



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Energias Alternativas e Renováveis
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica



RAFAEL PEREIRA DE MEDEIROS

OTIMIZAÇÃO DO TEMPO DE VIDA DE UMA REDE DE SENSORES SEM FIO BASEADO EM AUTÔMATOS CELULARES DE APRENDIZAGEM

JOÃO PESSOA/PB

2020

RAFAEL PEREIRA DE MEDEIROS

**OTIMIZAÇÃO DO TEMPO DE VIDA DE UMA REDE DE
SENSORES SEM FIO BASEADO EM AUTÔMATOS
CELULARES DE APRENDIZAGEM**

Defesa final apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Juan Moises Mauricio Villanueva.

João Pessoa, Paraíba, Brasil

©Rafael Pereira de Medeiros, Fevereiro de 2020

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M488o Medeiros, Rafael Pereira de.

Otimização do tempo de vida de uma rede de sensores sem fio baseado em autômatos celulares de aprendizagem /

Rafael Pereira de Medeiros. - João Pessoa, 2020.

86 f. : il.

Orientação: Juan Moises Mauricio Villanueva Villanueva.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Rede de Nós Sensores Sem Fio. 2. Autômatos Celulares de Aprendizagem. 3. Otimização do Tempo de Vida de Redes. I. Villanueva, Juan Moises Mauricio Villanueva. II. Título.

UFPB/BC

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEE

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

OTIMIZAÇÃO DO TEMPO DE VIDA DE UMA REDE DE SENSORES SEM FIO
BASEADO EM AUTÔMATOS CELULAR DE APRENDIZAGEM

Elaborado por

RAFAEL PEREIRA DE MEDEIROS

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

COMISSÃO EXAMINADORA


PROF. DR. JUAN MOISES MAURICIO VILLANUEVA (Presidente)


PROF. DR. EULER CÁSSIO TAVARES DE MACEDO


PROF. DR. LUCAS VINÍCIUS HARTMANN

João Pessoa/PB, 14 de fevereiro de 2020

AGRADECIMENTOS

*"Todo pensamento é uma causa,
e toda condição é um efeito."
(Joseph Murphy)*

RESUMO

Com o advento da automação, seja na indústria ou em residências, cada vez mais informação está sendo gerada, tanto na forma de acionamentos quanto por aquisição. Com isso, cada vez mais sensores e atuadores estão sendo utilizados, caracterizando redes cada vez mais densas. No caso dos nós sensores, é necessário haver um gerenciamento de uso dos mesmos, para uma melhor gestão energética. Os Sistemas a Eventos Discretos (SED) são apresentados como solução para uma melhor elaboração da lógica aplicada e aproveitamento dos sensores. Além disso, por meio dos Autômatos Celulares de Aprendizagem (ACA), tem-se a possibilidade de elaborar rotas inteligentes que atendam aos requisitos de cobertura do sistema, de forma otimizada. Para tanto, neste trabalho, é apresentando um modelo para caracterização de uma rede de sensores sem fio, baseada na teoria dos sistemas a eventos discretos e considerando-se autômatos celulares de aprendizagem, para otimização do consumo de energia em uma rede de sensores sem fio, por meio da formação de rotas visando o aumento do tempo de vida da rede. O modelo foi desenvolvido, analisado e avaliado usando a ferramenta computacional *stateflow* no MATLAB®/Simulink®. Foram elaborados algoritmos correspondentes ao modelo e testes experimentais para validação dos métodos. A partir dos resultados em simulação, foi verificada uma redução no consumo médio da rede de até 67,54 % e um aumento do tempo de vida de até 192,86 %, nos cenários analisados. Os resultados experimentais foram realizados utilizando uma rede de sensores sem fio com cinco nós sensores, sendo observado um aumento do tempo de vida em 31,71 %.

Palavras-chave: Rede de Nós Sensores Sem Fio, Autômatos Celulares de Aprendizagem, Otimização do Tempo de Vida de Redes.

ABSTRACT

With the advent of automation, whether in industry or residences, more and more information is being generated, either in actuators or by acquisition. Thereby, increasingly sensors are being used, featuring increasingly dense networks. In the case of sensor nodes, is necessary to have usage management of them, to have better energy management. The Discrete Event Systems (DES) are presented as a solution to a better elaboration of applied logics and harnessing of sensors. And more, through the use of Cellular Learning Automata (CLA), there is the possibility of elaborate intelligent groups that attends the systems requirement of coverage, in an optimized way. Therefore, in this work is presented a model for characterization of a wireless network sensor, based on discrete event systems theory and considering cellular learning automata, to the optimization of energy consumption in a wireless sensor network, through the formation of groups aimed at increasing the network's lifetime. The model was developed, analyzed and validated using the computational tool Stateflow, in MATLAB®/Simulink®. Algorithms corresponding to the models and assemblies were developed to validate the methods. From the results obtained in simulation, was verified a decrease in average consumption of network up to 67,54 % and an increase of the network's lifetime up to 192,86 %, in scenarios under analysis. The experimental results were performed using a wireless sensor network with five sensors, with an increase in the lifetime of 31.71 %.

Keywords: Wireless Sensor Network, Cellular Learning Automata, Otimization of Network Lifetime.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Sistema geral. | 21 |
| Figura 2 – Modelo geral. | 22 |
| Figura 3 – Classificação dos Sistemas. | 24 |
| Figura 4 – Comparação entre sistemas SDVC e SED. | 25 |
| Figura 5 – Simbologia utilizada no AFD. | 27 |
| Figura 6 – Exemplo de Autômato AFD. | 28 |
| Figura 7 – Exemplo de evolução do modelo de Greenber-Hasting. | 30 |
| Figura 8 – Ambiente de aprendizado do AA. | 31 |
| Figura 9 – Associação de grupos dos ACA. | 33 |
| Figura 10 – Principais topologias nas RSSF. | 34 |
| Figura 11 – Possibilidades de formação de rotas de cobertura. | 38 |
| Figura 12 – Fases do algoritmo proposto. | 43 |
| Figura 13 – Fluxograma geral do algoritmo. | 44 |
| Figura 14 – Autômato representativo do modelo. | 45 |
| Figura 15 – Formação de rota de transmissão. | 46 |
| Figura 16 – Elaboração do autômato em simulador. | 47 |
| Figura 17 – Resposta para uma entrada de palavra válida no autômato. | 48 |
| Figura 18 – Destaque para as propriedades da modelagem no autômato elaborado. | 49 |
| Figura 19 – Conjunto de blocos correspondentes aos estados e eventos do ACA elaborado. | 50 |
| Figura 20 – Bloco com conjunto de estados. | 51 |
| Figura 21 – Conjunto de autômatos utilizados na caracterização da RSSF. | 52 |
| Figura 22 – Microcontrolador ATmega328PU-TH. | 54 |
| Figura 23 – Placa de desenvolvimento ESP32. | 55 |
| Figura 24 – Módulo transceptor NRF24L01. | 56 |
| Figura 25 – Módulo de acionamentos. | 57 |
| Figura 26 – Esquema do plano lógico aplicado. | 59 |
| Figura 27 – Organização da mensagem. | 59 |
| Figura 28 – Organização do endereçamento. | 60 |
| Figura 29 – Disposição dos nós sensores e endereços utilizados. | 61 |
| Figura 30 – Disposição dos nós sensores no ambiente, vista anterior. | 62 |
| Figura 31 – Disposição dos nós sensores no ambiente, vista posterior. | 63 |
| Figura 32 – Legenda utilizada nos gráficos das RSSF elaboradas. | 64 |
| Figura 33 – Visualização gráfica para a distribuição dos nós sensores. | 65 |
| Figura 34 – Seleção aleatória inicial de alguns nós sensores. | 66 |
| Figura 35 – Formação do grupo de cobertura. | 67 |
| Figura 36 – Rota selecionada após remoção dos nós em redundância. | 67 |

| | |
|---|----|
| Figura 37 – Consumo geral para RSSF sem otimização. | 68 |
| Figura 38 – Consumo geral para RSSF com grupo de cobertura inicial. | 69 |
| Figura 39 – Consumo geral para RSSF com o modelo proposto. | 70 |
| Figura 40 – Análise do tempo de vida nas três situações. | 70 |
| Figura 41 – Posicionamento geral no segundo cenário. | 72 |
| Figura 42 – Posicionamento homogêneo no segundo cenário. | 73 |
| Figura 43 – Algumas rotas formadas no cenário 2. | 74 |
| Figura 44 – Consumo ao longo das formações das rotas para cada nó sensor da rede. . . | 75 |
| Figura 45 – Rodadas e falhas de transmissão para seleção aleatória. | 76 |
| Figura 46 – Falhas de transmissão para seleção aleatória sem inserir o atraso entre rodadas. | 77 |
| Figura 47 – Rodadas e falhas de transmissão para algoritmo baseado em ACA. | 77 |
| Figura 48 – Distribuição do uso dos sensores ao longo das rodadas para a seleção aleatória. | 80 |
| Figura 49 – Distribuição do uso dos sensores ao longo das rodadas para o algoritmo baseado em ACA. | 81 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Níveis de Abstração nos Modelos de SED. | 26 |
| Tabela 2 – Faixas principais de frequência na ISM. | 33 |
| Tabela 3 – Modos de operação definidos para o ACA elaborado. | 40 |
| Tabela 4 – Conjunto de estados para o modelo elaborado. | 40 |
| Tabela 5 – Conjunto de eventos para o modelo elaborado. | 41 |
| Tabela 6 – Funções de transições de estados. | 42 |
| Tabela 7 – Funções de eventos ativos. | 42 |
| Tabela 8 – Sequência de eventos para atingir o estado marcado. | 46 |
| Tabela 9 – Configurações definidas para testes experimentais. | 62 |
| Tabela 10 – Resumo dos resultados obtidos em simulação. | 71 |
| Tabela 11 – Consumo em cada nó sensor para seleção aleatória. | 78 |
| Tabela 12 – Consumo para algoritmo baseado em ACA. | 78 |
| Tabela 13 – Utilização de cada nó sensor para seleção aleatória. | 79 |
| Tabela 14 – Utilização de cada nó sensor para algoritmo baseado em ACA. | 79 |
| Tabela 15 – Resumo dos resultados obtidos experimentalmente. | 81 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-------|---|
| Wi-Fi | Fidelidade sem fio (do inglês <i>Wireless Fidelity</i>) |
| SED | Sistemas a Eventos Discretos |
| RSSF | Redes de Sensores Sem Fio |
| SISO | Única entrada e uma única saída (do inglês, <i>Single Input, Single Output</i>)) |
| MIMO | Múltiplas entradas e múltiplas saídas (do inglês, <i>Multiple Input, Multiple Output</i>)) |
| MISO | Múltiplas entradas e única saída (do inglês <i>Multiple Input, Single Output</i>) |
| SIMO | Entrada única e múltiplas saídas (do inglês <i>Single Input, Multiple Output</i>) |
| SDVC | Sistemas Discretos de Variáveis Contínuas |
| AFD | Autômato Finito Determinístico |
| AFND | Autômato Finito Não Determinístico |
| AC | Autômatos Celulares |
| AA | Autômatos de Aprendizado |
| ACA | Autômatos Celulares de Aprendizado |
| ISM | Industrial, Científica e Médica (do inglês, <i>Industrial, Scientific and Medical</i>) |
| SMD | Industrial, Científica e Médica (do inglês, <i>Industrial, Scientific and Medical</i>) |
| CPU | Unidade Central de Processamento (do inglês, <i>Central Processing Unit</i>) |
| MQTT | Transporte de Telemetria (do inglês, <i>Message Queue Telemetry Transport</i>) para Fila de Mensagens |
| SPI | Interface Periférica Serial (do inglês, <i>Serial Peripheral Interface</i>) |
| GFSK | Chaveamento por Deslocamento em Frequência Gaussiano (do inglês, <i>Gaussian Frequency Shift Keying</i>) |
| CCP | Campo de Controle de Pacote |
| CRC | Verificação Cíclica de Redundância (do inglês, <i>Cyclic Redundancy Check</i>) |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | | |
|----------|-----|--|
| $u(t)$ | [-] | Entradas do Sistema. |
| $y(t)$ | [-] | Saídas do sistema. |
| $g(u)$ | [-] | Relação de saídas genéricas. |
| Σ | [-] | Alfabeto de uma linguagem. |
| X | [-] | Quantidade de estados. |
| f | [-] | Conjunto de transições. |
| x_o | [-] | Estado inicial. |
| X_m | [-] | Estado marcado. |
| Γ | [-] | Função de eventos ativos. |
| G | [-] | Autômato geral. |
| C | [-] | Espaço celular. |
| V | [-] | Vizinhança. |
| Q | [-] | Conjunto finito de estados. |
| E | [-] | Conjunto finito de ações de entradas. |
| S | [-] | Conjunto finito de saídas. |
| P | [-] | Conjunto de penalidades ou conjunto de probabilidade de ações. |
| H | [-] | Algoritmo de aprendizado do autômato. |
| e | [-] | Parâmetro de recompensa. |
| s | [-] | Parâmetro de penalidade. |

| | | |
|-------------|-----|-------------------------------------|
| T_{max} | [-] | Tempo de vida máximo de uma rede. |
| t | [-] | Intervalo de tempo. |
| f_{max} | [-] | Função de maximização de uma rota. |
| k | [-] | Quantidade de nós sensores da rede. |
| con | [A] | Consumo de cada nó sensor. |
| C_s | [A] | Consumo individual dos sensores. |
| C_{geral} | [A] | Consumo geral da rede. |

