



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Modelado de consumo energético en  
redes IoT basado en autómatas  
celulares**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero en Telecomunicaciones**

**P R E S E N T A**

Joel Reyes Vargas

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Luis Francisco García Jiménez



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020**



# Agradecimientos

A mi familia, gracias por brindarme las condiciones que me permitieron obtener educación universitaria, gracias por su dedicación y su confianza. Agradezco especialmente a mis padres y hermanas, todo lo que soy es gracias a ustedes, y de la misma forma todo mi esfuerzo es por y para ustedes.

Gracias a las personas que han formado parte de mi desarrollo educativo, tanto profesores como compañeros. Agradezco a mis amigos por el apoyo y las risas, gracias por estar siempre para mí.

De la misma forma agradezco al Dr. Luis Francisco García Jiménez por su ayuda en el desarrollo de este trabajo, así como las aportaciones y recomendaciones para mejorarlo por parte de la Dra. María Elena Lárraga Ramírez y el Dr. José Jaime Camacho Escoto.

Finalmente agradezco el apoyo brindado por parte del proyecto DGAPA-PAPIIT IA105520.



# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>1</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>3</b>
1.1. Definición del problema . . . . .	3
1.2. Hipótesis . . . . .	4
1.3. Metas . . . . .	4
1.3.1. Meta general . . . . .	4
1.3.2. Metas particulares . . . . .	4
1.4. Metodología . . . . .	4
1.5. Contribución . . . . .	4
1.6. Descripción del contenido . . . . .	5
<b>2. Antecedentes</b>	<b>7</b>
2.1. Autómatas celulares . . . . .	7
2.1.1. Malla . . . . .	7
2.1.2. Vecindad . . . . .	9
2.1.3. Estados . . . . .	9
2.1.4. Reglas de transición . . . . .	10
2.2. Estado del arte en redes de sensores con autómatas celulares . . . . .	11
<b>3. Análisis de patrones</b>	<b>13</b>
3.1. Básicos . . . . .	13
3.2. Complejos . . . . .	15
<b>4. Propuesta de modelo</b>	<b>19</b>
4.1. Primera regla: ciclo de trabajo . . . . .	19
4.2. Segunda regla: probabilidad de cambio . . . . .	19
4.3. Planteamiento del modelo . . . . .	21
<b>5. Análisis de desempeño</b>	<b>23</b>
5.1. Modelo de pruebas . . . . .	23
5.2. Ciclo de trabajo . . . . .	24
5.3. Consumo energético . . . . .	25
5.4. Estadística . . . . .	26
5.5. Comparación . . . . .	30
<b>6. Conclusiones</b>	<b>33</b>
6.1. Conclusiones generales . . . . .	33
6.2. Verificación de hipótesis . . . . .	33
6.3. Perspectivas de la investigación . . . . .	34



# Índice de figuras

2.1. Geometrías de mallas. . . . .	8
2.2. Celda de una malla cuadrada . . . . .	8
2.3. Dimensión de malla de geometría cuadrada. . . . .	8
2.4. Vecindad de Moore para diferentes radios de vecindad. . . . .	9
2.5. Vecindad de von Neumann para diferentes radios de vecindad. . . . .	9
2.6. Desarrollo generacional con las reglas del juego de la vida. . . . .	10
2.7. Desarrollo generacional con la regla de contacto. . . . .	11
3.1. Patrón cuadrado. . . . .	13
3.2. Patrón de oscilador de dos periodos. . . . .	14
3.3. Patrón de glider. . . . .	14
3.4. Patrón de generador de gliders. . . . .	15
3.5. Patrón inicial de die hard simétrico. . . . .	16
4.1. Autómata celular del juego de la vida sin reglas adicionales. . . . .	20
4.2. Autómata celular del juego de la vida con la regla del ciclo de trabajo. . . . .	20
4.3. Autómata celular del juego de la vida con las dos reglas adicionales propuestas. . . . .	21
5.1. Red de sensores basada en el modelo propuesto, con estado inicial aleatorio. . . . .	23
5.2. Cobertura de la red de acuerdo a la cantidad de resultados promediados. . . . .	24
5.3. Variación del promedio de cobertura en la red respecto al valor de $n$ . . . . .	25
5.4. Variación del promedio vida de la red respecto al valor de $n$ . . . . .	25
5.5. Cobertura promedio durante toda la vida de la red. . . . .	26
5.6. Cobertura promedio de la red hasta que un sensor se queda sin batería. . . . .	27
5.7. Sensor (negro) con vecinos activos (gris) en vecindad de radio 2. . . . .	28
5.8. Estado de la red cuando uno de los sensores se queda sin batería. . . . .	28
5.9. Cantidad de vecinos respecto al porcentaje de sensores sin batería. . . . .	29
5.10 Aspecto de la red cuando el 20% de los sensores se queda sin batería. . . . .	29
5.11 Estado final de una red basada en las reglas del juego de la vida. . . . .	30





# Índice de tablas

5.1. Resultados estadísticos hasta que un sensor se queda sin batería. . . . .	27
5.2. Resultados estadísticos hasta que un 20% de los sensores se queda sin batería. .	30
5.3. Resultados estadísticos con las reglas del juego de la vida. . . . .	30
5.4. Comparación de vida útil de la red para diferentes escenarios. . . . .	31
5.5. Comparación de cobertura promedio para diferentes escenarios. . . . .	31
5.6. Comparación de sensores activos dentro de la vecindad de radio 1 para diferentes escenarios. . . . .	31
5.7. Comparación de sensores activos dentro de la vecindad de radio 2 para diferentes escenarios. . . . .	32

# Resumen

Las redes de sensores se componen por dispositivos que suelen ser alimentados por pequeñas baterías. Debido a esto, es de suma importancia implementar algoritmos que minimicen el tiempo que un sensor permanece encendido.

Una de las principales tareas en las redes IoT es recolectar información como temperatura, humedad o polen, para ser enviada a un nodo principal (*sink*), el cual procesa dicha información para tomar alguna acción. Sin embargo, un sensor suele recolectar mediciones muy parecidas a la de sus vecinos, por lo que carece de sentido que todos los vecinos recolecten la misma información cada instante de tiempo. Este problema en las redes IoT presenta la oportunidad de establecer estrategias inteligentes que minimicen la cantidad de sensores que monitorizan una área y de esta forma aumentar la vida útil de los sensores.

Actualmente se han propuesto diferentes técnicas que minimizan el uso energético en los sensores. Una de ellas es el uso de autómatas celulares. Un autómata es un sistema discreto, el cual se puede entender como una entidad que cuenta con un estado, una vecindad de entidades iguales a él y una función de transición que le permite cambiar de estado. Aunque existen propuestas que reducen el consumo energético en las redes de sensores usando autómatas celulares, muchas de éstas no garantizan un número mínimo de nodos vecinos que permitan propagar la información a diferentes partes de la red. Por ello, esta tesis propone un modelo basado en un autómata celular del *juego de la vida* (uno de los conjuntos de reglas de transición más populares en autómatas celulares) para una red inalámbrica de sensores, con el fin de extender la vida de los dispositivos y a su vez garantizar un número mínimo de vecinos que permita el correcto uso de los protocolos de encaminamiento.



# Capítulo 1

## Introducción

El uso de sensores es cada vez más frecuente, en gran parte, debido a la popularidad que ha tomado internet de las cosas (IoT). Una parte esencial de las redes IoT consiste en recolectar información a través de diversos sensores para ser enviada a un nodo principal (*sink*), donde es recolectada y procesada. De este modo, una red IoT se puede ver como una red inalámbrica de sensores (WSN), en la cual cada nodo debe tomar una acción determinada dependiendo el estado de sus nodos vecinos. El tiempo que una red de sensores permanece activa está estrechamente ligada con el consumo energético de cada nodo. Por ello, es de suma importancia buscar algoritmos inteligentes que puedan disminuir el consumo energético.

Muchas veces, los sensores recolectan mediciones que resultan ser muy similares a las de sus vecinos, debido a que la distribución de los dispositivos muchas veces provoca que se encuentren demasiado cerca físicamente uno de otro. Algunos de los parámetros que se miden son temperatura, humedad y luminosidad. Es por esto que resulta útil poner a los sensores en estado de reposo con cierta frecuencia y que a la vez se activen en diferentes tiempos impidiendo así que se traslapen sus mediciones.

Se han propuesto diversas estrategias para disminuir el consumo energético en las redes de sensores [1][2][3], una de ellas es el uso de autómatas celulares. Un autómata celular consiste en una entidad que cuenta con un estado, una vecindad y un conjunto de reglas de transición. Estas entidades pueden ser usadas para modelar una red de sensores, donde cada entidad es un nodo de la red, el estado indica si el nodo se encuentra activo o en reposo, la vecindad está compuesta por las entidades que se encuentran en el rango de comunicación del nodo, finalmente las reglas de transición determinan el comportamiento de cada nodo con base en el estado de los nodos que se encuentren en su vecindad [4][5].

Un autómata celular puede comportarse de múltiples formas dependiendo de sus reglas de transición así como de su estado inicial. De esta forma, existen combinaciones de éstos dos elementos que resultan en comportamientos que pueden ser útiles en el modelado de diversos sistemas. Es por esto que en esta tesis se propone un algoritmo que disminuye el consumo energético en una red de sensores usando autómatas celulares, planteando un escenario en el que los sensores que componen a la red se encuentran distribuidos uniformemente dentro de una malla de dos dimensiones con forma cuadrada y que se comportan de acuerdo a variaciones del conjunto de reglas de transición conocido como *el juego de la vida* [4] [6], el cual permite modelar los principales casos de interés en una red inalámbrica de sensores.

### 1.1. Definición del problema

Debido a que los dispositivos que componen las redes inalámbricas de sensores usualmente son alimentados por pequeñas baterías, el ahorro de energía es una tarea primordial en el despliegue y funcionamiento de este tipo de redes.

Por otro lado, una de las principales tareas en las redes IoT es recolectar información para ser enviada a un nodo principal. Sin embargo, un sensor suele recolectar mediciones parecidas a la de sus vecinos, por lo que carece de sentido que los nodos vecinos recolecten

la misma información.

Por ello, esta tesis propone un modelo basado en el uso de autómatas celulares para disminuir el consumo energético en una red de sensores sin sacrificar la funcionalidad de la misma, ya que aunque existen propuestas para el uso de autómatas celulares en redes de sensores, muchas de estas propuestas [7] [8] [9] [10], muchas de estas no garantizan un mínimo número de vecinos que reenvíen la información, perjudicando el funcionamiento de los protocolos de capas superiores (modelo OSI), como son los protocolos de encaminamiento.

## 1.2. Hipótesis

*Variaciones en las reglas del juego de la vida, permite extender la vida útil de los sensores sin comprometer el funcionamiento de los protocolos de encaminamiento.*

## 1.3. Metas

### 1.3.1. Meta general

Disminuir el consumo energético en redes de sensores sin comprometer su funcionamiento usando autómatas celulares.

### 1.3.2. Metas particulares

- Proponer variaciones en las reglas del juego de la vida en una red de sensores.
- Desarrollar un simulador que permita visualizar el comportamiento del autómata celular.
- Realizar un análisis estadístico para determinar el conjunto de reglas óptimas.

## 1.4. Metodología

Para alcanzar la meta de este trabajo se siguen las siguientes fases.

- Entender el concepto de autómatas celulares, así como el comportamiento de los patrones más conocidos.
- Programar un simulador que permita modificar las reglas definidas en los autómatas celulares.
- Extender las reglas del juego de la vida con la finalidad.
- Medir en el simulador el consumo energético de cada sensor.
- Realizar un análisis estadístico de los resultados para cada uno de los patrones y conjuntos de reglas propuestas.
- Comparar los resultados con el fin de obtener el mejor conjunto de reglas.

## 1.5. Contribución

- Se propone un algoritmo para disminuir el consumo energético en redes de sensores con base en autómatas celulares.
- Se propone un conjunto de reglas para hacer viable el uso de autómatas celulares en redes de sensores sin perjudicar a capas superiores del modelo OSI.

## 1.6. Descripción del contenido

Con la finalidad de alcanzar la meta planteada previamente, la estructura de esta tesis se plantea de la siguiente forma:

- El capítulo 2 presenta los conceptos básicos sobre los autómatas celulares, así como una revisión de los trabajos más relevantes respecto a la implementación de autómatas celulares en redes de sensores.
- El capítulo 3 presenta algunos de los patrones iniciales más populares en el juego de la vida, así como sus limitaciones para ser implementados en una red de sensores.
- El capítulo 4 presenta dos reglas propuestas para hacer posible la implementación del juego de la vida en una red de sensores, así como prolongar la vida útil de la misma.
- El capítulo 5 presenta los resultados y un análisis estadístico obtenido a partir de simular una red inalámbrica de sensores, la cual se mapea a un autómata celular regido bajo las reglas de transición del juego de la vida.
- El capítulo 6 presenta las conclusiones generales, la verificación de la hipótesis y las perspectivas de investigación.



