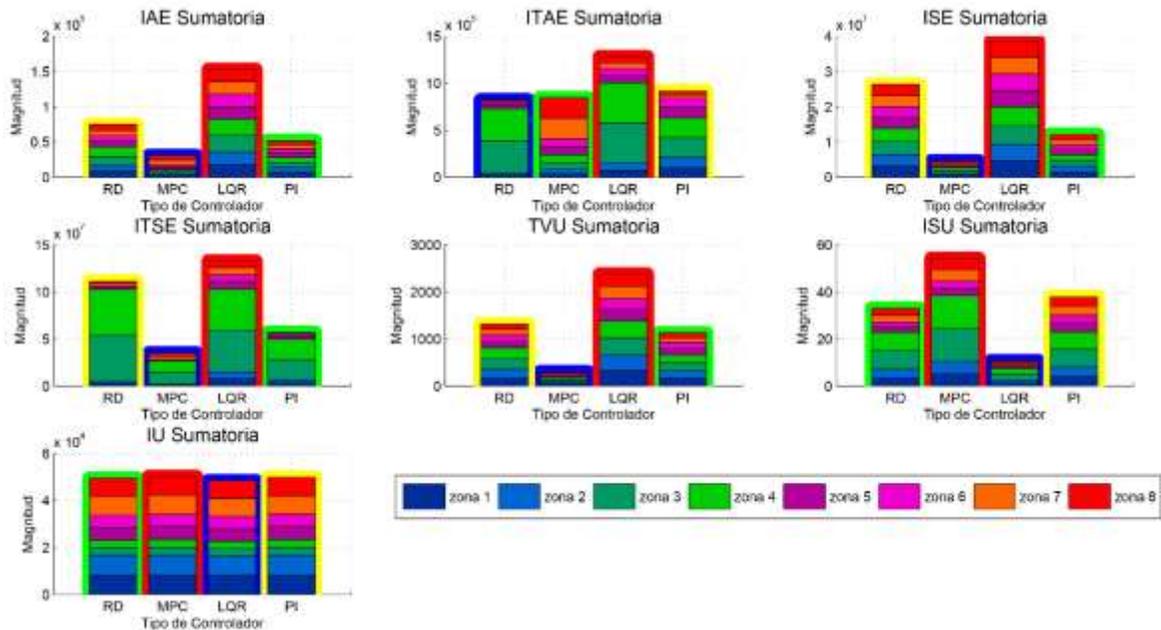


Figura 15 Gráfica de barras apiladas Ejemplo

Teniendo en cuenta que el cálculo de indicadores se hace en cada una de las zonas de iluminación, en este gráfico, cada zona se representa como una barra con un color diferente. El grosor de cada barra es proporcional a la magnitud del indicador analizado.

En conjunto, la magnitud de cada barra apilada (sumatoria de los indicadores obtenidos por zona) es una medida global de desempeño que permite comparar los diferentes controladores utilizados en relación a cada uno los indicadores. Se ha incluido un borde de color a cada barra apilada con el fin de visualizar de forma más fácil el desempeño de cada controlador. En orden ascendente de magnitud, los bordes asumen los colores azul, verde, amarillo y rojo, siendo azul el de menor magnitud y por ende el controlador con mejor desempeño.

Esta gráfica es útil al momento de analizar el desempeño de cada controlador por zonas independientes de una forma más detallada, pero si lo que se desea es tener una visión conjunta del desempeño del controlador en relación a todos los indicadores calculados, la gráfica de radar es una representación más adecuada.

A continuación, se procede a realizar el análisis de desempeño comparativo de los controladores utilizados en cada uno de los escenarios planteados. El proceso propuesto contempla un análisis de desempeño inicial bajo condiciones de energía suficiente en el sistema, y luego un análisis de desempeño bajo condiciones de energía insuficiente. Cada uno de estos momentos contempla a su vez el análisis de los dos regímenes de iluminación (homogénea y no homogénea).

4.4.1. Análisis comparativo Escenario 1. Perdida de presencia en zonas adyacentes

El escenario simula la necesidad de no utilización momentánea de una fracción del espacio iluminado definido por dos lámparas vecinas debido a la ausencia de individuos en dichas zonas.

Análisis en condiciones de Energía Suficiente:

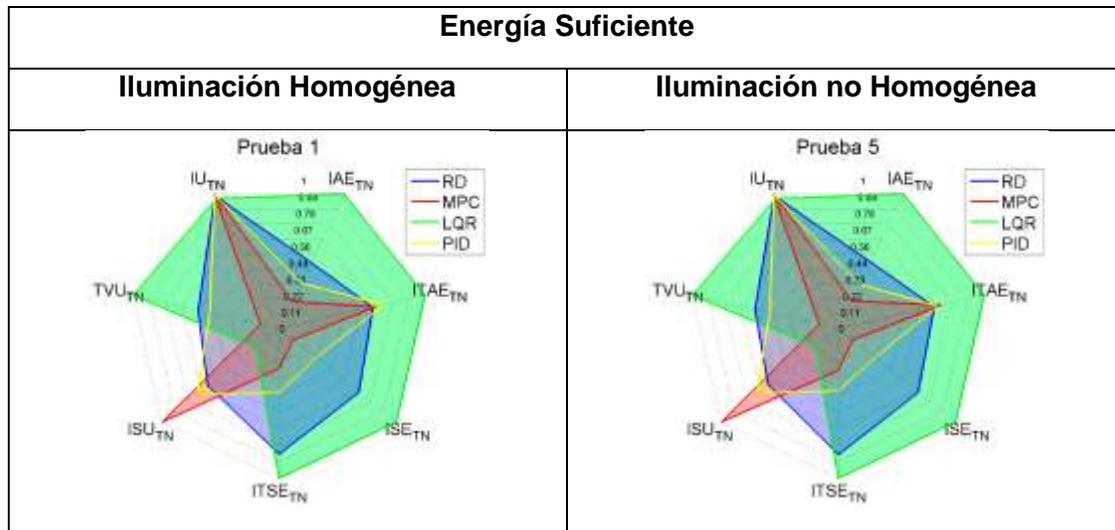


Figura 16 Diagramas de radar de desempeño controladores Escenario 1 con energía suficiente.

En la Figura 16 se puede evidenciar que los controladores que mejor desempeño presentan frente al seguimiento de referencia son los controladores MPC y PID, que muestran en el diagrama de radar indicadores de desempeño menores debido a que reaccionan con mayor velocidad de respuesta. El controlador basado en replicadores dinámicos propuesto ocupa un tercer lugar siendo mejor que el controlador LQR, el cual reacciona más lentamente. Sin embargo, si se hace un especial análisis del medidor ITAE (Anexo 2. Escenario 1, ITAE sumatoria prueba 1 y 5) se puede observar que el controlador basado en replicadores dinámicos presenta la menor magnitud del grupo. Esto quiere decir que, si bien no es el controlador más rápido, en comparación al controlador MPC y PID presenta menor amplitud en los transitorios ante el evento de perdida y recuperación de presencia, así como un mejor seguimiento de las referencias en las zonas que no detectan perdida de presencia. Este comportamiento se puede evidenciar en las respuestas temporales mostradas en la Figuras Figura 17 y Figura 18.

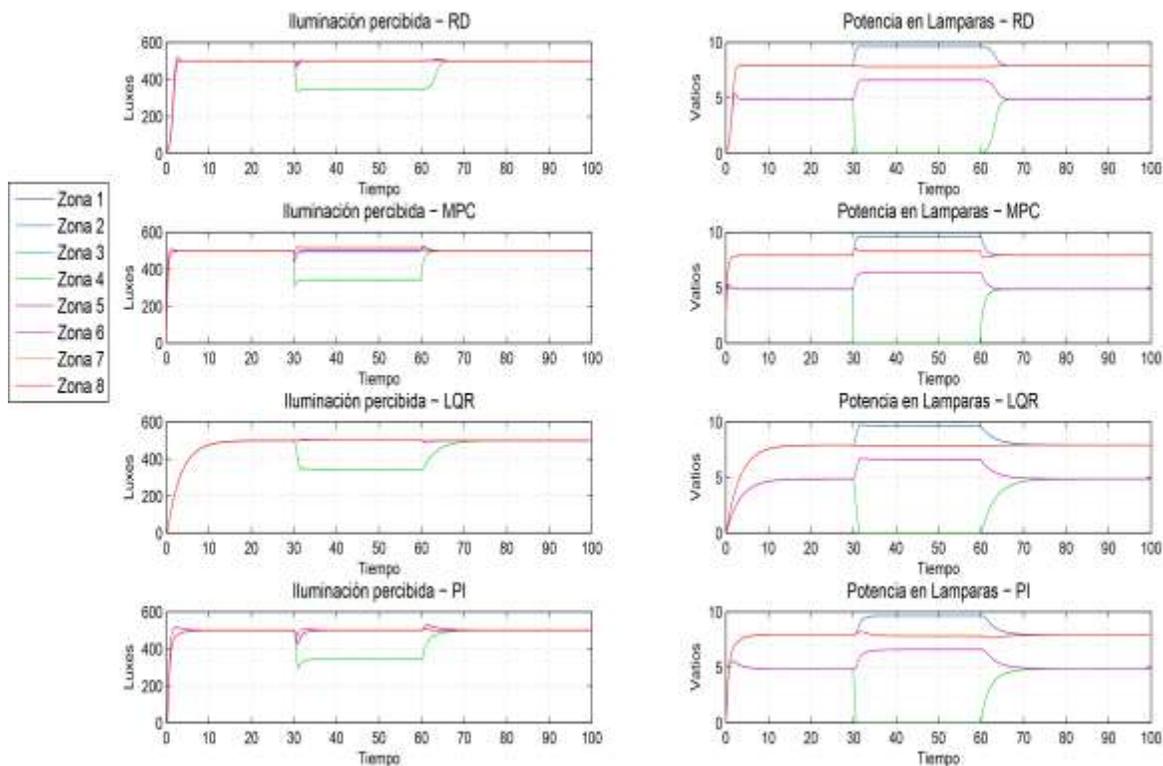


Figura 17 Respuesta temporal Prueba 1. Iluminación Homogénea

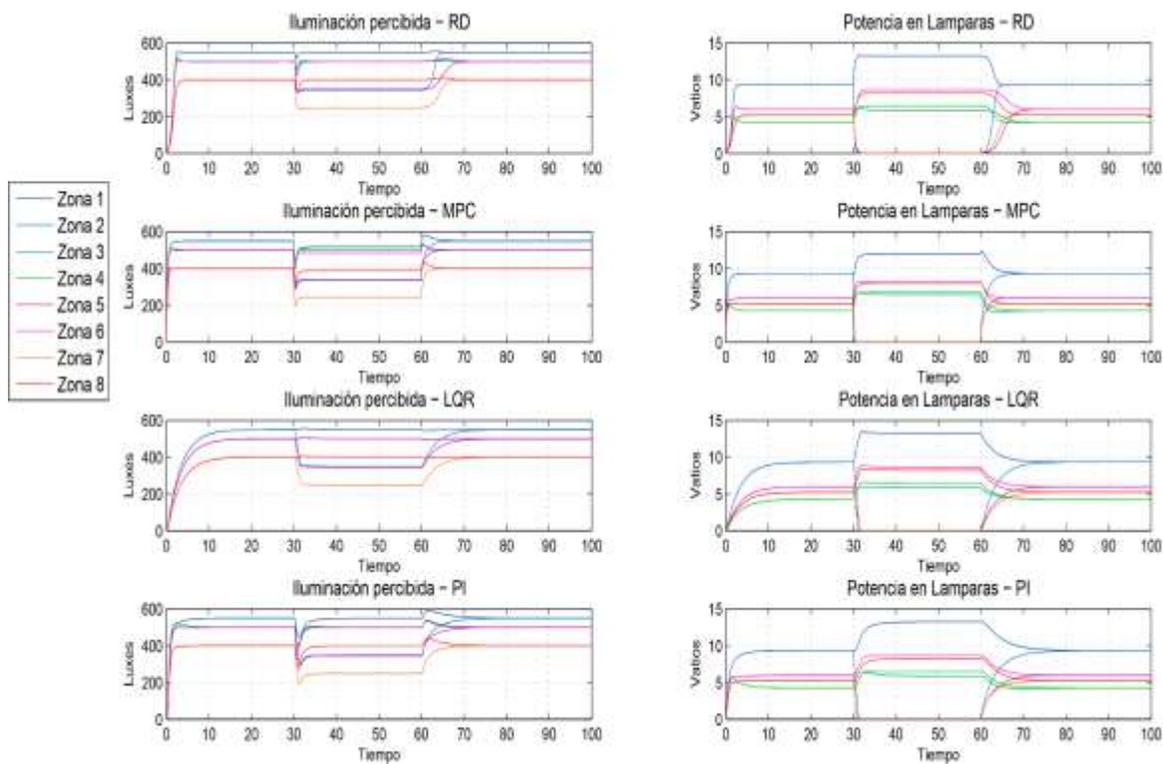


Figura 18 Respuesta temporal Prueba 6. Iluminación no Homogénea

En términos de energía utilizada en la acción de control, todos los controlados usan casi la misma energía (Anexo 2. Escenario 1, sumatoria IU), diferenciándose principalmente por la agresividad de la acción de control, siendo el controlador MPC el más rápido, pero a su vez el que más transitorios presenta. El controlador basado en replicadores dinámicos y el controlador PID presentan un desempeño relativamente similar evidenciando un equilibrio entre velocidad de respuesta y presencia de transitorios. El controlador LQR es el menos agresivo al no presentar transitorios, pero al mismo tiempo el más lento.

En términos generales se podría decir que el controlador MPC es el que mejor desempeño presenta siempre y cuando se cuente con un actuador que permita asegurar la velocidad de repuesta que éste requiere; de no ser así el controlador PID o el controlador basado en replicadores dinámicos propuesto serían dos buenas alternativas de aplicación.

Análisis en condiciones de Energía Insuficiente:

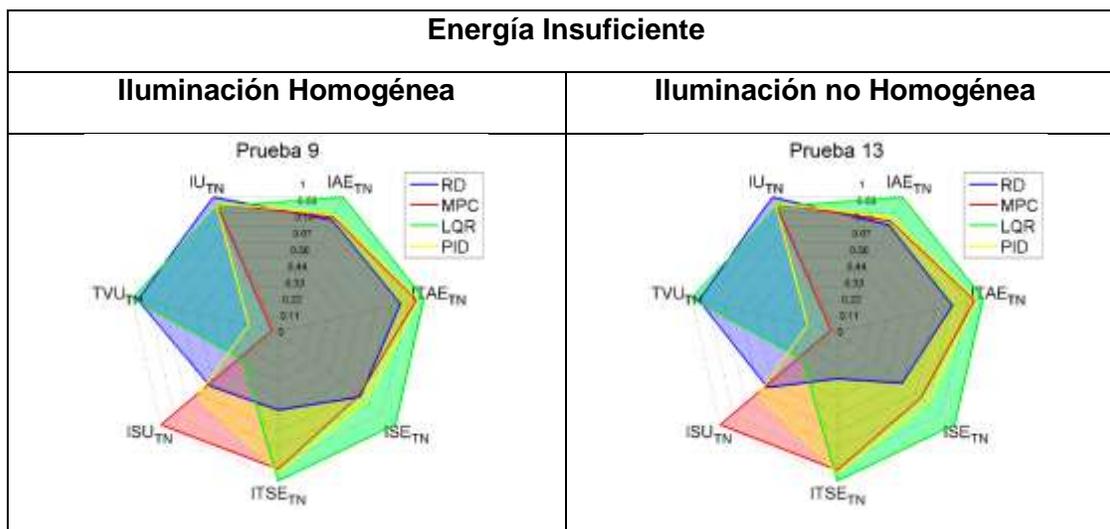


Figura 19 Diagramas de radar de desempeño controladores Escenario 1 con energía insuficiente.

Cuando la energía presente en el sistema es limitada, el controlador basado en replicadores dinámicos es el que mejor desempeño en seguimiento de referencia presenta, sobre todo cuando las condiciones de iluminación requeridas son no homogéneas, como se presenta en la Figura 19. Los controladores MPC, LQR y PID no gestionan de forma adecuada la energía excedente disponible producto de la reducción de iluminación de las lámparas cuya referencia disminuye a cero debido a la pérdida de presencia, esto se debe a que no pueden reasignar potencia a aquellas zonas donde se necesita, habilidad que sí posee el controlador basado en replicadores dinámicos.

Ahora, es necesario resaltar que el controlador basado en replicadores dinámicos en esta condición de energía deficiente, si bien no logra cumplir con la referencia de iluminación requerida, sacrifica esta habilidad en pro de que el conjunto de lámparas

realice un seguimiento más homogéneo siendo esto una fortaleza a nivel de desempeño. Los controladores MPC, PID y LQR concentran el esfuerzo de control en seguir la referencia en cada zona, pero al no tener en cuenta la homogeneidad del conjunto, hace que la iluminación del recinto presente diferencias notables entre zonas. Este comportamiento se puede evidenciar en las Figuras Figura 20 y Figura 21, la barra de desempeño por zona del sistema de replicadores dinámicos presenta una distribución más homogénea en indicadores como IAE, ITAE, ISE e ITSE, siendo el sistema que mejor desempeño tiene tanto en régimen de iluminación homogénea como no homogénea; por otra parte como el sistema de replicadores aprovecha la energía disponible en el sistema de forma eficiente, consume más energía en comparación a los otros algoritmos debido a que durante el evento de perdida de presencia utiliza la energía liberada para tratar de buscar la referencia deseada, lo que a fin de cuentas es una característica beneficiosa en el sistema.

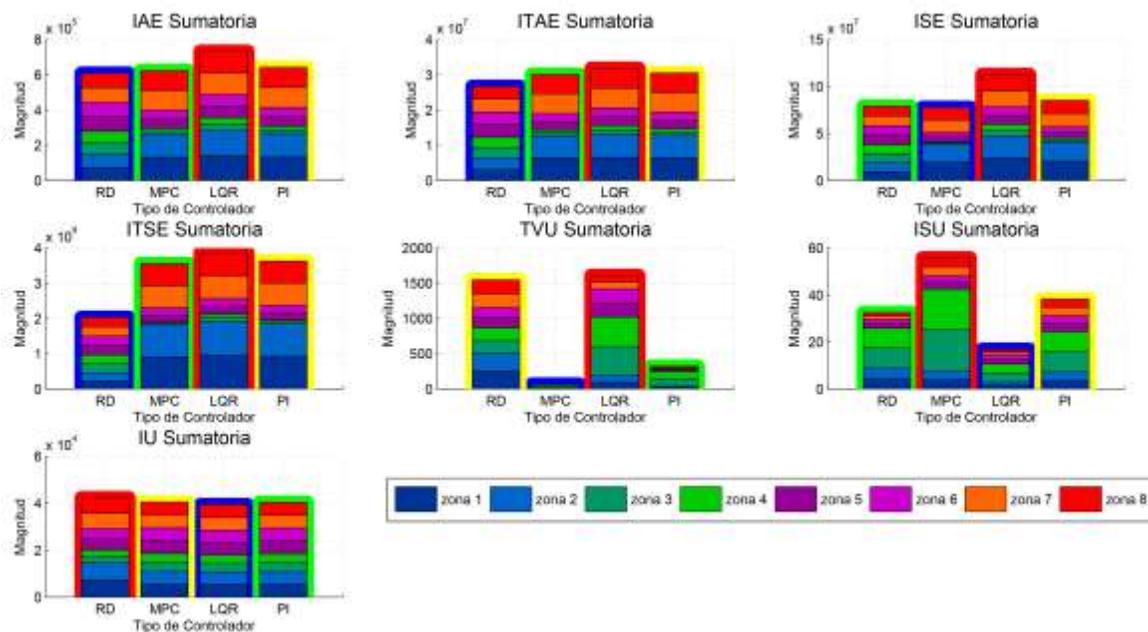


Figura 20 Gráfico de barras apiladas Escenario 1 Perdida de presencia en zonas adyacentes. Condiciones de energía insuficiente e Iluminación homogénea.

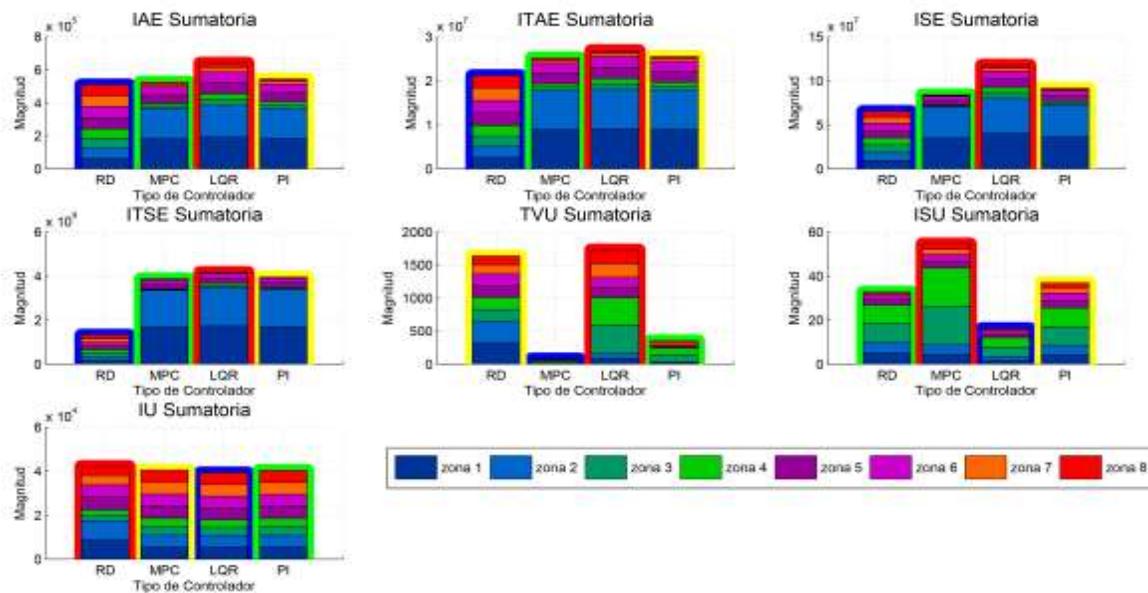


Figura 21 Gráfico de barras apiladas Escenario 1 Perdida de presencia en zonas adyacentes. Condiciones de energía insuficiente e Iluminación no homogénea.

Adicionalmente el controlador basado en replicadores dinámicos es el menos agresivo en referencia a la acción de control, ya que todos los demás presentan cambios bruscos entre los límites de saturación. Este comportamiento se observa en las Figuras Figura 22 y Figura 23.