SUMÁRIO

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1 | Objetivos | 19 |
| 1.1.1 | Objetivo Geral | 19 |
| 1.1.2 | Objetivos Específicos | 19 |
| 1.2 | Organização do trabalho | 19 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 21 |
| 2.1 | Sistemas a Eventos Discretos (SED) | 21 |
| 2.1.1 | Níveis de Abstração dos SED | 25 |
| 2.2 | Linguagens Formais e Autômatos | 26 |
| 2.2.1 | Linguagens Formais | 26 |
| 2.2.2 | Autômatos | 27 |
| 2.3 | Autômatos Celulares | 28 |
| 2.4 | Autômatos de Aprendizado | 30 |
| 2.5 | Autômatos Celulares de Aprendizado | 32 |
| 2.6 | Redes de Sensores Sem Fio | 32 |
| 2.6.1 | Topologias de Redes Sem Fio | 33 |
| 2.7 | Eficiência Energética em RSSF | 35 |
| 3 | OTIMIZAÇÃO DO TEMPO DE VIDA DE UMA RSSF | 36 |
| 3.1 | Formulação do Problema | 36 |
| 3.2 | Definições de Eventos e Estados do Nó Sensor | 37 |
| 3.3 | Proposta do Modelo do Nó Sensor Baseado em Autômatos | 41 |
| 3.3.1 | Elaboração do Modelo de Nó Sensor | 43 |
| 3.3.2 | Validação do Modelo de Nó Sensor | 47 |
| 3.4 | Modelagem da RSSF baseado em ACA | 49 |
| 3.4.1 | Modelo da RSSF Em Stateflow® | 50 |
| 4 | MATERIAIS E MÉTODOS | 53 |
| 4.1 | Hardware | 53 |
| 4.1.1 | Plataforma Arduino | 53 |
| 4.1.2 | Módulo Para Comunicação Sem Fio ESP32 | 54 |
| 4.1.3 | Transceptor NRF24L01 | 55 |
| 4.1.4 | Módulo de Acionamentos | 56 |
| 4.2 | Metodologia | 57 |
| 4.2.1 | Parâmetros Definidos | 58 |

| | | |
|---------|---|-----------|
| 4.2.1.1 | Definição da Mensagem | 58 |
| 4.2.1.2 | Distribuição no Ambiente | 60 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 64 |
| 5.1 | Resultados do cenário 1 | 65 |
| 5.2 | Resultados do cenário 2 | 71 |
| 5.3 | Resultados Experimentais | 75 |
| 5.3.1 | Tempo de Vida da Rede e Falhas de Transmissão | 76 |
| 5.3.2 | Consumo dos Nós Sensores | 77 |
| 5.3.3 | Utilização dos Nós Sensores | 79 |
| 5.3.4 | Homogeneidade da Rede | 79 |
| 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 82 |
| | REFERÊNCIAS | 84 |

1 INTRODUÇÃO

As atividades produtivas vêm passando por grandes mudanças. Com destaque para as atividades de manufatura, tais mudanças visam aumentar a eficiência e competitividade. Buscando ainda: reduzir custos, melhorar a qualidade e disponibilidade, além de objetivar a inovação. Nesse sentido, a automação pode ser utilizada como opção para englobar tais metas (TEIXEIRA; VISOTO; PAULISTA, 2016).

As primeiras grandes implementações de automação industrial foram observadas em fábricas automotivas, no século XIX. Inicialmente adaptando a produção em tarefas repetitivas e cíclicas, visando a produção de forma eficiente de produtos similares. Com o advento de recursos computacionais, foi possível introduzir a flexibilidade na produtividade, possibilitando o atendimento a diferentes linhas de produção. Assim, agregando novas técnicas e procedimentos, a partir da necessidade do processo (JÚNIOR et al., 2016).

Na automação residencial, conforme citado por Dzogovic et al. (2019) em 1975 foi possível ter o controle de dispositivos domésticos e aplicações, graças ao primeiro protocolo de comunicação no ramo. Ao longo dos anos, diversas outras tecnologias de comunicação sem fio foram desenvolvidas, com o aumento da popularidade das casas inteligentes. Após o advento das comunicações sem fio (Wi-Fi, do inglês *Wireless Fidelity*) e telefonia móvel, cada vez mais dispositivos estão integrados.

Seja na automação industrial ou residencial, cada vez mais dispositivos estão presentes nas arquiteturas e mesmo no cotidiano das atividades. Assim, o relacionamento entre tantos dispositivos têm se tornado cada vez mais complexos. Uma forma de simplificar a análise dos sistemas que envolvem as residências ou plantas industriais é por meio da elaboração de modelos, que sintetizam o comportamento de tais processos. Além disso, a utilização de modelos também possibilita análises sem necessariamente ter que realizar montagens, como a possibilidade de previsão de acontecimentos (MELOTTI, 2009).

Desse modo, é possível elaborar modelos como uma sequência de etapas, considerando que tais etapas ocorrem em eventos instantâneos. Definindo assim como Sistemas a Eventos Discretos (SEDs) (MORALES, 2009). Dentre as técnicas a eventos discretos, é possível destacar os Autômatos, devido a simplicidade de simulação, além de apresentar resultados similares aos sistemas reais (MELOTTI, 2009).

Os autômatos também são utilizados para representação das interações entre os elementos que compõem o sistema, além de corresponder ao desempenho conjunto, gerado a partir de um conjunto de indivíduos em um sistema complexo. E ainda, os elementos são então relacionados por meio de regras, transmitindo cada informação obedecendo a uma lei correspondente a tal transição (MELOTTI, 2009).

Outra importante área de aplicação dos SEDs é na prevenção e detecção de falhas. Conforme levantado por Júnior et al. (2016), há diversos trabalhos que relacionam modelos baseados em SEDs e otimização de operações e sistemas. Um exemplo de aplicação citado é na otimização de rede de sensores, buscando o diagnóstico de falhas. Além disso, também são abordados trabalhos baseados em estados, associando as dinâmicas das transições.

Nos sistemas baseados em redes de sensores sem fio (RSSF), diversas técnicas são utilizadas para aumentar a eficiência dos sistemas. Assim, os métodos são utilizados visando melhorias no consumo, gerenciamento da atividade dos nós (relação de quanto tempo em estado ativo ou desativado), transmissão dos dados e coordenação das informações (MANJU; CHAND; KUMAR, 2018a).

Além disso, outro importante ponto de análise nas RSSF é a área de cobertura. Os autômatos podem ser utilizados como uma importante ferramenta para otimizar o uso dos nós sensores para atender aos requisitos de cobertura, avaliando redundância, tempo de vida e percentual de uso dos nós sensores da rede. Em (MANJU; CHAND; KUMAR, 2018a) e (MOSTAFAEI; OBAIDAT, 2018) são apresentadas análises da cobertura de técnicas de autômatos aplicados a RSSF. Ademais, nesses trabalhos são apresentados numa categoria mais específica de autômatos, denominados autômatos de aprendizagem.

O diferencial deste grupo de SED é a adaptação e melhoria contínua do algoritmo, objetivando o ajuste de acordo com a topologia apresentada pela rede. A aprendizagem aplicada nos autômatos pode ter origem a partir da definição de penalidades e recompensas, formação de rotas e seleção de nós principais e de nós não relevantes. Com o uso mais eficiente dos nós, há a diminuição do consumo e melhor aproveitamento dos nós, com um menor número de nós não utilizados.

Diante da crescente utilização de cada vez mais dispositivos e sensores sem fio, técnicas para otimização da eficiência energética são cada vez mais necessárias. Contudo, conforme levantado por (COSTA; LIMA, 2017), há poucos trabalhos que visam relacionar a automação residencial com a eficiência energética, sendo que no mercado, as atenções têm se voltado cada vez mais para o consumo racional e a contenção de despesas. Assim, busca-se a comodidade e conforto proporcionado pela automação, em união com um controle dos gastos do consumo energético, por meio de um monitoramento do consumo e permitindo ao sistema verificar como otimizar a rede elétrica, identificando possíveis desperdícios e se adaptando ao usuário.

Com isso, neste trabalho, propõe-se a elaboração e implementação de um modelo matemático de programação baseado em Autômatos de Aprendizagem, visando a análise e definição para otimização no posicionamento e otimização de consumo de uma rede de sensores sem fio. Desta maneira, o objetivo desta pesquisa é o desenvolvimento de uma ferramenta para seleção da melhor rota entre os nós sensores presentes, otimizando o consumo por meio da utilização do menor número possível de sensores, visando o aumento do tempo de vida de rede. De forma que seja possível verificar qual foi o consumo em cada um dos nós da rede e quantos nós sensores

disponíveis na RSSF foram utilizados. E mais, de forma que seja possível aplicar de forma prática e facilitada o modelo proposto.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta matemática para otimização do consumo energético de um grupo de nós sensores em uma rede RSSF. Para tanto, a principal meta é a elaboração de rotas para uma transmissão inteligente entre os nós sensores e assim ser possível um aumento do tempo de vida da rede. Para visualização dos resultados foi utilizado o ambiente computacional MATLAB®.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar um levantamento bibliográfico acerca dos princípios básicos de sistemas SED, com ênfase em autômatos de aprendizagem;
- Elaborar um modelo matemático para otimização do consumo energético em uma RSSF, baseado em autômatos de aprendizagem;
- Definição de novas funções para penalização ou favorecimento dos nós sensores, como restrições de uso como exemplo de penalidade ou aumento da chance de utilização, no caso de uma bonificação. Tais funções têm como objetivo o uso homogêneo da rede;
- Comparação dos dados obtidos em cenários distintos;
- Aumento do tempo de vida da rede.

1.2 Organização do trabalho

O trabalho elaborado está organizado em seis capítulos. O primeiro capítulo é definido pela descrição da contextualização do tema, por meio da introdução, assim como os objetivos propostos e a estrutura disposta.

No segundo capítulo são apresentados os princípios básicos dos SED, desde um panorama geral do tema até a definição da teoria dos autômatos utilizada no trabalho. Além de apresentar como os autômatos são abordados no contexto da automação.

O terceiro capítulo é composto pela apresentação a proposta de trabalho, com destaque para o algoritmo desenvolvido, além de fluxogramas, formulações e definição dos cenários empregados no estudo.

No quarto capítulo são definidos os materiais e métodos adotados no projeto, por meio de descrições de *hardware* e parâmetros utilizados para aplicação prática.

No quinto capítulo há a apresentação dos resultados obtidos, por meio de gráficos de posicionamento dos nós sensores e levantamentos do consumo apresentado pelo grupo da RSSF, bem como os resultados práticos obtidos.

O sexto capítulo contém as conclusões acerca do projeto, além das dificuldades observadas e possíveis melhorias.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

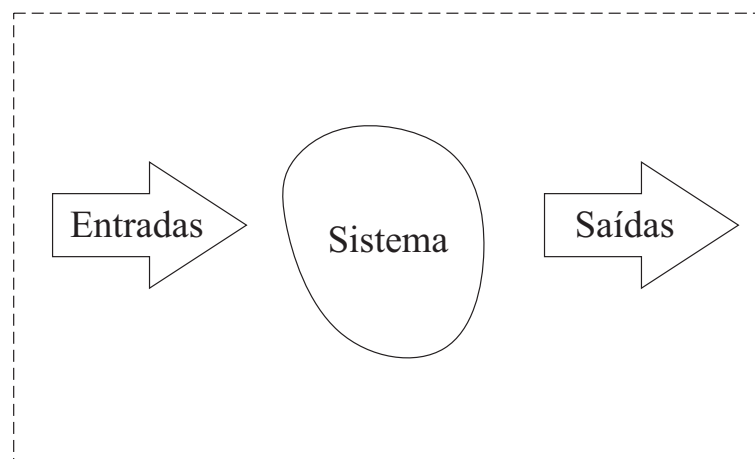
Neste capítulo procura-se apresentar os conceitos apontados por meio de levantamento bibliográfico, realizado para o desenvolvimento de uma abordagem que considera a otimização energética de uma RSSF. Dessa forma, são apresentados os teoremas básicos acerca dos SEDs, além da definição de autômatos e suas respectivas aplicações para otimização e também a caracterização de redes de sensores sem fio, afim de relacionar os autômatos em uma aplicação para otimização do posicionamento de sensores.

2.1 Sistemas a Eventos Discretos (SED)

A evolução humana passa por um momento de grande crescimento dos dados gerados, seja em dispositivos móveis ou fixos, conectados a rede mundial de computadores. Dessa forma, cada vez mais informações são transmitidas e processadas. Com isso, para permitir a interligação entre os mais diversos dispositivos, mais sinais são utilizados no cotidiano. Além disso, é necessária a interpretação ou modificação destes sinais, possibilitando a interpretação como arquivos de áudio, vídeo, entre outros. Assim, os sistemas são entidades que podem modificar ou extrair informações dos sinais. Os sistemas podem ser elaborados fisicamente, com componentes elétricos, mecânicos, hidráulicos, entre outros ou podem estar presentes em algoritmos (LATHI, 2006).

Assim, os sistemas são uma relação entre entradas e saídas, conforme ilustrado na Figura 1. Contudo, na análise de dados e processos, o foco passa a ser o estudo quantitativo dos sistemas, visando o desenvolvimento de técnicas para controle, observação e atuação. Com isso, uma análise apenas qualitativa passa a ser insuficiente (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2009).

Figura 1 – Sistema geral.