# Capítulo 2

## Antecedentes

En este capítulo, se define el concepto de autómata celular junto con los cuatro principales elementos que lo componen; malla, vecindad, estado y reglas de transición. Además, se presentan los trabajos más relevantes relacionados con el uso de autómatas celulares en redes inalámbricas de sensores.

### 2.1. Autómatas celulares

Un autómata celular es un “sistema, de tiempo discreto y descentralizado que puede ser usado para simular sistemas físicos” [9]. Intencionalmente se suele usar esta definición ya que es bastante amplia y permite desarrollar de forma más profunda el concepto, sin embargo, de forma más detallada se define a un autómata celular como una cuádrupla  $A = \{C, S, \delta, N\}$  [8], donde  $C$  representa las celdas de la malla,  $S$  el estado de las celdas,  $\delta$  representa la regla de transición del autómata y  $N$  representa la vecindad de cada celda. En un tiempo  $t$ , cada celda  $C$  tiene asignado un estado  $S$ . El estado de una celda  $c \in C$  en el tiempo  $t + 1$  es determinado por la función de transición  $\delta$  dependiendo del estado actual de  $c$  y los estados de las celdas en la vecindad de  $c$  en el tiempo  $t$ . De esta forma, se puede entender al autómata celular como un sistema discreto, compuesto por un número infinito de entidades que cuentan con una vecindad, con un estado y un conjunto de reglas de transición. Como se menciona en la primera definición, un autómata celular se desarrolla en tiempo discreto y a cada uno de estos tiempos se les denomina generación. Por otro lado, es importante destacar que si bien el comportamiento de un autómata celular está determinado por sus reglas de transición, también depende del estado inicial de cada una de las celdas y su ubicación, formando así patrones iniciales con comportamiento característico.

A continuación, se describe de forma detallada cada uno de los componentes con la finalidad de visualizar al autómata celular dentro de una cuadrícula donde cada cuadrado representa una entidad y el color que tome dicho cuadrado representa su estado.

#### 2.1.1. Malla

Una malla puede ser presentada como un grafo, el cual tiene la capacidad formar diferentes geometrías. Aunque la mayoría de las aplicaciones de autómatas celulares se basan en una malla de forma cuadrada, también existen mallas de forma triangular, hexagonal. Estas mallas son conocidas como mallas Abelianas, pero también existen mallas de geometría irregular, conocidas como mallas no Abelianas [4]. En la figura 2.1 se muestran ejemplos de mallas de geometría regular. Por otro lado, para representar una malla de geometría irregular se suelen usar diagramas de Voronoi.

A los elementos que conforman una malla se les conoce como celdas. Al tratarse de un grafo, se define a las celdas de la malla como cualquier grupo cerrado mínimo de vértices y aristas, es decir, que no contiene ninguno de estos elementos dentro de sí. En la figura 2.2 se



muestra una celda de una malla cuadrada, donde los vértices se representan con círculos y las aristas con líneas rectas.

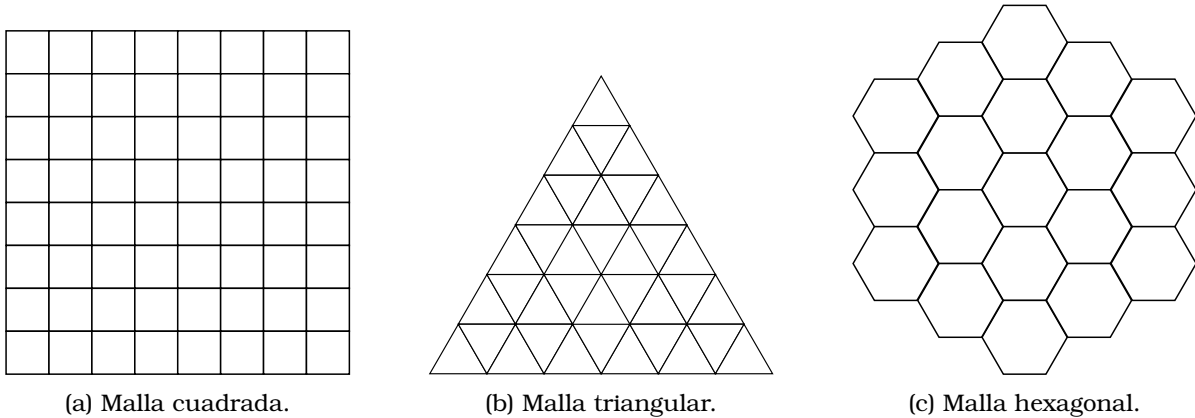


Figura 2.1: Geometrías de mallas.

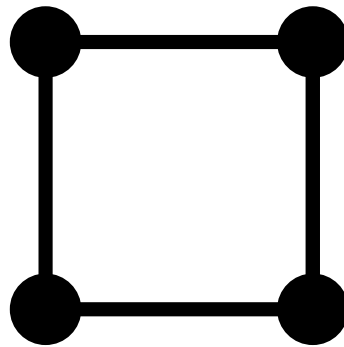


Figura 2.2: Celda de una malla cuadrada

La malla de un autómata celular puede ser de dimensión 1 o mayor, además se extiende de forma infinita, sin embargo es imposible visualizar de forma gráfica una malla infinita de dimensión 4 o superior, por lo que la mayoría de las aplicaciones con autómatas celulares suelen basarse en una malla finita de dimensión 2. En la figura 2.3, se muestra una malla de geometría cuadrada de diferentes dimensiones.

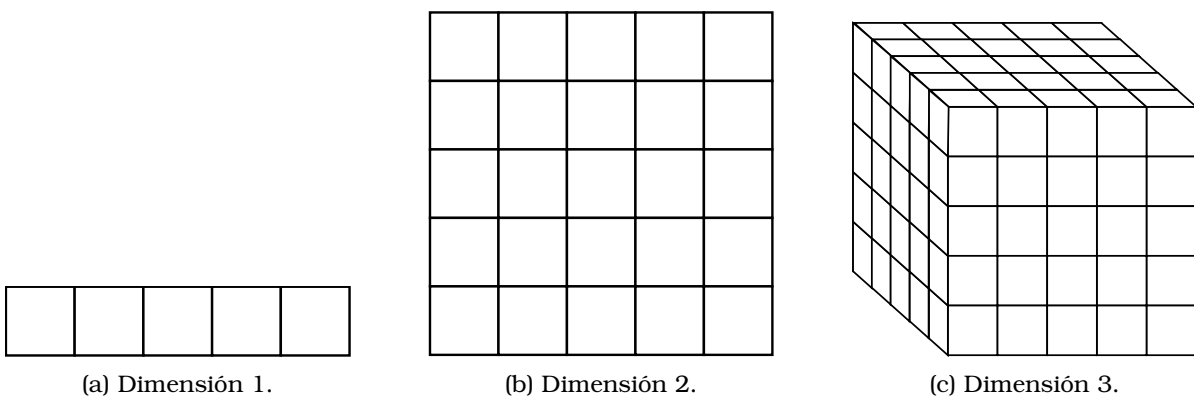


Figura 2.3: Dimensión de malla de geometría cuadrada.

Para facilitar el estudio, en esta tesis se usa exclusivamente una malla finita de geometría cuadrada y de dimensión 2.

### 2.1.2. Vecindad

En un autómata celular, cada celda es capaz de interactuar con un número determinado de celdas en su entorno. A la celda sobre la cual se desea visualizar su vecindad se le conoce como celda origen. La celda origen puede contar con diferentes formas y radios de vecindad. Las formas más populares de vecindades son la vecindad de Moore y la de von Neumann [11] [4]. En las figuras 2.4 y 2.5 se muestran las vecindades de Moore y de von Neumann con diferentes radios para una malla de geometría cuadrada y de dimensión 2. La celda origen se presenta en negro y su vecindad en color gris.

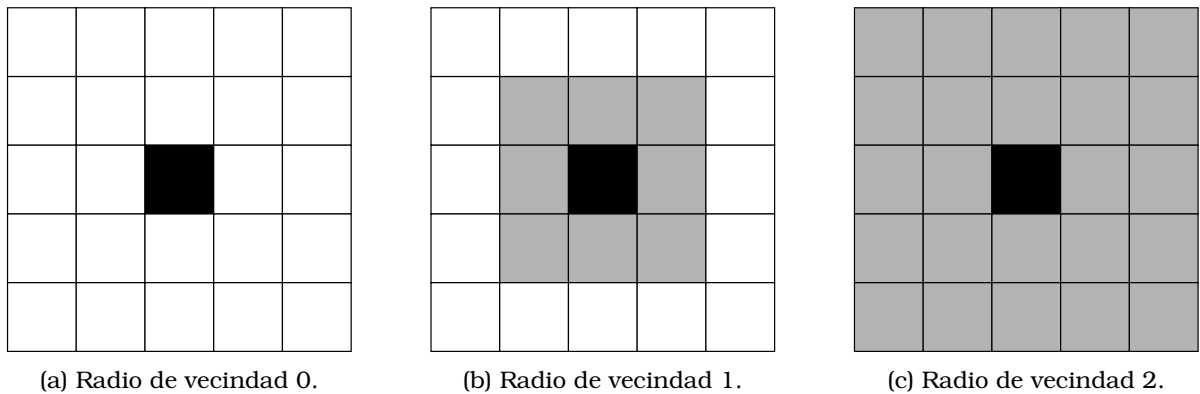


Figura 2.4: Vecindad de Moore para diferentes radios de vecindad.

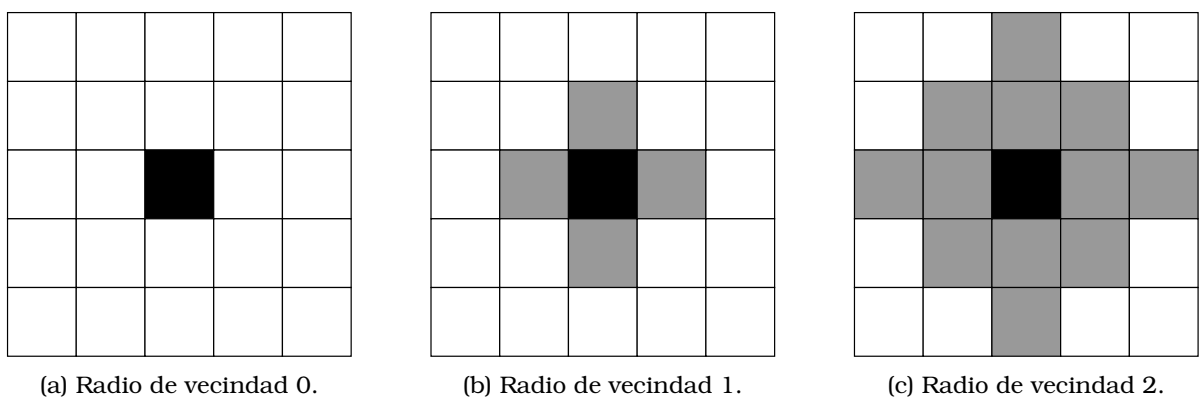


Figura 2.5: Vecindad de von Neumann para diferentes radios de vecindad.

En esta tesis se usan las vecindades de Moore de radio 1 y 2.

### 2.1.3. Estados

Los estados de un autómata celular son un conjunto finito de valores, una celda sólo puede tomar uno de estos valores a la vez. En esta tesis sólo se usan dos valores diferentes, representados en color blanco y en negro, de tal forma que cuando una celda tome alguno de estos valores, se representará con su respectivo color. En esta tesis el color blanco representa un estado que representa un estado de reposo, mientras que el negro representa un estado de actividad.

Como se mencionó previamente, un autómata celular es un sistema de tiempo discreto, en el cual a cada unidad de tiempo se le conoce como generación. El estado de una celda sólo puede cambiar al avanzar desde una generación  $t$  a una generación  $t + 1$ .

### 2.1.4. Reglas de transición

El comportamiento de los autómatas celulares está determinado por las reglas que se definen, estas reglas pueden provocar el cambio de estado de las celdas, que como se mencionó anteriormente, al tratarse de un sistema discreto, los cambios de estado solo pueden darse de forma discreta, es decir, de generación en generación. Uno de los conjuntos de reglas más populares de los autómatas celulares es conocido como “el juego de la vida” y consiste en:

1. Una celda que se encuentra en estado de reposo, cambia de estado en la siguiente generación sólo si dentro de su vecindad de Moore de radio 1 hay exactamente tres celdas en estado activo en la generación actual, de lo contrario permanece en el mismo estado.
2. Una celda que se encuentra en estado activo, mantiene su estado en la siguiente generación si dentro de su vecindad de Moore de radio 1 hay dos o tres vecinos en estado activo en la generación actual, de lo contrario cambia de estado.