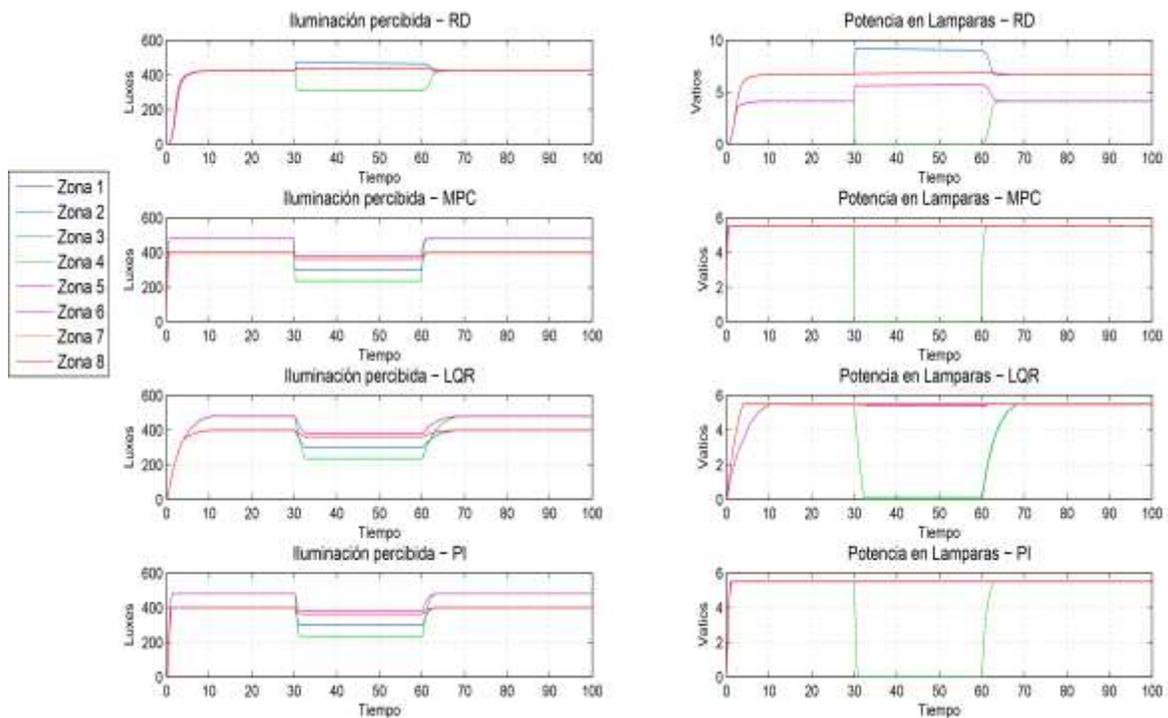


Figura 22 Respuesta temporal Prueba 9. Iluminación Homogénea

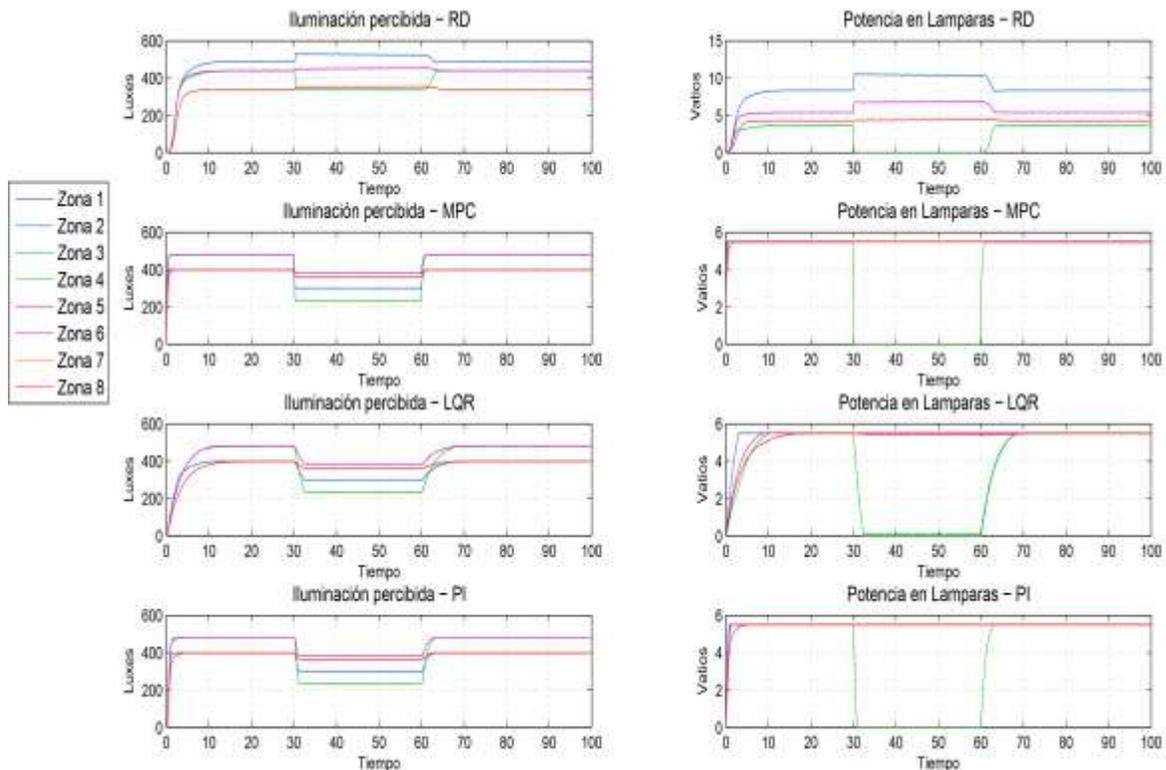


Figura 23 Respuesta temporal Prueba 13. Iluminación no Homogénea

Con respecto al uso de energía, se encuentra que según los indicadores el controlador con menor desempeño es el basado en replicadores dinámicos. Sin embargo, este resultado puede ser explicado de forma favorable ya que al referirse a las gráficas de repuesta temporal se puede observar que mientras los otros controladores se saturan al máximo nivel de potencia permitido por lámpara dado por la restricción de potencia existente, el controlador basado en replicadores dinámicos propuesto tiene la capacidad de gestionar la energía disponible en la red permitiéndole reasignar potencia entre lámparas, y así conseguir un mejor desempeño de seguimiento de referencia. Por otra parte, el único controlador que es capaz de solventar de forma adecuada el evento de pérdida de presencia es el controlador basado en replicadores dinámicos propuesto.

Se puede concluir entonces que, en este escenario bajo condiciones de energía insuficientes, el controlador basado en replicadores dinámicos presenta el mejor desempeño gracias a su habilidad de asignación dinámica de recursos en su estructura de red, permitiendo un comportamiento en conjunto mucho más adecuado usando una acción de control poco agresiva.

4.4.2. Análisis comparativo Escenario 2. Perdida de presencia en zonas no adyacentes

El segundo escenario simula la necesidad de no utilización momentánea de una fracción del espacio iluminado, en una situación definida por la ausencia de personas en tres zonas, de las cuales 2 son adyacentes mientras que la tercera lámpara se encuentra separada de las dos primeras. El objetivo del escenario es evidenciar la capacidad de respuesta de los controladores ante eventos de perdida de presencia en zonas alejadas una de otra.

Análisis en condiciones de Energía Suficiente:

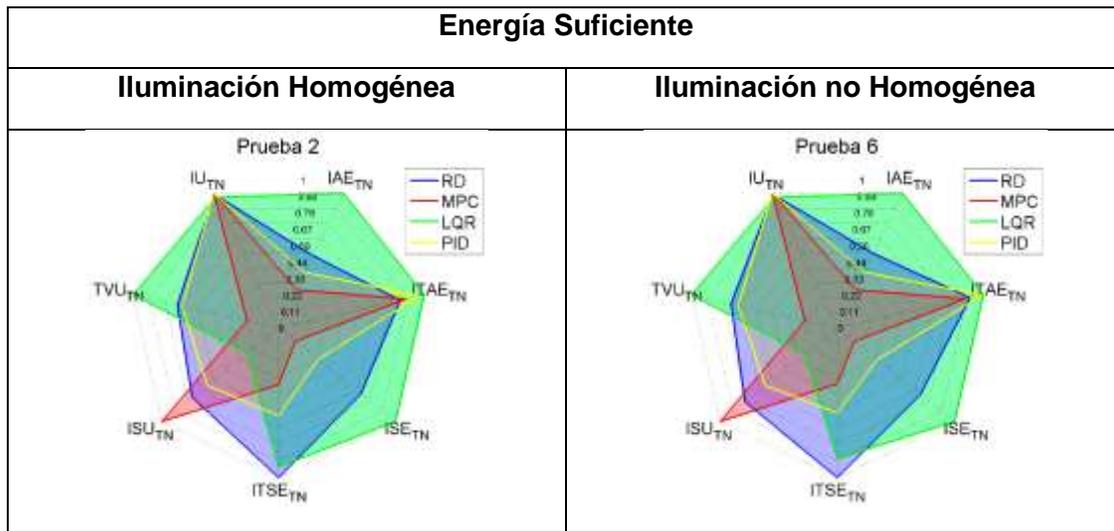


Figura 24 Diagramas de radar de desempeño controladores Escenario 2 con energía suficiente.

Teniendo en cuenta que las condiciones de prueba son similares al escenario 1, los resultados de desempeño en la Figura 22, con respecto al seguimiento de referencia y el uso de energía no cambian drásticamente. El comportamiento de los controladores en este escenario y condiciones de disponibilidad de energía, mantiene las dinámicas presentes en el escenario 1, aunque las zonas de iluminación que detectan perdida de presencia no sean adyacentes. Lo dicho anteriormente se puede evidenciar en las gráficas temporales mostradas en las Figuras Figura 25 y Figura 26 y en el Anexo 2, Escenario 2.

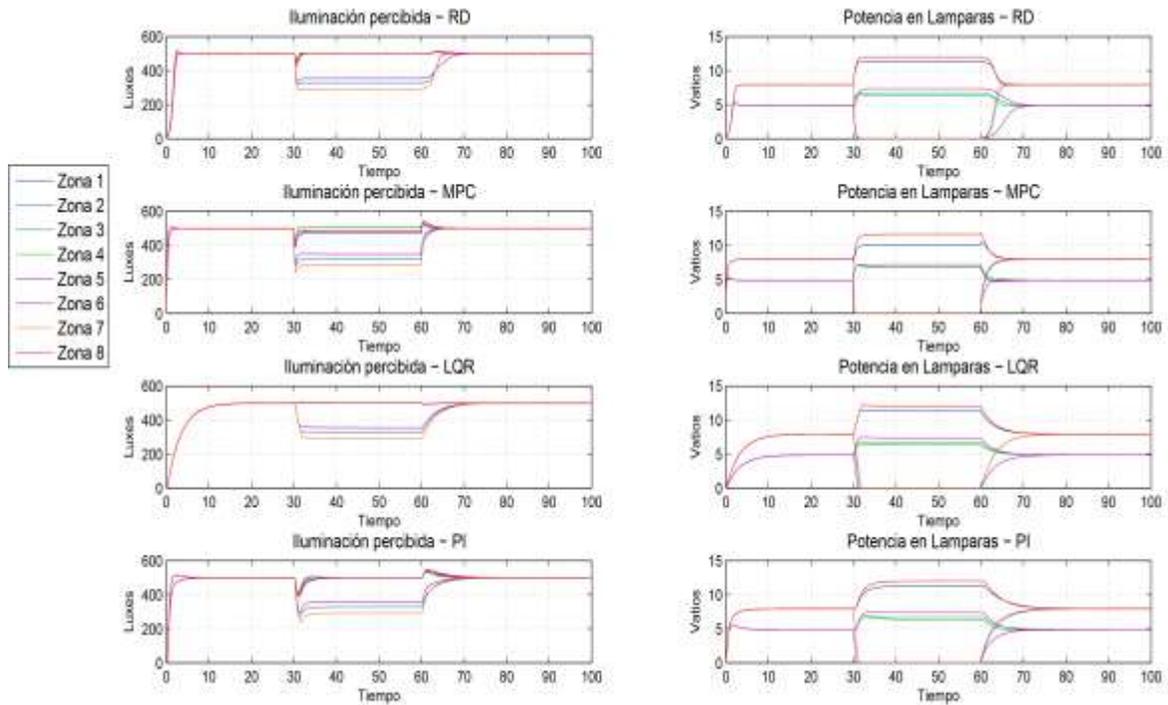


Figura 25 Respuesta temporal Prueba 2. Iluminación Homogénea

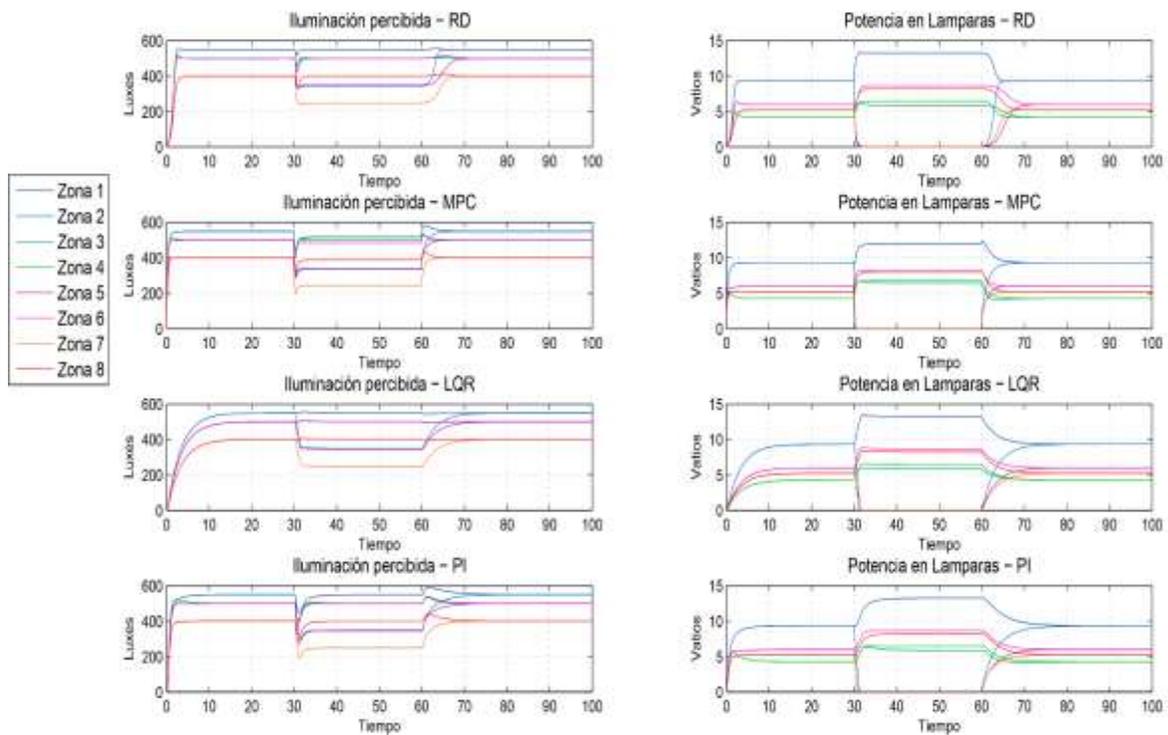


Figura 26 Respuesta temporal Prueba 6. Iluminación no Homogénea

Análisis en condiciones de Energía Insuficiente:

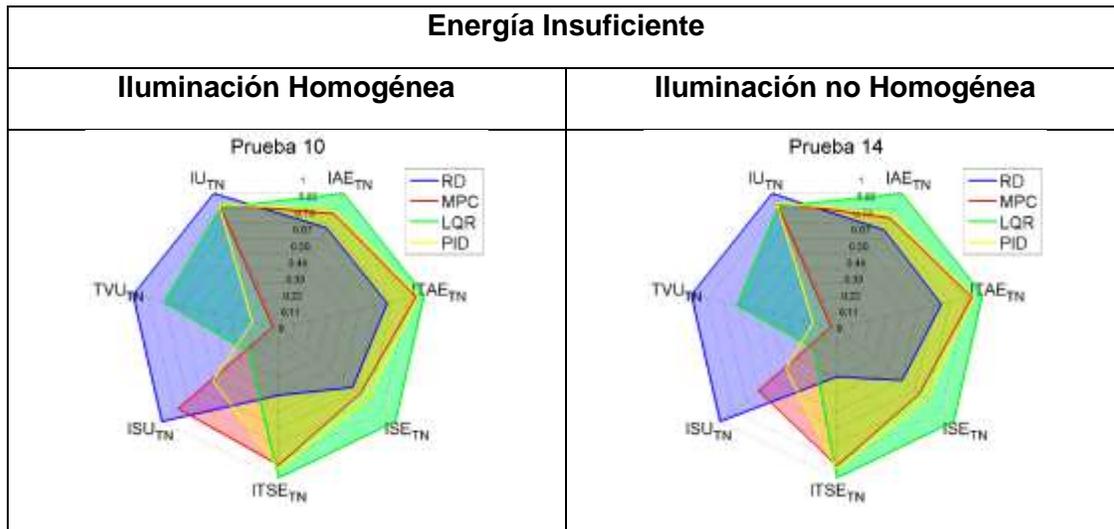


Figura 27 Diagramas de radar de desempeño controladores Escenario 2 con energía insuficiente.

El desempeño frente a seguimiento de referencia en este escenario bajo condiciones de energía insuficiente, es similar al obtenido en el escenario 1. La Figura 27 muestra nuevamente la habilidad que tiene el sistema de replicadores dinámicos para reasignar recursos, factor que le da ventajas en este tipo de situaciones.

En las Figuras Figura 28 y Figura 29, se puede evidenciar como el sistema de replicadores dinámicos propuesto permite una mayor homogeneidad en el seguimiento de referencias a nivel general, presentando un mayor consumo de energía debido a que aprovecha de mejor manera la energía liberada por las zonas que se apagan durante el evento.

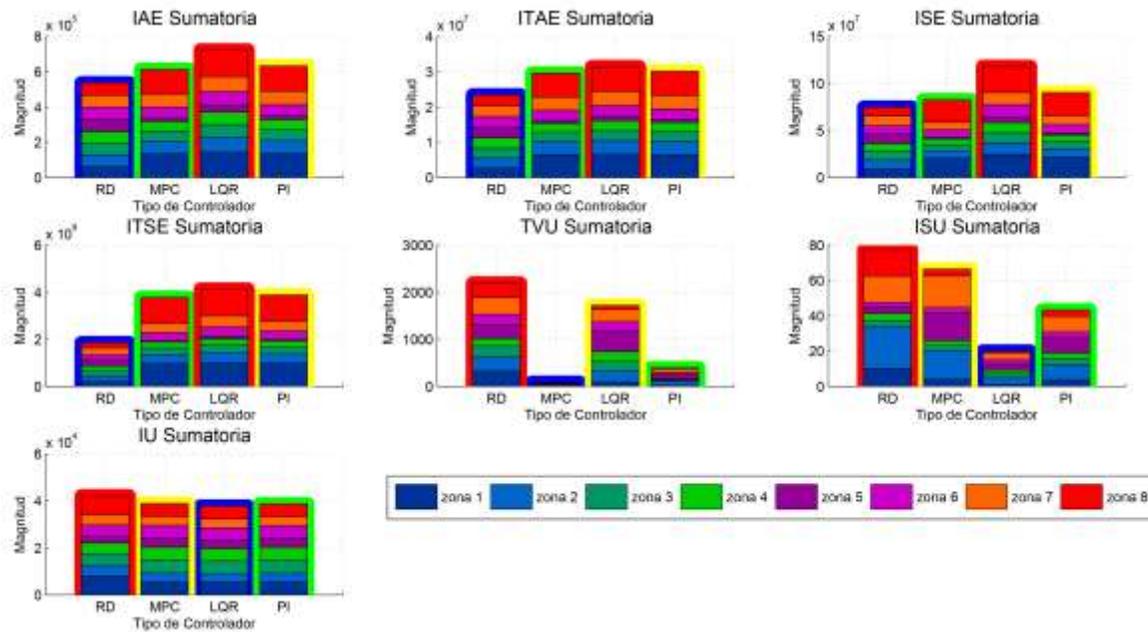


Figura 28 Gráfico de barras apiladas Escenario 2 Perdida de presencia en zonas no adyacentes. Condiciones de energía insuficiente e Iluminación homogénea.

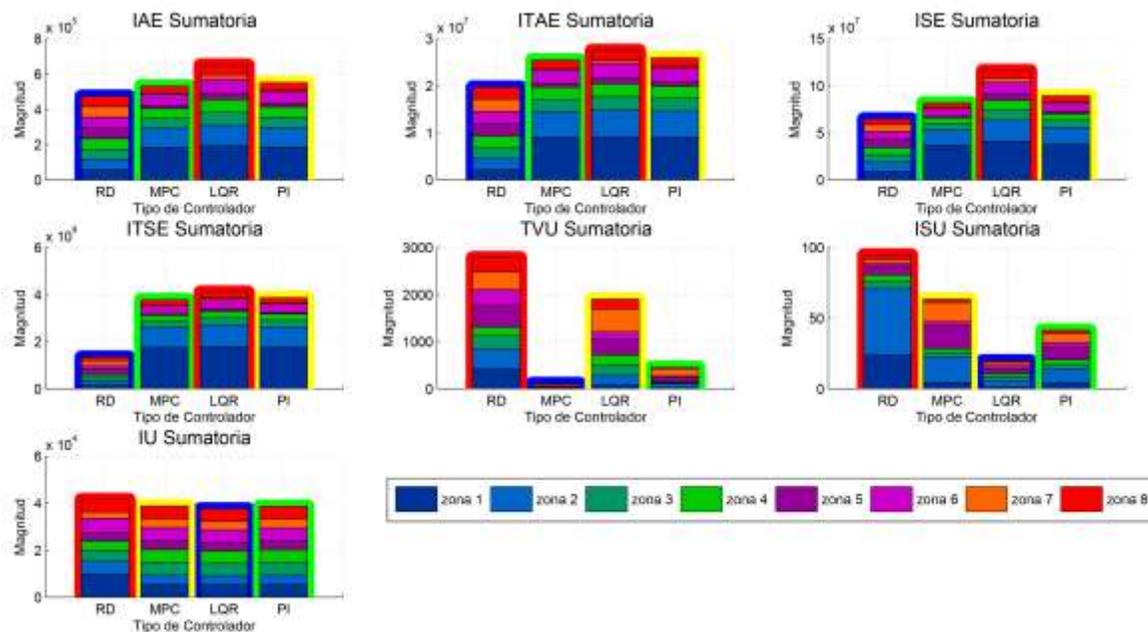


Figura 29 Gráfico de barras apiladas Escenario 1 Perdida de presencia en zonas no adyacentes. Condiciones de energía insuficiente e Iluminación no homogénea.

Se puede hacer una observación adicional, y es que debido a que en este caso son tres (3) las lámparas que detectan ausencia de individuos, durante el evento de perdida de presencia habría más energía disponible en el sistema para ser

reasignada con el fin de cumplir de mejor manera los requerimientos de iluminación de las zonas que si tienen individuos. Por esta razón, los medidores relacionados con la magnitud de la acción de control alcanzan un mayor valor. A continuación, las Figuras Figura 30 y Figura 31 presentan las dinámicas temporales de iluminación sensada y acción de control con el fin de ilustrar lo dicho anteriormente.