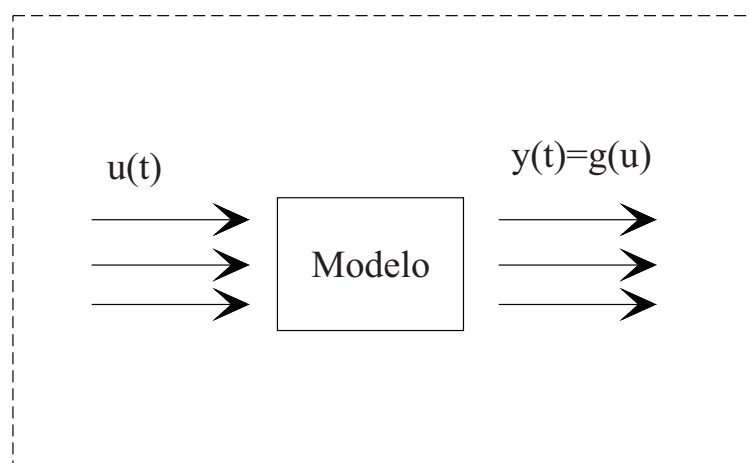


Fonte: Autoria Própria, baseado em (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2009).

Sistemas que possuem uma única entrada e uma única saída são denominados SISO (do inglês, *Single Input, Single Output*), enquanto que sistemas que possuem múltiplas entradas e múltiplas saídas são denominados MIMO (do inglês, *Multiple Input, Multiple Output*), podendo ainda expandir a definição para sistemas SIMO e MISO, para uma entrada e várias saídas e várias entradas e única saída, (do inglês, *Single Input, Multiple Output* e *Multiple Input, Single Output*), respectivamente.

Uma forma de representação dos sistemas reais é por meio da elaboração de modelos. Um modelo é uma ferramenta matemática que replica o comportamento de um sistema, por meio de equações e fórmulas. Na Figura 2 é apresentado um modelo equivalente ao sistema da Figura 1, relacionando as entradas $u(t)$, com as saídas $y(t)=g(u)$ (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2009).

Figura 2 – Modelo geral.



Fonte: Autoria Própria, baseado em (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2009).

É possível elaborar uma classificação dos sistemas, de acordo com o apresentado por Cassandras e Lafortune (2009). A classificação apresentada abaixo corresponde a uma definição mais formal e geral dos sistemas, finalizando com a descrição dos SED.

- **Sistemas Estáticos e Dinâmicos:** Para sistemas estáticos, a saída é independente de valores passados. Ou seja, a saída $y(t)$ depende apenas dos valores atuais de $u(t)$. Enquanto que para sistemas dinâmicos, a saída $y(t)$ depende dos valores anteriores de $u(t)$, como $u(t-1)$ e $u(t-2)$, por exemplo, o comportamento pode ser observado em equações diferenciais.
- **Sistemas Variantes no Tempo e Invariantes no Tempo:** Sistemas invariantes não modificam seu comportamento com o passar do tempo, conforme descrita na propriedade da estacionariedade. Ou seja, conforme descrito em: $y(t) = g(u(t)) \Leftrightarrow y(t-\tau) = g(u(t-\tau))$.
- **Sistemas Lineares e Não Lineares:** Um sistema é classificado como linear quando satisfaz o princípio da superposição, definido como: $g(a_1u_1 + a_2u_2) = a_1g(u_1) + a_2g(u_2)$, nos quais u_1 e u_2 são dois vetores de entrada e a_1 e a_2 são dois números reais, além de $g(\cdot)$

correspondendo ao resultado correspondente. A superposição é a união da homogeneidade e da aditividade. Para os sistemas que não satisfaçam esta condição, são considerados não lineares.

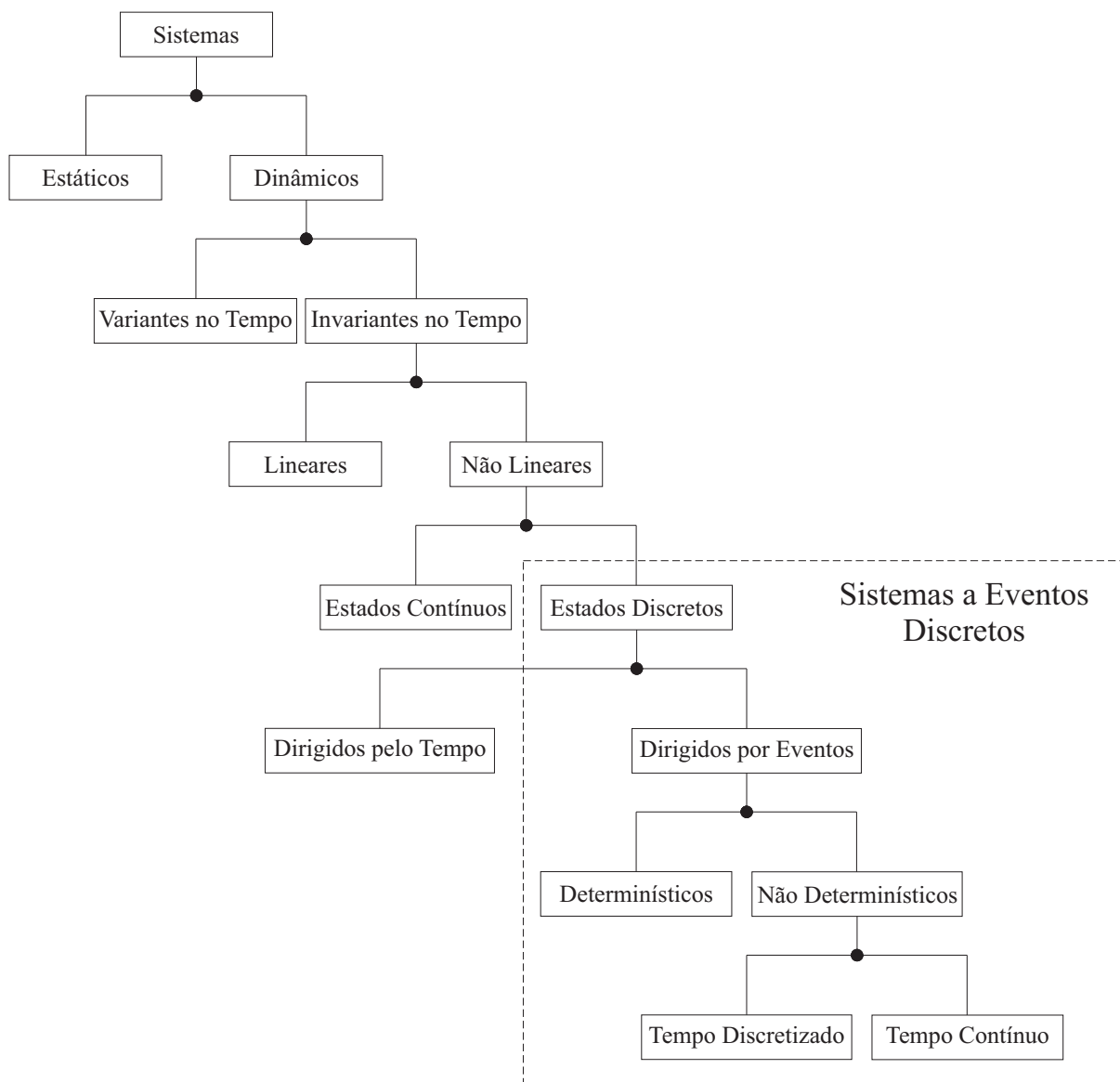
- **Sistemas a Estados Contínuos e Estados Discretos:** Nos sistemas a estados contínuos, as variáveis de estado podem estar dispostas ao longo de qualquer valor real ou complexo. Por outro lado, os sistemas a estados discretos apresentam variáveis de estados dispostas apenas ao longo de intervalos discretos, ou seja, ao longo de intervalos inteiros.
- **Sistemas Dirigidos pelo Tempo e Dirigidos por Eventos:** Para sistemas dirigidos pelo tempo, os estados variam continuamente ao longo do tempo. Para os sistemas dirigidos por eventos, o vetor de estado muda após a ocorrência de eventos assíncronos, provocando transições de estado, enquanto que entre as ocorrências de eventos, os estados permanecem inalterados.
- **Sistemas Determinísticos e Não Determinísticos:** O sistema é definido não determinístico quando apresenta uma ou mais variáveis que podem assumir valores aleatórios. Outra denominação é de sistema estocástico, sendo observado quando o vetor de estados é descrito por um processo estocástico e um arranjo probabilístico é necessário para caracterizar o comportamento do sistema. No caso de ausência de variáveis aleatórias, o sistema é definido como determinístico.
- **Sistemas a Tempo Discretizado e a Tempo Contínuo:** Na sequência, tem-se os sistemas a tempo discretizado, que são sistemas que apresentam componentes do vetor de estado definidos em momentos específicos de tempo, como no caso de processos de amostragem de sinais. Enquanto que sistemas a tempo contínuo são sistemas que possuem todas as entradas, estados e saídas que podem ser definidos ao longo de todos os possíveis valores do tempo.

Por conseguinte, um SED são sistemas que percebem a ocorrência do ambiente por meio de eventos. É possível resumir a classificação dos sistemas de acordo com Cassandras e LaFortune (2009) conforme apresentado na Figura 3. Todavia, a classificação apresentada corresponde às definições enfatizadas neste trabalho, com foco nos SEDs. Pois eventos dirigidos pelo tempo também podem estar definidos em tempo discreto ou contínuo, por exemplo.

Além disso, os SED evoluem com a ocorrência dos eventos, que provoca uma transição ou mudança de estado. O objetivo de especificar um SED é estabelecer que tarefas e metas específicas sejam atendidas, por meio de sequências ordenadas. Tal característica é fundamental para o projeto proposto, visando a obtenção do melhor resultado possível.

Em contraste aos SED, há os Sistemas Discretos de Variáveis Contínuas (SDVC). Enquanto que nos SED as mudanças de estado ocorrem em momentos específicos de tempo, nos SDVC o estado muda a cada instante. Além disso, as funções de espaço de estado nos SDVC

Figura 3 – Classificação dos Sistemas.



Fonte: Adaptado de (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2009).

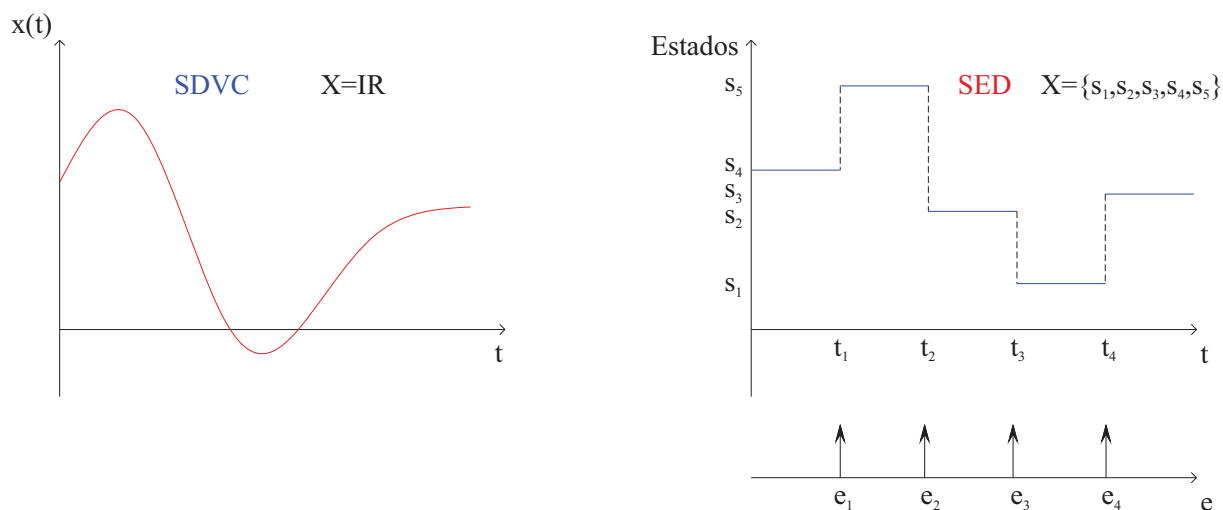
relacionam o estado ao tempo, ao passo que nos SED o espaço de estados pode ser representado por uma sequência de eventos. E mais, nos SED é tratada a teoria do controle das atividades, sem necessariamente se preocupar com a implementação física, à medida que nos SDVC há a preocupação da realização física das atividades (MORALES, 2009).

Na Figura 4 há uma ilustração para comparação de um sistema SDVC com um sistema SED. Nos quais X corresponde ao espaço de estados, t é o tempo, e são os eventos e s corresponde aos estados. O eixo com a ilustração da passagem de tempo foi mantida no SED para critério de comparação, uma vez que tais sistemas são definidos de acordo com a ocorrência dos eventos.

Vale destacar que ainda é possível perceber na Figura 4 que nos SED o acontecimento de eventos leva a uma mudança nos estados discretos, enquanto que nos SDVC as modificações

ocorrem ao longo da passagem do tempo. Por outro lado, o acontecimento de eventos pode não necessariamente levar a mudança de estado, como no caso de eventos de auto-laço, nos quais o sistema se mantém no mesmo estado.

Figura 4 – Comparação entre sistemas SDVC e SED.



Fonte: Autoria Própria.

2.1.1 Níveis de Abstração dos SED

A aplicabilidade dos SED é variada conforme o objetivo e prática desejada, não sendo observado um modelo mais genérico. Entretanto, algumas técnicas têm ganhado destaque na utilização em modelagens em alguns estudos de caso. Abaixo estão listadas algumas das técnicas citadas por Morales (2009):

- Autômatos;
- Redes de Petri;
- Álgebra Max-Plus;
- Cadeias de Markov;
- Teoria das Filas;
- Álgebra de Processos.