Se nombró a este conjunto de reglas como “el juego de la vida” debido a que una celda permanece activa o *viva* si cuenta con suficientes vecinos para convivir, por el contrario, la celda pasa a estado de reposo o *muere* cuando no tiene suficientes vecinos con quien convivir o cuando tiene demasiados vecinos, lo que provoca que los recursos en su vecindad no sean suficientes para todas las entidades.

Este conjunto de reglas se ha usado para modelar diversos sistemas como redes neuronales y el comportamiento de las células humanas. En la figura 2.6, se muestra el desarrollo en generaciones de un autómata celular con un patrón inicial (primera generación) bajo las reglas del juego de la vida, en donde las celdas en negro representan el estado activo, mientras que las celdas en blanco representan el estado de reposo.

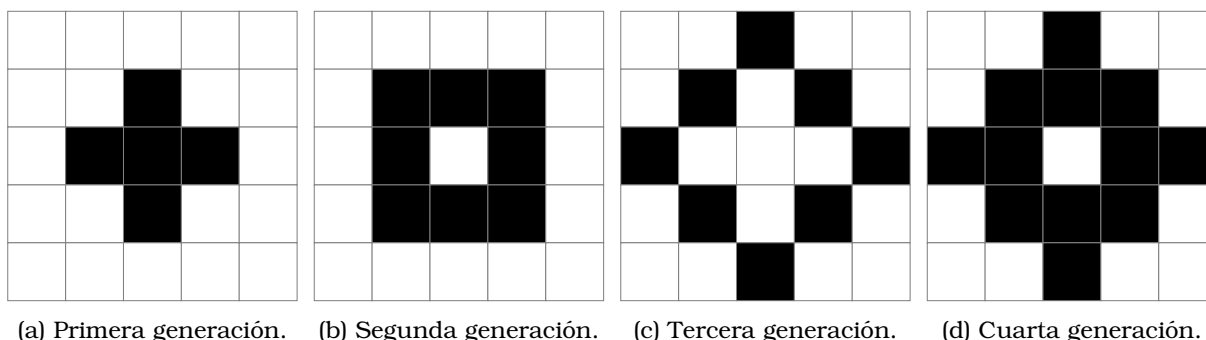


Figura 2.6: Desarrollo generacional con las reglas del juego de la vida.

Se puede observar que las reglas se aplican de forma sincrónica en todas las celdas, por lo que el cambio de estado de cada una de las celdas es independiente al cambio de estado de las demás, aún cuando estas celdas se encuentren en su vecindad de Moore de radio 1. Es por esto que el estado de las celdas en una generación futura es completamente dependiente del estado de las celdas en la generación anterior, generando así patrones que ya se tienen bien definidos.

De la misma forma, existen reglas de transición mucho más simples como la “regla de contacto”, la cual consiste en una sola regla:

1. Una celda estará en estado activo en la siguiente generación si existe al menos una celda en estado activo dentro de su vecindad de Moore de radio 1 en la generación actual.

El nombre de esta regla se debe a que una entidad se activa cuando otra entidad activa entra en contacto con ella. En la figura 2.7 se muestra el desarrollo por generaciones de un autómata celular con solo una celda en estado activo (mostrada en negro) como primera generación bajo la regla de contacto.

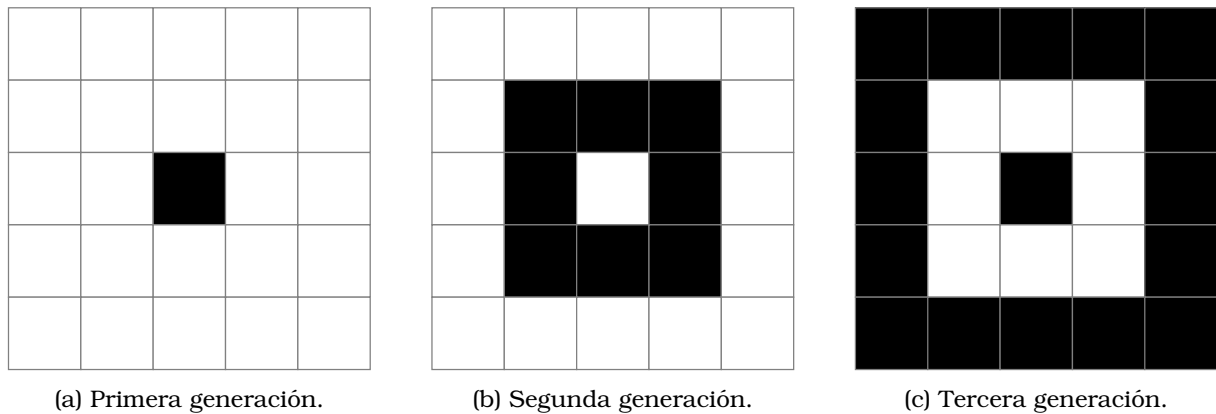


Figura 2.7: Desarrollo generacional con la regla de contacto.

En ambos casos, el conjunto de reglas responde a un patrón inicial (primera generación) de los cuales se hablará en el siguiente capítulo.

En esta tesis se propone modelar una red de sensores con base en un autómata celular del juego de la vida, debido a que sus condiciones representan dos escenarios de amplia importancia en estas redes. Recordando una de las reglas del juego de la vida tenemos que una celda en estado activo pasa a estado de reposo en la siguiente generación si cuenta con más de 3 o con menos de 2 vecinos en estado activo durante la generación actual. El primer escenario a tomar en cuenta es el caso en el que se tienen más de 3 vecinos en estado activo, ya que como se mencionó en el capítulo 1, los sensores suelen tomar mediciones muy parecidas a las de sus vecinos, por lo que resultaría útil que algunos de los sensores no realizaran sus tareas, justo como lo propone la regla. El segundo escenario es en el que se tienen menos de 2 vecinos en estado activo, en una red de sensores es de gran importancia la transmisión de información, para lo cual se requiere de suficientes vecinos con los cuales comunicarse, es por esto que si se tienen muy pocos vecinos carece de sentido realizar las tareas de los sensores, ya que no podrán comunicar la información que recolecten.

## 2.2. Estado del arte en redes de sensores con autómatas celulares

Como se mencionó anteriormente, los autómatas celulares pueden ser usados para modelar diversos sistemas físicos [12] [13], de esta forma se propone modelar una red inalámbrica de sensores. Uno de los principales problemas en las redes de sensores es que muchas veces estos dispositivos son distribuidos de manera aleatoria. Esto puede causar que los sensores no puedan enviar la información recolectada correctamente debido a limitaciones de cobertura. Por ejemplo, en [14] los autores proponen un método para disminuir el consumo energético y mejorar la cobertura en redes de sensores usando autómatas celulares. Este método busca que al menos dos sensores cubran la misma área con base en los estados de sus vecinos. Sin embargo, no garantiza que protocolos de capas superiores puedan funcionar correctamente.

A diferencia de [14], en esta tesis, las vecindades de radio 1 y 2 se definen como los dispositivos que se encuentra a uno o a dos saltos del sensor origen respectivamente, mientras que la ubicación de cada dispositivo es el centro de cada uno de los cuadrados que compone la cuadrícula.

De la misma forma, los autores en [7] proponen una forma de reducir el consumo energético de una red de sensores usando autómatas celulares, en este caso usan la vecindad de von Neuman para cada uno de los nodos, además que su regla de transición consiste en que un nodo estará vivo siempre que cuente con energía y con más de dos vecinos vivos, de lo contrario entrará en estado de reposo. También los autores propusieron que un nodo puede vivir en la siguiente generación con una probabilidad basada en el número de vecinos vivos que tenga en la generación actual. Sus resultados muestran que para una cuadrícula de 50 por 50

y con 100 cargas de batería, se obtuvo una cobertura promedio de aproximadamente 60 % del área durante aproximadamente 150 generaciones. A diferencia de este trabajo, en esta tesis se propone usar la vecindad de Moore, una variación de las reglas del juego de la vida y una condición probabilística basada en el estado de la batería de cada nodo en lugar del número de vecinos.

Siguiendo la misma línea de investigación, los autores en [9] proponen el uso de bloques de sensores, cada bloque está compuesto por nueve sensores acomodados como si se tratase de un nodo junto con sus ocho vecinos correspondientes a una vecindad de Moore, además plantean el uso de equipo real, lo cual les permite obtener un análisis de consumo energético mucho más apegado a la realidad. Sus reglas de transición consisten en revisar el número de nodos activos en la vecindad, si este es menor a dos el nodo se enciende. Si el número de nodos activos es mayor a dos, se promedia la batería restante de todos los nodos activos y se compara con la batería restante del nodo actual, de tal forma que si la batería del nodo actual es menor a la promedio, el nodo pasa a estado de reposo, en caso contrario permanece encendido. Sus resultados muestran que usando una red de 270 por 270 nodos colocados de forma uniforme y las reglas de transición previamente mencionadas, lograron reducir el consumo energético casi un 50 % a comparación de cuando no se usa ningún tipo de algoritmo.

El problema de la distribución aleatoria de los sensores usualmente es modelado con celdas irregulares. En [10], los autores implementan el algoritmo usado en el artículo [9] pero para un caso de distribución aleatoria de sensores mediante diagramas de Voronoi. Las vecindades de cada uno de los bloques de sensores se seleccionan de acuerdo a la distribución de las celdas en el diagrama, de tal forma que su vecindad solo consiste en los bloques que se encuentran a un salto de cada nodo, sin embargo, los autores proponen que si el radio de vecindad de una celda es igual a 1, sus vecinos serán solo los bloques que se encuentren a un salto de él, pero si el radio de vecindad de la celda es igual a 2, sus vecinos serán los bloques tanto a 1 como a 2 saltos de él. Sus simulaciones demuestran que el consumo energético pudo ser disminuido sólo un 30 % en comparación de cuando no se usa ningún tipo de algoritmo, sin embargo, se logró solucionar el problema de la distribución aleatoria de sensores, aunque no resuelven el problema de que debido a la distribución de sensores pueden existir áreas sin cobertura.

A diferencia de las propuestas previamente mencionadas, en esta tesis se propone un algoritmo que reduce el consumo energético basado en las reglas del juego de la vida pero que garantiza un número alto de vecinos durante el tiempo de vida de la red para no afectar a los protocolos de capas superiores, como son los protocolos de encaminamiento.

## Capítulo 3

# Análisis de patrones

En este capítulo se muestran algunos de los patrones iniciales más populares en los autómatas celulares. Para ello, cada sensor se representa como un cuadrado en la vecindad de Moore, donde el color negro representa actividad en el sensor, mientras que el color blanco representa reposo. Específicamente, en esta tesis actividad en el sensor significa que es capaz de recibir y transmitir información.

El análisis de los patrones se divide en dos categorías de acuerdo a su complejidad y para todos se aplican las reglas del juego de la vida debido a la versatilidad de comportamientos que brinda dicho conjunto de reglas. Además se justifica el posible uso de alguno de estos patrones en una red de sensores que se comporte de acuerdo a las reglas del juego de la vida.

Debido a que el propósito de esta tesis es modelar una red de sensores usando autómatas celulares, a partir de este capítulo se considera que la malla del autómata celular representa la red de sensores, las celdas representan a cada uno de los sensores, y el color de la celda representa el estado del sensor (activo o en reposo).

Todos los patrones mostrados en este capítulo se obtuvieron de ConwayLife, uno de los catálogos de patrones más amplios que existen [15].

### 3.1. Básicos

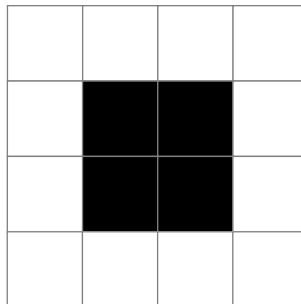


Figura 3.1: Patrón cuadrado.

Para el patrón inicial mostrado en la figura 3.1 se puede observar que los sensores activos seguirán activos, debido a que estos cuentan con exactamente tres vecinos prendidos, por lo que permanecerán en el mismo estado en la siguiente generación. Por otro lado, los sensores apagados cuentan con solo uno o máximo dos vecinos activos, lo que implica que no podrán cambiar de estado. Por esta razón este patrón inicial no funciona en una red de sensores, ya que únicamente estarían activos los sensores en el centro del área y nunca se obtendrían mediciones en las orillas del área.

Dado a que es necesario el cambio de estados en las redes de sensores, se propone un estado inicial conocido como oscilador de dos periodos, el cual se muestra en la figura 3.2.