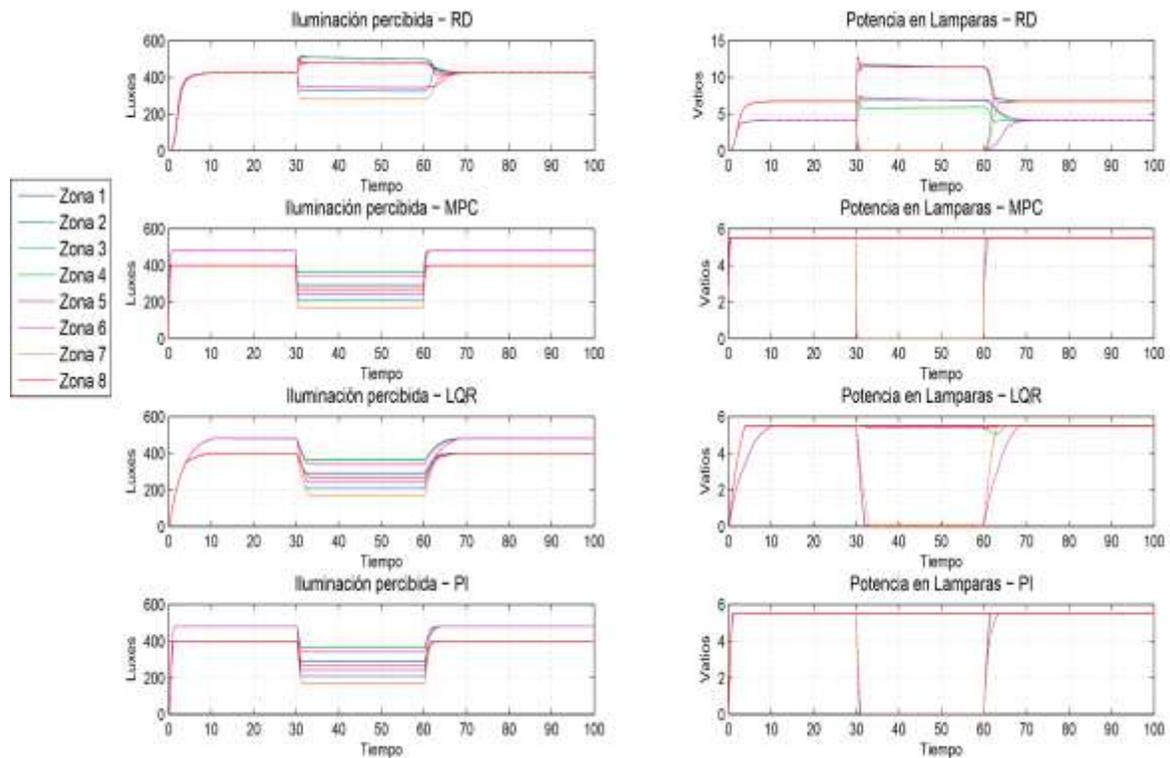


Figura 30 Respuesta temporal Prueba 10. Iluminación Homogénea

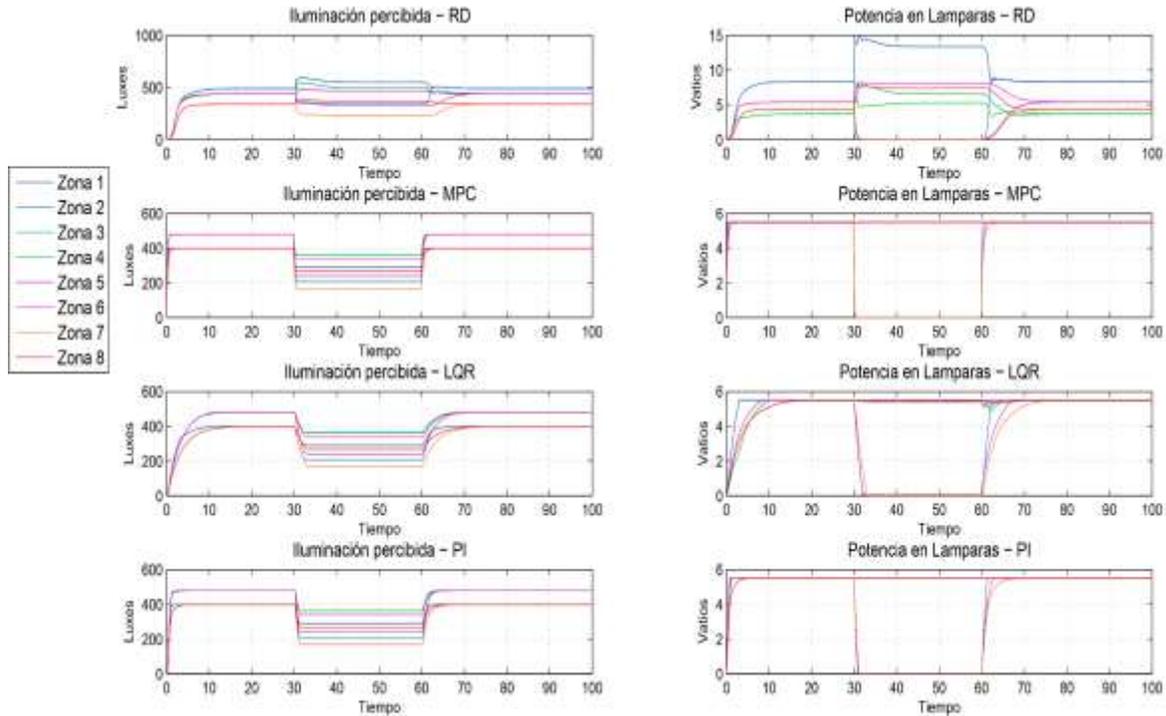


Figura 31 Respuesta temporal Prueba 14. Iluminación no Homogénea

El haber planteado este escenario de prueba tiene un objetivo adicional dirigido a evaluar y evidenciar el efecto que tiene la inclusión de la restricción de potencia mínima en agentes reales y ficticios del controlador basado en replicadores dinámicos (Sección 3.2.3 y 3.2.6). Al no permitir que una zona se apague en su totalidad, se evita que el grafo de conexión se fragmente y por ende se puede lograr la reasignación de potencia entre los agentes del sistema, haciendo de este controlador una opción competitiva frente a otros controladores. Este es uno de los aportes importantes de este trabajo ya que se brinda una alternativa de solución al problema de creación de islas dentro de un grafo en las cuales los recursos disponibles se limitan a aquellos que hayan quedado dentro de cada componente.

Teniendo en cuenta esto, se puede concluir que el controlador basado en replicadores dinámicos es el que mejor desempeño presenta en condiciones de energía insuficiente, para este escenario.

4.4.3. Análisis comparativo Escenario 3. Activación momentánea de zonas adyacentes.

Este escenario busca evaluar el comportamiento de los controladores frente a la ocupación momentánea y parcial del recinto caso de estudio, partiendo de una condición de ausencia total de personas en el ambiente de iluminación.

Análisis en condiciones de Energía Suficiente:

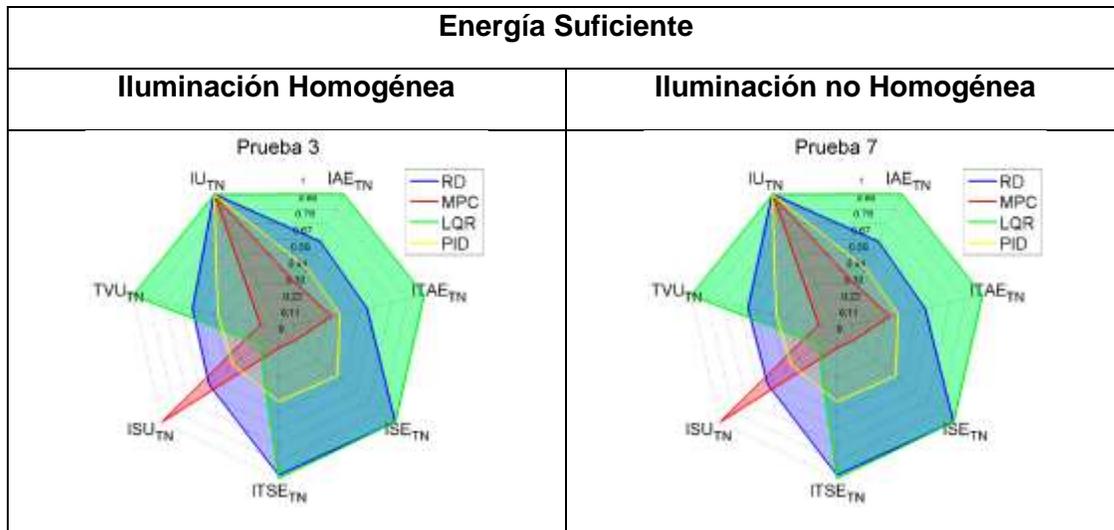


Figura 32 Diagramas de radar de desempeño controladores Escenario 3 con energía suficiente.

Como se puede observar en la Figura 32, el controlador MPC es el que mejor desempeño presenta frente al seguimiento de referencia, seguido del controlador PID. El controlador basado en replicadores dinámicos ocupa el tercer puesto nuevamente, presentando magnitudes de ISE y ITSE mayores en comparación a los escenarios anteriores.

La respuesta temporal de cada uno de los controladores se presenta en las Figuras Figura 33 y Figura 34, donde el controlador con dinámicas poblacionales, ante eventos de este tipo, responde ligeramente más lento que los controladores MPC y PID. Sin embargo, para efectos prácticos la repuesta sigue siendo aceptable, estando por encima del LQR.

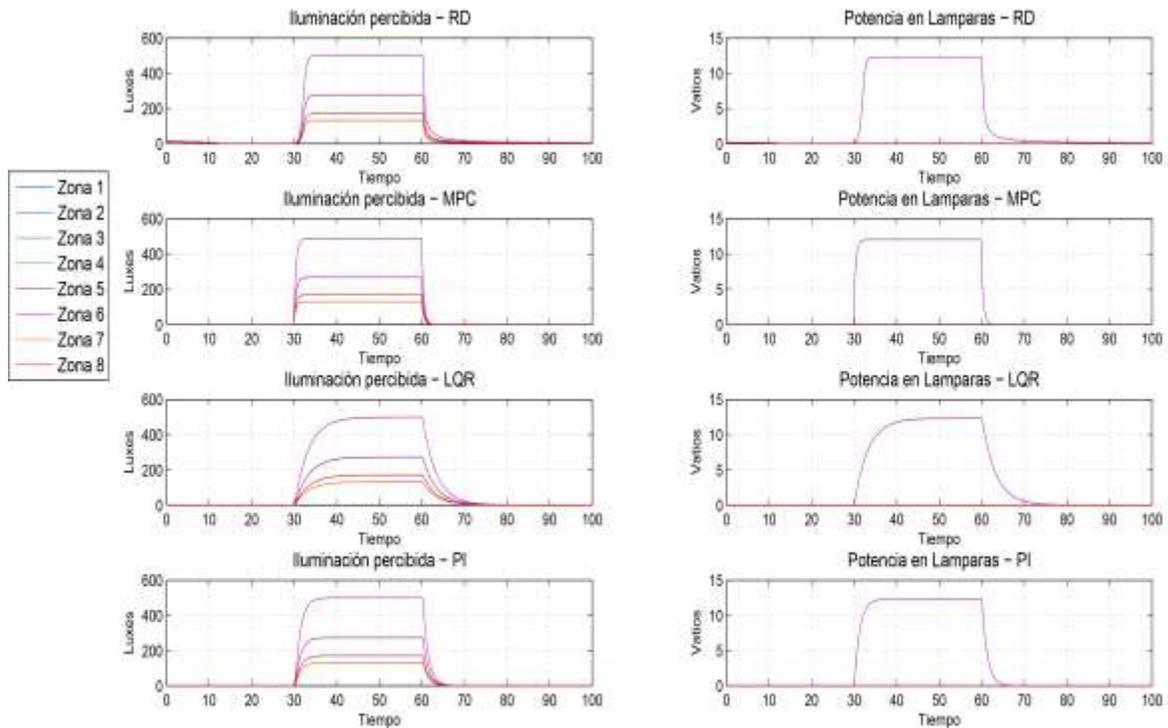


Figura 33 Respuesta temporal Prueba 3. Iluminación Homogénea

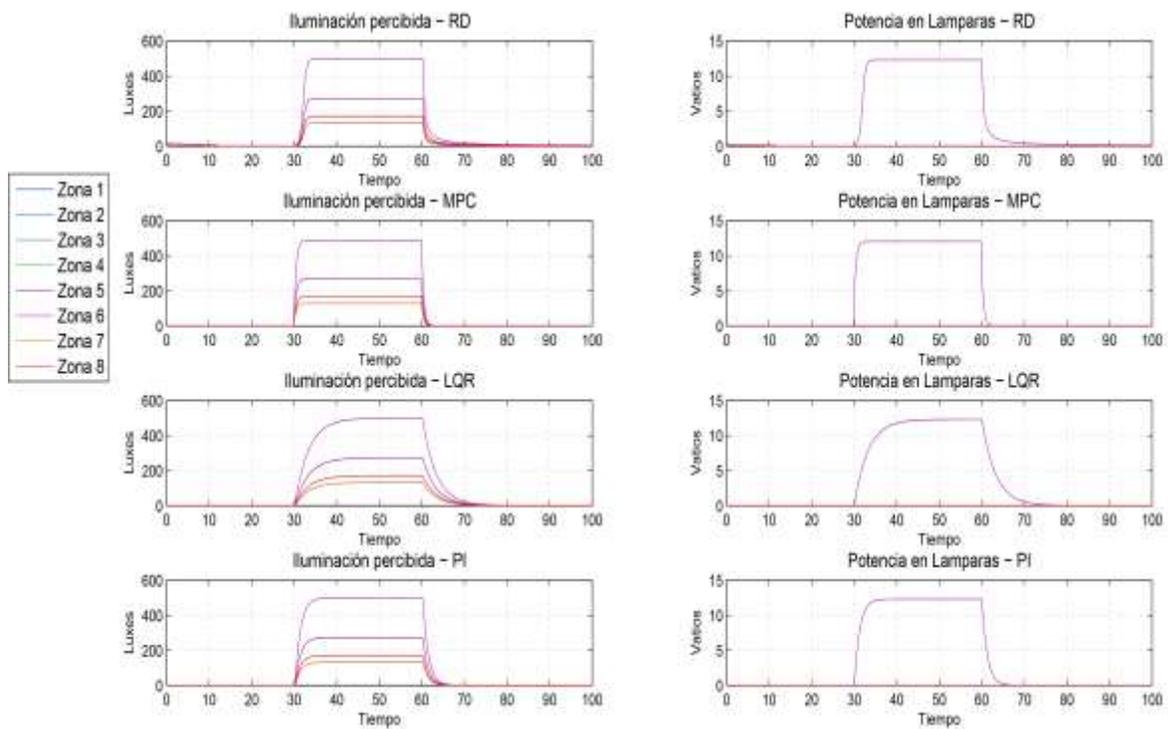


Figura 34 Respuesta temporal Prueba 7. Iluminación no Homogénea

Haciendo el análisis de nivel de uso de energía, los cuatro controladores utilizan casi la misma cantidad (medidor IU Anexo 2. Escenario 3. Energía Suficiente), pero el controlador PID presenta la acción de control menos agresiva.

Se podría decir entonces que, para efectos de este escenario, el controlador PID es el que mejor desempeño presenta y se podría explicar este resultado en el entendido que solo son dos las zonas que tendrían requerimiento de seguimiento de referencia. Además, al no haber mayor influencia de las demás zonas, una solución de seguimiento individual es lo más adecuado.

Análisis en condiciones de Energía Insuficiente:

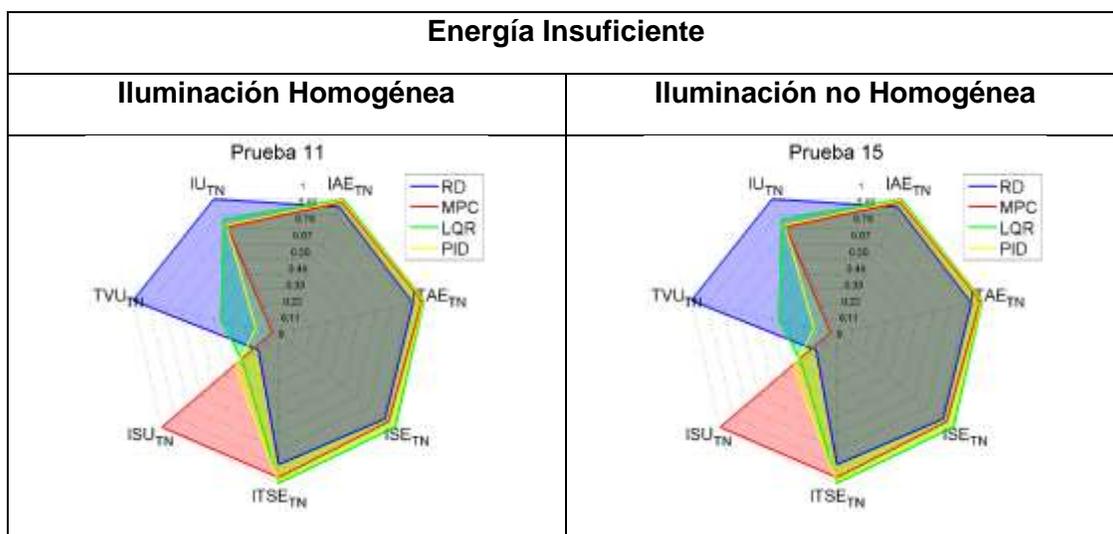


Figura 35 Diagramas de radar de desempeño controladores Escenario 3 con energía insuficiente.

Se puede observar que, en términos generales, el controlador PID presenta la menor área en el gráfico de radar de la Figura 35, pero es claro que el controlador basado en replicadores dinámicos presenta un mejor desempeño en relación al seguimiento de referencia (IAE, ITAE, ISE).

Si se analizan las repuestas temporales presentadas en las Figuras Figura 36 y Figura 37, se encuentra que en condiciones de energía insuficiente el controlador basado en replicadores dinámicos presenta una dinámica de búsqueda de referencia creciente a diferencia de los otros controladores de la prueba. Esto se debe a que la restricción de potencia de los controladores MPC, PID y LQR está dada por un máximo de potencia por lámpara de $1/8$ de la potencia disponible, de tal forma que al encender las lámparas 4 y 6 a este valor máximo, la iluminación que se consigue no es la suficiente para lograr la referencia.

Por otra parte, el controlador basado en replicadores dinámicos no tiene una restricción de potencia máxima por lámpara ya que su valor depende de la dinámica

de asignación de recursos del algoritmo. En este sentido, se puede evidenciar que el controlador trata de buscar la referencia durante el evento de presencia de individuos, pero lo hace muy lentamente con una pendiente creciente. Esto muestra que la estrategia de no fragmentación del grafo con la imposición de una restricción de potencia mínima beneficia la asignación de recursos cuando hay varios agentes activos. En cambio, en el caso de tener muchos agentes inactivos se genera una reasignación de recursos lenta. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el lapso de tiempo del evento es solo de 30 segundos, por lo que en un tiempo más largo, el error de seguimiento podría llegar a ser menor. Con el fin de ilustrar lo descrito anteriormente las Figuras 29 y 30 presentan la repuesta temporal de los diferentes controladores.

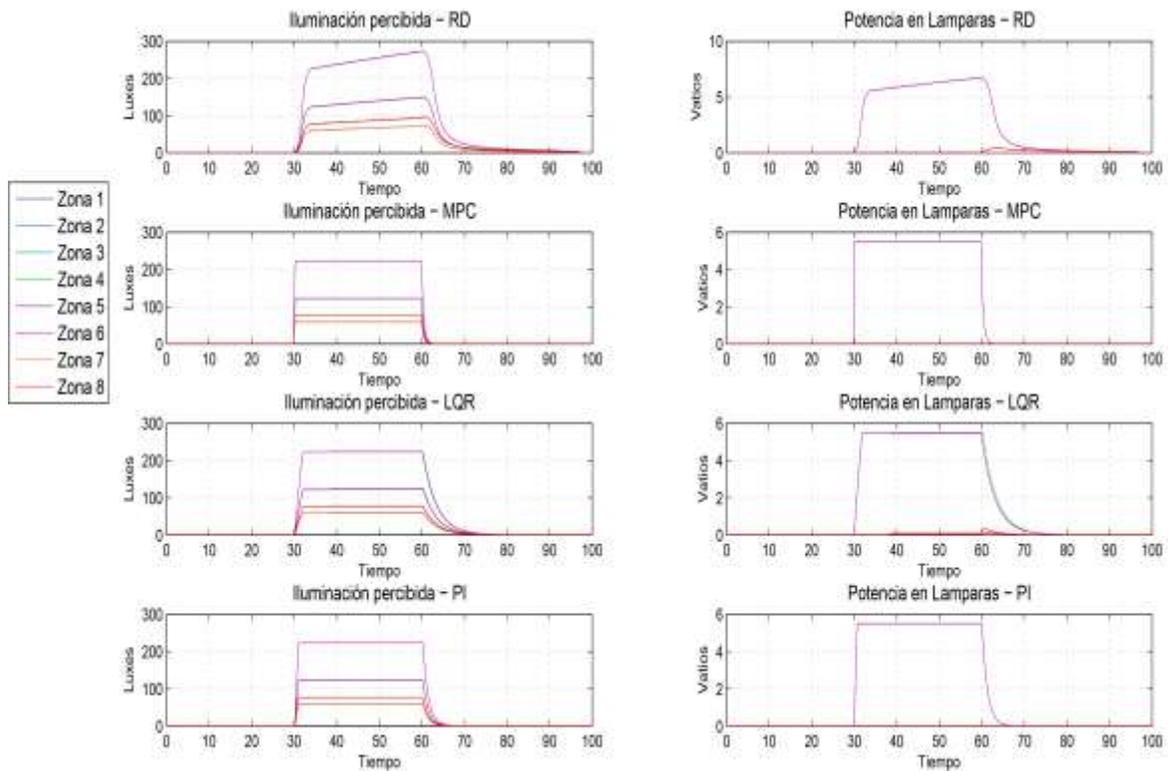


Figura 36 Respuesta temporal Prueba 11. Iluminación Homogénea

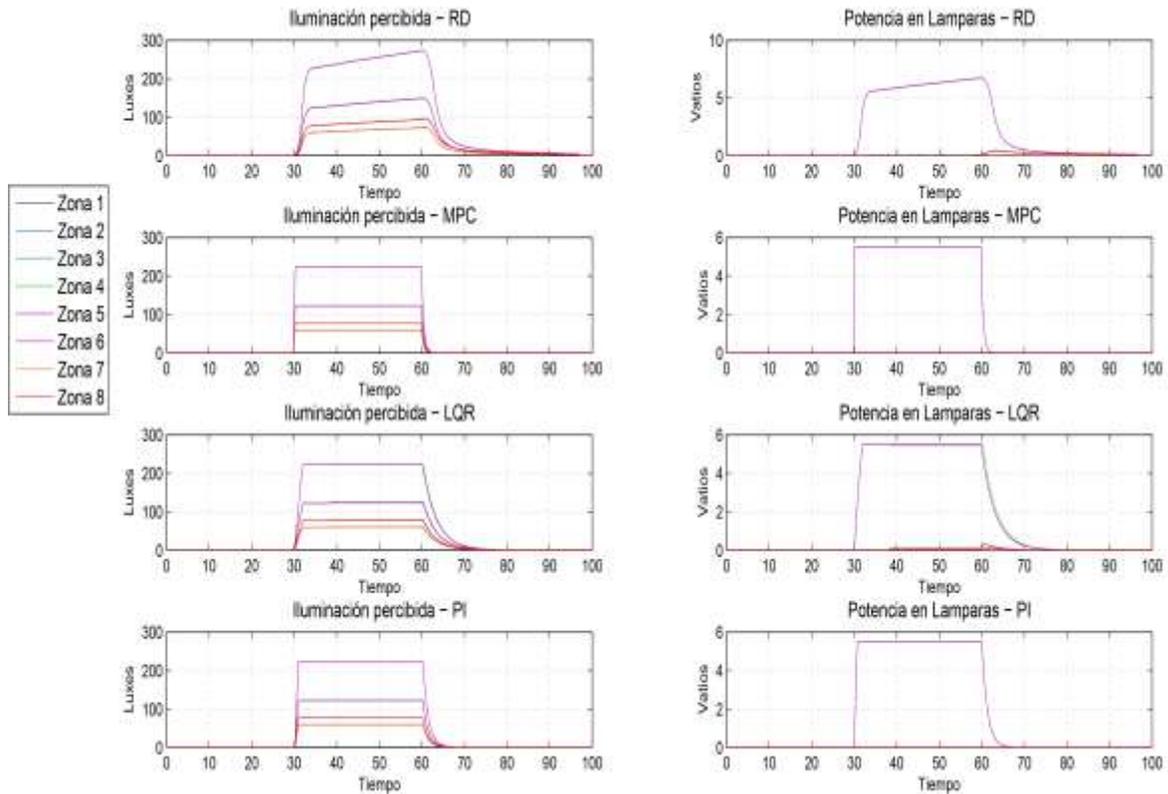


Figura 37 Respuesta temporal Prueba 15. Iluminación no Homogénea

De esta manera se podría decir entonces que el controlador basado en replicadores dinámicos presenta un mejor desempeño en este tipo de escenarios, haciendo la aclaración de que la velocidad de la repuesta dependería de la cantidad de agentes activos en el proceso.