Os modelos das técnicas listadas são categorizados de acordo com: as variáveis utilizadas no modelo, podendo ser lógico, algébrico ou para análise de desempenho; se são dependentes do tempo ou não dependentes do tempo, sendo temporizados ou não temporizados; e se os eventos possuem aleatoriedade envolvida, sendo determinístico ou estocástico.

Assim, os três níveis de abstração dos SED são: Linguagens Não Temporizadas, Linguagens de Modelagem Temporal e Linguagens Estocásticas de Modelagem Temporal, conforme é descrito na Tabela 1 (HO, 1989). Neste trabalho, será dado destaque às linguagens não temporizadas, com ênfase nos autômatos.

Tabela 1 – Níveis de Abstração nos Modelos de SED.

| Modelos | Temporizados | Não Temporizados |
|-----------------------|--|-----------------------------|
| Lógicos | Autômatos Temporizados Redes de Petri Temporizadas | Autômatos Redes de Petri |
| Algébricos | Álgebra Max-Plus | Álgebra de Processos |
| Análise de Desempenho | Cadeias de Markov Teoria das Filas Redes de Petri Estocásticas | |

Fonte: Adaptado de (HO, 1989).

2.2 Linguagens Formais e Autômatos

Na seção anterior foram levantadas as diferenças entre SED e SDVC. Contudo, para a elaboração de modelos é necessário descrever o comportamento e como estruturar um sistema, de forma que seja possível elaborar técnicas para atender aos requisitos do projeto e ao desempenho esperado (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2009).

2.2.1 Linguagens Formais

O comportamento de um sistema é modelado por uma linguagem. Porém, antes de definir a linguagem, deve-se definir alfabeto e palavra. O alfabeto é um conjunto não vazio de símbolos, representado por Σ , como em $\Sigma = \{\alpha, \beta, \gamma\}$. A combinação de um conjunto de símbolos de um alfabeto é denominado palavra, como por exemplo, para o alfabeto $\Sigma = \{a, b, c, \dots, z\}$ é possível formar as palavras robo, automato, entre outras. Finalmente, a linguagem é o conjunto de palavras originadas com os símbolos de um alfabeto Σ (JÚNIOR et al., 2016).

O formalismo associado a uma linguagem pode ser reconhecedor ou gerador. O formalismo reconhecedor consiste em identificar se uma palavra pertence ou não à linguagem, retornando um valor correspondente para o caso de pertencer. Enquanto que o formalismo gerador consiste em um conjunto de regras utilizadas para a formação das palavras (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2009).

As operações associadas às linguagens também são operações comuns a conjuntos, como união, interseção e concatenação, por exemplo. Além disso, há outras operações como a projeção, na qual elementos não observáveis em um conjunto de eventos são eliminados, tendo em vista que tal conjunto é alvo da projeção desejada. As operações visam a formações de novas linguagens (CARVALHO, 2011).

2.2.2 Autômatos

Conforme citado na seção anterior, uma das técnicas para elaboração de modelos em SED são os autômatos. Os autômatos são utilizados para representar uma linguagem com entradas e saídas discretas, de acordo com regras bem definidas. Um autômato pode ser finito ou infinito e determinístico ou não determinístico (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2009).

A definição do autômato finito consiste na quantidade de estados, determinado por X , que é finita, além de um conjunto de transições f , que possuem ocorrência oriunda de símbolos de entrada, dentre um alfabeto Σ . Antes de ocorrer a primeira transição, o autômato se encontra no estado inicial x_o . No caso do autômato possuir um número infinito de estados, define-se como autômato infinito (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2009).

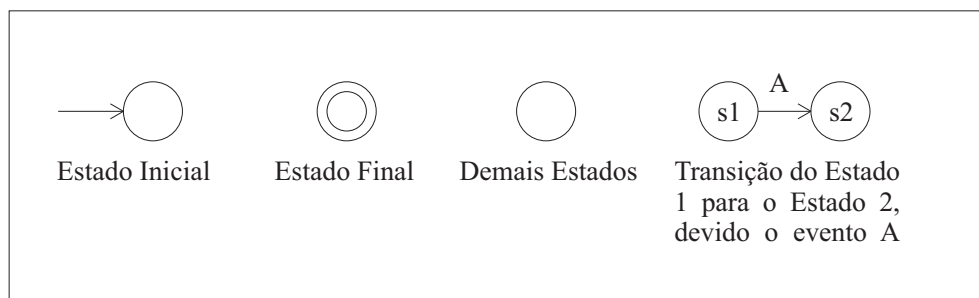
Um autômato é definido como determinístico quando f é uma função de $X \times \Sigma$ em X , que não possui duas transições no mesmo evento. Dessa forma, no caso de duas ou mais transições de saída a partir de um mesmo estado, o autômato passa a ser Autômato Finito Não Determinístico (AFND). Há estados que são os objetivos do autômato, ou estados marcados. Tais estados finais são definidos por X_m . Se uma determinada palavra levar a um estado marcado, o autômato reconhece esta palavra. Assim, pode-se caracterizar um autômato finito como uma sêxtupla, como definido na Equação 1 (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2009).

$$G = (X, \Sigma, f, \Gamma, x_o, X_m) \quad (1)$$

Nos quais X é o conjunto de estados, Σ é o alfabeto ou conjunto de símbolos, $f : \Sigma \times X \rightarrow X$ é a função transição de estados, Γ é a função de eventos ativos, x_o é o estado inicial e X_m é o conjunto de estados marcados.

Quanto à representação gráfica, o Autômato Finito Determinístico (AFD) pode corresponder a um diagrama semelhante ao empregado nas máquinas de estados finitos. Na Figura 5 são apresentados os símbolos utilizados no AFD, assim como o que representa cada símbolo.

Figura 5 – Simbologia utilizada no AFD.



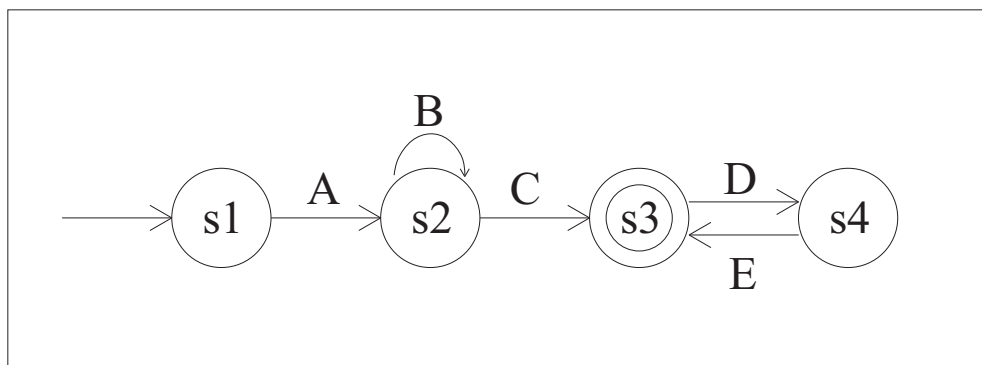
Fonte: Autoria Própria.

Dessa maneira, os estados de um autômato são conectados por meio de arcos, cujos vértices representam os estados, formando assim um diagrama de transição de estados, ou grafo

direcionado. Na Figura 6 é apresentado o grafo direcionado de um autômato geral, de acordo com $G = (X, \sum, f, \Gamma, x_o, X_m)$, dentre os quais:

- $X = \{s1, s2, s3, s4\}$;
- $\sum = \{A, B, C, D, E\}$;
- $X_m = \{s3\}$;
- $x_o = s1$;
- $f(s1, A) = s2; f(s2, B) = s2; f(s2, C) = s3; f(s3, C) = s4; f(s4, E) = s3;$
- $f\Gamma(s1) = \{A\}; f\Gamma(s2) = \{C\}; f\Gamma(s3) = \emptyset; f\Gamma(s4) = \{E\}$;

Figura 6 – Exemplo de Autômato AFD.



Fonte: Autoria Própria.

Há duas características a se destacar nos autômatos: quando o estado não apresenta eventos ativos, também é denominado como estado em bloqueio; estados com eventos que possuem o mesmo destino da origem são denominados como em auto laço, como apresentado no estado s2 da Figura 6.

2.3 Autômatos Celulares

Os autômatos são ferramentas utilizadas em variadas aplicações e diferentes áreas do conhecimento. Além disso, há diversos modelos e variações dos autômatos. Neste trabalho, um dos modelos em destaque são os Autômatos Celulares (AC). Os AC possuem como principais propriedades a simplicidade na determinação de suas regras e o fato que cada célula que compõe o sistema pode evoluir, apenas com base nos sistemas anteriores do sistema de células. Há diversos modelos propostos que são utilizados para representar fenômenos da natureza, comportamento de mercado, distribuição de sensores, entre outros (CASTRO; CASTRO, 2015).

Conforme levantado por Castro e Castro (2015), há exemplos de aplicações dos AC para modelagem de fenômenos da natureza, como deslizamentos de terra ou mesmo reações químicas, surgimento de cristais de gelo e outros. Tais exemplos reforçam a simplicidade e ao mesmo tempo o quão poderosas são as ferramentas baseadas nos AC. Além disso, todos os trabalhos citados possuem em comum o estado inicial de aleatoriedade, além de uma evolução associada a cada um dos sistemas.

A evolução dos sistemas possui como base a situação atual dos vizinhos e um conjunto de regras que é comum a todas as células. Contudo, mesmo compartilhando do mesmo conjunto de regras, a situação de cada membro do sistema pode variar de forma indeterminada e de forma complexa ao longo do tempo, podendo até mesmo gerar novos sistemas ou se auto reproduzir, gerando outros sistemas similares.

Para definir de forma geral os AC, algumas propriedades possuem destaque (WEIMAR, 1997):

- Constituem um conjunto de células, na forma de grade ou matriz;
- Evoluem a partir de etapas discretas de tempo;
- Cada célula pertence a um conjunto finito de estados;
- As células são dispostas a um mesmo conjunto de regras e cada qual evolui de acordo com o estado atual da célula e de algumas células vizinhas;
- As relações com a vizinhança ocorre de forma uniforme e local;

Em uma definição mais formal, os AC podem ser definidos como uma quádrupla, conforme descrito na Equação 2 (LEITE, 2016).

$$A = (C, V, Q, f) \quad (2)$$

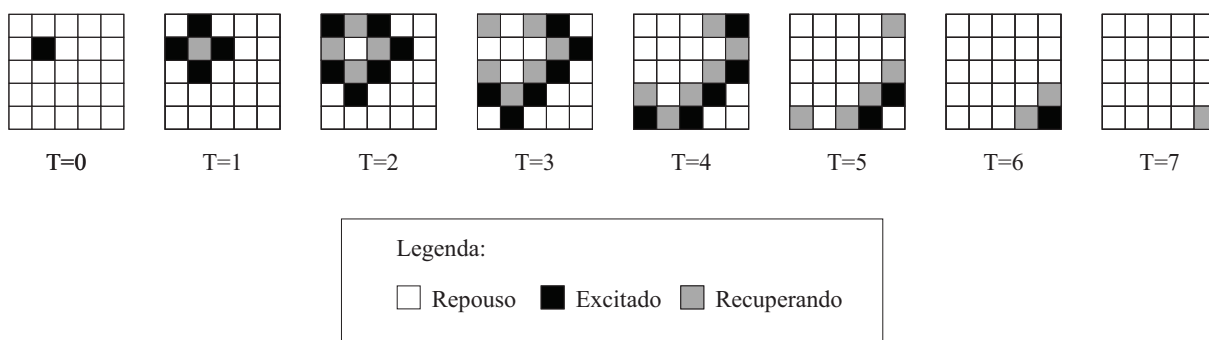
De forma que C é o espaço celular, definido de forma regular, na forma de matriz. Os elementos de C são denominados células. $V = \{i_1, \dots, i_s\}$ é um conjunto finito de elementos, denominado vizinhança. Q é o conjunto finito de estados e f é a função de transição, na qual é associado um novo estado de acordo com a distribuição da vizinhança, na forma $f : Q^s \rightarrow Q$, sendo $s = |V|$ a cardinalidade do conjunto vizinhança.

Ainda conforme levantado por Castro e Castro (2015), dois algoritmos ilustram bem a dinâmica dos AC. O primeiro exemplo é o modelo de Greenber-Hasting enquanto o segundo exemplo é o jogo da vida, do matemático britânico John Horton Conway.

O modelo de Greenber-Hasting consiste na representação da dinâmica dos tecidos nervosos ou musculares. O modelo apresenta um AC de três estados: (0) repouso, (1) excitado

e (2) recuperando. De forma básica, segue três regras: continuar em repouso, caso não haja nenhuma célula excitada na vizinhança; caso esteja em estado de excitação, entra em estado de recuperação no próximo passo; uma célula em recuperação entra em descanso no próximo passo. Na Figura 7 é apresentado um exemplo de funcionamento do modelo de Greenber-Hasting ao longo dos intervalos de tempo.

Figura 7 – Exemplo de evolução do modelo de Greenber-Hasting.



Fonte: Adaptado de (CASTRO; CASTRO, 2015).

Enquanto que o jogo da vida é definido como outro autômato celular, mas desta vez com uma vizinhança baseada em oito células e apenas dois estados para as células, sendo 0 morta e 1 viva. O autômato é baseado em quatro regras: A célula permanece viva para uma vizinhança com 2 ou 3 células vivas; Se tiver 1 ou nenhuma célula vizinha viva, a célula morre; No caso da célula possuir 4 ou mais vizinhos vivos, a célula também morre; A célula revive no caso de 3 vizinhos vivos.

Com os dois exemplos ilustrados, os AC caracterizam um grupo de autômatos baseados na evolução e em estados da vizinhança, além de uma simplicidade associada ao algoritmo. Tais características são fundamentais na construção de um algoritmo para associação de um conjunto de elementos semelhantes.