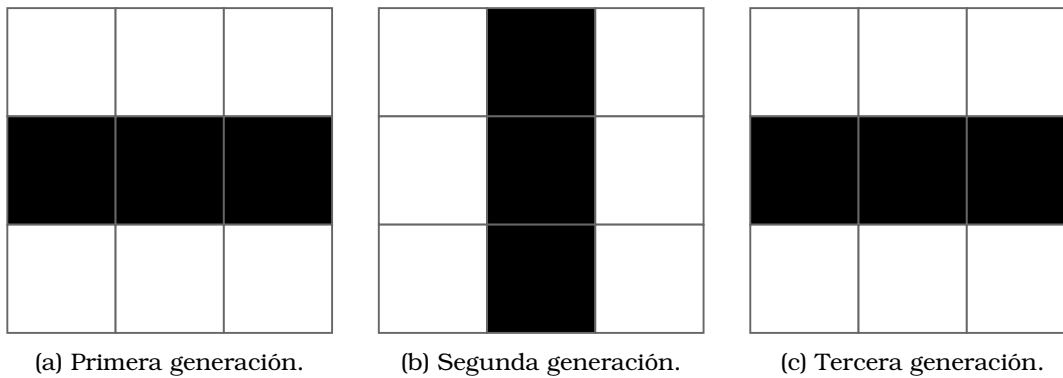


Figura 3.2: Patrón de oscilador de dos periodos.

El nombre de este autómatas celular se debe a que el patrón oscila en dos estados, de tal forma que en la tercera generación se tendrá el mismo patrón que en la primera generación. Aunque en este autómatas celular los sensores se activan y se desactivan, los dispositivos que se encuentran en las esquinas nunca se utilizan, por lo que resultaría poco funcional al ser implementado en una red de sensores.

Con el propósito de conseguir movilidad de los paquetes dentro de la red de sensores, se usan autómatas celulares especiales, uno de ellos se conoce como *glider* el cual se muestra en la figura 3.3. Dicho autómatas consiste en un oscilador de cuatro periodos que tiene la particularidad de moverse de forma diagonal. La desventaja de este patrón inicial es que no tiene forma de volverse a generar por sí mismo, por lo que el movimiento diagonal sólo ocurrirá una vez.

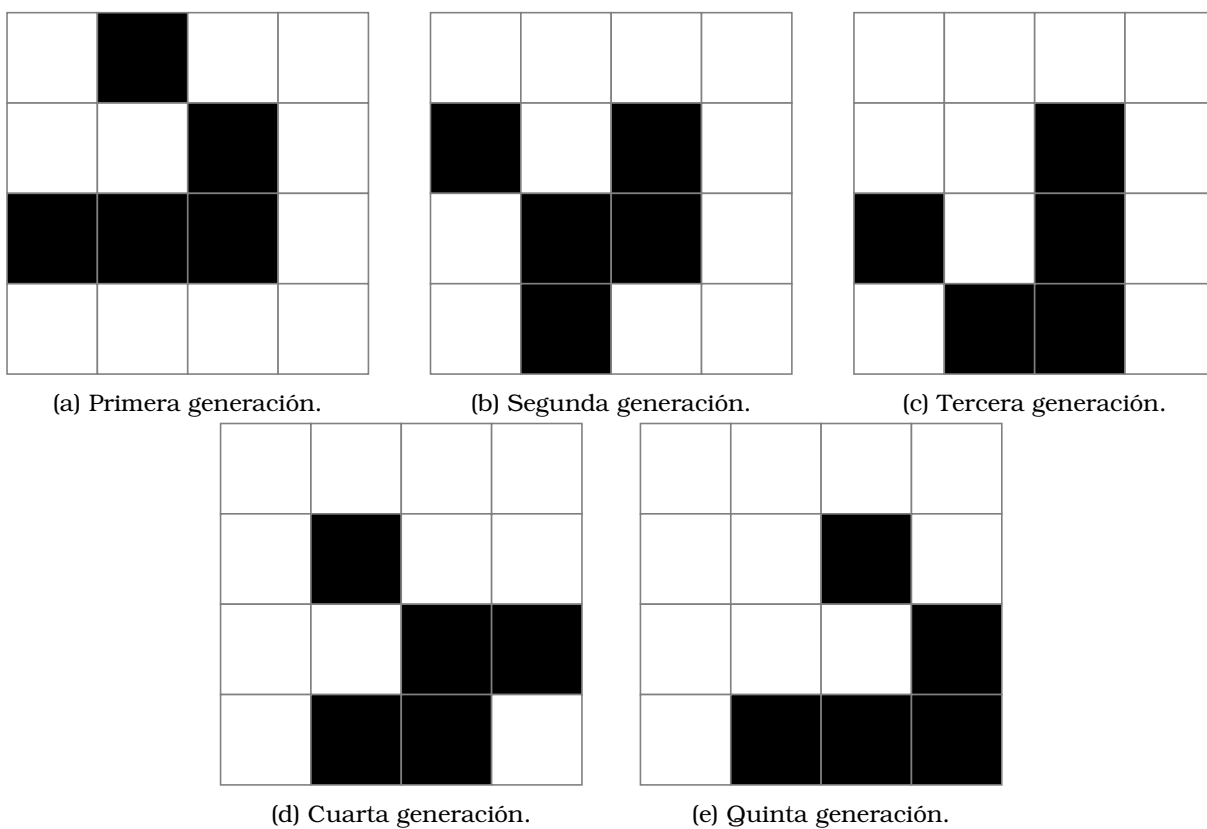


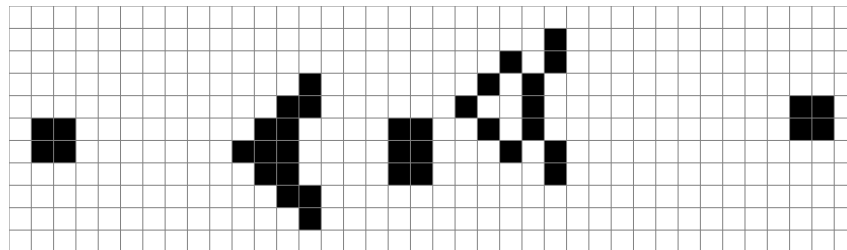
Figura 3.3: Patrón de glider.

Existen patrones iniciales más elaborados que resuelven el problema antes mencionado,

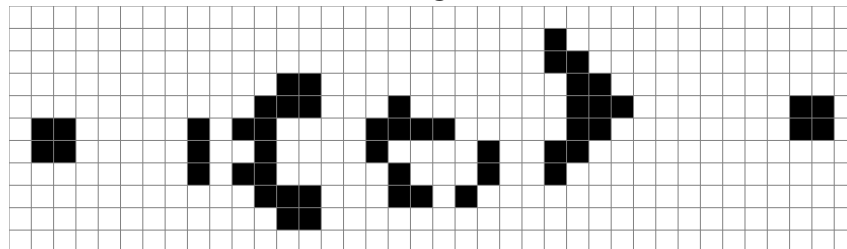
uno de ellos es conocido como *glider gun*.

## 3.2. Complejos

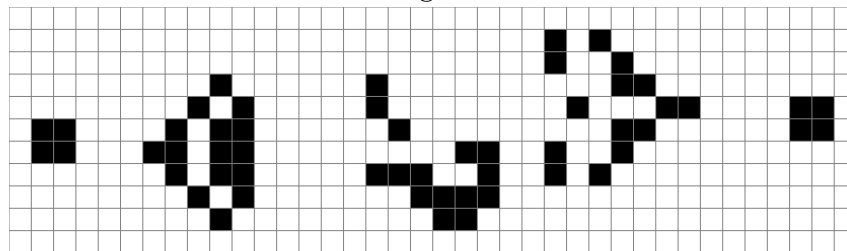
El autómata glider gun tiene la particularidad de generar gliders que se desplazan en forma diagonal como el mostrado en la figura 3.3.



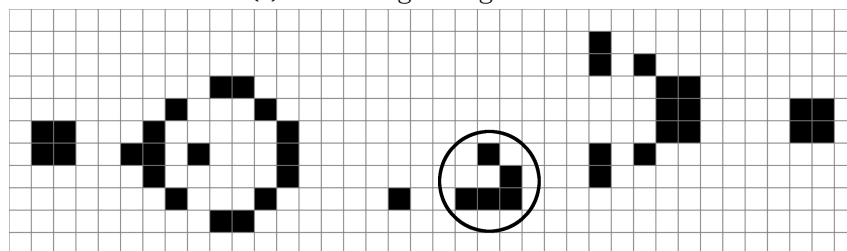
(a) Primera generación.



(b) Sexta generación.



(c) Decimosegunda generación.



(d) Decimoquinta generación.

Figura 3.4: Patrón de generador de gliders.

En la figura 3.4d, se puede observar cómo el autómata glider gun es capaz de crear un glider (encerrado en un círculo), sin embargo esto le toma 15 generaciones. Una desventaja de este autómata es que siempre genera los gliders en la misma dirección, por lo que el movimiento de la red no podría adaptarse a diferentes topologías.

Finalmente, uno de los patrones iniciales más populares es conocido como *die hard* debido a que permanece en movimiento (vivo) durante varias generaciones, la variante más duradera de este patrón es conocido como *die hard simétrico*, que vive 1638 generaciones, además de formar patrones que cubren completamente la cuadrícula, tal como se puede ver en la figura 3.5.



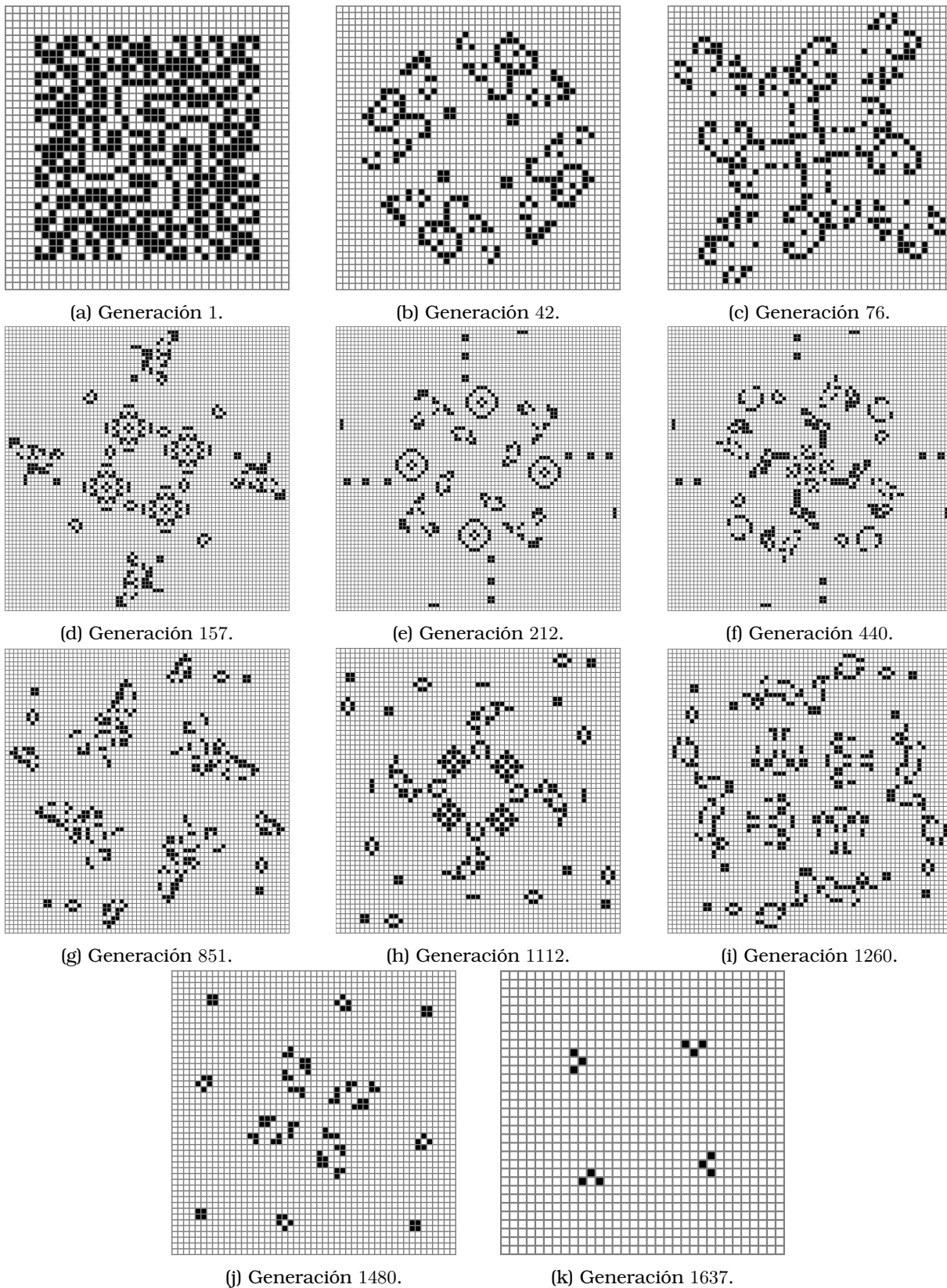


Figura 3.5: Patrón inicial de die hard simétrico.