3.2.1 Análisis comparativo Escenario 4. Ocupación progresiva.

El último escenario de prueba busca evaluar el comportamiento de los diferentes controladores en el caso de una ocupación progresiva del recinto a iluminar.

Análisis en condiciones de Energía Suficiente:

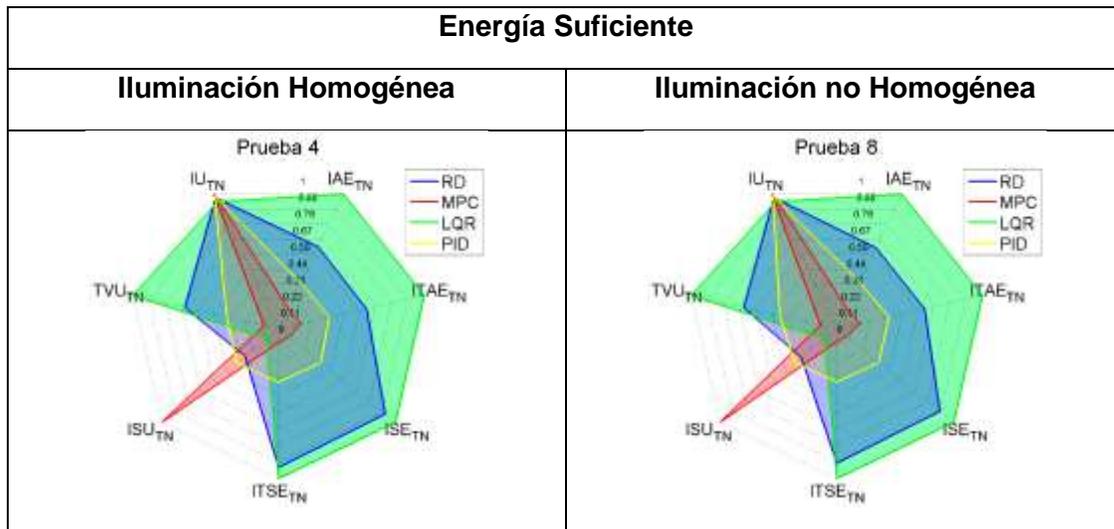


Figura 38 Diagramas de radar de desempeño controladores Escenario 4 con energía suficiente.

La Figura 38 presenta el desempeño de los controladores en este escenario, con una tendencia similar al que se ha encontrado en los escenarios 1 y 2. Se nota que los controladores MPC y PID son los de mejor desempeño a nivel de seguimiento de referencia gracias a su velocidad de repuesta. Por su parte, el controlador basado en replicadores dinámicos nuevamente ocupa el tercer puesto dejando en último lugar al controlador LQR.

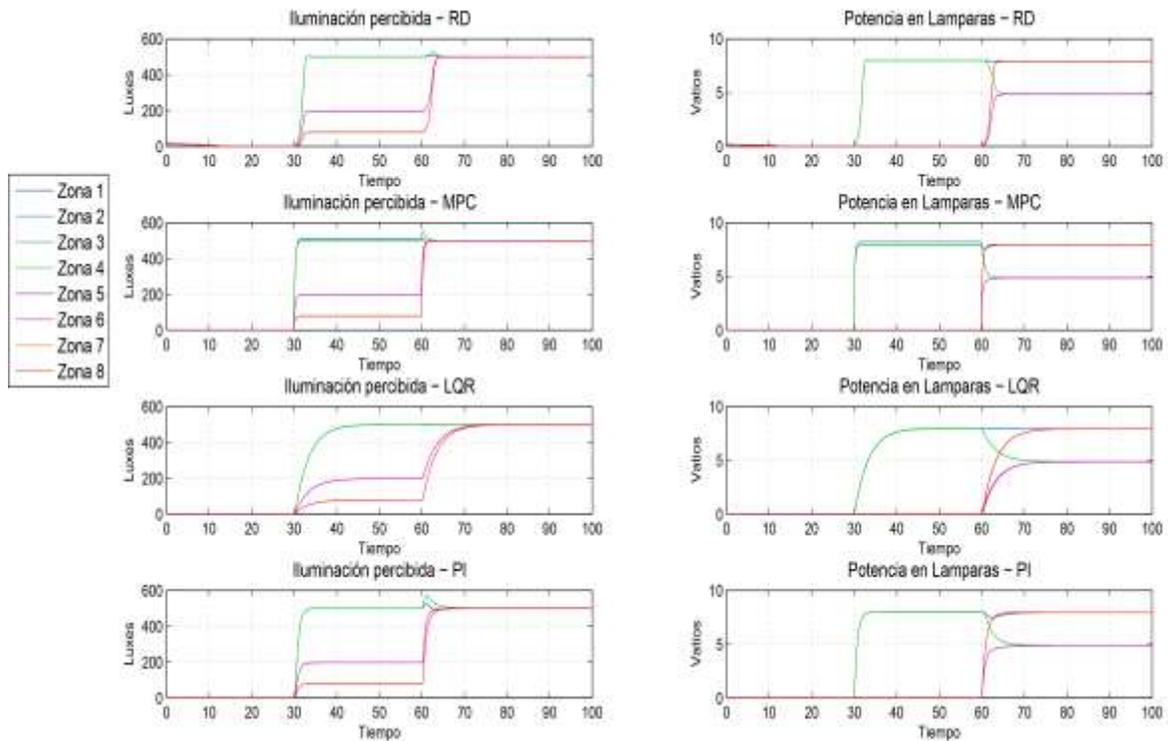


Figura 39 Respuesta temporal Prueba 4. Iluminación Homogénea

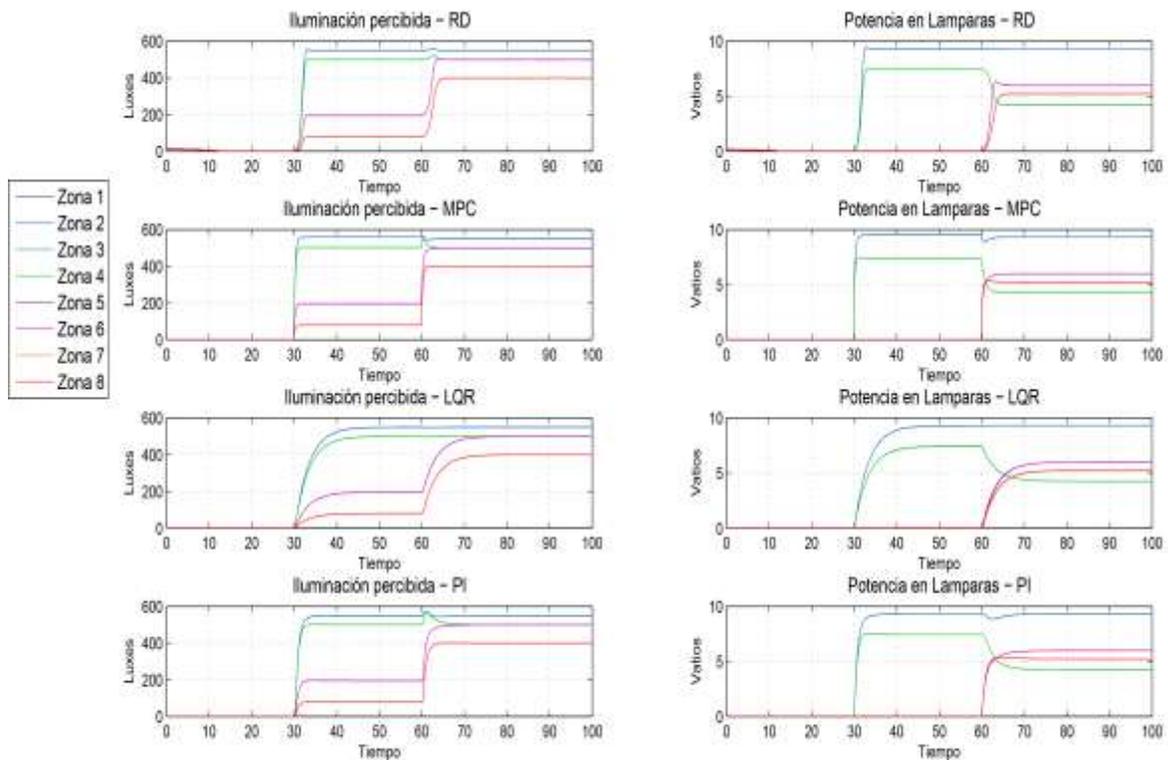


Figura 40 Respuesta temporal Prueba 8. Iluminación no Homogénea

En relación al esfuerzo de control, las Figuras Figura 39 y Figura 40 de respuesta temporal muestran que el controlador menos agresivo es el LQR, siendo la causa de su baja velocidad de respuesta. Por otra parte, el controlador basado en replicadores dinámicos es el que menor amplitud de transitorios presenta al momento de los eventos de presencia de individuos y el que tiene los segundos mejores índices en relación a uso de energía como se puede ver en las Figuras Figura 41 y Figura 42.

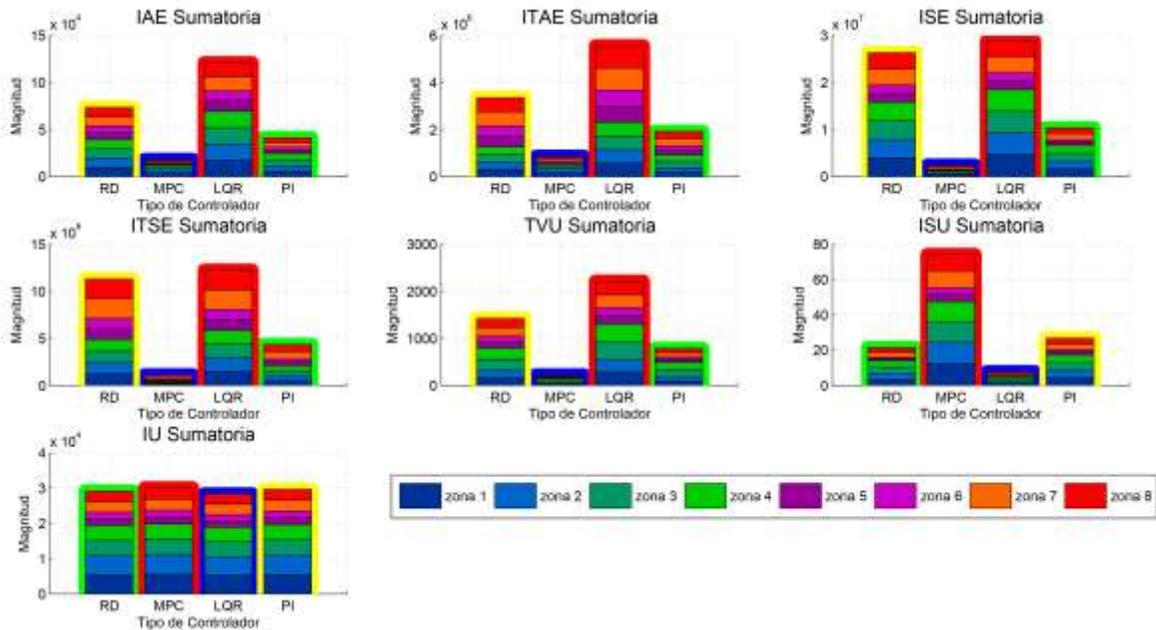


Figura 41 Grafico de barras apiladas Escenario 4 Ocupación progresiva. Condiciones de energía suficiente e Iluminación homogénea.

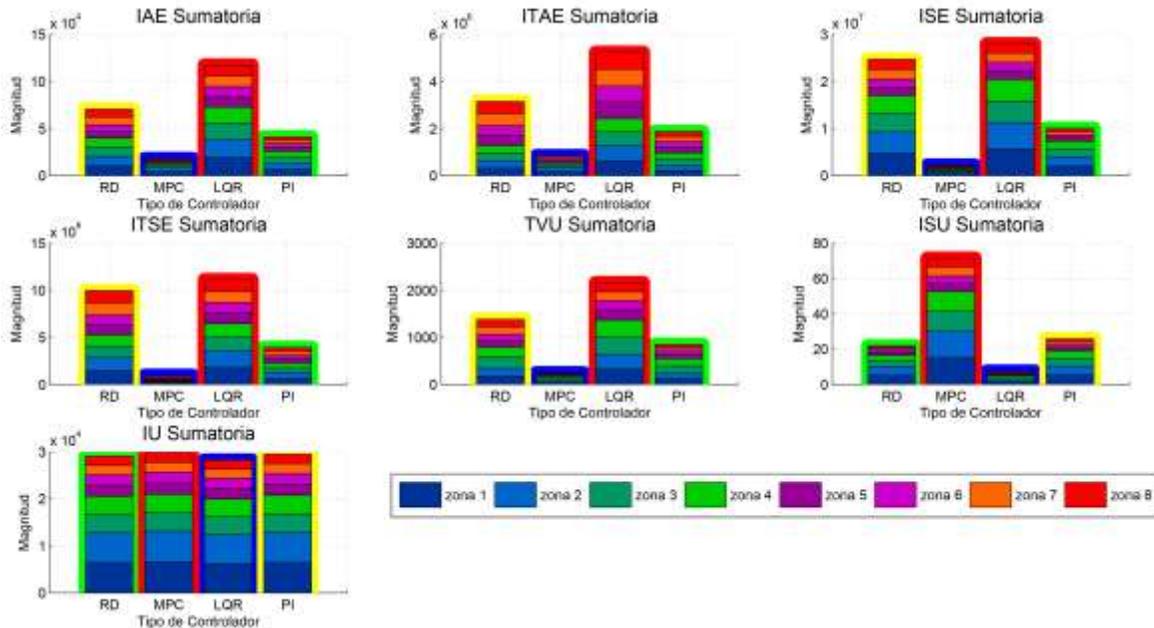


Figura 42 Grafico de barras apiladas Escenario 4 Ocupación progresiva. Condiciones de energía suficiente e Iluminación no homogénea.

Análisis en condiciones de Energía Insuficiente:

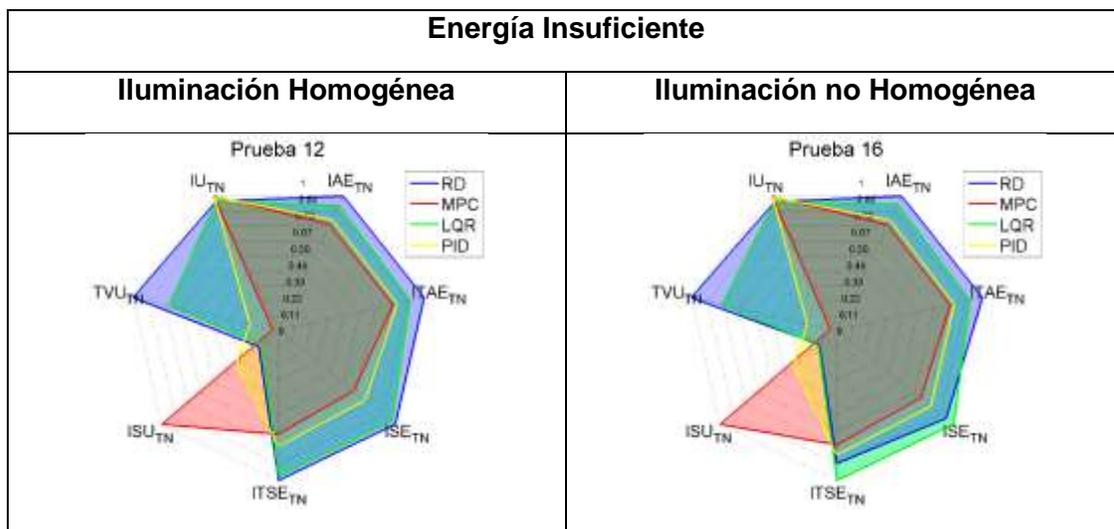


Figura 43 Diagramas de radar de desempeño controladores Escenario 4 con energía insuficiente.

En condiciones de energía insuficiente, según el diagrama de radar de las Figuras Figura 40 y Figura 43, parecería que el controlador basado en replicadores dinámicos es el que menor desempeño tendría, pero esta interpretación no está completa si no se analiza el comportamiento temporal del controlador. Las Figuras Figura 44 y Figura 45 muestran como el controlador basado en replicadores dinámicos, ante la presencia de individuos, presenta un comportamiento igual al que

presentó en el escenario 3. Es decir, busca la referencia de manera progresiva pero lenta, a diferencia de los otros controladores que se saturan. El tener la posibilidad de asignar la energía disponible de forma lenta, pero sin una restricción de potencia máxima preestablecida en cada lámpara, brinda a este controlador una ventaja frente a los demás. Adicionalmente, es el controlador menos agresivo a nivel de acción de control, cualidades que hacen de esta alternativa la mejor opción en este caso.

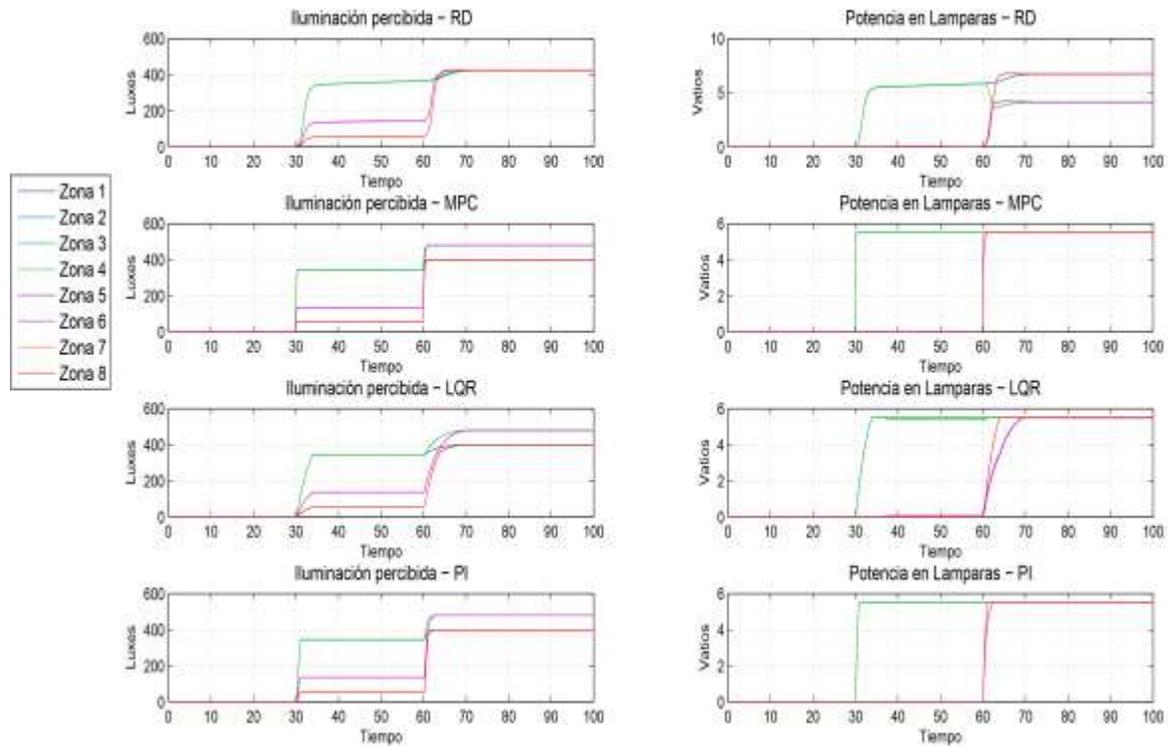


Figura 44 Respuesta temporal Prueba 12. Iluminación Homogénea

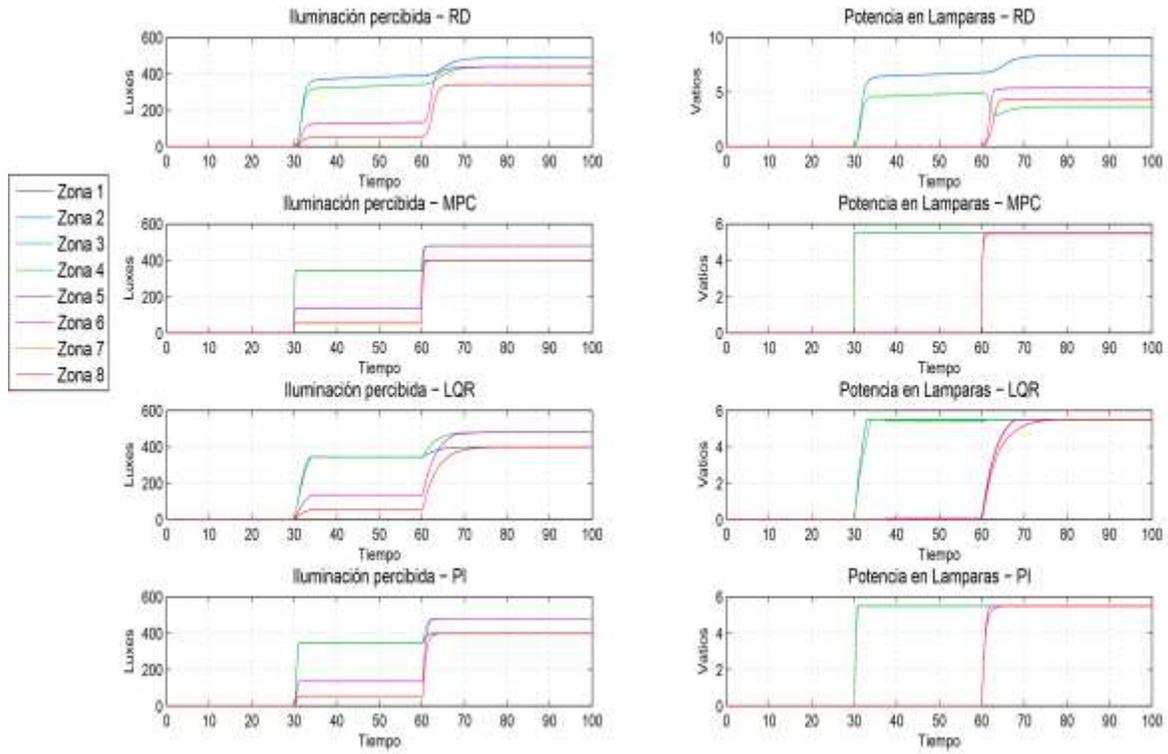


Figura 45 Respuesta temporal Prueba 16. Iluminación no Homogénea

Una vez finalizado el análisis por escenario, a modo de resumen gráfico se presenta la siguiente tabla, con el objetivo de tener una percepción global del desempeño de los controladores comparados en cada una de las pruebas.