2.4 Autômatos de Aprendizado

Na sequência, outro grupo de autômatos em destaque são os autômatos de aprendizado (AA). Além das definições elementares dos autômatos, o termo aprendizado dos AA corresponde à capacidade desse grupo de algoritmos em adquirir conhecimento por meio da modificação do comportamento, em consequência a alguma ação tomada em um ambiente. Assim, o algoritmo possui um conjunto de decisões a serem tomadas, com base nas ações e suas influências no sistema, respondendo de forma positiva ou negativa, com uma probabilidade de escolha associada. E mais, o autômato faz escolhas de acordo com um conjunto de regras, visando o melhor resultado possível. Para que seja possível alcançar o melhor resultado, o AA continua a interagir com o ambiente, de modo a ir se adaptando e atualizando (MANJU; CHAND; KUMAR, 2018b).

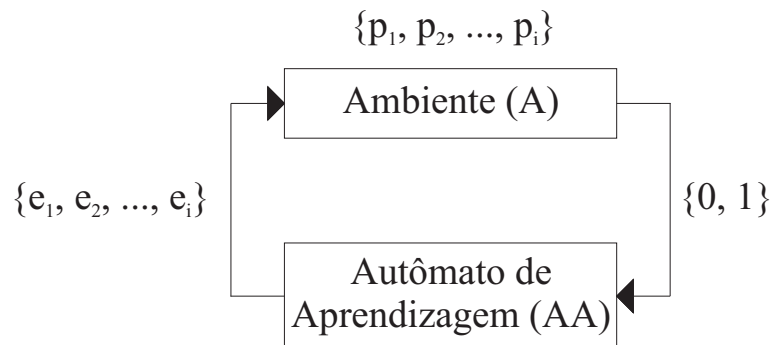
De modo formal, o ambiente que compõe o AA pode ser representado por meio de uma quádrupla, conforme exibido na Equação 3 (MANJU; CHAND; KUMAR, 2018b):

$$A = (E, S, P, H) \quad (3)$$

Em que: E corresponde a um conjunto finito de ações de entradas, na forma $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$, S corresponde a um conjunto finito de saídas, na forma $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, P representa um conjunto de penalidades ou conjunto de probabilidade de ações ($P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$), na qual cada elemento está associado a uma ação de entrada e_i . Por fim, H corresponde ao algoritmo de aprendizado do autômato.

Dessa forma, cada célula possui um conjunto de ações de entrada ($\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$) para escolher. Uma vez definida a ação escolhida, um vetor de probabilidade de escolha é atualizado, de acordo com o conjunto associado de penalidades. Assim, é atribuída uma recompensa ou penalidade, que define as futuras ações e decisões do sistema. Na Figura 8 é apresentado o modo de aprendizado utilizado no AA.

Figura 8 – Ambiente de aprendizado do AA.



Fonte: Adaptado de (MANJU; CHAND; KUMAR, 2018b).

Conforme ilustrado na Figura 8, o AA interage com o ambiente, buscando o melhor resultado possível, de modo a obter a melhor recompensa possível, em caso favorável retornando 1, em caso de penalidade retornando 0. Ainda de acordo com MANJU, CHAND e KUMAR (2018b), os AA podem apresentar estrutura fixa ou estrutura variável. Neste trabalho também será considerada uma estrutura variada, uma vez que o vetor de ações é atualizado a cada rodada, de acordo com o vetor recompensa obtido.

O processo do autômato pode ser descrito na sequência definida a seguir: há uma escolha aleatória inicial para a ação de entrada e_i , baseada na probabilidade de ações p , atuando no ambiente A . Uma vez definida a ação, há a atualização do vetor de probabilidade de ações. Caso o retorno seja recompensa, a atualização ocorre de acordo com a Equação 4. Em caso de penalidade, a atualização de p ocorre de acordo com a Equação 5 (MOHAMADI; ISMAIL;

SALLEH, 2014).

$$\begin{aligned} p_i(n+1) &= p_i(n) + e[1 - p_i(n)] \\ p_j(n+1) &= (1 - e)p_j(n) \quad \forall j, j \neq i \\ p_i(n+1) &= (1 - s)p_i(n) \end{aligned} \quad (4)$$

$$p_i(n+1) = \frac{s}{i-1} + (1-s)p_i(n) \quad \forall j, j \neq i \quad (5)$$

Tanto na Equação 4, quanto na Equação 5, e e s correspondem a parâmetros de recompensa e penalidade, respectivamente. Assim, é proposto com o uso dos AA um ambiente dinâmico, no qual a eficiência do sistema aumenta de acordo com as mudanças no ambiente. Consequentemente, os AA são ferramentas ideais em problemas que visam a otimização, que envolvem um certo nível de incerteza associada. Conforme citado por MANJU, CHAND e KUMAR (2018b), por meio dos AA, diversos algoritmos de RSSF obtiveram um melhor desempenho, envolvendo melhoras em aspectos como cobertura e eficiência energética.

2.5 Autômatos Celulares de Aprendizado

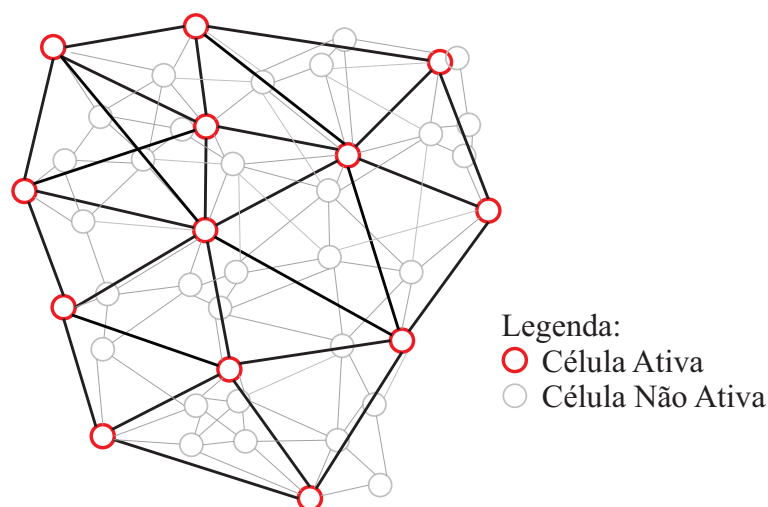
É possível ainda associar os AC com os AA, para elaboração de rotas inteligentes, alvo desse estudo. Conforme enunciado em MOSTAF AEI e OBAIDAT (2018) e outros autores, os Autômatos Celulares de Aprendizado (ACA) correspondem a associação das células dos AA, a partir de associações para formar estruturas conforme apresentado nos AC. A partir do conjunto de AA, os estados são definidos a partir do vetor de probabilidade de ações. A união de tais características compõe assim os ACA.

O modo de operação dos ACA consiste em inicialmente o estado de cada AA é elaborado de forma aleatória ou de acordo com o vetor de probabilidade de ações. Depois, as regras definidas de acordo com os AC definem as evoluções associadas. E por fim, os AA atualizam os estados de acordo com uma penalidade ou recompensa associada. O processo se repete até que o resultado desejado seja obtido. Na Figura 9 é apresentado o resultado de seleção e formação de rotas a partir de um conjunto de células (MOSTAF AEI; OBAIDAT, 2018). Neste exemplo, cada um dos elementos se relaciona com os demais, de forma que um grupo geral é elaborado visando executar a tarefa desejada da melhor forma possível. Com isso, as células ativas e em destaque foram selecionadas ao longo da evolução e interação entre os elementos do sistema.

2.6 Redes de Sensores Sem Fio

Os sensores em geral possuem larga importância na medição e avaliação das mais variadas grandezas da natureza. Possuem a característica de converter alguma forma de energia em um

Figura 9 – Associação de grupos dos ACA.



Fonte: Adaptado de (MOSTAFAEI; OBAIDAT, 2018).

sinal elétrico para posterior processamento. As grandezas analisadas podem passar por grandezas térmicas, mecânicas, químicas, elétricas, magnéticas, entre outras (SILVA et al., 2013).

Contudo, em locais de difícil acesso acaba não sendo tão simples realizar instalações convencionais dos sensores, como as baseadas em sistemas a dois, três ou quatro fios. Com isso, passou-se a adotar cada vez mais a tecnologia de sensoriamento sem fios. A comunicação sem fio teve início no final do século XIX, por meio de Landell de Moura e Marconi, na telegrafia sem fio (TSE; VISWANATH, 2005).

Ao longo dos anos, novas tecnologias foram incorporadas à área, de acordo com a evolução nas telecomunicações em geral. Passando então a ser necessário organizar e classificar a frequência de operação e utilização do espectro eletromagnético, em faixas classificadas como Industrial, Científica e Médica (do inglês, *Industrial, Scientific and Medical*, ou ISM). As faixas de frequência mais utilizadas estão descritas na Tabela 2 (SILVA et al., 2013).

Tabela 2 – Faixas principais de frequência na ISM.

| Frequência Central | Faixa de Operação |
|--------------------|-------------------------|
| 433,92 MHz | 433,05 MHz a 434,79 MHz |
| 868 MHz | 856 MHz a 868 MHz |
| 915 MHz | 902 MHz a 928 MHz |
| 2,45 GHz | 2,4 GHz a 2,5 GHz |
| 5,8 GHz | 5,725 GHz a 5,875 GHz |

Fonte: (SILVA et al., 2013).

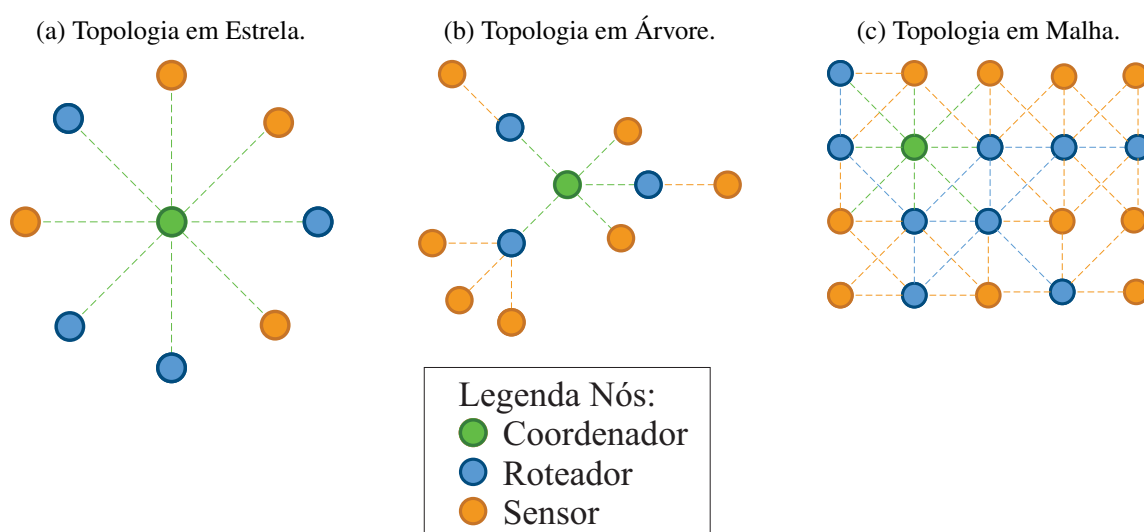
2.6.1 Topologias de Redes Sem Fio

De forma resumida, os principais componentes de uma RSSF são o nó coordenador e os nós sensores. Há variadas formas de organizar os mesmos, de acordo com a necessidade de

utilização de energia, banda, velocidade de comunicação, entre outros requisitos. Além disso, a depender da topologia escolhida ou mesmo das necessidades do projeto, pode ser necessário um nó intermediário, denominado nó roteador, que pode assumir o papel de nó sensor e transmitir dados, conectando o nó coordenador e os demais nós sensores, por exemplo.

As principais topologias são apresentadas na Figura 10. A topologia da Figura 10a corresponde a Topologia em estrela, na qual todos os nós sensores são conectados diretamente ao nó coordenador. Os nós roteadores passam a atuar apenas como nós sensores, uma vez que não há transmissão de dados através deles, uma vez que os mesmos só se comunicam com o nó central. Na Figura 10b é apresentada a topologia em Árvore. Nesta topologia, os nós roteadores intermediam as conexões entre o nó coordenador e os nós sensores, podendo até mesmo os nós roteadores assumir a função de nós coordenadores. E na Figura 10c é exibida a topologia em malha, a qual corresponde a uma distribuição de rede na qual todos os nós podem comunicar entre si, independentemente se forem coordenadores, roteadores ou sensores. Há diversas outras topologias disponíveis, além das topologias híbridas (SILVA et al., 2013).

Figura 10 – Principais topologias nas RSSF.



Fonte: Autoria própria, baseado em (SILVA et al., 2013).

Grande parte dos projetos que envolvem RSSF possuem como metas o baixo consumo energético e baixo consumo de banda, uma vez que a fonte de energia que envolve tais dispositivos é limitada (na maioria dos casos é utilizada uma bateria com carga finita). Assim, um objetivo primordial em projetos de RSSF visam equilibrar o tempo de vida da rede e a qualidade de serviço, relacionando entrega de dados, velocidade de comunicação, entre outros fatores. Para tanto, diversas pesquisas focam no correto dimensionamento dos componentes do sistema ou aprimorar técnicas de comunicação, protocolos utilizados ou aperfeiçoar algoritmos utilizados (SILVA et al., 2013).