Sin embargo, su principal desventaja es que un cúmulo grande de sensores permanecen muchas generaciones apagados, lo que en una red podría significar la pérdida de información,

ya que los protocolos de encaminamiento no podrían funcionar correctamente. Debido a esto es necesario implementar variaciones a estas reglas que permitan a los sensores encenderse si es que han permanecido una gran cantidad de generaciones apagados.



## Capítulo 4

# Propuesta de modelo

Este capítulo presenta un protocolo de capa MAC basado en variaciones del juego de la vida que es capaz de extender la vida útil de la red, y que además garantiza un número mínimo de vecinos que hace posible que protocolos de capas superiores del modelo OSI trabajen adecuadamente.

A continuación se presentan dos reglas adicionales al juego de la vida que conforman la propuesta de esta tesis. Para esta tesis, una red de sensores se representa por una malla cuadrada de dimensión 2, en la cual cada celda representa un sensor de la red; el color de las celdas representa el estado del sensor, el color blanco representa reposo, mientras que el color negro representa actividad.

### 4.1. Primera regla: ciclo de trabajo

En una red de sensores, mantener los dispositivos activos de forma continua durante largos periodos de tiempo significa agotar rápidamente la batería, por el contrario, si un sensor permanece inactivo de forma continua durante largos periodos de tiempo significa pérdidas de información. Como se mostró en el capítulo 3, este es un problema en los patrones formados por un autómatas celular que usa las reglas de transición del juego de la vida, por lo cual se propone que; si un sensor permanece activo continuamente durante una cantidad  $n$  de generaciones, en la siguiente generación cambiará su estado a reposo, por el contrario, si un sensor ha permanecido en reposo continuo durante una cantidad  $n$  de generaciones, en la siguiente generación cambiará su estado a activo, no importando, en ambos casos, el estado de sus vecinos.

En esta tesis, el número máximo de generaciones que el sensor permanece activo o en reposo es  $n = 10$ . A esta regla la nombraremos ciclo de trabajo. La elección de este valor se explica de forma detallada en el capítulo 5.2.

La figura 4.1 muestra una malla cuadrada de dimensión 2 que contiene nueve celdas, cada una de ellas representa a un sensor. En esta figura se puede observar que durante todas las generaciones el patrón permanece igual, esto tiene como consecuencia que sólo se usen algunos de los sensores (representados en negro), los cuales agotarán su batería rápidamente, mientras que los sensores en color blanco no se usan en ningún momento. En cambio, en la figura 4.2 se observa que cuando los sensores que han permanecido activos durante 10 generaciones seguidas, cambian su estado a reposo para la siguiente generación, mientras que los sensores que han permanecido en reposo durante 10 generaciones seguidas, cambian su estado a activo para la siguiente generación. Esto descarta el problema de los patrones estáticos en los autómatas celulares que usan las reglas de transición del juego de la vida.

### 4.2. Segunda regla: probabilidad de cambio

En esta regla se propone que si un sensor cuenta con mucha batería, su probabilidad de encenderse es alta en la siguiente generación, por el contrario, si el porcentaje de batería es

baja, su probabilidad de encenderse también debe ser baja. Lo anterior asegura una mayor vida útil a los sensores.

Bajo la premisa anterior, se establece la siguiente regla: si un sensor cuenta con menos del 50 % de carga en su batería y ha permanecido en reposo durante diez generaciones, en la siguiente generación tendrá 60 % de probabilidad de cambiar a su estado activo y 40 % de probabilidad de permanecer en reposo. En caso de contar con más del 50 % de carga en su batería y haber permanecido en reposo durante diez generaciones, en la siguiente generación el sensor cambia a su estado activo con 100 % de probabilidad.

El resultado de añadir las dos reglas previamente mencionadas se muestra en la figura 4.3, donde los sensores que hayan permanecido activos durante diez generaciones de forma consecutiva, cambiaron a su estado de reposo sin importar el estado de sus vecinos, mientras que los sensores que hayan permanecido en reposo durante diez generaciones consecutivas, y que cuenten con un porcentaje de batería menor al 50 %, cambiaron a su estado activo en la siguiente generación con una probabilidad del 60 %, y se mantuvieron en su estado de reposo con una probabilidad de 40 %.

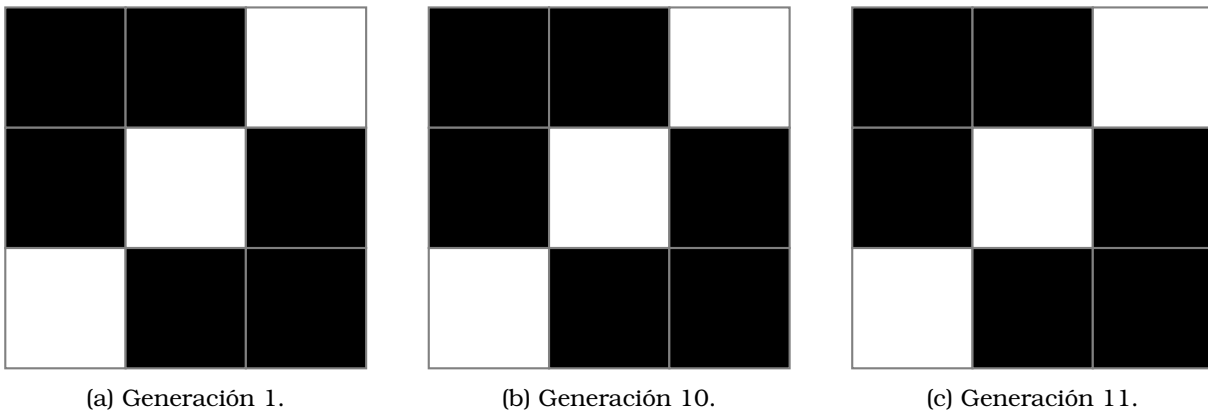


Figura 4.1: Autómata celular del juego de la vida sin reglas adicionales.

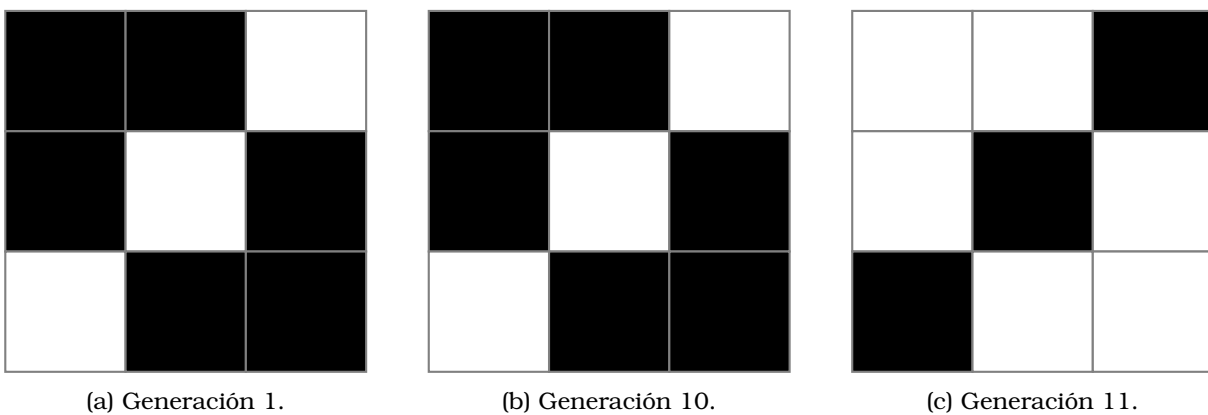


Figura 4.2: Autómata celular del juego de la vida con la regla del ciclo de trabajo.

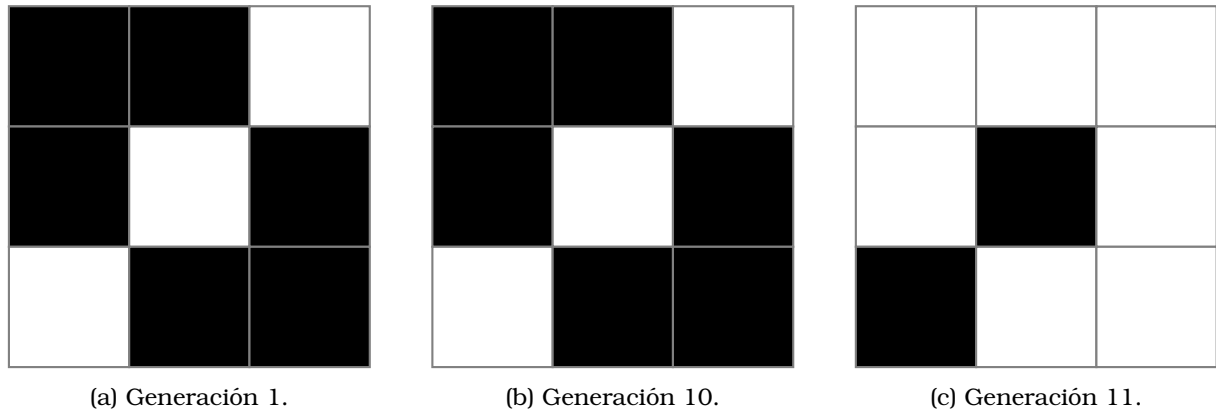


Figura 4.3: Autómata celular del juego de la vida con las dos reglas adicionales propuestas.

### 4.3. Planteamiento del modelo

El modelo propuesto en esta tesis consiste en un autómata celular compuesto por una malla de dimensión 2 que representa a una red de sensores distribuida de forma uniforme, donde cada celda representa un sensor de la red, los cuales pueden estar en uno de dos estados posibles; el estado de reposo representado en color blanco y el estado activo representado en negro. El estado activo consiste en que el sensor realice sus tareas de forma habitual, mientras que el estado de reposo significa que el sensor no realiza tarea alguna. Las reglas de transición son las siguientes:

- Si un sensor que se encuentra en estado de reposo, cuenta con exactamente 3 sensores en estado activo dentro de su vecindad de Moore de radio 1 en una generación  $t$ , cambiará a su estado activo en la generación  $t + 1$ .
- Si un sensor que se encuentra en estado activo, cuenta con 2 o 3 sensores en estado activo dentro de su vecindad de Moore de radio 1 en una generación  $t$ , se mantendrá en el mismo estado en la generación  $t + 1$ . En caso de contar con menos de 2 o con más de 3 sensores activos dentro de su vecindad de Moore de radio 1, cambiará a su estado de reposo en la generación  $t + 1$ .
- Si un sensor ha permanecido en estado activo desde una generación  $t + 1$ , hasta una generación  $t + 10$  de forma consecutiva, cambiará a su estado de reposo en la generación  $t + 11$ .
- Si un sensor cuenta con menos del 50% de carga en su batería y ha permanecido en estado de reposo desde una generación  $t + 1$ , hasta una generación  $t + 10$  de forma consecutiva, cambiará a su estado activo en la generación  $t + 11$  con una probabilidad del 60% y continuará en reposo con una probabilidad del 40%.

Estas reglas se aplican de forma síncrona durante cada generación en todos los sensores dentro de la red. En esta tesis se modela la batería de manera discreta, es decir, si un sensor permanece en estado activo durante una generación, su batería se decrementa en una unidad, tal como se hace en otros trabajos relacionados [7][8].



## Capítulo 5

# Análisis de desempeño

Este capítulo presenta la metodología a seguir para analizar el desempeño energético de una red de sensores basada en el modelo mostrado en el capítulo 4.3. Además, se muestran los resultados obtenidos al simular el comportamiento de la red en diferentes escenarios. Finalmente, se muestran datos estadísticos que permiten observar la viabilidad de la propuesta.

### 5.1. Modelo de pruebas

Para realizar las pruebas, se desarrolló un simulador en el lenguaje de alto nivel *Python* que permite visualizar gráficamente el desarrollo generacional del autómatas celular.

Con base en lo mostrado en el capítulo 4.3, se propone una malla cuadrada de dimensión 2 para representar una red de sensores distribuida uniformemente. La red está compuesta por 900 sensores, la batería de cada uno de ellos cuenta con capacidad de cien cargas, se consume una carga de batería por cada generación en la que el sensor se encuentra activo.

El estado inicial de la red se determina de forma aleatoria, es decir, que al iniciar la simulación, cada uno de los sensores (representados por las celdas del autómatas celular) tendrá un 50% de probabilidad de comenzar en estado activo y 50% de probabilidad de comenzar en estado de reposo. En la figura 5.1 se muestran dos posibles estados iniciales de la red.