	Energía Suficiente		Energía Insuficiente	
	Iluminación Homogénea	Iluminación no Homogénea	Iluminación Homogénea	Iluminación no Homogénea
Escenario 1				
	Escenario 2			
Escenario 3				
	Escenario 4			

Tabla 8 Resumen Gráfico de Resultados de Desempeño – Gráficos de Radar

5. Conclusiones y trabajo futuro

El trabajo realizado adapta un algoritmo de control de iluminación basado en replicadores dinámicos locales brindándole la capacidad de activar o desactivar zonas de iluminación dependiendo de un parámetro de detección de presencia de individuos. Esto solventa los inconvenientes que la desactivación de agentes reales puede generar en un sistema de este tipo en un escenario que comparte información local y tiene bajo costo computacional.

5.1. Conclusiones

La función de aptitud propuesta en el presente trabajo consigue que el algoritmo basado en replicadores dinámicos locales sea capaz de reaccionar a evento de tipo booleano, en este caso ausencia/presencia de individuos, permitiendo que los agentes reales del sistema encargados de la iluminación logren simular su desactivación. Esto se logra mediante la inclusión de una restricción de barrera de potencia mínima que evita alcanzar el estado de equilibrio trivial de potencia cero, condición en la cual un agente real deja de participar en el sistema de replicadores.

Se presenta una solución simple a la necesidad de incluir una restricción de potencia mínima en los agentes ficticios que evita su desactivación total. La solución no modifica la función de aptitud del agente ficticio por lo que su estructura no cambia, demostrando que, a nivel discreto, se puede hacer una asignación de potencia a nivel local que es fácilmente implementable.

A su vez, se presenta una alternativa de desactivación de agentes reales y ficticios que no implica la fragmentación del grafo de conexión del sistema. La inclusión de las restricciones de potencia mínima permite mantener la conexión del grafo todo el tiempo evitando la creación de islas que restringen la asignación de recursos en el sistema de forma adecuada.

Factores como la utilización de un modelo de iluminación que aproxima el valor de la iluminancia percibida en una zona y el hecho de que un agente real solo dispone de información local, complican la definición una restricción de barrera dada por una función de aptitud continua. Sin embargo, la inclusión de una restricción de barrera controlada por una banda de histéresis de potencia mínima, presenta una solución eficaz a este problema.

Se demuestra que una topología de conexión entre agentes reales tipo anillo y complementada con una conexión de agentes reales y ficticios de uno a uno, permite conservar las bondades de asignación de recursos propia de los sistemas de replicadores dinámicos sin necesidad de canales de comunicación entre agentes ficticios. Esto, a nivel de implementación, permite utilizar el menor número de canales de conexión entre agentes reales lo que simplificaría un proceso de implementación.

Se presenta una propuesta de replicador dinámico local discreto en (19) basada en la aproximación de Euler de derivada, la cual cumple con la condición de invarianza del simplex característica de los sistemas de replicadores dinámicos. La nueva expresión depende únicamente de información local permitiendo ser fácilmente implementable en un dispositivo digital.

Frente a las pruebas de desempeño, el controlador MPC es el que mejores resultados presenta en la mayoría de los escenarios que cuentan con energía suficiente, seguido del controlador PID. Sin embargo, se debe resaltar que en el caso de la solución basada en MPC es una alternativa compleja computacionalmente debido a que es un algoritmo centralizado que requiere un cálculo matricial grande y que además requiere información de todos los nodos del sistema todo el tiempo. Por otra parte, la solución basada en PID, aunque es una solución totalmente descentralizada y que no requiere de información de otras zonas, no presenta un buen desempeño cuando las condiciones de disponibilidad de energía son insuficientes.

El controlador LQR, si bien cumple con el propósito de seguimiento de referencia, en la mayoría de los escenarios es el controlador que menor desempeño presenta. Por otra parte, al ser un controlador centralizado, se convierte en una alternativa no tan eficiente frente a los resultados de los demás controladores, aunque la facilidad de implementación por realimentación de estados le da una ventaja.

En este sentido la solución basada en replicadores dinámicos sensible a detección de presencia de individuos se convertiría en una alternativa atractiva ya que es descentralizada, trabaja únicamente con información local en un grafo de conexión simple, y tiene un buen desempeño en asignación de recursos cuando no hay energía suficiente. Adicionalmente, en condiciones de energía suficiente, el algoritmo propuesto evidencia un uso de energía muy similar a los otros controladores propuestos, pero un comportamiento más equilibrado frente a la acción de control en términos de agresividad.

5.2. Trabajo futuro

Con el fin de evaluar el sistema de mejor manera, se podría implementar el sistema en un entorno real con el fin de evidenciar la influencia de factores como el retardo en comunicación, la velocidad de repuesta de los actuadores, las limitaciones en medida de los sistemas de sensado de iluminación, y la velocidad de procesamiento del algoritmo. Asimismo, es importante evaluar estos factores en el correcto desempeño del algoritmo planteado cuando se programe la estrategia en un sistema embebido.

De igual forma, se requiere analizar si una implementación de este tipo de sistemas permite asegurar un ahorro de energía significativo que viabilice su implementación en un ambiente real. El ahorro se sugiere dado que el algoritmo desarrollado gestiona el uso innecesario de energía cuando hay ausencia de individuos en una determinada zona, manteniendo niveles adecuados y confortables en las demás.

Es necesario realizar un análisis de estabilidad del sistema debido a que la función de aptitud y la forma en que se incluyen las restricciones de frontera son de tipo no lineal. Aunque el desempeño probado en distintos escenarios es adecuado, se pueden presentar condiciones de operación en la cuales el algoritmo no converja.

Si el resultado de lo expuesto anteriormente fuese satisfactorio, un trabajo pendiente sería el desarrollo de un prototipo modular patentable y fácil de configurar que permita definir redes de lámparas optimizadoras de energía.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Data tables – Data & Statistics - IEA.” [Online]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables?country=WORLD&energy=Balances&year=2017>. [Accessed: 20-Jul-2020].
- [2] “Población urbana (% del total) | Data.” [Online]. Available: <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.URB.TOTL.IN.ZS>. [Accessed: 20-Jul-2020].
- [3] “BALANCE ENERGETICO COLOMBIANO - BECO.” [Online]. Available: <https://www1.upme.gov.co/InformacionCifras/Paginas/BalanceEnergetico.aspx>. [Accessed: 20-Jul-2020].
- [4] “BECOCONSULTA.” [Online]. Available: <https://www1.upme.gov.co/InformacionCifras/Paginas/BECOCONSULTA.aspx>. [Accessed: 20-Jul-2020].
- [5] F. Viani, A. Polo, P. Garofalo, N. Anselmi, M. Salucci, and E. Giarola, “Evolutionary Optimization Applied to Wireless Smart Lighting in Energy-Efficient Museums,” *IEEE Sens. J.*, vol. 17, no. 5, pp. 1213–1214, 2017, doi: 10.1109/JSEN.2017.2647827.
- [6] D. Zhang and X. Xia, “Distributed illumination control of LED networked systems via local occupancy information,” *2017 IEEE 56th Annu. Conf. Decis. Control. CDC 2017*, pp. 4141–4146, 2018, doi: 10.1109/CDC.2017.8264268.
- [7] N. Iksan, E. D. Udayanti, A. Arfriandi, and D. A. Widodo, “Automatic Control using Fuzzy Techniques for Energy Management on Smart Building,” *2018 Int. Conf. Comput. Eng. Netw. Intell. Multimedia, CENIM 2018 - Proceeding*, pp. 156–160, 2018, doi: 10.1109/CENIM.2018.8711385.
- [8] A. Seyedolhosseini, N. Masoumi, M. Modarressi, and N. Karimian, “Illumination Control of Smart Indoor Lighting Systems Consists of Multiple Zones,” *Proc. - 2018 Smart Grid Conf. SGC 2018*, pp. 1–4, 2018, doi: 10.1109/SGC.2018.8777883.
- [9] D. Tran and Y. K. Tan, “Sensorless illumination control of a networked LED-

- lighting system using feedforward neural network,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 4, pp. 2113–2121, 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2266084.
- [10] C. Barz, O. Chiver, E. Zoltan, M. Horgos, and D. Preradovic, “Automation with MFD Titan for lighting control,” *Proc. 2016 Int. Conf. Expo. Electr. Power Eng. EPE 2016*, pp. 466–471, 2016, doi: 10.1109/ICEPE.2016.7781384.
- [11] D. Caicedo and A. Pandharipande, “Distributed illumination control with local sensing and actuation in networked lighting systems,” *IEEE Sens. J.*, vol. 13, no. 3, pp. 1092–1104, 2013, doi: 10.1109/JSEN.2012.2228850.
- [12] M. A. Pradhan and A. D. Shaligram, “Optimization of indoor lighting by automatic control,” *Proc. 2017 Int. Conf. Wirel. Commun. Signal Process. Networking, WiSPNET 2017*, pp. 1529–1533, 2018, doi: 10.1109/WiSPNET.2017.8300017.
- [13] A. Pantoja and N. Quijano, “Distributed optimization using population dynamics with a local replicator equation,” *2012 IEEE 51st IEEE Conf. Decis. Control*, pp. 3790–3795, 2012, doi: 10.1109/CDC.2012.6426277.
- [14] N. Espana and A. Pantoja, “Multizone illuminance control based on replicator dynamics,” *2015 IEEE 2nd Colomb. Conf. Autom. Control. CCAC 2015 - Conf. Proc.*, 2015, doi: 10.1109/CCAC.2015.7345177.
- [15] S. Afshari and S. Mishra, “A Plug-and-Play Realization of Decentralized Feedback Control for Smart Lighting Systems,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 24, no. 4, pp. 1317–1327, 2016, doi: 10.1109/TCST.2015.2487880.
- [16] I. E. S. of N. America, *The Lighting Handbook*, 10th Editi. Illuminating Engineering Society of North America, 2013.
- [17] Ministerio de Minas y Energía, “Resolución Número 180540 De 2010, RETILAP,” p. 243, 2010, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [18] P. Morgan Pattison, M. Hansen, and J. Y. Tsao, “LED lighting efficacy: Status and directions,” *Comptes Rendus Phys.*, vol. 19, no. 3, pp. 134–145, 2018, doi: 10.1016/j.crhy.2017.10.013.
- [19] M. E. Raypah, B. K. Sodipo, M. Devarajan, and F. Sulaiman, “Estimation of Luminous Flux and Luminous Efficacy of Low-Power SMD LED as a Function of Injection Current and Ambient Temperature,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 63, no. 7, pp. 2790–2795, 2016, doi: 10.1109/TED.2016.2556079.
- [20] N. Lighting, S. Division, and D. Lsd, “Energy Savings with Fluorescent and LED Dimming,” 2015.
- [21] J. W. Weibull and J. W. W. is A. O. W. P. of E. at S. S. of Economics., *Evolutionary Game Theory*. .

-
- [22] S. N. and S. J. W. Edited by Suvrit Sra, *Optimization for Machine Learning*. 2011.
- [23] A. Pantoja, G. Obando, and N. Quijano, "Distributed optimization with information-constrained population dynamics," *J. Franklin Inst.*, vol. 356, no. 1, pp. 209–236, 2019, doi: 10.1016/j.jfranklin.2018.10.016.
- [24] J. H. K. Sigmund, *Evolutionary Games and Population Dynamics*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1998.
- [25] R. Olfati-Saber, J. A. Fax, and R. M. Murray, "Consensus and Cooperation in Networked Multi-Agent Systems," *Proc. IEEE*, vol. 95, no. 1, pp. 215–233, 2007, doi: 10.1109/JPROC.2006.887293.
- [26] N. Gentile and M. C. Dubois, "Field data and simulations to estimate the role of standby energy use of lighting control systems in individual offices," *Energy Build.*, vol. 155, pp. 390–403, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.09.028.
- [27] A. Pantoja, N. Quijano, and K. M. Passino, "Dispatch of distributed generators under local-information constraints," *Proc. Am. Control Conf.*, pp. 2682–2687, 2014, doi: 10.1109/ACC.2014.6859190.
- [28] R. R. Cardoso and A. F. Brandao, "Artificial neural network application to a building hybrid illumination system," *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, pp. 866–871, 2008, doi: 10.1109/ISIE.2008.4677011.
- [29] Y. Wang and S. Wu, "Development of a solar LED illumination control system based on variable universe adaptive fuzzy PID controller," *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, pp. 14–17, 2011, doi: 10.1109/APPEEC.2011.5749162.
- [30] H. Liao, X. Sheng, and D. Yang, "Design of adaptive lighting system based on fuzzy PID," in *2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, 2018, pp. 1543–1547, doi: 10.1109/CCDC.2018.8407372.
- [31] M. Mahdavian and N. Wattanapongsakorn, "Multi-objective optimization of PID controller tuning for greenhouse lighting control system considering rtp in the smart grid," in *2014 International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC)*, 2014, pp. 57–61, doi: 10.1109/ICSEC.2014.6978129.
- [32] M. Mahdavian and N. Wattanapongsakorn, "Optimizing PID controller tuning for greenhouse lighting control system by varying number of objectives," in *2014 11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 2014, pp. 1–6, doi: 10.1109/ECTICon.2014.6839890.
- [33] S. Agheb, X. Tan, and D. H. K. Tsang, "Model predictive control of integrated room automation considering occupants preference," *2015 IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun. SmartGridComm 2015*, pp. 665–670, 2016, doi:

10.1109/SmartGridComm.2015.7436377.

- [34] R. Eini and S. Abdelwahed, "A Neural Network-based Model Predictive Control Approach for Buildings Comfort Management," in *2020 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, 2020, pp. 1–7, doi: 10.1109/ISC251055.2020.9239051.
- [35] C. Lu, H. Xiao, and H. Ogai, "Low energy consumption method based on multi-objective PSO for illumination distribution optimization," *2017 56th Annu. Conf. Soc. Instrum. Control Eng. Japan, SICE 2017*, vol. 2017-November, pp. 338–342, 2017, doi: 10.23919/SICE.2017.8105740.
- [36] L. Wang, *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB*. Springer, 2009.
- [37] K. Ogata, *Sistemas de Control en Tiempo Discreto*, 2da. Ed. PRENTICE HALL HISPANOAMERICANA S.A., 1996.
- [38] J. P. Hespanha, *Linear Systems Theory*, Ed, 2nd. Princeton, 2018.
- [39] K. Ogata, *Ingeniería de Control Moderna*, 3ra Ed. PRENTICE-HALL HISPANOAMERICANA, S.A., 1998.
- [40] Y. E. Wu, C. L. Shen, and C. Y. Liu, "Implementation of solar illumination system with three-stage charging and dimming control function," *2011 Int. Conf. Electr. Inf. Control Eng. ICEICE 2011 - Proc.*, pp. 2260–2263, 2011, doi: 10.1109/ICEICE.2011.5776825.
- [41] M. C. Pacis, K. D. Estoy, L. C. Pepito, J. M. Martinez, and N. B. Linsangan, "Design of a solar powered LED lighting system using the dual axis tracking system," *IEEE Reg. 10 Humanit. Technol. Conf. R10-HTC 2015 - co-located with 8th Int. Conf. Humanoid, Nanotechnology, Inf. Technol. Commun. Control. Environ. Manag. HNICEM 2015*, 2016, doi: 10.1109/R10-HTC.2015.7391847.
- [42] L. S. Shyu, C. H. Lee, K. Y. Lu, and C. T. Horng, "Independent wind-solar hybrid generation system for construction and verification in campus," *Proc. - 2018 1st Int. Cogn. Cities Conf. IC3 2018*, pp. 174–178, 2018, doi: 10.1109/IC3.2018.00-34.
- [43] X. Cao, X. Dai, and J. Liu, "Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade," *Energy Build.*, vol. 128, pp. 198–213, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.06.089.
- [44] D. Li, Z. Kun, and Q. Gao, "Zero Energy Consumption LED Intelligent Lighting System Based on the Technology of PoE," *Chinese Control Conf. CCC*, vol. 2018-July, pp. 7639–7643, 2018, doi: 10.23919/ChiCC.2018.8483337.

Anexo 1. Gráficas de respuestas temporales

En este apartado se presentan todas las gráficas de respuesta temporal asociadas a las 16 pruebas de desempeño trabajadas en el presente trabajo. El objetivo del anexo es brindar al lector la oportunidad de revisar con mayor detalle los resultados obtenidos, permitiendo el análisis de transitorios, tiempos de respuesta.

Las gráficas se presentan por escenario de prueba, en una disposición de tablas organizadas de acuerdo a la disponibilidad de energía y régimen de iluminación.

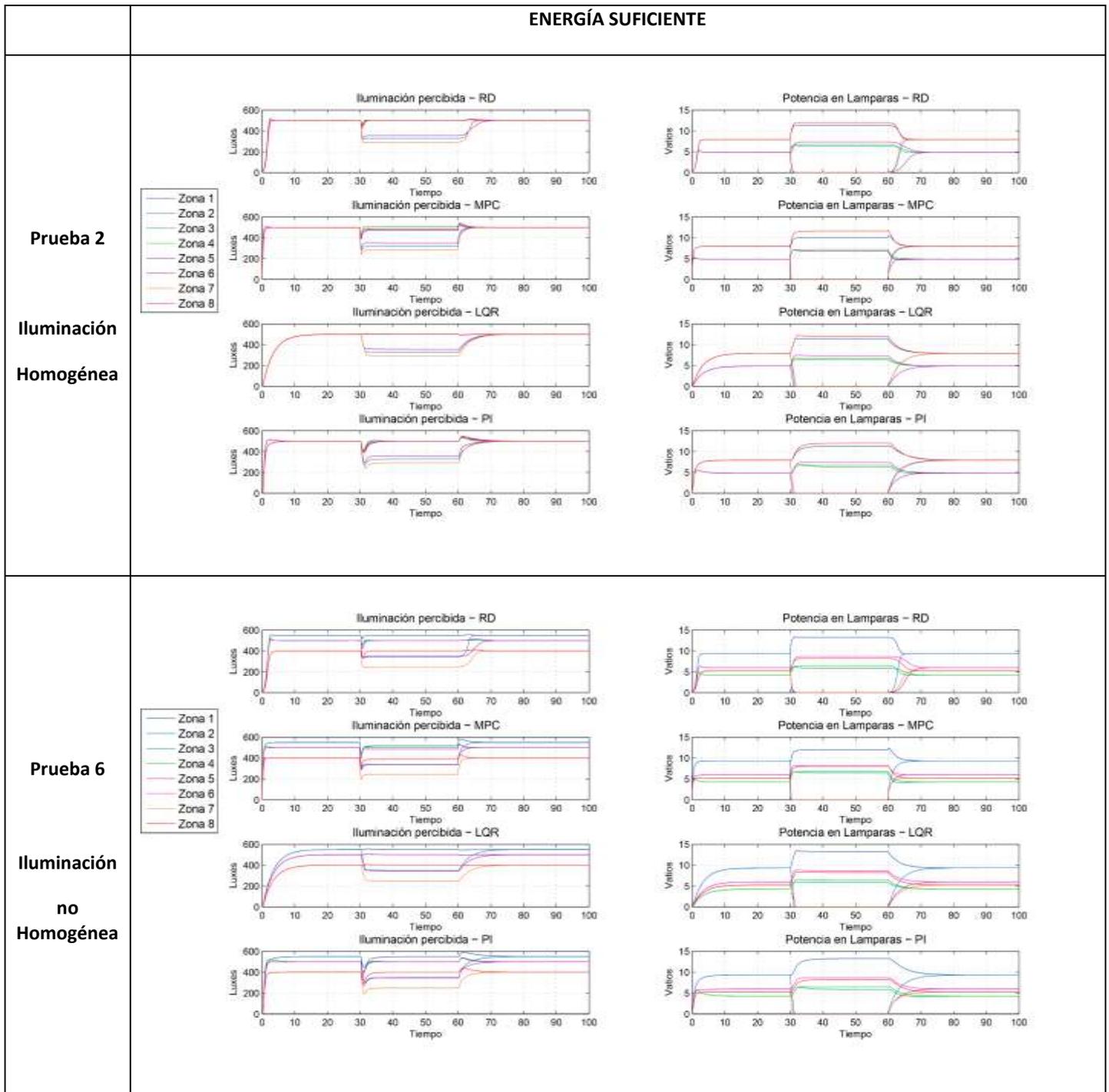
Escenario 1.

		ENERGÍA SUFICIENTE	
<p>Prueba 1</p> <p>Iluminación Homogénea</p>			
<p>Prueba 5</p> <p>Iluminación no Homogénea</p>			

ENERGÍA INSUFICIENTE

<p>Prueba 9</p> <p>Iluminación Homogénea</p>	<p>The graphs for Prueba 9 show perceived illumination (Luxes) and lamp power (Watts) over time (0-100) for four control methods: RD, MPC, LQR, and PI. A legend indicates eight zones (Zona 1 to Zona 8). In RD, MPC, and PI, the illumination is constant at approximately 400 Luxes, and power is constant at approximately 5 Watts. In LQR, the illumination drops to about 250 Luxes between 30 and 60 seconds, and power drops to 0 Watts during the same period.</p>
<p>Prueba 13</p> <p>Iluminación no Homogénea</p>	<p>The graphs for Prueba 13 show perceived illumination (Luxes) and lamp power (Watts) over time (0-100) for the same four control methods. In RD, MPC, and PI, the illumination is constant at approximately 400 Luxes, and power is constant at approximately 5 Watts. In LQR, the illumination drops to about 250 Luxes between 30 and 60 seconds, and power drops to 0 Watts during the same period.</p>

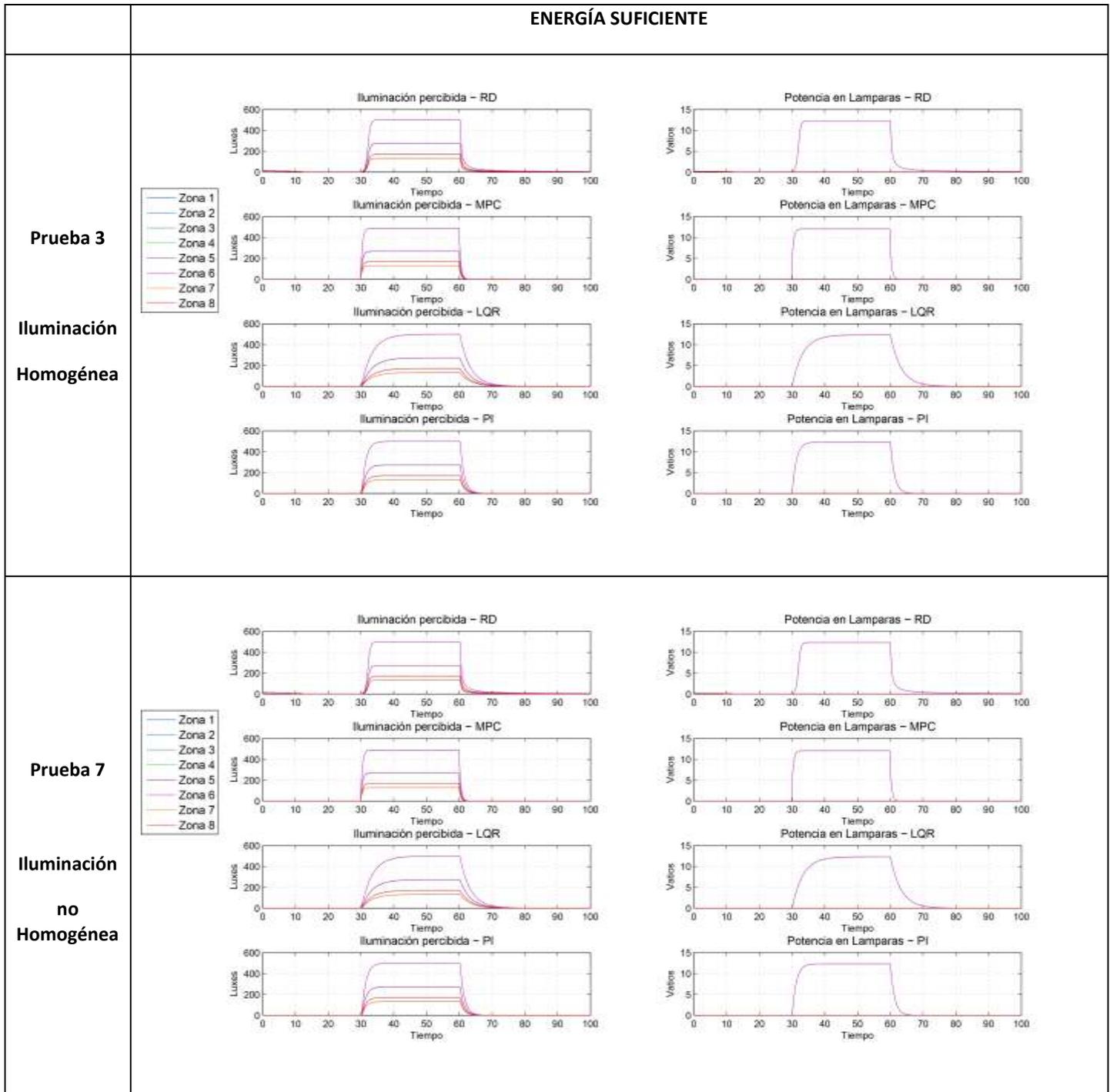
Escenario 2.