2.7 Eficiência Energética em RSSF

As RSSF possuem diversas vantagens de aplicabilidade e organização. Contudo, aplicações que utilizam baterias como fonte de alimentação acabam ficando extremamente dependentes de fatores como tempo de vida. O tempo de vida por sua vez pode ser definido pelo máximo tempo possível em que um sensor pode cumprir adequadamente sua função de coletar, transferir informações, entre outras funções. O fim do tempo de vida de um nó sensor pode ocorrer devido a falta de fornecimento de alimentação (esgotamento da bateria, por exemplo) ou falha de comunicação, seja por definições de algoritmo, falta de alcance ou outros fatores (MANJU; CHAND; KUMAR, 2018a).

Um tempo de vida baixo corresponde a uma elevada taxa de manutenção. Em alguns casos acaba sendo mais viável o descarte do sensor ao invés da manutenção. Há diversas pesquisas que buscam aumentar o tempo de vida das RSSF. Algumas partem do princípio de coleta de energia do ambiente, como utilizar painéis solares fotovoltaicos, por exemplo. Outras pesquisas visam a otimização de algoritmos, protocolos, entre outras técnicas, para utilizar a energia de forma mais eficiente (SOUZA, 2014).

Como principais tarefas dos nós sensores, tem-se a detecção de eventos no ambiente, processamento e transmissão dos dados. Ou de forma resumida: sensoriamento, processamento e comunicação (AKYILDIZ et al., 2002). Em aplicações que exijam um sensoriamento mais recorrente, há um maior consumo de energia que em um sensoriamento esporádico ou a realização de uma atividade de processamento mais complexo também corresponderá a um maior consumo. Mas de um modo geral, a atividade que mais consome energia é o recebimento e transmissão de dados (SOUZA, 2014). Logo, a utilização de técnicas para aprimorar o uso de estados de baixo consumo de energia dos sensores é fundamental, para utilizar energia apenas quando necessário.

Dessa forma, em redes como as RSSF, objetiva-se a utilização dos nós sensores da forma mais eficiente possível. Com isso, também há análises do consumo geral da rede, pois o consumo geral pode estar baixo, mas ao se analisar os nós de forma individual podem haver desgastes e sobrecarga em alguns dos nós. Ainda pode ocorrer o contrário, um consumo individual baixo, mas o consumo geral da rede elevado, que pode ocorrer devido a um uso de mais sensores do que o necessário.

3 OTIMIZAÇÃO DO TEMPO DE VIDA DE UMA RSSF

Neste capítulo é proposto o procedimento para construção do modelo para otimização do consumo energético de uma RSSF, com base em autômatos com característica dos Autômatos ACA. Para tanto, considera-se um procedimento sequencial de forma a permitir a revisão dos conceitos apresentados e assim alinhar da melhor forma possível os conceitos teóricos com o modelo proposto. A primeira seção corresponde à formulação da problemática, com levantamento inicial das informações do projeto. Na segunda seção são apresentadas as definições dos eventos e estados a serem considerados no modelo. Na sequência, é apresentado o modelo de nó sensor elaborado com base em autômatos na terceira seção. E na quarta e última seção, há a descrição da modelagem da RSSF completa, com base em autômatos do tipo ACA e a forma de implementação do algoritmo.

3.1 Formulação do Problema

O algoritmo proposto visa a maximização do tempo de vida de uma RSSF. Para tanto, algumas relações podem ser consideradas. O tempo máximo de vida de uma rede é a quantidade de intervalos de tempo no qual a RSSF consegue manter sua funcionalidade. A cada passo, uma parcela da carga da bateria ou do limiar de energia estabelecido é consumido. Assim, na Equação 6 é apresentada a relação de tempo de vida máximo de uma rede de sensores.

$$T_{max} = \sum_{i=1}^n T_i \quad (6)$$

No qual T_i corresponde a cada intervalo de tempo. Dessa forma, é desejado que o tempo de vida da rede seja o maior possível. Pois dessa forma, tem-se uma menor manutenção e um menor custo com baterias ou um menor custo com energia elétrica, no caso de conexão do sistema à rede elétrica.

Ao tratar de uma rede de sensores, temos uma relação que envolve todos os membros que compõem a rede. Assim, se todos os sensores forem utilizados ao mesmo tempo, o consumo energético será elevado. Desse modo, é interessante a formação de rotas com o menor número possível de sensores, para que o consumo geral seja o menor possível. Portanto, é possível estabelecer uma relação com o tempo de vida da rede e a quantidade de nós sensores necessários para atender à transmissão. Com isso, a função de maximização de uma rota é apresentada na Equação 7 (NAKAMURA et al., 2004).

$$f_{max} = \frac{T_{max}}{k \times con} \quad (7)$$

Em que: k é a quantidade de nós sensores que pertencem à rota e con é o consumo de cada nó sensor. Dessa maneira, para que a função f_{max} apresente o maior valor possível, deseja-se que o tempo de vida da rede T_{max} seja maximizado, que a rede também utilize a menor quantidade de nós sensores (k) disponíveis e que o consumo dos nós sensores seja baixo, para também maximizar a função f_{max} .

Logo, a função de maximização visa que o tempo de vida seja o máximo possível e que cada rota tenha o mínimo possível de sensores, em uma mesma área de cobertura estabelecida. Assim, no modelo elaborado é necessário que se tenha a possibilidade de formar arranjos inteligentes, que possam ser recombinações para otimizar a função de maximização apresentada.

Além disso, visando a economia de energia, no modelo deve ser considerada a utilização do modo de baixo consumo de energia dos nós sensores, também denominado modo *sleep* (do inglês, dormir), ou seja, uma configuração na qual o dispositivo se encontra com o mínimo possível de componentes ativos. Assim, quando os sensores não estão sendo utilizados, se encontram neste estado. Tal forma é uma extensão do comportamento característicos dos sensores, de possuir dois estados, ou seja, ligado ou desligado.

Diante destas colocações, o modelo proposto possui como base os sistemas do tipo SED, tendo em vista a característica de passagem de tempo de forma discreta do sistema, ao longo dos intervalos que constituem o tempo de vida da RSSF. Além disso, a formação de rotas (conjunto de nós sensores utilizados para a transmissão da informação) e a disposição à regras e condições semelhantes remetem aos autômatos do tipo ACA, além da possibilidade de recombinação do arranjo e aprendizado contínuo.

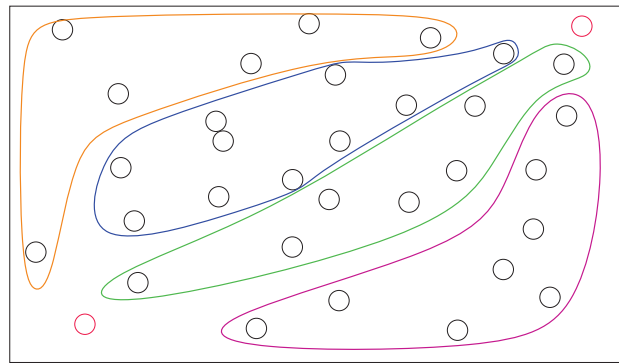
3.2 Definições de Eventos e Estados do Nó Sensor

O algoritmo a ser elaborado visa o desenvolvimento de um modelo no qual seja possível analisar " n " nós sensores distribuídos ao longo de uma área. Por meio de um algoritmo para cada nó, o grupo deve se associar de forma a retardar o máximo tempo possível para atingir um valor de consumo pré-estabelecido.

Além disso, ao elaborar diferentes arranjos, os sensores da rede são utilizados de forma mais homogênea. Por isso, se torna necessário um algoritmo capaz de gerenciar a formação de rotas para os sensores. Na Figura 11 é apresentada uma distribuição de nó sensores no ambiente, com destaque para possíveis formações de rotas para cobertura, de acordo com a proximidade entre nós e visando a transmissão da informação entre os dois nós sensores em destaque.

Diante disso, um sistema do tipo SED é o mais indicado para elaborar o modelo, devido à característica discreta do sistema. A forma como o comportamento de cada um dos sensores pode ser avaliada, em dois estados, pode ser associada por meio de autômatos. Contudo, devido à distribuição de vários sensores semelhantes, se torna necessário utilizar os conceitos de autômatos

Figura 11 – Possibilidades de formação de rotas de cobertura.



Fonte: Autoria Própria.

AC. E mais, a forma de evoluir e interação com o ambiente remete aos AA. Dessa forma, a rede pode ser modelada com base em autômatos ACA para atender às premissas do sistema.

Contudo, para elaboração do ACA, deve-se inicialmente definir os parâmetros fundamentais dos Autômatos: os Estados e os Eventos. Contudo, antes da definição dos estados e eventos utilizados no modelo, serão definidos as premissas e passos empregados na modelagem de um nó sensor, com base em autômatos.

A lógica principal do autômato elaborado segue algumas etapas que podem ser extrapoladas em oito passos descritos a seguir:

1. Fase de Inicialização: No momento inicial, todos os nós sensores estão em estado de baixo consumo. Tal fase é necessária para garantir que todos os sensores iniciem igualmente;
2. Seleção Aleatória: Após a inicialização, há a verificação do vetor de probabilidade de escolhas. Assim, conforme definido anteriormente, seguindo a definição dos ACA, há um vetor de probabilidade de escolhas iniciado aleatoriamente, de acordo com o horário de execução, por exemplo;
3. Verificação do consumo: Em um primeiro momento, todos os nós estão com um consumo zerado. Mas ao longo do tempo, nesta etapa ocorre a verificação do consumo dos sensores ao longo das iterações e consequentemente, transmissões. Além disso, nesta etapa ocorre o levantamento do consumo de cada nós e do grupo como um todo;
4. Nós em Estado Ativo: De acordo com o vetor probabilidade de escolhas, os nós são selecionados para passar ou permanecer em modo ativo;
5. Verificações na Distribuição Geral: Nesta etapa são verificados se houve a seleção de nós redundantes, em casos nos quais dois ou mais sensores estão próximos, de forma que apenas um já consiga transmitir a informação. Ainda nesta etapa são verificados se há nós que são muito solicitados, denominados nós críticos, para evitar a sobrecarga e consumo

exagerado destes nós. Em algumas distribuições, os nós críticos podem ser necessários para que seja possível transmitir a informação ao destino desejado;

6. Formação de Rota de Cobertura: Após as devidas verificações, é elaborado a rota de transmissão atual, com base no consumo individual, no consumo do grupo e visando a melhor distribuição possível dos nós. Para tanto, é verificada a densidade de nós ao longo da área de distribuição, de forma que sejam utilizados apenas os nós necessários;
7. Resposta à Ação: Na próxima etapa, é verificado se o rota formada é mais eficiente que anteriormente ou não. Em caso positivo, é aplicada uma recompensa aos nós envolvidos. No caso da rota formada ser menos eficiente, é aplicada uma penalidade aos nós selecionados. A bonificação ou pena reflete no vetor de probabilidade de escolha;
8. Transmissão e Reinício do Ciclo: Como última etapa, ocorre a atualização do vetor de probabilidade de escolhas, visando aproveitar os nós de forma mais homogênea possível. Ou seja, dos n nós disponíveis, tenta-se utilizar o máximo possível deles, de um modo que ao final todos atinjam o limiar de consumo estimado no maior tempo possível. Também é nesta etapa que deve ocorrer a transmissão dos dados pelos sensores. Ao final, ocorre o retorno à terceira etapa, para que o consumo seja atualizado e ocorra mais uma rodada de transmissão, no caso do consumo geral não ter sido extrapolado, ou seja, verificando a exaustão da rede.

Dos passos enunciados, os três iniciais correspondem à etapa de verificação. Os passos 4, 5 e 6 correspondem à etapa de aprendizagem, na qual são feitos levantamentos e análises do sistema. A etapa 7 corresponde ao monitoramento, verificando condições para possíveis bonificações ou beneficiamentos. E a etapa 8 corresponde à atualização. Além disso, para corresponder ao conjunto de etapas propostas, foram analisados e estabelecidos estados e eventos necessários e que correspondam à sequência definida.

A fim de simplificar a organização e operação do algoritmo proposto, foram definidos elementos para acompanhamento dos modos de operação ao longo dos eventos do autômato. Assim, na Tabela 3 são listados os modos de operação definidos para o algoritmo elaborado. Os elementos que compõem o autômato em desenvolvimento correspondem a cada um dos nós que fazem parte dos sensores do sistema. Assim, cada sensor possui um conjunto de elementos e seu algoritmo próprio, mas todos estão dispostos às mesmas regras e mesma lógica de aplicação.

Por conseguinte, a partir dos modos de operação listados na Tabela 3, foram definidos estados para o autômato. Os estados definidos são todos de característica discreta e representam a situação atual do sistema. Com isso, a sequência de estados representa o funcionamento ideal do algoritmo, visando atingir um estado marcado, ou seja, atingir o objetivo de transmitir a informação desejada.

Tabela 3 – Modos de operação definidos para o ACA elaborado.

| Elementos de cada nó | Modos de Operação | |
|--------------------------------|-------------------|------------------|
| | 0 | 1 |
| Nó Sensor (NS) | <i>sleep</i> | Ativo |
| Probabilidade de Escolha (PE) | Menor que 0,5 | Maior que 0,5 |
| Energia Remanescente (ER) | Maior que limiar | Menor que limiar |
| Nó Crítico (NC) | Não | Sim |
| Nó Redundante (NR) | Não | Sim |
| Nó do Grupo de Cobertura (NGC) | Não | Sim |
| Resposta à Ação (RA) | Penalidade | Recompensa |
| Nó Transmitindo (NT) | Não | Sim |

Fonte: Autoria Própria.