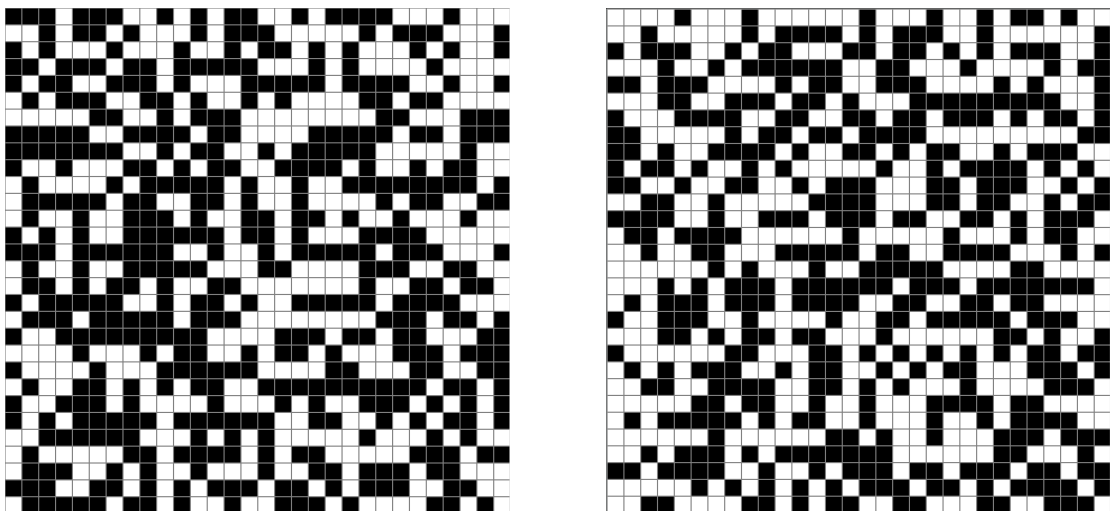


Figura 5.1: Red de sensores basada en el modelo propuesto, con estado inicial aleatorio.

Al porcentaje de sensores que se encuentren activos respecto al total de sensores se le denominará porcentaje de cobertura, de tal forma que la cobertura de los casos mostrados en la figura 5.1 es de aproximadamente 50%. La simulación termina cuando todos los sensores se quedan sin batería.



Debido a que un autómata celular cambia su comportamiento con base en su estado inicial, los resultados obtenidos por la simulación serán diferentes cada vez que ésta se realice. Es por esto que se debe repetir la simulación tantas veces como sea necesario, de tal forma que al promediar los resultados, la variación en los mismos sea despreciable. En la figura 5.2 se muestra una gráfica que representa la convergencia de la cobertura en la red de acuerdo a la cantidad de simulaciones realizadas.

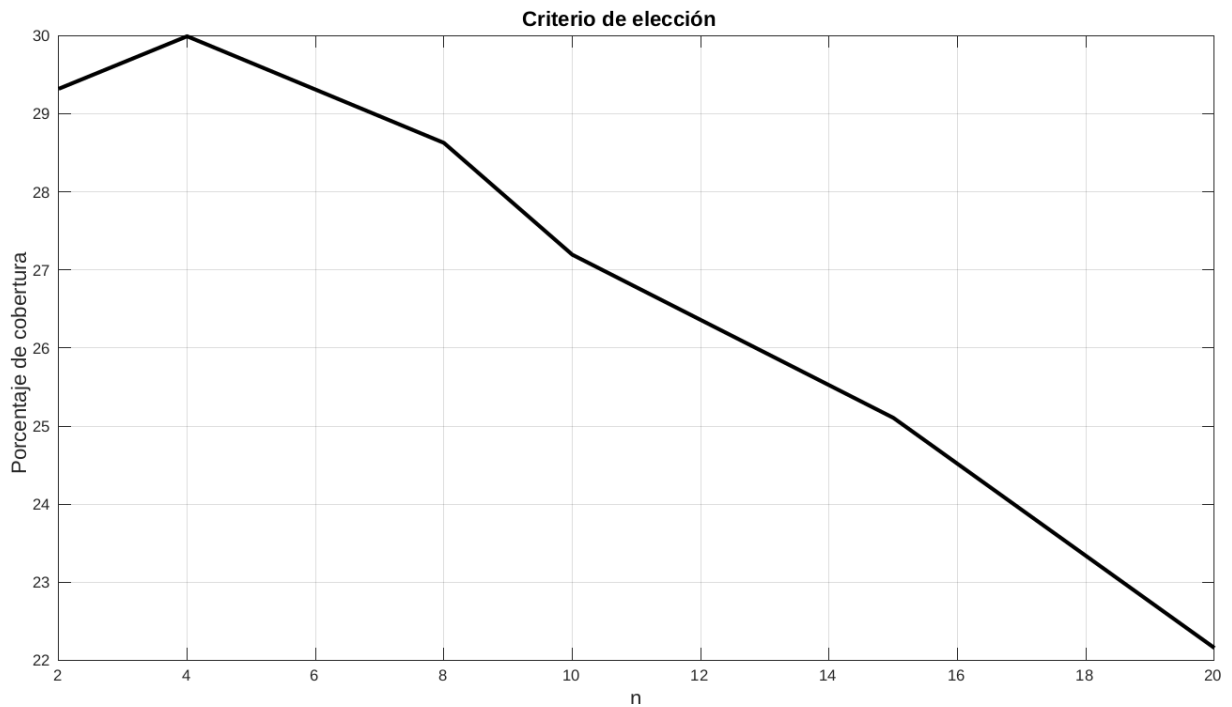
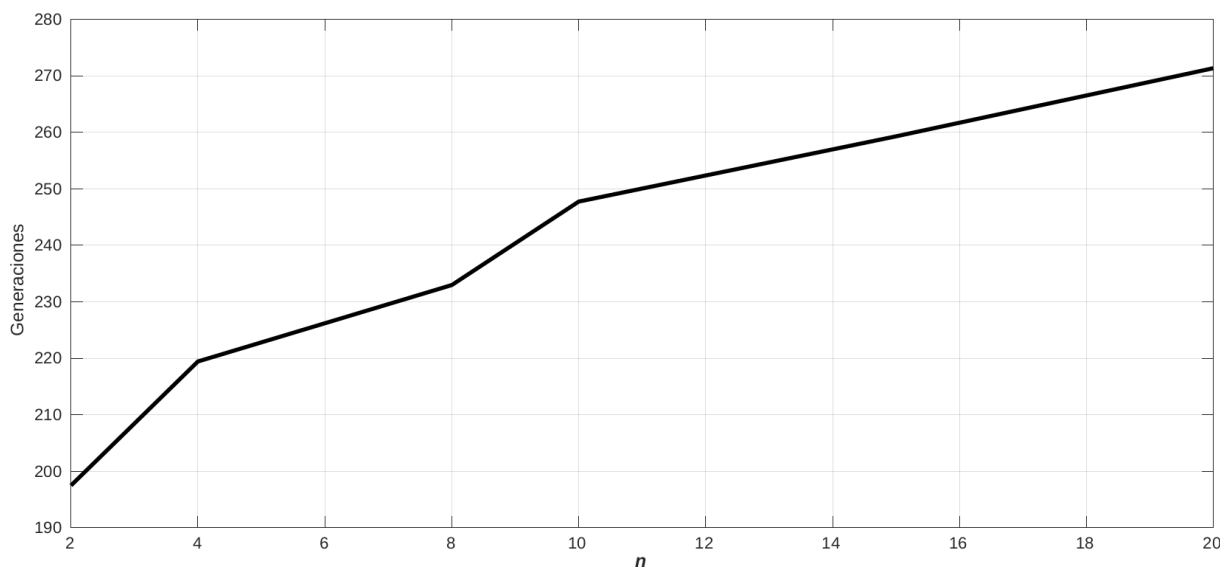


Figura 5.2: Cobertura de la red de acuerdo a la cantidad de resultados promediados.

Como se puede observar en la figura 5.2, la variación en el promedio de los resultados de las simulaciones comienzan a disminuir a partir del promedio obtenido de 80 simulaciones, por lo que para obtener resultados precisos, en esta tesis se promedian los resultados de 100 simulaciones en todos los casos presentados.

## 5.2. Ciclo de trabajo

Como se mencionó en el capítulo 4.1, el valor de  $n$  usado en esta tesis es de 10, este número se eligió con base en las gráficas de las figuras 5.3 y 5.4, las cuales muestran los diferentes resultados obtenidos para diferentes valores de  $n$  promediando 100 simulaciones para cada caso. Como se puede observar, es posible tomar cualquier valor de  $n$ . Sin embargo, tomando en cuenta la relación entre la cobertura promedio y la vida promedio de la red, en esta tesis se eligió el valor de  $n = 10$ , debido a que como se verá más adelante, este valor nos permite obtener un número de vecinos activos suficientes para establecer protocolos de encaminamiento.

Figura 5.3: Variación del promedio de cobertura en la red respecto al valor de  $n$ .Figura 5.4: Variación del promedio vida de la red respecto al valor de  $n$ .

### 5.3. Consumo energético

Una vez seleccionado el valor de  $n$  se realiza la simulación con el modelo completo propuesto en la sección 4, recordando que al inicio de cada simulación cada uno de los sensores cuenta con una batería completamente cargada y con capacidad de mantener encendido al dispositivo durante cien generaciones. Los resultados mostrados fueron obtenidos al promediar los resultados de 100 simulaciones.

La cobertura de la red indica el porcentaje de sensores en estado activo respecto al total de sensores que compone la red, por lo que también puede verse como un indicador del

consumo energético promedio de la red. En la figura 5.5 se puede observar el valor de la cobertura promedio por generación durante toda la vida de la red, es decir, hasta que todos los sensores que la componen se quedan sin batería.

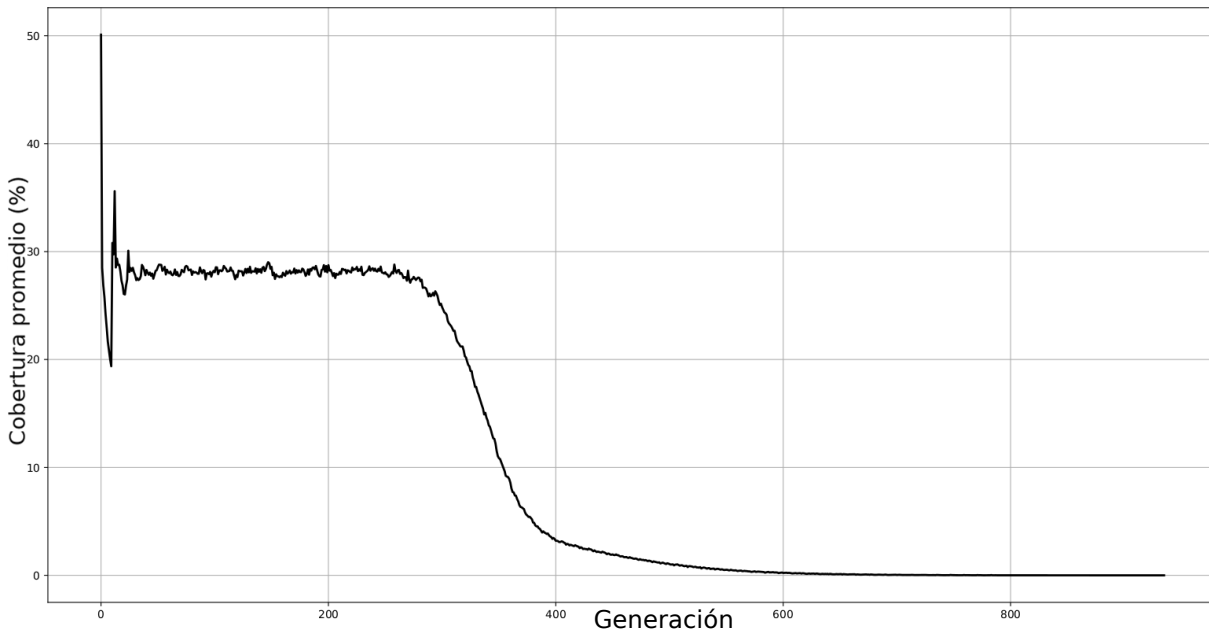


Figura 5.5: Cobertura promedio durante toda la vida de la red.

Se puede observar en esta figura que la cobertura promedio al iniciar la simulación es de aproximadamente 50% debido a la condición inicial que se estableció, y que al pasar por un breve periodo de oscilación, el sistema se estabiliza en un valor cercano al 30% de cobertura, el cual comienza a decaer después de 300 generaciones. Por otro lado, se puede observar que la vida promedio de la red supera las 800 generaciones, sin embargo es notorio que antes de la mitad de la vida de la red hay una caída importante en el número de sensores encendidos por generación. Esto se debe a que la mayoría de los sensores se van quedando sin batería, lo que significaría que muchas vecindades quedarán incomunicadas, provocando que los protocolos de capas superiores del modelo OSI no trabajen correctamente. Es por esto que el análisis de resultados debe acotarse, de tal forma que sólo obtengamos resultados para los casos en los que la red de sensores es funcional. Finalmente, se puede ver que en cuanto uno de los sensores se queda sin batería, el resto de sensores no tarda en descargar la carga de su batería. Esto significa que el consumo energético dentro de la red bajo el modelo propuesto es casi homogéneo.