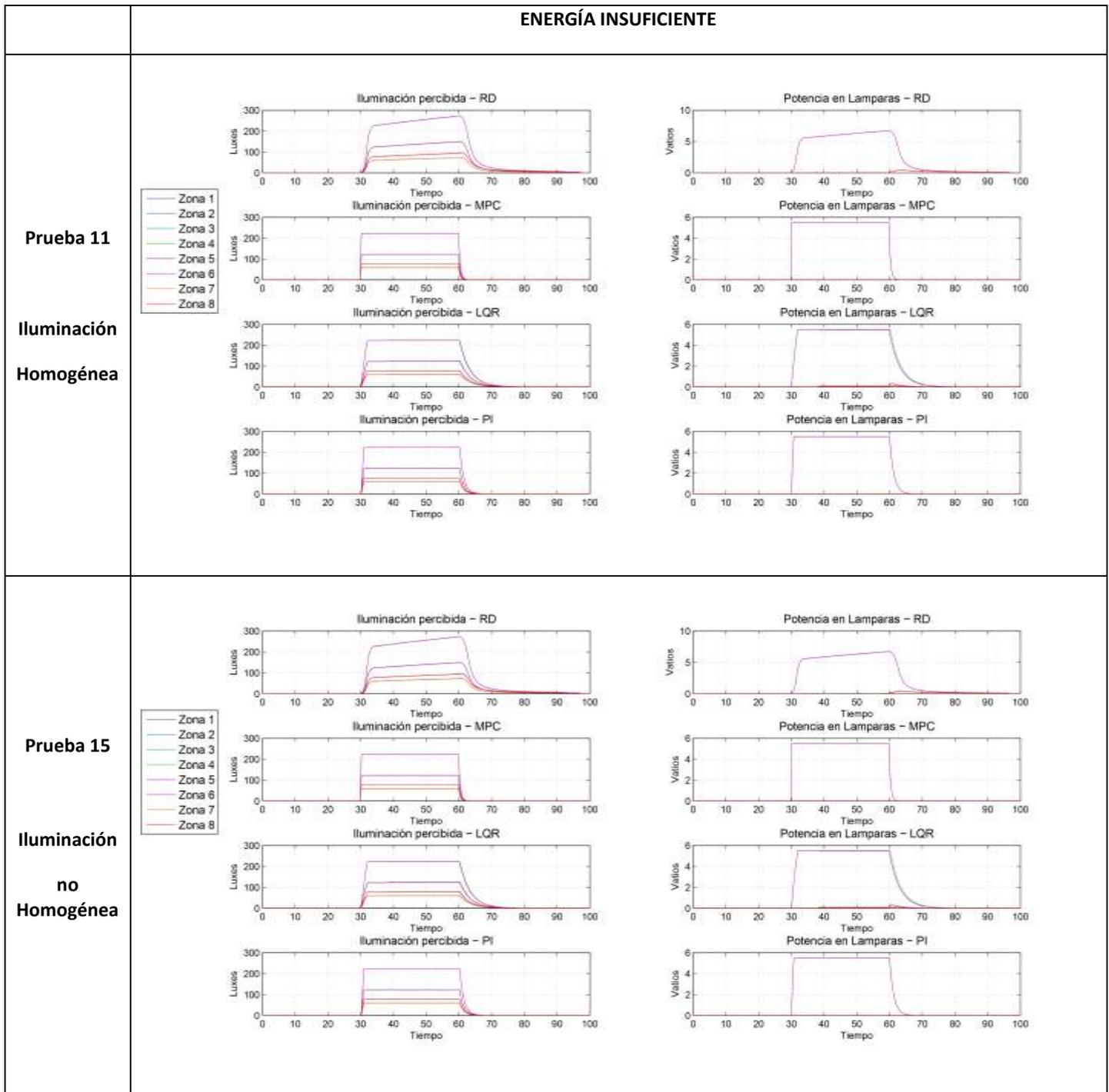
ENERGÍA INSUFICIENTE

<p>Prueba 10</p> <p>Iluminación Homogénea</p>	<p>The graphs for Prueba 10 show perceived illumination (Luxes) and lamp power (Valios) over time (0-100) for four methods: RD, MPC, LQR, and PI. A legend indicates eight zones (Zona 1 to Zona 8). In RD, MPC, and PI, the illumination is stable at approximately 400 Luxes, with a slight dip between 30 and 60 seconds. In LQR, the illumination is higher, around 500 Luxes, and shows a significant dip during the same period. Lamp power is generally low, around 5-6 Valios, with a spike to 10 Valios in RD between 30 and 60 seconds.</p>
<p>Prueba 14</p> <p>Iluminación no Homogénea</p>	<p>The graphs for Prueba 14 show perceived illumination (Luxes) and lamp power (Valios) over time (0-100) for the same four methods. The legend indicates eight zones. In RD, the illumination is higher, around 500 Luxes, and shows a significant dip during the 30-60 second period. In MPC, LQR, and PI, the illumination is lower, around 400 Luxes, and shows a significant dip during the same period. Lamp power is generally low, around 5-6 Valios, with a spike to 10 Valios in RD between 30 and 60 seconds.</p>

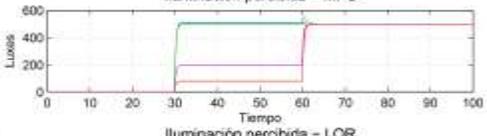
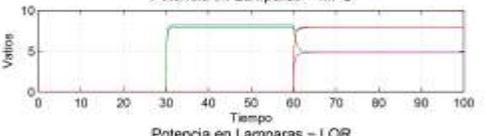
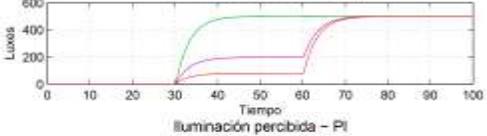
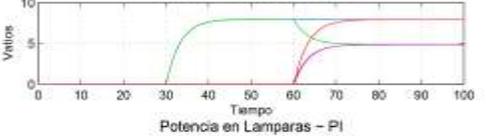
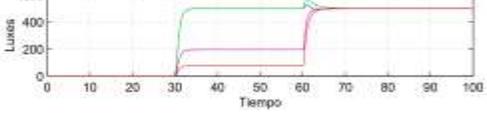
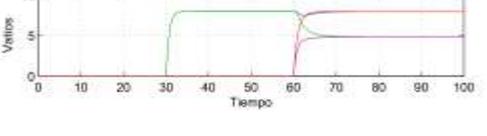
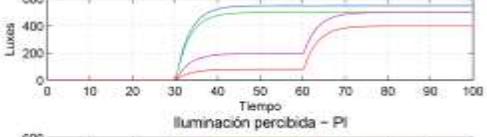
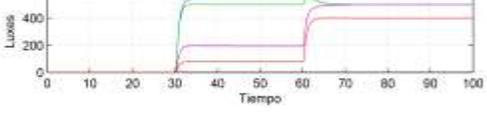
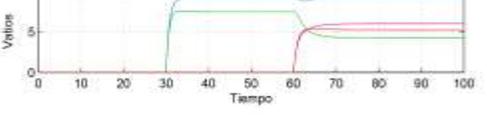
Escenario 3.

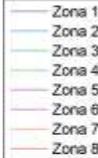
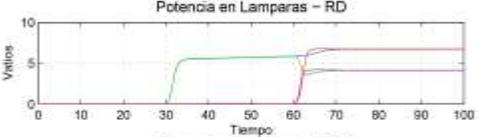
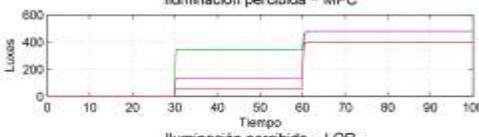
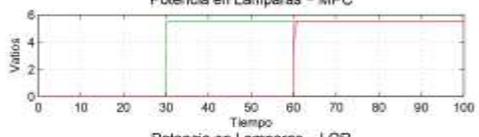
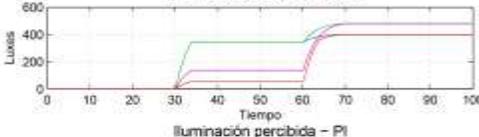
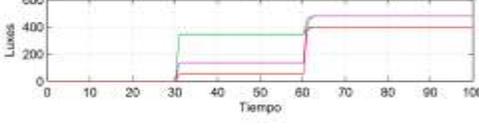
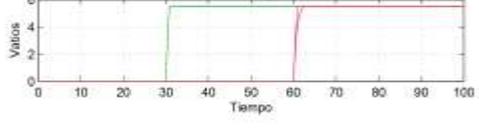
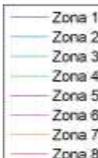
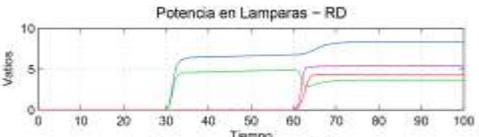
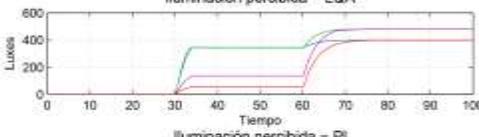
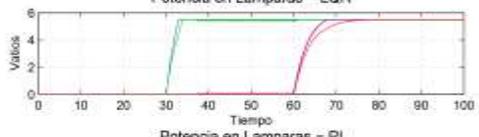
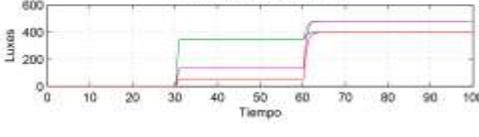
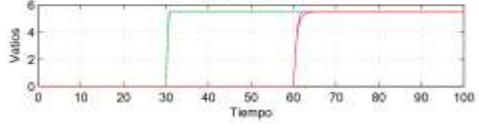


ENERGÍA INSUFICIENTE



Escenario 4.

		ENERGÍA SUFICIENTE	
<p>Prueba 4</p> <p>Iluminación Homogénea</p>	 <ul style="list-style-type: none"> Zona 1 Zona 2 Zona 3 Zona 4 Zona 5 Zona 6 Zona 7 Zona 8 	 <p>Iluminación percibida - RD</p>	 <p>Potencia en Lámparas - RD</p>
		 <p>Iluminación percibida - MPC</p>	 <p>Potencia en Lámparas - MPC</p>
		 <p>Iluminación percibida - LQR</p>	 <p>Potencia en Lámparas - LQR</p>
		 <p>Iluminación percibida - PI</p>	 <p>Potencia en Lámparas - PI</p>
<p>Prueba 8</p> <p>Iluminación no Homogénea</p>	 <ul style="list-style-type: none"> Zona 1 Zona 2 Zona 3 Zona 4 Zona 5 Zona 6 Zona 7 Zona 8 	 <p>Iluminación percibida - RD</p>	 <p>Potencia en Lámparas - RD</p>
		 <p>Iluminación percibida - MPC</p>	 <p>Potencia en Lámparas - MPC</p>
		 <p>Iluminación percibida - LQR</p>	 <p>Potencia en Lámparas - LQR</p>
		 <p>Iluminación percibida - PI</p>	 <p>Potencia en Lámparas - PI</p>

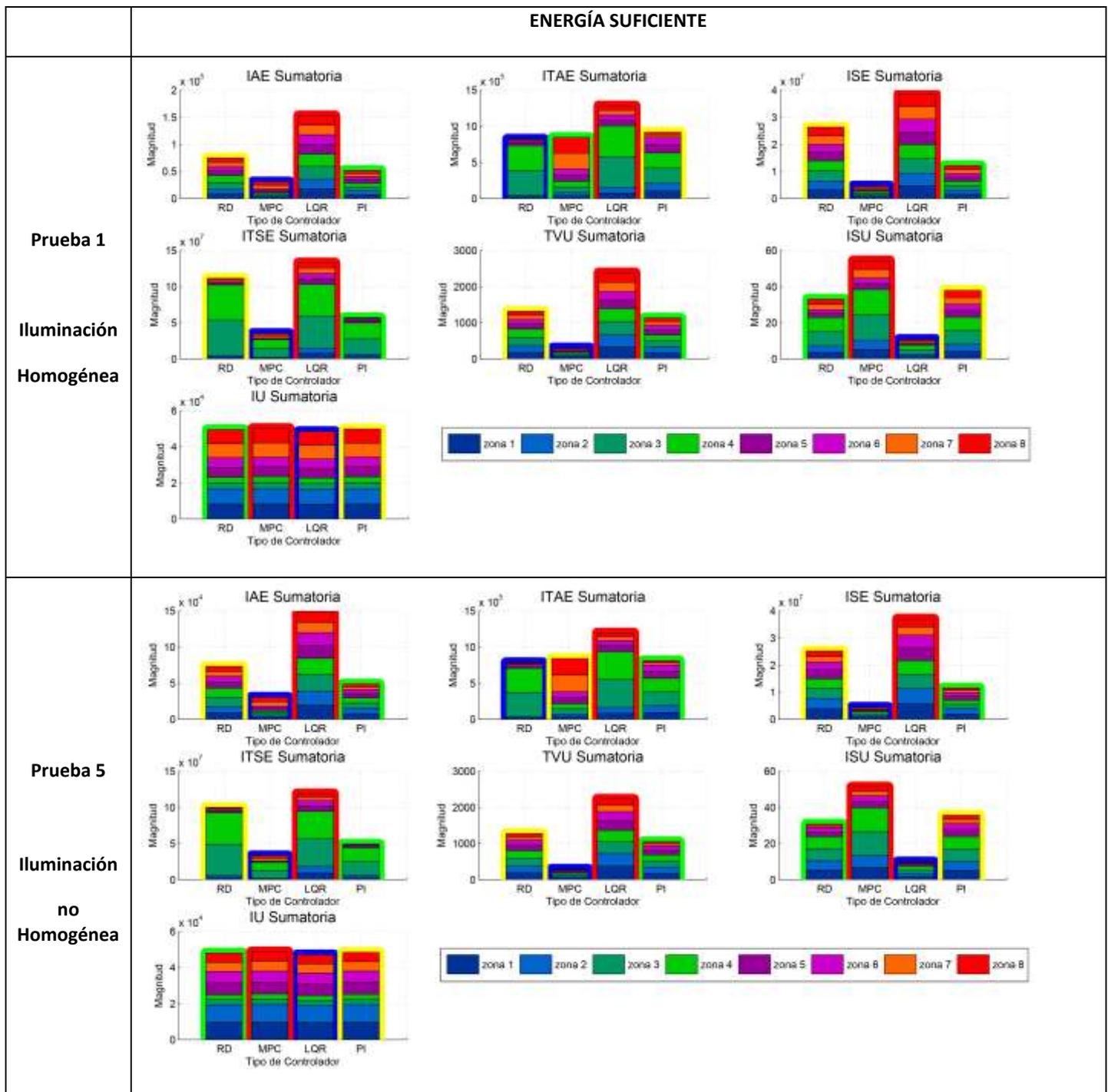
		ENERGÍA INSUFICIENTE	
Prueba 12 Iluminación Homogénea			
			
			
			
Prueba 16 Iluminación no Homogénea			
			
			
			

Anexo 2. Gráficas de barras apiladas

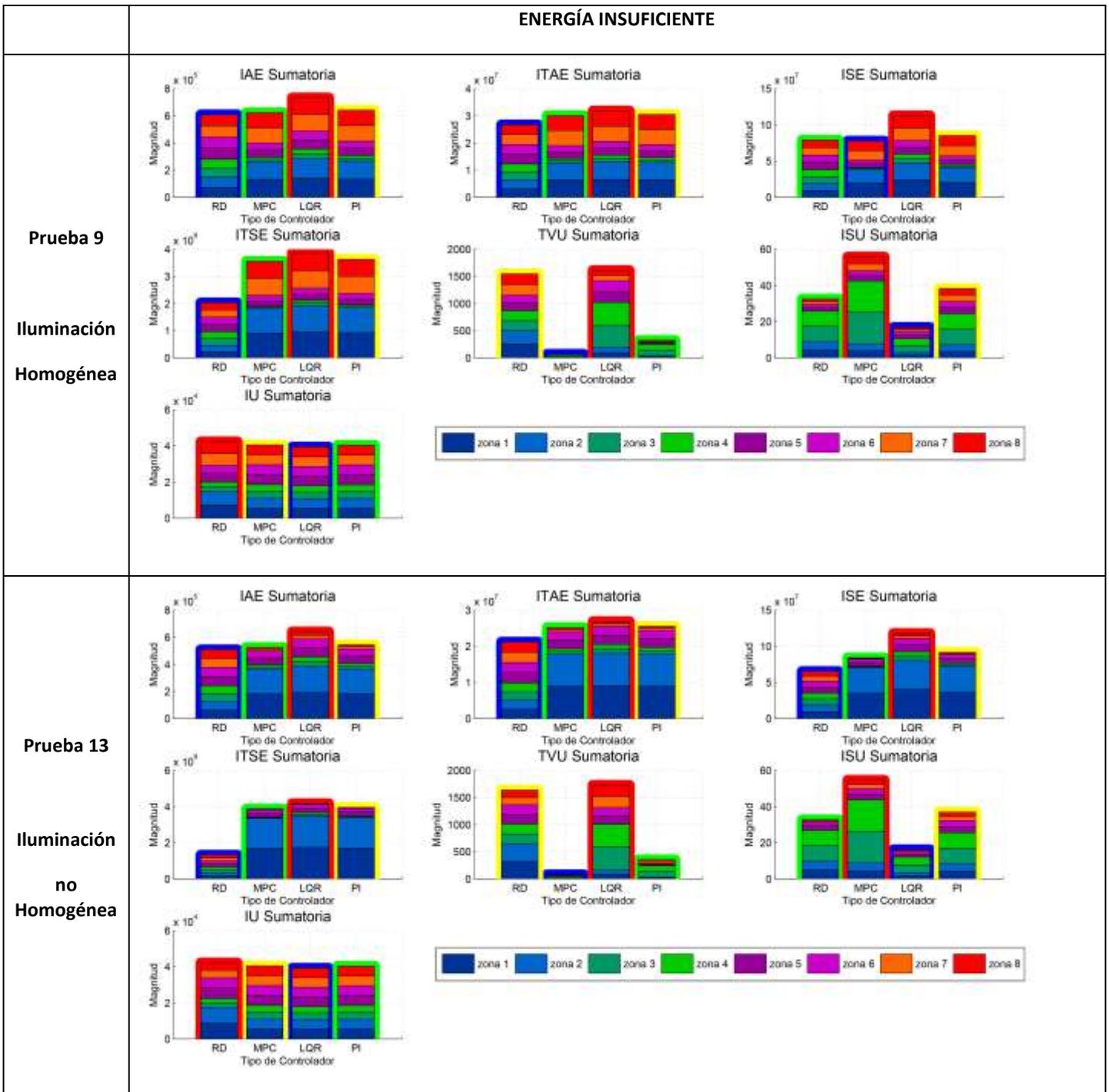
En este apartado se presentan todas las gráficas de barras apilada asociadas a las 16 pruebas de desempeño trabajadas en el presente trabajo. El objetivo del anexo es brindar al lector la oportunidad de revisar con mayor detalle los resultados obtenidos en relación al desempeño de cada una de las zonas del caso estudio.

Las gráficas se presentan por escenario de prueba, en una disposición de tablas organizadas de acuerdo a la disponibilidad de energía y régimen de iluminación.

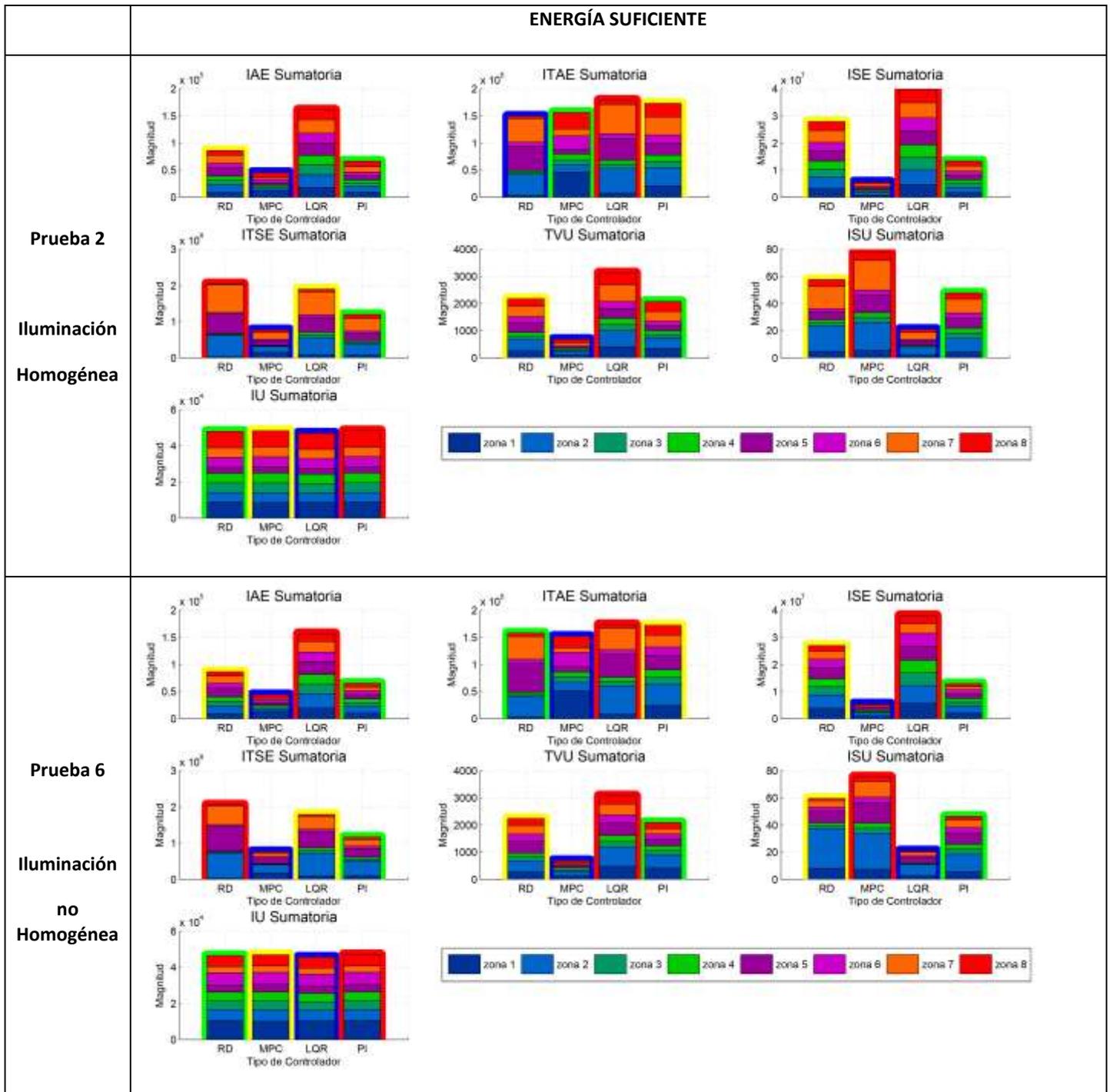
Escenario 1.