Assim, os estados correspondem aos atributos e relações das entidades que compõem o sistema naquele instante. Enquanto que os eventos são ocorrências de atividades no sistema que podem provocar ou não a transição de estados, visto que o acontecimento de um evento pode levar a ficar no mesmo estado sem ter transição, no caso de ocorrer um auto-laço (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2009).

Na Tabela 4 são descritos os estados do algoritmo, foram utilizadas as siglas para os elementos da Tabela 3. Em cada estado alguma variável do sistema é atualizada, recebendo um valor em caso positivo e outro em caso negativo. Por exemplo, caso um nó sensor seja considerado crítico, NC recebe o valor 1.

Tabela 4 – Conjunto de estados para o modelo elaborado.

| Estado | Descrição |
|--------|--|
| s0 | Nós sensores inativos; Elementos aguardando definição: (PE, ER, NS, NC, NR, NGC, RA, NT) |
| s1 | Recebe valor para Probabilidade de Escolha; Elementos aguardando definição: (ER, NS, NC, NR, NGC, RA, NT) |
| s2 | Recebe valor para Energia Remanescente; Elementos aguardando definição: (NS, NC, NR, NGC, RA, NT) |
| s3 | Valor definido para operação do Nó Sensor em Ativo ou <i>sleep</i> , definido caso a PE e a ER sejam 1; Elementos aguardando definição: (NC, NR, NGC, RA, NT) |
| s4 | Recebe definição se o nó faz parte do grupo de cobertura inicial; Elementos aguardando definição: (NC, NR, RA, NT) |
| s5 | Recebe valor para Nó Crítico (indispensável à comunicação); Elementos aguardando definição: (NR, RA, NT) |
| s6 | Recebe valor Nó Redundante, se verificado nós próximos, o nó atual passa a ser dispensável; Elementos aguardando definição: (RA, NT) |
| s7 | Recebe valor positivo de Resposta à Ação. Caso as condições anteriores (NS, PE, ER, NR, NGC, NC, NR) sejam positivas, o nó passa a transmitir, atingindo o estado marcado e reinicia o algoritmo |
| s8 | Recebe valor negativo de Resposta à Ação. Neste caso uma ou mais condições anteriores (NS, PE, ER, NR, NGC, NC, NR) são negativas, o nó não transmite e reinicia o algoritmo |

Fonte: Autoria Própria.

Correspondentemente aos estados descritos na Tabela 4, foram elaboradas transições, para que seja possível passar a cada um dos estados discriminados. Dessa forma, o conjunto de eventos para o modelo almejado é descrito na Tabela 5.

Tabela 5 – Conjunto de eventos para o modelo elaborado.

| Evento | Descrição |
|---------------|--|
| E1 | Aguardando Verificação do Ambiente/Cobertura |
| E2 | Aguardando Verificação da Energia Remanescente |
| E3 | Aguardando Seleção dos Nós em Modo Ativo |
| E4 | Aguardando Elaboração do Grupo de Cobertura |
| E5 | Aguardando Verificação dos Nós Críticos |
| E6 | Aguardando Verificação dos Nós Redundantes |
| E7 | Aguardando Definição de Recompensa |
| E8 | Aguardando Definição de Penalidade |
| E9 | Aguardando Transmissão/Verificação de Exaustão |
| E10 | Aguardando Vetor Probabilidade de Escolhas |
| E11 | Aguardando Verificação de Consumo |

Fonte: Autoria Própria.

Com isso, é possível relacionar a sêxtupla correspondente ao modelo, de acordo com a Equação 1. Uma vez definidos os elementos da expressão, é possível elaborar um diagrama com o conjunto de símbolos que ao serem relacionados correspondam ao comportamento do autômato desejado. A seguir, há a descrição da sêxtupla do autômato em desenvolvimento, de acordo com os estados e eventos descritos. Além disso, nas Tabelas 6 e 7 são apresentadas as funções transições de estado e a função de eventos ativos, respectivamente, definindo assim as transições ao longo dos estados.

- $X = \{s0, s1, s2, s3, s4, s5, s6, s7, s8\}$;
- $\Sigma = \{E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8, E9, E10, E11\}$;
- $X_m = \{s7\}$;
- $x_o = s0$;

3.3 Proposta do Modelo do Nó Sensor Baseado em Autômatos

O modelo a ser proposto neste trabalho é baseado em SED, no qual cada sensor é disposto a um mesmo algoritmo fundamental, baseado em autômatos. Assim, nesta seção é definido o funcionamento e o comportamento geral esperado do modelo elaborado para cada um dos elementos que compõem a RSSF. Dessa forma, o modelo correspondente a cada nó sensor da rede possibilita otimizar o consumo energético individualmente, mas também para todo o grupo

Tabela 6 – Funções de transições de estados.

| Transição | Função |
|------------------------------------|-------------------|
| Estado 0 para Estado 1 | $f(s0, E1) = s1$ |
| Estado 1 para Estado 2 | $f(s1, E2) = s2$ |
| Estado 2 para Estado 3 | $f(s2, E3) = s3$ |
| Estado 3 para Estado 4 | $f(s3, E4) = s4$ |
| Estado 4 para Estado 5 | $f(s4, E5) = s5$ |
| Estado 5 para Estado 6 | $f(s5, E6) = s6$ |
| Estado 6 para Estado 7 | $f(s6, E7) = s7$ |
| Estado 6 para Estado 8 | $f(s6, E8) = s8$ |
| Estado 7 para Estado 1 | $f(s7, E9) = s1$ |
| Estado 8 para Estado 1 | $f(s8, E9) = s1$ |
| Estado 0 para Estado 0 (auto-laço) | $f(s0, E10) = s0$ |
| Estado 1 para Estado 1 (auto-laço) | $f(s1, E11) = s1$ |
| Estado 6 para Estado 1 | $f(s6, E11) = s1$ |

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 7 – Funções de eventos ativos.

| Evento Atual | Função de Evento Ativo |
|--------------|---------------------------|
| Estado 0 | $f\Gamma(s0) = \{E1\}$ |
| Estado 1 | $f\Gamma(s1) = \{E2\}$ |
| Estado 2 | $f\Gamma(s2) = \{E3\}$ |
| Estado 3 | $f\Gamma(s3) = \{E4\}$ |
| Estado 4 | $f\Gamma(s4) = \{E5\}$ |
| Estado 5 | $f\Gamma(s5) = \{E6\}$ |
| Estado 6 | $f\Gamma(s6) = \{E7\}$ |
| Estado 7 | $f\Gamma(s7) = \emptyset$ |
| Estado 8 | $f\Gamma(s8) = \{E9\}$ |

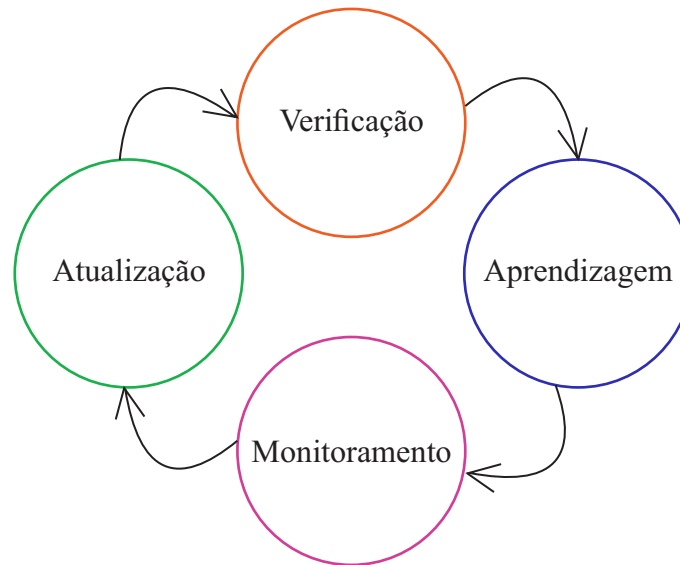
Fonte: Autoria Própria.

dos nós sensores da rede, por meio da elaboração de rotas de transmissão e consequente aumento do tempo de vida da rede.

Para tanto, a lógica aplicada é dividida em quatro etapas principais: Verificação do Sistema; Fase de Aprendizagem; Fase de Monitoramento; Fase de Atualização, conforme ilustrado na Figura 12. As quatro etapas ilustradas compõem os nove estados descritos anteriormente na Tabela 6.

Assim, após a inicialização, é realizada uma análise da disposição dos sensores no ambiente. Na sequência, tem-se uma etapa de aprendizagem, na qual é realizada uma análise das possibilidades de formação de rotas, além de aplicadas as devidas regras e condições. Depois, há um monitoramento para verificar se o pressuposto continua sendo atendido e também ocorre a aplicação de possíveis recompensas ou penalidades. Por fim, há a atualização da rede conforme as penalidades e recompensas aplicadas, havendo substituições se necessário.

Figura 12 – Fases do algoritmo proposto.



Fonte: Autoria própria.

3.3.1 Elaboração do Modelo de Nó Sensor

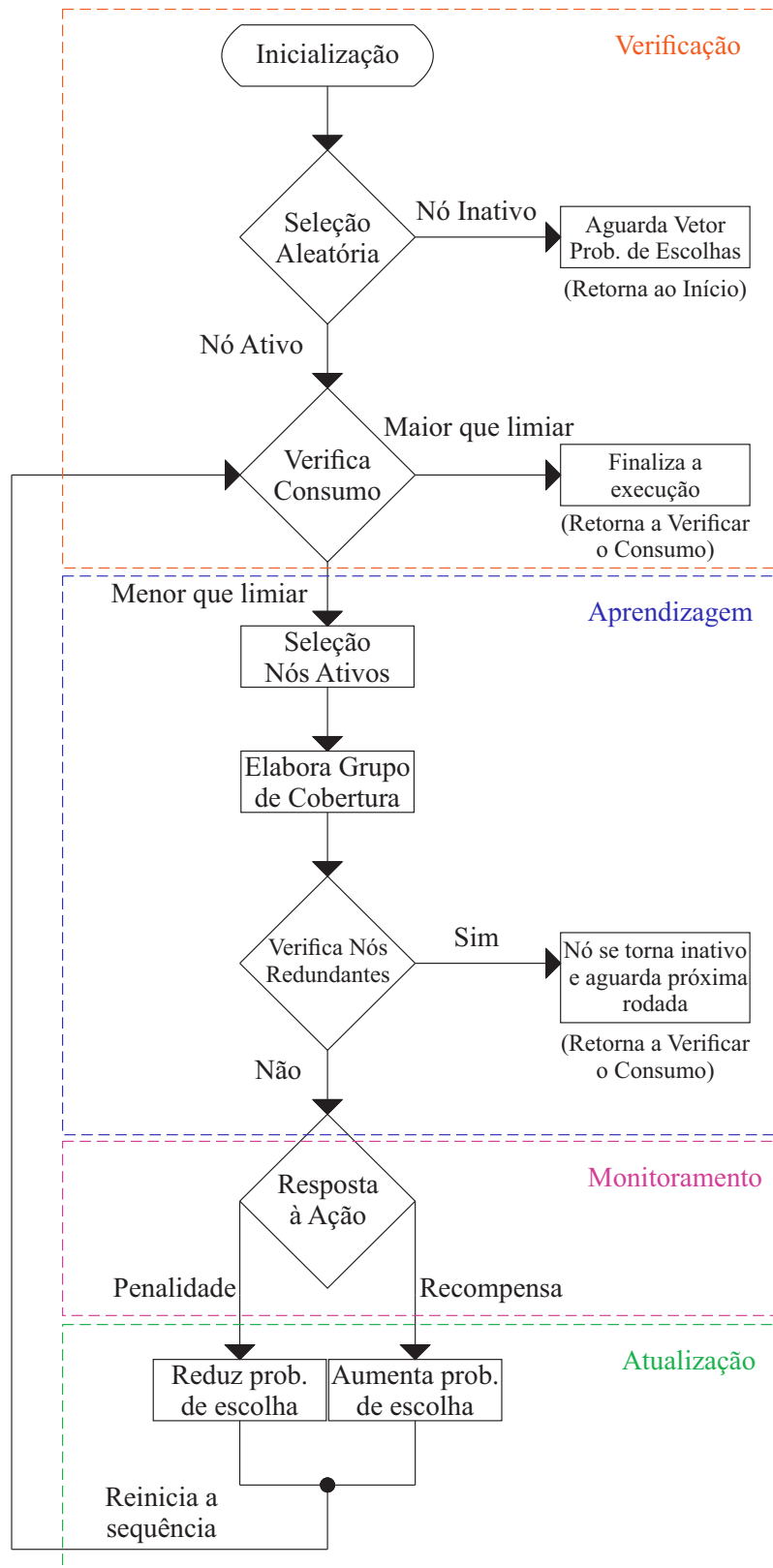
Na Figura 13 é observado o fluxograma completo do modelo proposto, contendo a sequência de eventos descritos na seção anterior, com destaque para as quatro etapas fundamentais descritas anteriormente. Cada nó sensor pertencente à rede está disposto à mesma sequência de acontecimentos, conforme definição dos AC.

Associando os estados e os eventos apresentados nas Tabelas 3 e 5, respectivamente, com o fluxograma da Figura 13 é possível elaborar um esboço do autômato correspondente ao modelo desejado para caracterização da RSSF, com base na simbologia apresentada na Figura 6. Desse modo, na Figura 14 é apresentada uma ilustração correspondente ao autômato geral do modelo.