## 5.4. Estadística

Como se mencionó anteriormente, las simulaciones deben repetirse 100 veces para poder obtener resultados confiables, esto nos permite realizar un análisis estadístico de los resultados. La ecuaciones 5.1, y 5.2, permiten calcular la media y la desviación estándar, respectivamente. Donde  $n$  es el número de veces que se realizó la simulación y  $x_i$  es el promedio obtenido durante cada simulación.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (5.2)$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (5.3)$$

Con la finalidad de acotar el análisis de resultados para los casos en los que la red de sensores es funcional, se repitieron las simulaciones, en esta ocasión la simulación termina en cuanto alguno de los sensores de la red se queda sin batería. Los resultados de cobertura promedio obtenidos se muestran en la figura 5.6.

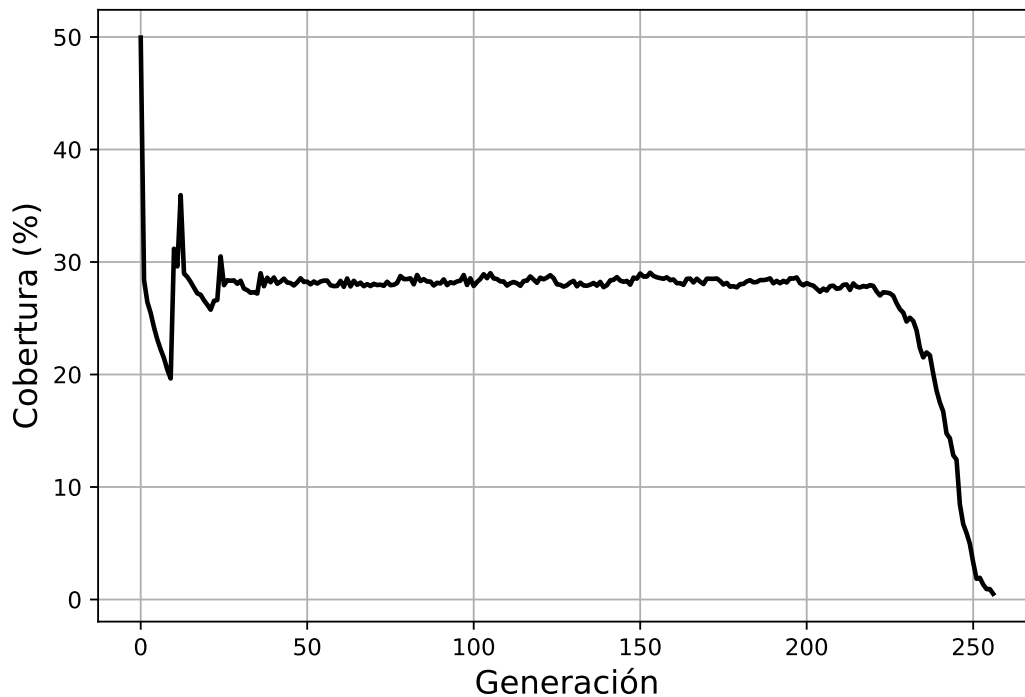


Figura 5.6: Cobertura promedio de la red hasta que un sensor se queda sin batería.

En la imagen se observa un comportamiento similar al mostrado en la figura 5.5; sin embargo, como era de esperarse, la gráfica de la figura 5.6 muestra menos generaciones.

Uno de los parámetros más importantes a tomar en cuenta en esta tesis es la cantidad de vecinos con los que cuenta cada uno de los sensores que forman la red, con la finalidad de comprobar la viabilidad de establecer protocolos de encaminamiento. Para visualizar la distribución de los vecinos respecto a los sensores, se utilizan las vecindades de los sensores de radio 1 y 2. En la tabla 5.1 se muestran los datos estadísticos obtenidos a partir de las simulaciones.

	Promedio	Desviación estándar
Vida de la red (generaciones)	241.6	8.93
Cobertura promedio (%)	28.2	0.3
Sensores activos dentro de la vecindad de radio 1	2.2	0.02
Sensores activos dentro de la vecindad de radio 2	6.5	0.07

Tabla 5.1: Resultados estadísticos hasta que un sensor se queda sin batería.

En caso de que la red de sensores propuesta no contara con algún método para alargar su vida útil, se obtendría como resultado que la vida de la red es de 100 generaciones y con un 100% de cobertura, ya que todos los sensores se mantendrían en estado activo. Al comparar este escenario con los resultados obtenidos con el modelo propuesto, se puede observar que la

vida útil de la red aumenta, aunque el porcentaje de cobertura en la red disminuye. Además, como se puede observar en la figura 5.7, los datos obtenidos sobre la cantidad de vecinos con los que cuenta en promedio cada sensor nos permiten establecer escenarios en los que es posible usar protocolos de encaminamiento.

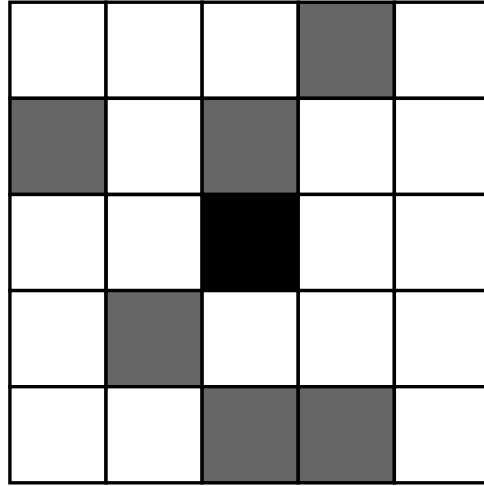


Figura 5.7: Sensor (negro) con vecinos activos (gris) en vecindad de radio 2.

En la figura 5.8, puede observarse el estado de la red de sensores cuando uno de los dispositivos se queda sin batería. En este caso el sensor que agotó su batería se encuentra marcado en la parte inferior derecha de la imagen.

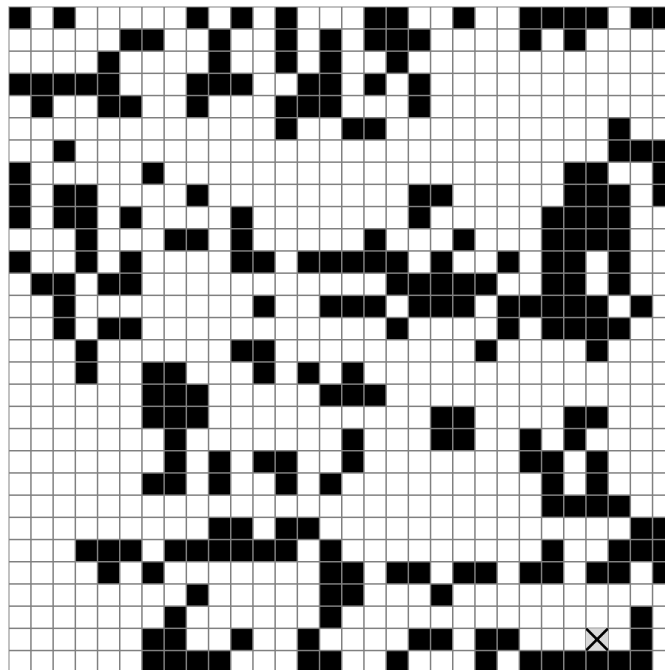


Figura 5.8: Estado de la red cuando uno de los sensores se queda sin batería.

Como se puede ver en esta figura, a pesar de que uno de los sensores ya no cuenta con carga en su batería, todavía existen suficientes sensores en la red como para que la misma siga realizando sus tareas. Con el propósito de extender la vida útil de la red, se busca el porcentaje promedio de nodos sin carga en su batería que permita preservar un número suficiente de sensores vecinos para poder establecer protocolos de encaminamiento. En la

figura 5.9 se muestra una gráfica que representa el número de vecinos activos que se tienen en promedio a partir de que el 1 % de los sensores se queda sin batería.

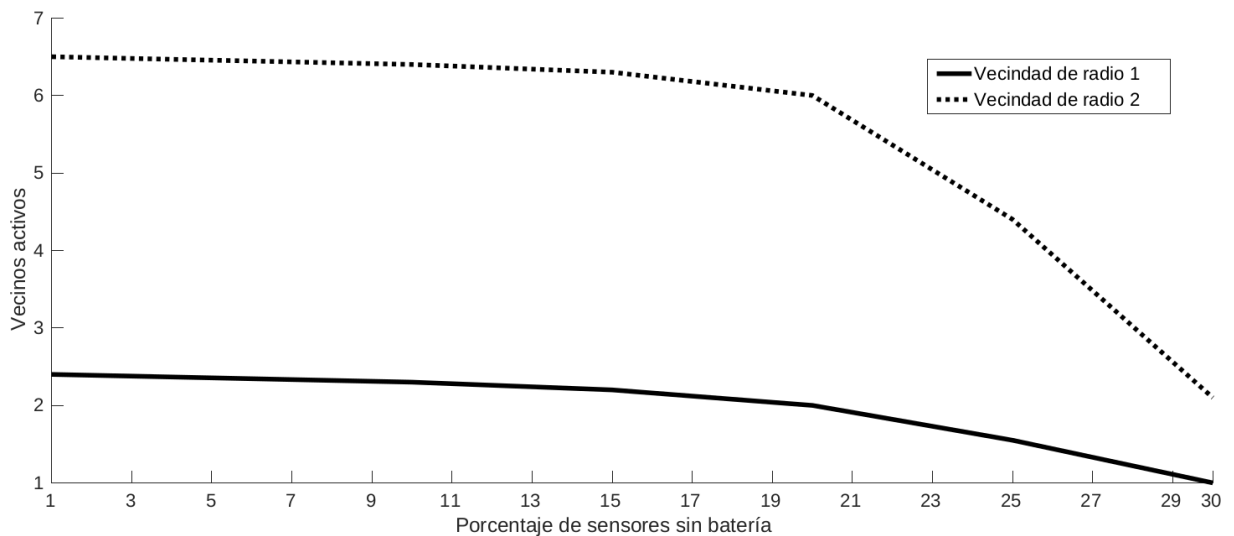


Figura 5.9: Cantidad de vecinos respecto al porcentaje de sensores sin batería.

Como se puede observar, a partir de que el 20 % de los sensores se queda sin batería, el número de vecinos cae rápidamente. Es por esto que se extenderá el análisis en la simulación hasta el momento en el que 20 % de los sensores que componen la red se queden sin batería. En la figura 5.10 se muestra uno de los posibles aspectos que tendría la red en el momento en el que 20 % de los sensores que la componen agotan su batería. Los sensores sin batería se representan en color gris.

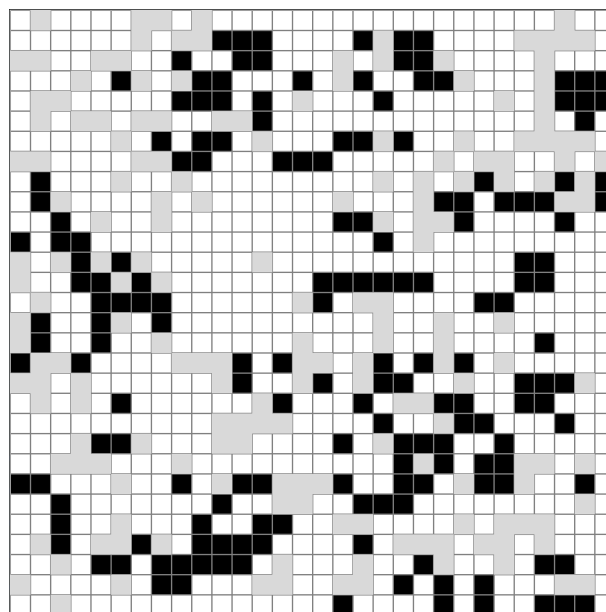


Figura 5.10: Aspecto de la red cuando el 20 % de los sensores se queda sin batería.

A continuación, en la tabla 5.2 se muestran los resultados obtenidos al finalizar la simulación en el momento en que el 20 % de los sensores se queda sin batería. De la misma forma que en los casos anteriores, se promediaron los resultados de 100 simulaciones. Se puede observar que se extiende la vida útil promedio de la red, y aunque la cobertura promedio se

reduce, la cantidad de vecinos activos promedio dentro de la vecindad de cada uno de los sensores se mantiene.

	Promedio	Desviación estándar
Vida de la red (generaciones)	322.2	3.64
Cobertura promedio (%)	27.58	0.29
Sensores activos dentro de la vecindad de radio 1	2.01	0.02
Sensores activos dentro de la vecindad de radio 2	6.08	0.06

Tabla 5.2: Resultados estadísticos hasta que un 20% de los sensores se queda sin batería.