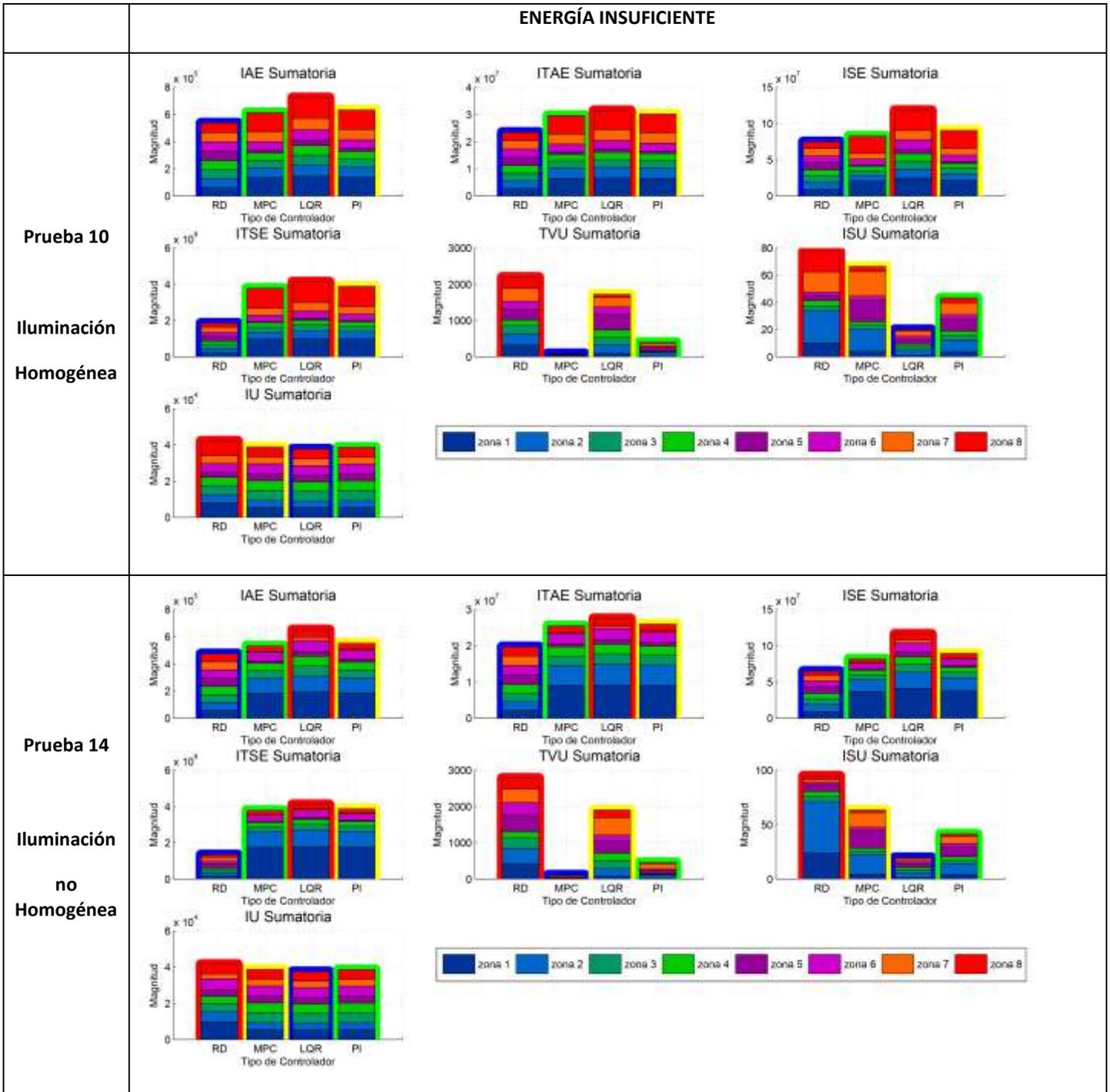
ENERGÍA INSUFICIENTE



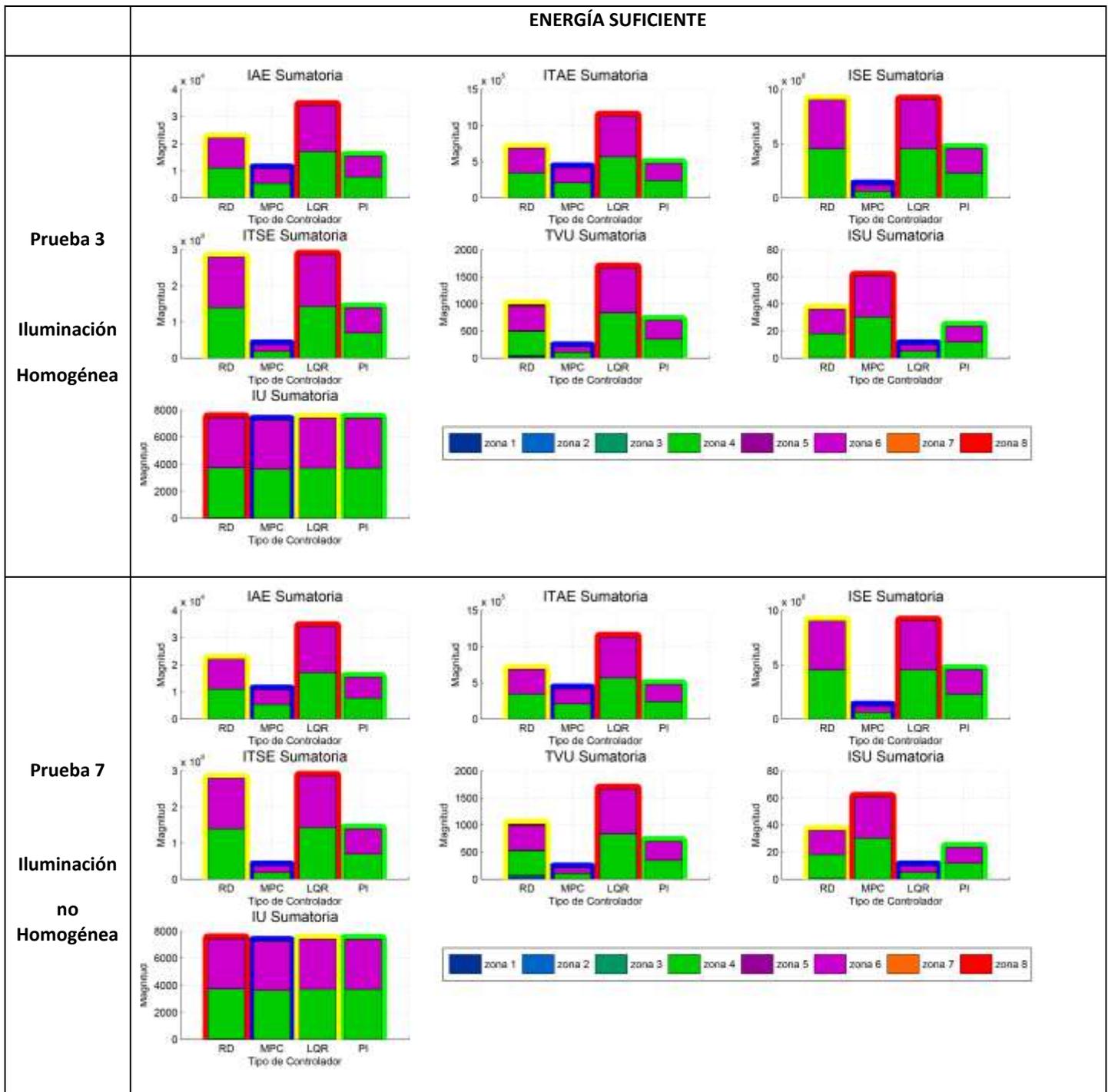
Escenario 2.



ENERGÍA INSUFICIENTE



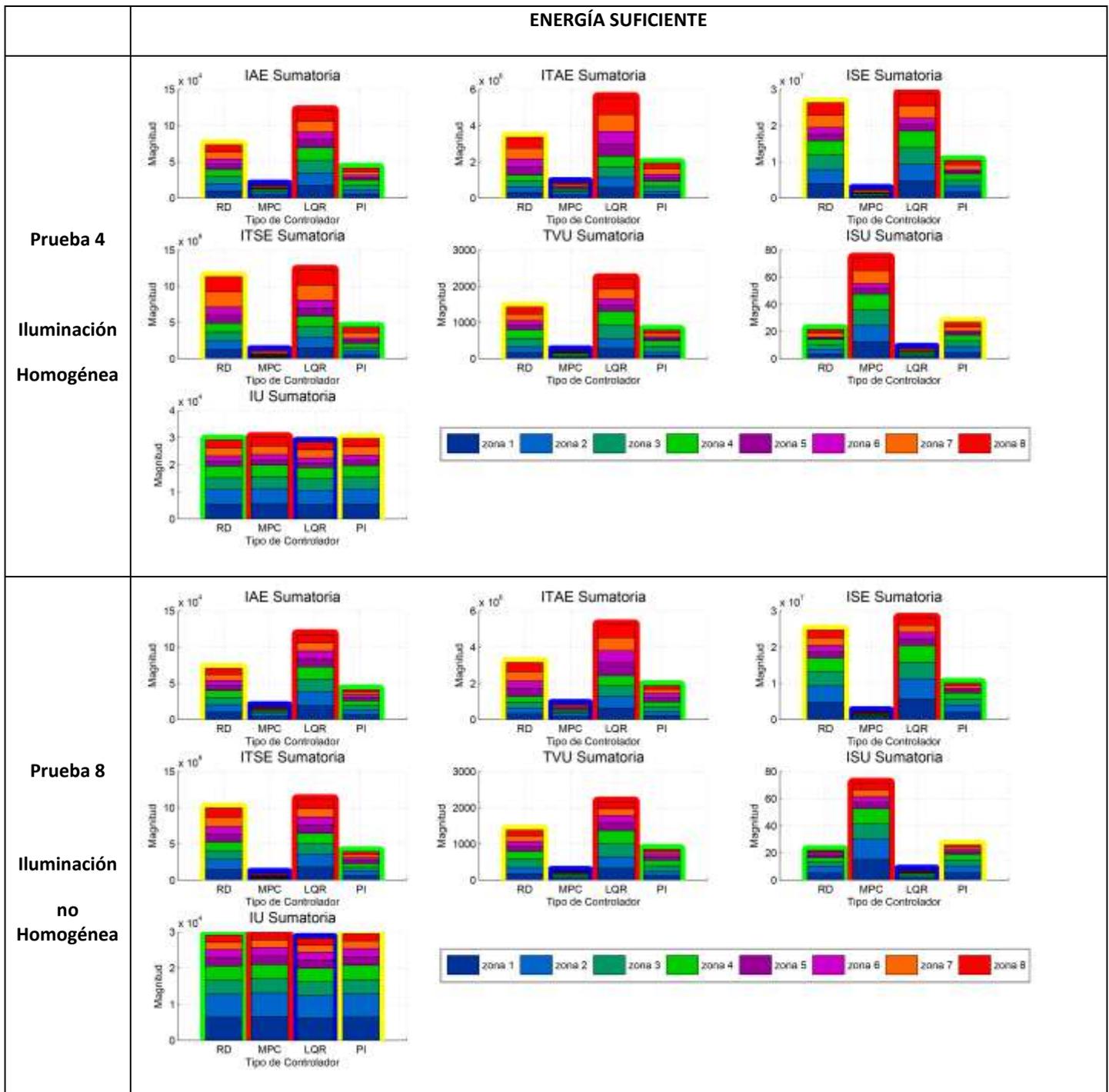
Escenario 3.



ENERGÍA INSUFICIENTE

<p>Prueba 11</p> <p>Iluminación Homogénea</p>	<p>IAE Sumatoria</p> <p>ITAE Sumatoria</p> <p>ISE Sumatoria</p> <p>ITSE Sumatoria</p> <p>TVU Sumatoria</p> <p>ISU Sumatoria</p> <p>zona 1, zona 2, zona 3, zona 4, zona 5, zona 6, zona 7, zona 8</p>
<p>Prueba 15</p> <p>Iluminación no Homogénea</p>	<p>IAE Sumatoria</p> <p>ITAE Sumatoria</p> <p>ISE Sumatoria</p> <p>ITSE Sumatoria</p> <p>TVU Sumatoria</p> <p>ISU Sumatoria</p> <p>zona 1, zona 2, zona 3, zona 4, zona 5, zona 6, zona 7, zona 8</p>

Escenario 4.



ENERGÍA INSUFICIENTE

<p>Prueba 12</p> <p>Iluminación Homogénea</p>	
<p>Prueba 16</p> <p>Iluminación no Homogénea</p>	

Anexo 3. Código de Matlab Utilizado

Código sistema de Replicadores dinámicos

```

clear all
clc
close all

% Modelo de iluminación

%Distancia en metros
do=1.45;
dh=2.00;
dv=1.5;

%Matriz de relación de posición lámparas

D=[do sqrt(do^2+dv^2) sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+dv^2+dh^2)
sqrt(do^2+4*dh^2) sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2) sqrt(do^2+9*dh^2)
sqrt(do^2+9*dh^2+dv^2);...
sqrt(do^2+dv^2) do sqrt(do^2+dv^2+dh^2) sqrt(do^2+dh^2)
sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2) sqrt(do^2+4*dh^2) sqrt(do^2+9*dh^2+dv^2)
sqrt(do^2+9*dh^2);...
sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+dv^2+dh^2) do sqrt(do^2+dv^2)
sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+dv^2+dh^2) sqrt(do^2+4*dh^2)
sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2);...
sqrt(do^2+dv^2+dh^2) sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+dv^2) do
sqrt(do^2+dv^2+dh^2) sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2)
sqrt(do^2+4*dh^2);...
sqrt(do^2+4*dh^2) sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2) sqrt(do^2+dh^2)
sqrt(do^2+dv^2+dh^2) do sqrt(do^2+dv^2) sqrt(do^2+dh^2)
sqrt(do^2+dv^2+dh^2);...
sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2) sqrt(do^2+4*dh^2) sqrt(do^2+dv^2+dh^2)
sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+dv^2) do sqrt(do^2+dv^2+dh^2)
sqrt(do^2+dh^2);...
sqrt(do^2+9*dh^2) sqrt(do^2+9*dh^2+dv^2) sqrt(do^2+4*dh^2)
sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2) sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+dv^2+dh^2) do
sqrt(do^2+dv^2);...
sqrt(do^2+9*dh^2+dv^2) sqrt(do^2+9*dh^2) sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2)
sqrt(do^2+4*dh^2) sqrt(do^2+dv^2+dh^2) sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+dv^2)
do];

Dd=[1 1 1 1 1 1 1 1];

%Condiciones iniciales lámparas

ICs=0;
ICl=0;

```

%Parámetros Lámpara

```

lamp_lum=2650;      %Flujo lumínico nominal lampara
lamp_area=3;       %Área de iluminación por lampara
CU=0.939;          %Coeficiente de utilización
FM=0.8;            %Factor de mantenimiento
Pmax=22;           %Potencia máxima de la lampara W
nv=110;            %Eficacia luminosa de la lampara lm/W
vmax_lamp=10;      %Máximo voltaje de dimerización de la lampara V

```

```
lamp_lux=(lamp_lum*CU*FM)/lamp_area;
```

```

Kl=nv;
tl=0.02;

```

%Parámetros Sensor

```

Ks=do^2*lamp_lux/(nv*Pmax);
ts=0.05;

```

```

Acs=-1/ts;
Bcs=Ks/ts;
Ccs=1;
Dcs=0;
Acl=-1/tl;
Bcl=Kl/tl;
Ccl=1;
Dcl=0;

```

```

siscs=ss(Acs,Bcs,Ccs,Dcs);
siscl=ss(Acl,Bcl,Ccl,Dcl);

```

```

[numcl,denc1]=ss2tf(Acl,Bcl,Ccl,Dcl);
[numcs,dencs]=ss2tf(Acs,Bcs,Ccs,Dcs);
Fcl=tf(numcl,denc1);
Fcs=tf(numcs,dencs);

```

```

tm=0.1;           % tiempo de muestreo.
alpha=0.045;

```

```

sisds=c2d(siscs,tm);
sisdl=c2d(siscl,tm);

```

```

[Ads,Bds,Cds,Dds]=ssdata(sisds);
[Adl,Bdl,Cdl,Ddl]=ssdata(sisdl);

```

% Replicador Dinámico continuo

```

VLEmax=5; %% (Voltaje Luz Ext maximo)Voltaje maximo que puede ser senado
a un max de luz externa
FlujoMax=750;
B=FlujoMax*100; %% Valor que asegura positividad de la fitness,el 10 es
un factor positivo mayor a 1.

```

```

% Potencia máxima disponible
Ptot=Pmax*8;
%Ptot=Ptot*0.25;

p0l= Ptot*0.001; %% potencia inicio para lámparas
p0f= (Ptot-p0l*8)/8; %% potencia inicio para agente ficticio

p0=[p0l p0l p0l p0l p0l p0l p0l p0l p0f]; %% condición inicial lámparas

%Parámetro Gama_i presencia
F=B*0.5; %Factor de penalización menor a B

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Escenarios de prueba para medida de desempeño
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
%% Tiempos de eventos %%%

t1=30;
t2=60;

gama_iT=[t1,t1,t1,t1,t1,t1,t1,t1; %% tiempo primer cambio
         t2,t2,t2,t2,t2,t2,t2,t2]; %% tiempo segundo cambio

%% Escenario 1 %%%
gama_iVi=[ 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]; %% valor inicio
gama_iVf=[ 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1; %% valro final primer cambio
         0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0]; %% -1 si cae a 0, 1 si sube a 1, 0
no cambia

% %%% Escenario 2 %%%
% gama_iVi=[ 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]; %% valor inicio
% gama_iVf=[ 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1; %% valro final primer cambio
%           0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0]; %% -1 si cae a 0, 1 si sube a 1, 0
no cambia

% %%% Escenario 3 %%%
% gama_iVi=[ 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]; %% valor inicio
% gama_iVf=[ 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0; %% valro final primer cambio
%           0, 0, 0, -1, 0, -1, 0, 0]; %% -1 si cae a 0, 1 si sube a 1,
0 no cambia

% %%% Escenario 4 %%%
% gama_iVi=[ 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]; %% valor inicio
% gama_iVf=[ 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0; %% valro final primer cambio
%           0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1]; %% -1 si cae a 0, 1 si sube a 1, 0
no cambia

%SetPoints
%Régimen Homogéneo
SP=[500,500,500,500,500,500,500,500];

```

```

% %Régimen No Homogéneo
%SP=[550,550,500,500,500,500,400,400];

%% Valores de potencia máxima y mínima de lámparas
Pmax=22;
Pmin=0.05;
Pmin_1=0.08;

%% Potencias adicionada en caso de drenado total de agente ficticio

pot_add=0.05;
f_limit=0.05;

%% Límites de potencia para saturador replicadores

max= 22;
min= 0.1;

%% Funciones de transferencia Lámparas y Sensores
[numL,denL]=ss2tf(Ac1,Bc1,Cc1,Dc1);
Fl=tf(numL,denL);

[numS,denS]=ss2tf(Acs,Bcs,Ccs,Dcs);
Fs=tf(numS,denS);

FTls=Fl*Fs; %% funcion de transferencia total Luz y Sensores

%% Parámetros de fitness

Up1=1; %porcentaje de penalización a SP
Up2=1000; %porcentaje de beneficio a SP cuando pi baja

% Matrices de conexión

% Matriz de conexión entre agentes reales

Arr=[0 1 1 0 0 0 0 0; % Conexión entre Agentes Reales - Agente 1
     1 0 0 1 0 0 0 0; % Conexión entre Agentes Reales - Agente 2
     1 0 0 0 1 0 0 0; % Conexión entre Agentes Reales - Agente 3
     0 1 0 0 0 1 0 0; % Conexión entre Agentes Reales - Agente 4
     0 0 1 0 0 0 1 0; % Conexión entre Agentes Reales - Agente 5
     0 0 0 1 0 0 0 1; % Conexión entre Agentes Reales - Agente 6
     0 0 0 0 1 0 0 1; % Conexión entre Agentes Reales - Agente 7
     0 0 0 0 0 1 1 0]; % Conexión entre Agentes Reales - Agente 8

% Matriz de conexión entre agentes reales y ficticios, cada fila
% representa el agente real, y las columnas la conexión con el agente
% ficticio del 9 al 16

Arf=[1 0 0 0 0 0 0 0 0; % Conexión entre Agente Real 1 y ficticios
     0 1 0 0 0 0 0 0 0; % Conexión entre Agente Real 2 y ficticios
     0 0 1 0 0 0 0 0 0; % Conexión entre Agente Real 3 y ficticios
     0 0 0 1 0 0 0 0 0; % Conexión entre Agente Real 4 y ficticios

```

```
0 0 0 0 1 0 0 0; % Conexión entre Agente Real 5 y ficticios
0 0 0 0 0 1 0 0; % Conexión entre Agente Real 6 y ficticios
0 0 0 0 0 0 1 0; % Conexión entre Agente Real 7 y ficticios
0 0 0 0 0 0 0 1]; % Conexión entre Agente Real 8 y ficticios

% Matriz de conexión entre agentes ficticios

Aff=[0 0 0 0 0 0 0 0; % Conexión entre Agente ficticio 1 y ficticios
      0 0 0 0 0 0 0 0; % Conexión entre Agente ficticio 2 y ficticios
      0 0 0 0 0 0 0 0; % Conexión entre Agente ficticio 3 y ficticios
      0 0 0 0 0 0 0 0; % Conexión entre Agente ficticio 4 y ficticios
      0 0 0 0 0 0 0 0; % Conexión entre Agente ficticio 5 y ficticios
      0 0 0 0 0 0 0 0; % Conexión entre Agente ficticio 6 y ficticios
      0 0 0 0 0 0 0 0; % Conexión entre Agente ficticio 7 y ficticios
      0 0 0 0 0 0 0 0]; % Conexión entre Agente ficticio 8 y ficticios

Ax=[Arr,Arf;Arf Aff];

% Matrices de Selección por agente SxL
SxL=zeros(length(Ax),length(Ax),length(Ax));
Sx=zeros(1,length(Ax));
for k = 1:length(Ax)
    Sx=Ax(k,:);
    SxL(:,:,k)=diag(Sx);
end
```