## 5.5. Comparación

Con la finalidad de comprobar la utilidad de las reglas adicionales implementadas al juego de la vida, se repite el procedimiento mostrado en la sección 5.4. Nuevamente se define una red de 30 por 30 sensores con una vecindad de Moore y un patrón inicial aleatorio, cada sensor cuenta con una batería con carga para 100 generaciones y en este caso se usan exclusivamente las reglas de transición del juego de la vida. Dado el comportamiento de los autómatas celulares con las reglas del juego de la vida, es posible que se llegue al escenario en el que todos los sensores se apaguen, esto termina con la vida útil de la red sin importar que aun haya sensores con carga en sus baterías, tal como se ve en la figura 5.11, donde los cuadrados en blanco representan a los sensores que aún cuentan con carga en su batería, mientras que los cuadrados en gris representan los sensores sin carga en su batería, sin embargo, no hay cuadrados en negro, lo que significa que ya no hay actividad dentro de la red.

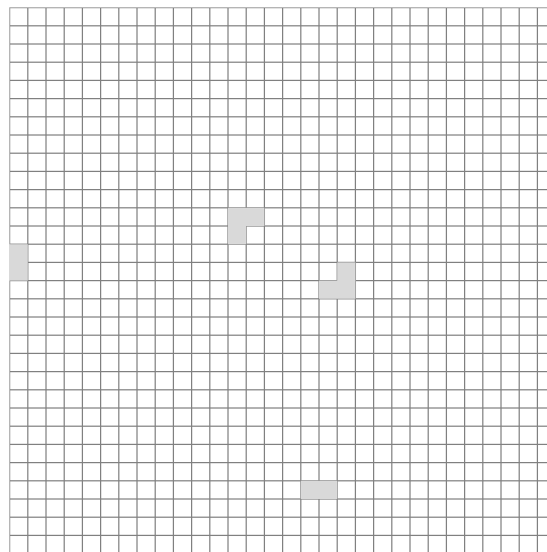


Figura 5.11: Estado final de una red basada en las reglas del juego de la vida.

Los resultados de las simulaciones se muestran en la tabla 5.3.

	Promedio	Desviación estándar
Vida de la red (generaciones)	283.18	95.24
Cobertura promedio (%)	6.97	1.22
Sensores dentro de la vecindad de radio 1	0.54	0.09
Sensores dentro de la vecindad de radio 2	1.63	0.29

Tabla 5.3: Resultados estadísticos con las reglas del juego de la vida.

Se puede observar que las reglas del juego de la vida por sí mismas no son de utilidad para prolongar la vida útil de la red sin perjudicar a las capas superiores del modelo OSI, ya que aunque la vida útil de la red sí aumenta, el parámetro de vecinos activos dentro de las vecindades de radio 1 y 2 es demasiado bajo como para poder establecer protocolos de encaminamiento, especialmente el valor de vecinos promedio en la vecindad de radio 1, ya que no garantiza ni un vecino activo, por lo que es poco probable establecer comunicación en la red.

Finalmente, en las tablas 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7 se muestra una comparación entre los resultados obtenidos para los diferentes escenarios mostrados en esta tesis.

	Vida útil de la red (generaciones)	Desviación estándar (generaciones)
Red de sensores estándar	100	0
Red con reglas del juego de la vida	283.18	95.24
Red con modelo propuesto hasta que uno de los sensores agota su batería	241.6	8.93
Red con modelo propuesto hasta que el 20 % de los sensores agota su batería	322.2	3.64

Tabla 5.4: Comparación de vida útil de la red para diferentes escenarios.

	Cobertura promedio (%)	Desviación estándar (%)
Red de sensores estándar	100	0
Red con reglas del juego de la vida	6.97	1.22
Red con modelo propuesto hasta que uno de los sensores agota su batería	28.2	0.3
Red con modelo propuesto hasta que el 20 % de los sensores agota su batería	27.58	0.29

Tabla 5.5: Comparación de cobertura promedio para diferentes escenarios.

	Sensores activos dentro de la vecindad de radio 1	Desviación estándar
Red de sensores estándar	8	0
Red con reglas del juego de la vida	0.54	0.09
Red con modelo propuesto hasta que uno de los sensores agota su batería	2.2	0.02
Red con modelo propuesto hasta que el 20 % de los sensores agota su batería	2.01	0.02

Tabla 5.6: Comparación de sensores activos dentro de la vecindad de radio 1 para diferentes escenarios.



	Sensores activos dentro de la vecindad de radio 2	Desviación estándar
Red de sensores estándar	24	0
Red con reglas del juego de la vida	1.63	0.29
Red con modelo propuesto hasta que uno de los sensores agota su batería	6.5	0.07
Red con modelo propuesto hasta que el 20% de los sensores agota su batería	6.08	0.06

Tabla 5.7: Comparación de sensores activos dentro de la vecindad de radio 2 para diferentes escenarios.

# Capítulo 6

## Conclusiones

En este capítulo, se presentan las conclusiones generales de esta tesis, así como la verificación de la hipótesis con base en los resultados obtenidos para el comportamiento de una red inalámbrica de sensores usando un modelo propuesto basado en un autómata celular del juego de la vida. Finalmente se presentan las perspectivas de investigación.

### 6.1. Conclusiones generales

Los trabajos relacionados mostrados en esta tesis proponen diferentes métodos para reducir el consumo energético de una red inalámbrica de sensores usando autómatas celulares, sin embargo en esta tesis se propone una variación de las reglas del juego de la vida que permite una distribución uniforme en el consumo energético de los sensores y garantiza un número alto de vecinos a uno y dos saltos para establecer rutas de comunicación. Para poder analizar el desempeño de una red inalámbrica de sensores bajo estas reglas se implementó un simulador con la finalidad de modificar cualquier parámetro de la red, así como para medir resultados tales como el número de generaciones que vive la red, la cantidad de vecinos para cada nodo, el porcentaje de nodos que se quedan sin batería.

Los resultados de la Sección 5.5, muestran el comportamiento de la red de acuerdo al porcentaje de sensores que aún cuentan con batería. Estos resultados permiten elegir de manera cuantitativa el escenario idóneo dependiendo el uso que se le desee dar a la red. Por ejemplo, si se busca una red con la mayor vida útil posible debe usarse el escenario mostrado en la figura 5.10, sin embargo, si se busca una red con mayor cobertura promedio debe usarse el escenario mostrado en la figura 5.8. Más aún, los resultados revelan que en ambos casos se tienen aproximadamente 6 vecinos activos dentro de la vecindad de radio 2, que es equivalente a tener en promedio 6 vecinos a dos saltos, lo que se traduce en que es viable establecer alguna técnica para determinar rutas de comunicación entre nodos con la finalidad de transmitir la información.

Finalmente, con los resultados obtenidos en la sección 5.5 es posible observar la utilidad de las reglas adicionales propuestas al juego de la vida, ya que mejoran tanto la vida útil promedio de la red como la cantidad de vecinos a dos saltos de cada nodo respecto a cuando se usan solamente las reglas originales del juego de la vida.

### 6.2. Verificación de hipótesis

Retomando la hipótesis presentada en la sección 1.2:

*“Variaciones en las reglas del juego de la vida, permiten extender la vida útil de los sensores sin comprometer el funcionamiento de los protocolos de encaminamiento”.*

Para verificar la hipótesis previamente mostrada, en esta tesis se modeló una red de sensores usando autómatas celulares y una variación de las reglas del juego de la vida. En la sección 5.4 se evaluaron diferentes escenarios, en los cuales las nuevas reglas de transición permitieron prolongar la vida útil de la red por lo menos tres veces respecto al escenario

en el cual todos los sensores permanecen encendidos todo el tiempo. De la misma forma se demostró que la cantidad de vecinos a dos saltos es suficiente como para implementar algoritmos de encaminamiento que permitan el correcto funcionamiento de la red. Por otro lado, en la sección 5.5 se muestra que en el caso de usar solamente las reglas del juego de la vida en una red de sensores, si bien la vida promedio de la red es casi tres veces mayor que en el escenario en el que los sensores permanecen encendidos todo el tiempo, la cantidad de vecinos a dos saltos es demasiado baja, lo que complica el uso de algoritmos de encaminamiento y con ello el mal funcionamiento de la red.

Por lo anterior, las variaciones en las reglas de transición del juego de la vida, permiten extender la vida útil de las redes de sensores sin comprometer el funcionamiento de los protocolos de encaminamiento.

### **6.3. Perspectivas de la investigación**

La primer perspectiva de investigación, sería implementar el modelos propuesto en esta tesis dentro de un simulador especializado en redes de sensores, para posteriormente implementarlo en sensores reales y así poder medir la eficiencia real del modelo.

En la Sección 2 se menciona que la distribución de los sensores usualmente es aleatoria, lo que presenta un problema para la metodología mostrada en esta tesis, de la misma forma se menciona que en la referencia [10] una metodología que permite modelar una red de sensores con distribución aleatoria usando autómatas celulares y diagramas de Voronoi. Por otro lado, en la referencia [16] se muestra el funcionamiento de los autómatas celulares inteligentes, los cuales cambian su comportamiento de acuerdo a la retroalimentación que reciben de su entorno.

Tomando en cuenta lo anterior, como perspectiva de investigación se puede proponer la implementación de las variaciones del juego de la vida en una red con distribución aleatoria de los sensores, así como el uso de autómatas celulares inteligentes que optimicen aún más el consumo energético de la red.

# Bibliografia

- [1] M. Cardei and D. Du, "Improving wireless sensor network lifetime through power aware organization." in *Wireless Netw.*, vol. 11, 2005, p. 333–340.
- [2] M. Cardei, M. T. Thai, Yingshu Li, and Weili Wu, "Energy-efficient target coverage in wireless sensor networks," in *Proceedings IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies.*, vol. 3, March 2005, pp. 1976–1984.
- [3] J. Carle and D. Simplot-Ryl, "Energy-efficient area monitoring for sensor networks," *Computer*, vol. 37, no. 2, pp. 40–46, Feb 2004.
- [4] K. Hadeler and J. Müller, *Cellular Automata: Analysis and Applications*, 1st ed., ser. Springer Monographs in Mathematics. Springer International Publishing, 2017.
- [5] J. Schiff, *Cellular Automata: A Discrete View of the World*, ser. Wiley Series in Discrete Mathematics & Optimization. Wiley, 2011. [Online]. Available: <https://books.google.com.mx/books?id=uXJC2C2sRbIC>
- [6] M. Gardner, "Mathematical games: The fantastic combinations of john conway's new solitaire game 'life'," *Scientific American*, vol. 223, pp. 120–123, 1970.
- [7] X. Xu, X. Zhang, and L. Wang, "Simulating energy efficient wireless sensor networks using cellular automata," in *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC)*, Dec 2011, pp. 3202–3211.
- [8] S. Choudhury, S. G. Akl, and K. Salomaa, "Energy efficient cellular automaton based algorithms for mobile wireless sensor networks," in *2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, April 2012, pp. 2341–2346.
- [9] C. Banerjee and S. Saxena, "Energy conservation in wireless sensor network using block cellular automata," in *2013 International Conference on Computer Communication and Informatics*, Jan 2013, pp. 1–6.
- [10] C. Banerjee, "Energy conservation in wireless sensor network using irregular cellular automata," in *2013 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability*, April 2013, pp. 223–227.
- [11] L. Gray, "A mathematician looks at wolfram's new kind of science." in *Amer. Math. Soc.*, vol. 50, 2003, pp. 200–211.
- [12] B. Chopard and M. Droz, *Cellular Automata Modeling of Physical Systems*, ser. Collection Alea-Saclay: Monographs and Texts in Statistical Physics. Cambridge University Press, 1998. [Online]. Available: [https://books.google.com.mx/books?id=8W\\_ygAACAAJ](https://books.google.com.mx/books?id=8W_ygAACAAJ)
- [13] E. Goles and S. Martínez, *Cellular Automata and Complex Systems*, ser. Nonlinear Phenomena and Complex Systems. Springer Netherlands, 2013. [Online]. Available: <https://books.google.com.mx/books?id=R0zzCAAQBAJ>
- [14] S. Wang and H. Wu, "An improved coverage scheme based on cellular automata in wsn," in *2010 Second International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing*, vol. 1, April 2010, pp. 458–461.

- 
- [15] "Life wiki." [Online]. Available: [https://www.conwaylife.com/wiki/Main\\_Page](https://www.conwaylife.com/wiki/Main_Page)
- [16] A. H. F. Navid and A. B. Aghababa, "Cellular learning automata and its applications," in *Emerging Applications of Cellular Automata*, A. Salcido, Ed. Rijeka: IntechOpen, 2013, ch. 5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5772/52953>