Código controlador MPC

```

clear all
clc
close all

%% Modelo matricial del sistema

%% Distancias en metros
do=1.45;
dh=2.00;
dv=1.5;

D=[do sqrt(do^2+dv^2) sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+dv^2+dh^2)
sqrt(do^2+4*dh^2) sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2) sqrt(do^2+9*dh^2)
sqrt(do^2+9*dh^2+dv^2);...
sqrt(do^2+dv^2) do sqrt(do^2+dv^2+dh^2) sqrt(do^2+dh^2)
sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2) sqrt(do^2+4*dh^2) sqrt(do^2+9*dh^2+dv^2)
sqrt(do^2+9*dh^2);...
sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+dv^2+dh^2) do sqrt(do^2+dv^2)
sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+dv^2+dh^2) sqrt(do^2+4*dh^2)
sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2);...
sqrt(do^2+dv^2+dh^2) sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+dv^2) do
sqrt(do^2+dv^2+dh^2) sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2)
sqrt(do^2+4*dh^2);...
sqrt(do^2+4*dh^2) sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2) sqrt(do^2+dh^2)
sqrt(do^2+dv^2+dh^2) do sqrt(do^2+dv^2) sqrt(do^2+dh^2)
sqrt(do^2+dv^2+dh^2);...
sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2) sqrt(do^2+4*dh^2) sqrt(do^2+dv^2+dh^2)
sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+dv^2) do sqrt(do^2+dv^2+dh^2)
sqrt(do^2+dh^2);...
sqrt(do^2+9*dh^2) sqrt(do^2+9*dh^2+dv^2) sqrt(do^2+4*dh^2)
sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2) sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+dv^2+dh^2) do
sqrt(do^2+dv^2);...
sqrt(do^2+9*dh^2+dv^2) sqrt(do^2+9*dh^2) sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2)
sqrt(do^2+4*dh^2) sqrt(do^2+dv^2+dh^2) sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+dv^2)
do];

%%%% Modelo planta %%%

%%Lampara
lamp_lum=2650;      %Flujo lumínico nominal lampara
lamp_area=3;       %Área de iluminación por lampara
CU=0.939;          %Coeficiente de utilización
FM=0.8;            %Factor de mantenimiento
Pmax=22;           %Potencia máxima de la lampara W
nv=110;            %Eficacia luminosa de la lampara lm/W
vmax_lamp=10;      %Máximo voltaje de dimerización de la lampara V

lamp_lux=(lamp_lum*CU*FM)/lamp_area;

Kl=nv;
t1=0.02;

```

```

% Sensor

Ks=do^2*lamp_lux/(nv*Pmax);
ts=0.05;

Acs=-1/ts;
Bcs=Ks/ts;
Ccs=1;
Dcs=0;
Acl=-1/tl;
Bcl=Kl/tl;
Ccl=1;
Dcl=0;

siscs=ss(Acs,Bcs,Ccs,Dcs);
siscl=ss(Acl,Bcl,Ccl,Dcl);

[numcl,dencl]=ss2tf(Acl,Bcl,Ccl,Dcl);
[numcs,dencs]=ss2tf(Acs,Bcs,Ccs,Dcs);
Fcl=tf(numcl,dencl);
Fcs=tf(numcs,dencs);
Ft=Fcl*Fcs;
a=Ft.num{1,1};
b=Ft.den{1,1};

m1=[0 1;-b(1,3) -b(1,2)];
m0=zeros(2);

Ac= [m1 m0 m0 m0 m0 m0 m0 m0;
      m0 m1 m0 m0 m0 m0 m0 m0;
      m0 m0 m1 m0 m0 m0 m0 m0;
      m0 m0 m0 m1 m0 m0 m0 m0;
      m0 m0 m0 m0 m1 m0 m0 m0;
      m0 m0 m0 m0 m0 m1 m0 m0;
      m0 m0 m0 m0 m0 m0 m1 m0;
      m0 m0 m0 m0 m0 m0 m0 m1];

Bc = [zeros(1,8); %%% Las ganancias son de la forma 1/(nv*D^2)
      1./((D(1,:).^2));
      zeros(1,8);
      1./((D(2,:).^2));
      zeros(1,8);
      1./((D(3,:).^2));
      zeros(1,8);
      1./((D(4,:).^2));
      zeros(1,8);
      1./((D(5,:).^2));
      zeros(1,8);
      1./((D(6,:).^2));
      zeros(1,8);
      1./((D(7,:).^2));
      zeros(1,8);
      1./((D(8,:).^2))];

```



```

% r= [SP(1) SP(2) SP(3) SP(4) SP(5) SP(6) SP(7) SP(8)]';
% r1=[SP(1) 0 SP(3) SP(4) 0 SP(6) 0 SP(8)]';
% r2=[SP(1) SP(2) SP(3) SP(4) SP(5) SP(6) SP(7) SP(8)]';

% %%% Escenario 3 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% r= [ 0 0 0 0 0 0 0 0 ]';
% r1=[ 0 0 0 SP(4) 0 SP(6) 0 0 ]';
% r2=[ 0 0 0 0 0 0 0 0 ]';

% %%% Escenario 4 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% r= [ 0 0 0 0 0 0 0 0 ]';
% r1=[SP(1) SP(2) SP(3) SP(4) 0 0 0 0 ]';
% r2=[SP(1) SP(2) SP(3) SP(4) SP(5) SP(6) SP(7) SP(8)]';

u=zeros(q,1); % u(k-1) =0
y=zeros(q,1);
% u1=zeros(m1,N_sim);
% y1=zeros(n1,N_sim);

rw=g_rw*eye(Nc*q,Nc*q); %% factor de peso

Ky=inv(Phi_Phi*rw)*Phi_R
Kmpc=inv(Phi_Phi*rw)*Phi_F
Kx=Kmpc(:,1:16);

%restricciones de acción de control
u_min=0;
u_max=22;
%u_max=22*0.25;

sumU=zeros(N_sim,1);
%DeltaU=inv(Phi_Phi+rw*eye(Nc*m1,Nc*m1))*(Phi_R*r-Phi_F*Xf) %Nc*8 ocho
entradas

for kk=1:N_sim

if kk>=t_ev1/Delta_t
r=r1;
end
if kk>=t_ev2/Delta_t
r=r2;
end

DeltaU=inv(Phi_Phi+rw)*(Phi_R*r-Phi_F*Xf);
deltau=DeltaU(1:8,1);
u=u+deltau;

for i=1:8
if u(i)<u_min
u(i)=u_min;
else if u(i)>u_max
u(i)=u_max;
end
end

```

```

end
end

u1(:,kk)=u;
y1(:,kk)=y;
rr(:,kk)=r;

xm_old=xm;
xm=Ad*xm+Bd*u;
y=Cd*xm;
Xf=[xm-xm_old;y];

for i=1:8
    sumU(kk)=sumU(kk)+u(i);
end

end

%%% Graficas de comportamiento muestra a muestra

k=0:(N_sim-1);

t=Delta_t*k;

figure
subplot(211)
plot(k,y1)
xlabel('Sampling Instant')
ylabel('y')
legend('Output')
subplot(212)
plot(k,u1)
xlabel('Sampling Instant')
ylabel('u')
legend('Control')

figure(2)
plot(k,sumU)
xlabel('Sampling Instant')
ylabel('sumU')
legend('Output')

Función mpcgain_multivar_FINAL

function [F,Phi,Phi_Phi,Phi_F,Phi_R,A_e,
B_e,C_e]=mpcgain_multivar_FINAL(Ap,Bp,Cp,Nc,Np);

% m = # de entradas
% q = # de salidas
% n1= # de estados

[q,n1]=size(Cp);
[n1,m]=size(Bp);

```

```

A_e=eye(n1+q,n1+q); % dimensiones (estados+salidas):(estados+salidas)
A_e(1:n1,1:n1)=Ap;
A_e(n1+1:n1+q,1:n1)=Cp*Ap;

B_e=zeros(n1+q,q); % dimensiones (estados+salidas):salidas
B_e(1:n1,:)=Bp;
B_e(n1+1:n1+q,:)=Cp*Bp;

Iqq=eye(q,q);
Om=zeros(q,n1);

C_e=[Om Iqq]; % dimensiones (salidas:estados+salidas)

n=n1+q;
h(1:q,:)=C_e; %% El primer elemento de h ahora es una matriz
F(1:q,:)=C_e*A_e;

for kk=2:Np
    h(q*(kk-1)+1:kk*q,:)=h((q*(kk-2)+1):(kk-1)*q,:)*A_e; %Voy calculado
    C*A aumentando el indice de A
    F(q*(kk-1)+1:kk*q,:)=F((q*(kk-2)+1):(kk-1)*q,:)*A_e; %Voy aumentando
    el indice de A
end

v=h*B_e; %Multiplico h por B para obtener la primera
fila de Phi
[mv,nv]=size(v);
Phi = zeros(mv,Nc*nv); %Se crea la Matriz Phi de ceros
Phi(:,1:nv)=v; %ubicar datos en la matriz Phi
for i=2:Nc
    Phi(:,((i-1)*nv)+1:i*nv)=[zeros((i-1)*q,nv);v(1:mv-(i-1)*q,1:nv)];
end

BarRs=zeros(q*Np,q);
for kk=1:Np
    BarRs(((kk-1)*q)+1:kk*q,:)=eye(q,q);
end

Phi_Phi= Phi'*Phi;
Phi_F= Phi'*F;
Phi_R=Phi'*BarRs;

%Ky=inv(Phi_Phi+BarRs)*Phi_R;
%Kmpc=inv(Phi_Phi+BarRs)*Phi_F;

```

Código controlador LQR

```

clear all
clc
close all

do=1.45;
dh=2.00;
dv=1.5;
D=[do sqrt(do^2+dv^2) sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+dv^2+dh^2)
sqrt(do^2+4*dh^2) sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2) sqrt(do^2+9*dh^2)
sqrt(do^2+9*dh^2+dv^2);...
sqrt(do^2+dv^2) do sqrt(do^2+dv^2+dh^2) sqrt(do^2+dh^2)
sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2) sqrt(do^2+4*dh^2) sqrt(do^2+9*dh^2+dv^2)
sqrt(do^2+9*dh^2);...
sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+dv^2+dh^2) do sqrt(do^2+dv^2)
sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+dv^2+dh^2) sqrt(do^2+4*dh^2)
sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2);...
sqrt(do^2+dv^2+dh^2) sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+dv^2) do
sqrt(do^2+dv^2+dh^2) sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2)
sqrt(do^2+4*dh^2);...
sqrt(do^2+4*dh^2) sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2) sqrt(do^2+dh^2)
sqrt(do^2+dv^2+dh^2) do sqrt(do^2+dv^2) sqrt(do^2+dh^2)
sqrt(do^2+dv^2+dh^2);...
sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2) sqrt(do^2+4*dh^2) sqrt(do^2+dv^2+dh^2)
sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+dv^2) do sqrt(do^2+dv^2+dh^2)
sqrt(do^2+dh^2);...
sqrt(do^2+9*dh^2) sqrt(do^2+9*dh^2+dv^2) sqrt(do^2+4*dh^2)
sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2) sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+dv^2+dh^2) do
sqrt(do^2+dv^2);...
sqrt(do^2+9*dh^2+dv^2) sqrt(do^2+9*dh^2) sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2)
sqrt(do^2+4*dh^2) sqrt(do^2+dv^2+dh^2) sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+dv^2)
do];

%%%% Modelo planta %%%

%Lámpara

lamp_lum=2650;      %Flujo luminoso nominal lampara
lamp_area=3;       %Area de iluminación por lampara
CU=0.939;          %Coeficiente de utilización
FM=0.8;            %Factor de mantemiento
Pmax=22;           %Potencia máxima de la lampara W
nv=110;            %Eficacia luminosa de la lampara lm/W
vmax_lamp=10;      %Máximo voltaje de dimerización de la lampara V

lamp_lux=(lamp_lum*CU*FM)/lamp_area;

Kl=nv;
tl=0.02;

% Sensor

Ks=do^2*lamp_lux/(nv*Pmax);

```

```

ts=0.05;

Acs=-1/ts;
Bcs=Ks/ts;
Ccs=1;
Dcs=0;
Acl=-1/tl;
Bcl=Kl/tl;
Ccl=1;
Dcl=0;

siscs=ss(Acs,Bcs,Ccs,Dcs);
siscl=ss(Acl,Bcl,Ccl,Dcl);

[numcl,dencl]=ss2tf(Acl,Bcl,Ccl,Dcl);
[numcs,dencs]=ss2tf(Acs,Bcs,Ccs,Dcs);
Fcl=tf(numcl,dencl);
Fcs=tf(numcs,dencs);
Ft=Fcl*Fcs;
a=Ft.num{1,1};
b=Ft.den{1,1};

m1=[0 1;-b(1,3) -b(1,2)];
m0=zeros(2);

A_lqr=[m1 m0 m0 m0 m0 m0 m0 m0;
        m0 m1 m0 m0 m0 m0 m0 m0;
        m0 m0 m1 m0 m0 m0 m0 m0;
        m0 m0 m0 m1 m0 m0 m0 m0;
        m0 m0 m0 m0 m1 m0 m0 m0;
        m0 m0 m0 m0 m0 m1 m0 m0;
        m0 m0 m0 m0 m0 m0 m1 m0;
        m0 m0 m0 m0 m0 m0 m0 m1];

B_lqr=[zeros(1,8); %%% Las ganancias son de la forma 1/D^2
        1./((D(1,:).^2));
        zeros(1,8);
        1./((D(2,:).^2));
        zeros(1,8);
        1./((D(3,:).^2));
        zeros(1,8);
        1./((D(4,:).^2));
        zeros(1,8);
        1./((D(5,:).^2));
        zeros(1,8);
        1./((D(6,:).^2));
        zeros(1,8);
        1./((D(7,:).^2));
        zeros(1,8);
        1./((D(8,:).^2));];

B_lqr=a(1,3)*B_lqr; % El 6.341522272727273e+04 es la ganancia de la FdT
total

```

```

C_lqr=zeros(8,16);
C_lqr(1,1) = 1; C_lqr(2,3) = 1;C_lqr(3,5) = 1; C_lqr(4,7) = 1;
C_lqr(5,9) = 1; C_lqr(6,11) = 1;C_lqr(7,13) = 1; C_lqr(8,15) = 1;

D_lqr=zeros(8,8);

%% Discretización de A,B,C y D para conseguir G y H
Ts=0.1;
[Ad_lqr,Bd_lqr,Cd_lqr, Dd_lqr] = c2dm(A_lqr,B_lqr,C_lqr,D_lqr,Ts);
G=Ad_lqr;
H=Bd_lqr;
C=Cd_lqr;

%% Entonces para plantear el seguimiento se crean las matrices ampliadas

Ga=[ G   zeros(16,8);
     -C*G eye(8,8) ];

Ha=[ H;
     -C*H];

%% Parámetros de ajuste Q y R

Q = zeros(24); %% Se esta ponderando solo x3 que es la integral del
error
%% Ponderación estado x1 lux
Qx1=100;
Q(1,1) = Qx1;          Q(4,4) = Qx1;
Q(7,7) = Qx1;          Q(10,10) = Qx1;
Q(13,13) = Qx1;        Q(16,16) = Qx1;
Q(19,19) = Qx1;        Q(22,22) = Qx1;

%% Ponderación estado x2 derivada de lux
Qx2=100;
Q(2,2) = Qx2;          Q(5,5) = Qx2;
Q(8,8) = Qx2;          Q(11,11) = Qx2;
Q(14,14) = Qx2;        Q(17,17) = Qx2;
Q(20,20) = Qx2;        Q(23,23) = Qx2;

%% Ponderación estado x3 integral del error
Qx3=100;
Q(3,3) = Qx3;          Q(6,6) = Qx3;
Q(9,9) = Qx3;          Q(12,12) = Qx3;
Q(15,15) = Qx3;        Q(18,18) = Qx3;
Q(21,21) = Qx3;        Q(24,24) = Qx3;

R = eye(8)*100;

k = dlqr(Ga,Ha,Q,R);
K = k(:,1:16);
Ki= k(:,17:24);

Kb=1800;

```

```

%% Sistema discreto con todos los estados de salida

C_lqr=eye(16,16);
D_lqr=zeros(16,8);

Ts=0.1;
[Ad_lqr,Bd_lqr,Cd_lqr, Dd_lqr] = c2dm(A_lqr,B_lqr,C_lqr,D_lqr,Ts);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Escenarios de prueba para medida de desempeño
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
%% Tiempos de eventos %%%
t1=30;
t2=60;
gama_iT=[t1,t1,t1,t1,t1,t1,t1,t1; %% tiempo primer cambio
          t2,t2,t2,t2,t2,t2,t2,t2]; %% tiempo segundo cambio

% %%% Escenario 1 %%%
% gama_iVi=[ 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]; %% valor inicio
% gama_iVf=[ 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1; %% valro final primer cambio
%           0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0]; %% -1 si cae a 0, 1 si sube a 1, 0
no cambia

% %%% Escenario 2 %%%
% gama_iVi=[ 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]; %% valor inicio
% gama_iVf=[ 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1; %% valro final primer cambio
%           0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0]; %% -1 si cae a 0, 1 si sube a 1, 0
no cambia

% %%% Escenario 3 %%%
% gama_iVi=[ 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]; %% valor inicio
% gama_iVf=[ 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0; %% valro final primer cambio
%           0, 0, 0, -1, 0, -1, 0, 0]; %% -1 si cae a 0, 1 si sube a 1,
0 no cambia

% %%% Escenario 4 %%%
% gama_iVi=[ 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]; %% valor inicio
% gama_iVf=[ 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0; %% valro final primer cambio
%           0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1]; %% -1 si cae a 0, 1 si sube a 1, 0
no cambia

%SetPoints
%Régimen Homogéneo
SP=[500,500,500,500,500,500,500,500];
% Régimen No Homogéneo
%SP=[550,550,500,500,500,500,400,400];

% Saturación
min=0;
max=Pmax;

```

Código PID

```

clear all
clc
close all

do=1.45;
dh=2.00;
dv=1.5;

D=[do sqrt(do^2+dv^2) sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+dv^2+dh^2)
sqrt(do^2+4*dh^2) sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2) sqrt(do^2+9*dh^2)
sqrt(do^2+9*dh^2+dv^2);...
sqrt(do^2+dv^2) do sqrt(do^2+dv^2+dh^2) sqrt(do^2+dh^2)
sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2) sqrt(do^2+4*dh^2) sqrt(do^2+9*dh^2+dv^2)
sqrt(do^2+9*dh^2);...
sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+dv^2+dh^2) do sqrt(do^2+dv^2)
sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+dv^2+dh^2) sqrt(do^2+4*dh^2)
sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2);...
sqrt(do^2+dv^2+dh^2) sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+dv^2) do
sqrt(do^2+dv^2+dh^2) sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2)
sqrt(do^2+4*dh^2);...
sqrt(do^2+4*dh^2) sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2) sqrt(do^2+dh^2)
sqrt(do^2+dv^2+dh^2) do sqrt(do^2+dv^2) sqrt(do^2+dh^2)
sqrt(do^2+dv^2+dh^2);...
sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2) sqrt(do^2+4*dh^2) sqrt(do^2+dv^2+dh^2)
sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+dv^2) do sqrt(do^2+dv^2+dh^2)
sqrt(do^2+dh^2);...
sqrt(do^2+9*dh^2) sqrt(do^2+9*dh^2+dv^2) sqrt(do^2+4*dh^2)
sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2) sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+dv^2+dh^2) do
sqrt(do^2+dv^2);...
sqrt(do^2+9*dh^2+dv^2) sqrt(do^2+9*dh^2) sqrt(do^2+4*dh^2+dv^2)
sqrt(do^2+4*dh^2) sqrt(do^2+dv^2+dh^2) sqrt(do^2+dh^2) sqrt(do^2+dv^2)
do];
Dd=[1 1 1 1 1 1 1 1];

ICs=0;
ICl=0;

%Lámpara

lamp_lum=2650;      %Flujo lumínico nominal lámpara
lamp_area=3;       %Área de iluminación por lámpara
CU=0.939;          %Coeficiente de utilización
FM=0.8;            %Factor de mantenimiento
Pmax=22;           %Potencia máxima de la lámpara W
nv=110;            %Eficacia luminosa de la lámpara lm/W
vmax_lamp=10;      %Máximo voltaje de dimerización de la lámpara V

lamp_lux=(lamp_lum*CU*FM)/lamp_area;

Kl=nv;
tl=0.02;

```

```

% Sensor

Ks=do^2*lamp_lux/(nv*Pmax);
ts=0.05;

Acs=-1/ts;
Bcs=Ks/ts;
Ccs=1;
Dcs=0;
Acl=-1/tl;
Bcl=Kl/tl;
Ccl=1;
Dcl=0;

siscs=ss(Acs,Bcs,Ccs,Dcs);
siscl=ss(Acl,Bcl,Ccl,Dcl);

[numcl,denc1]=ss2tf(Acl,Bcl,Ccl,Dcl);
[numcs,dencs]=ss2tf(Acs,Bcs,Ccs,Dcs);
Fcl=tf(numcl,denc1);
Fcs=tf(numcs,dencs);

%Tiempo de muestreo
tm=0.1;

sisds=c2d(siscs,tm);
sisdl=c2d(siscl,tm);

[Ads,Bds,Cds,Dds]=ssdata(sisds);
[Adl,Bdl,Cdl,Ddl]=ssdata(sisdl);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Escenarios de prueba para medida de desempeño
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%% Tiempos de eventos %%%
t1=30;
t2=60;
gama_iT=[t1,t1,t1,t1,t1,t1,t1,t1; %% tiempo primer cambio
         t2,t2,t2,t2,t2,t2,t2,t2]; %% tiempo segundo cambio

% %%% Escenario 1 %%%
% gama_iVi=[ 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]; %% valor inicio
% gama_iVf=[ 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1]; %% valor final primer cambio
%           0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0]; %% -1 si cae a 0, 1 si sube a 1, 0
no cambia

% %%% Escenario 2 %%%
% gama_iVi=[ 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]; %% valor inicio
% gama_iVf=[ 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1]; %% valor final primer cambio
%           0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0]; %% -1 si cae a 0, 1 si sube a 1, 0
no cambia

```

```
% %% Escenario 3 %%%
% gama_iVi=[ 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]; %% valor inicio
% gama_iVf=[ 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0]; %% valor final primer cambio
%           0, 0, 0, -1, 0, -1, 0, 0]; %% -1 si cae a 0, 1 si sube a 1,
0 no cambia

% %% Escenario 4 %%%
% gama_iVi=[ 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]; %% valor inicio
% gama_iVf=[ 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0]; %% valor final primer cambio
%           0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1]; %% -1 si cae a 0, 1 si sube a 1, 0
no cambia

%SetPoints
%Régimen Homogéneo
SP=[500,500,500,500,500,500,500,500];
% Régimen No Homogéneo
%SP=[550,550,500,500,500,500,400,400];

% Funciones de transferencia Lámparas y Sensores
[numL,denL]=ss2tf(Acl,Bcl,Ccl,Dcl);
Fl=tf(numL,denL);

[numS,denS]=ss2tf(Acs,Bcs,Ccs,Dcs);
Fs=tf(numS,denS);

FTls=Fl*Fs; %% función de transferencia total Luz y Sensores
FTd=c2d(FTls,tm);

%% Controlador

Kp=0.000025;
Ti=0.001552;
Td=0;
Ki=Kp/Ti;
Kd=Kp*Td;

%windup
Kb=10;

%saturación
max=Pmax;
%max=Pmax*0.25;
min=0;
```