Conforme ilustrado na Figura 14, o estado alvo do autômato está representado pelo estado marcado s_7 . Para que seja possível um nó sensor da rede alcançar tal estado marcado, algumas etapas devem ser atendidas, como descrito a seguir:

- Inicialmente todos os nós estão em estado inativo, no estado s_0 . Caso não seja selecionado, permanece no estado s_0 para aguardar o vetor probabilidade de escolhas;
- Ao passar para o estado s_1 , o nó sensor em questão deve estar entre os elementos selecionados para estado ativo no vetor de probabilidade de escolhas, vale ressaltar que o vetor realiza a seleção inicial de forma aleatória, conforme definição dos AA. Caso o nó não tenha sido escolhido, ao longo das recombinações e evolução do ACA que o nó pode passar ao estado ativo;
- Em uma aplicação prática, uma transmissão inicial é necessária para que os nós tenham ciência de sua condição como ativo e demais condições aqui descritas. A transmissão

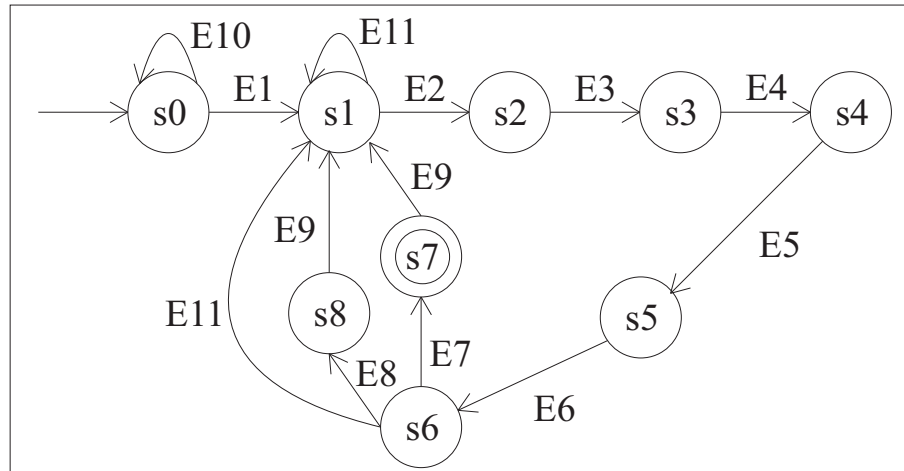
Figura 13 – Fluxograma geral do algoritmo.



Fonte: Autoria Própria.

para atualização da situação dos nós sensores deve ocorrer ciclicamente, no início das

Figura 14 – Autômato representativo do modelo.



Fonte: Autoria Própria.

verificações;

- No estado s2 o nó sensor ainda não deve ter atingido o limiar de consumo estabelecido, no caso de não ser mais a primeira rodada do autômato;
- Os nós ativos são selecionados no estado s3. Caso o nó sensor esteja selecionado passa ao estado 1, como nó ativo;
- No estado s4, é elaborado o grupo de cobertura inicial. Assim, em caso de nó ativo, o nó sensor passa a fazer parte do grupo de cobertura preliminar;
- Na sequência, no estado s5 são verificados se há nós redundantes. O estado desejado é que o nó não esteja em caso de redundância com outro nó próximo. Também é verificado se o nó em questão é crítico para que seja possível realizar a transmissão;
- No estado s6 é realizada a ponderação para atribuir a recompensa ou não ao nó sensor. Dessa forma, deseja-se que o nó tenha sido selecionado. Caso o nó seja redundante, há o retorno para verificação de consumo;
- Por fim, deseja-se que o nó se encontre no estado s7, transmitindo e reiniciando o ciclo.

É possível resumir o conjunto de estados e condições desejadas para que um nó sensor alcance o estado marcado s7 em uma tabela com os índices correspondentes a cada transição. Assim, na Tabela 8 são apresentados os estados ao longo das transições e cada modificação que os elementos característicos do nó sensor vão passando para que seja possível atingir o estado marcado e o nó sensor transmitir.

Em um exemplo, a sequência ideal é que no Estado s0 o nó tenha probabilidade de escolha positiva no Evento E1, tendo energia remanescente suficiente no E2, ficando ativo no

E3, sendo selecionado como nó do grupo de cobertura no E4, podendo ser um nó crítico no E5, não ser um nó redundante no E6 e assim tendo uma resposta à ação positiva na E7, chegando ao estado marcado s7. Caso alguma condição como energia remanescente insuficiente ou o nó ser redundante ocorra, no Estado s6 ocorre o Evento E8, chegando ao Estado s8 e não transmitindo.

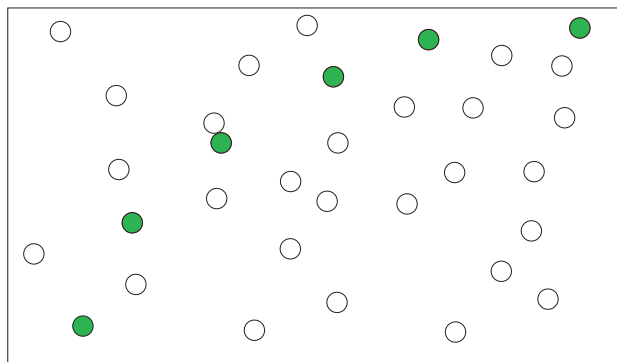
Tabela 8 – Sequência de eventos para atingir o estado marcado.

| Estados | Elementos do Sistema | | | | | | | | Eventos |
|---------|----------------------|----|----|----|----|-----|----|----|---------|
| | NS | PE | ER | NC | NR | NGC | RA | NT | |
| s0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | E1 |
| s1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | E2 |
| s2 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | E3 |
| s3 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | E4 |
| s4 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | E5 |
| s5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | E6 |
| s6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | E7/E8 |
| s7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | E9 |
| s8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | E9 |

Fonte: Autoria Própria.

É importante ressaltar que o comportamento descrito é para cada um dos nós sensores que compõem a RSSF em análise. Com exceção do estado aleatório inicial, o ideal é que haja interação entre os nós sensores para a formação de rotas de transmissão ao longo das transmissões, de forma que os sensores sejam utilizados da forma mais homogênea possível. Um resultado esperado é apresentado na Figura 15, na qual contém uma ilustração que corresponde a uma seleção de n nós sensores para compor uma possível rota de transmissão em uma determinada área. O arranjo elaborado pode ser reconstruído para que o tempo de vida da rede aumente. Os sensores preenchidos e em verde correspondem aos nós que foram selecionados para compor o grupo de cobertura e ficam em modo ativo. Os demais nós sensores, apenas com o contorno preto são nós que não foram selecionados e permanecem em modo inativo.

Figura 15 – Formação de rota de transmissão.



Fonte: Autoria Própria.

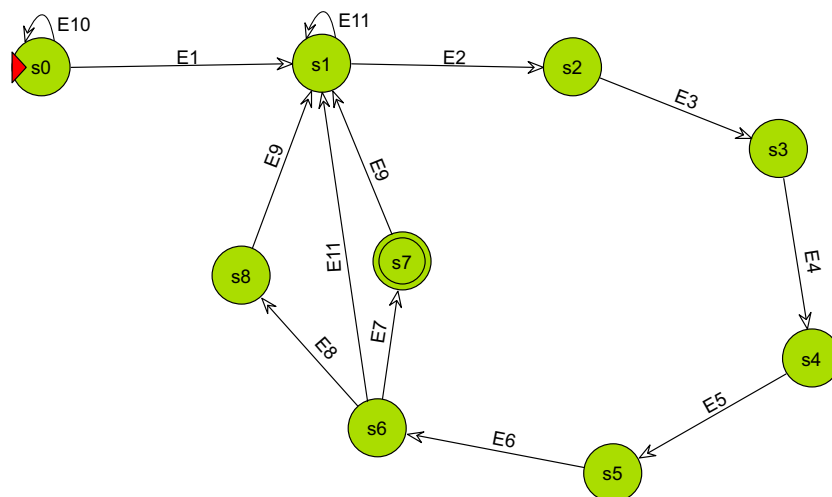
3.3.2 Validação do Modelo de Nó Sensor

Para validação do modelo de nó sensor elaborado, foi utilizado o *software* "Simulador de Autômatos", que é gratuito e foi desenvolvido como trabalho de conclusão de curso na Universidade de Uberaba. O *software* é uma ferramenta para criação, simulação e conversão de modelos formais, apresentando a distribuição e o reconhecimento de palavras para autômatos AFD e autômatos do tipo AFND (JUNIOR; ORBOLATO; NEPOMUCENO, 2009).

Então, o simulador foi utilizado para uma visualização preliminar e ilustração da sequência de eventos desejada. A distribuição do autômato apresentado na Figura 14 foi elaborada no Simulador de Autômatos, como apresentado na Figura 16. Ao introduzir a sequência que corresponda ao estado s_7 , o programa reconhece a palavra como pertencente ao autômato, retornando a mensagem apresentada na Figura 17. Assim, o objetivo do autômato em desenvolvimento é também atingir o estado ilustrado pelo termo s_7 , que representa a transmissão do nó sensor.

Por conseguinte, o *software* auxilia na construção e visualização da lógica utilizada no autômato, possuindo como principal vantagem a interface simplificada e facilidade de uso. Além disso, também é possível converter os autômatos AFD em AFND e vice-versa. Para elaboração de modelos basta inserir os estados, definindo o estado inicial e o estado marcado e as transições entre eles. Ao inserir uma sequência que finalize em um estado marcado, a sequência é reconhecida como sucesso para o autômato elaborado.

Figura 16 – Elaboração do autômato em simulador.

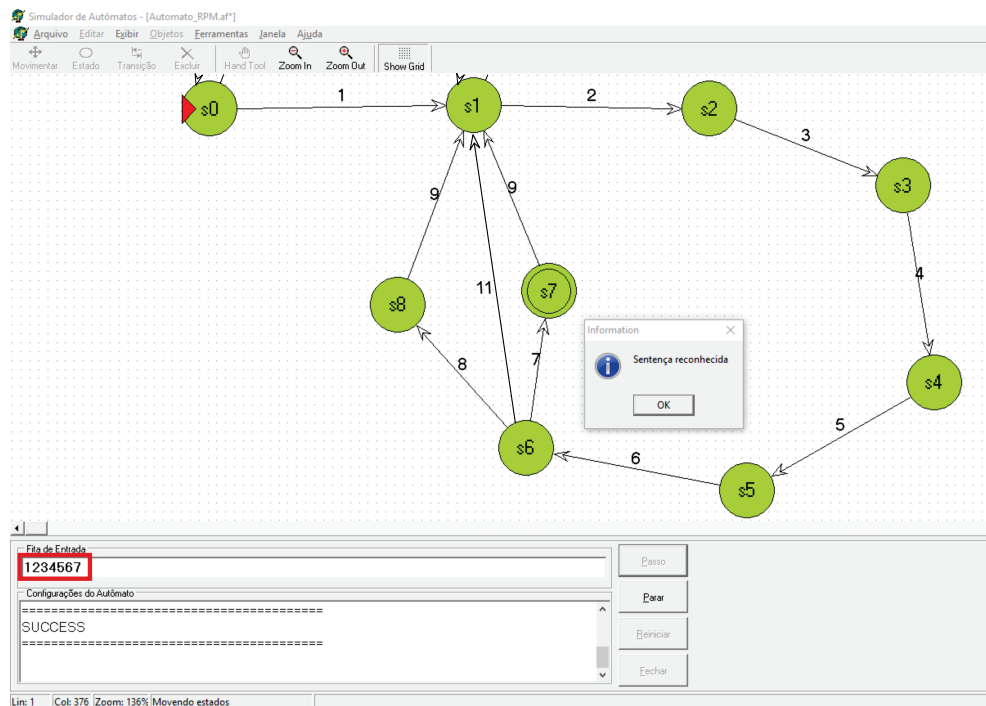


Fonte: Autoria Própria.

A partir do diagrama apresentado, pode-se observar algumas propriedades da modelagem no autômato elaborado (MURATA, 1989):

- Sequencial: Dado uma sequência de eventos, o início de um evento seguinte se dá ao término do evento anterior;

Figura 17 – Resposta para uma entrada de palavra válida no autômato.



Fonte: Autoria Própria.

- Conflito efetivo: Dois eventos distintos partem de um mesmo evento, mas a habilitação de um evento implica que o outro não será atendido;
- Reunião: Um evento pode iniciar a partir da transição de dois estados distintos, representando a reunião de múltiplas condições.

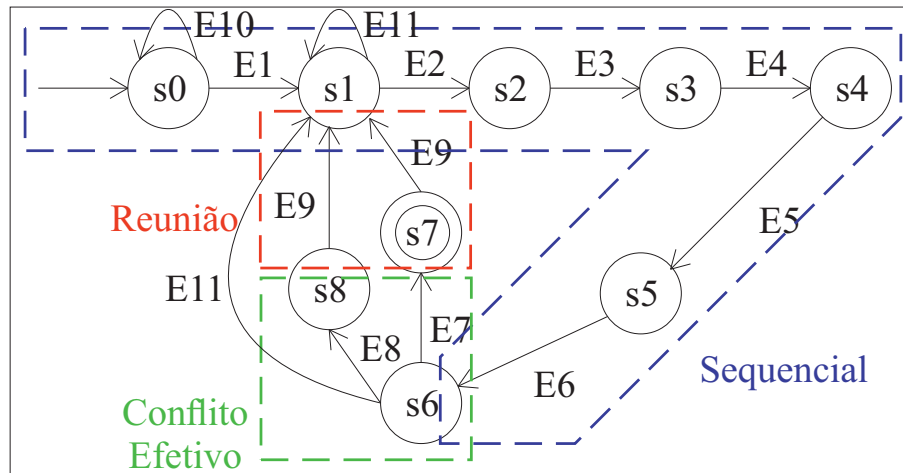
É possível destacar tais características na Figura 14, nas regiões as quais são observadas as propriedades da modelagem, como ilustrado na Figura 18.

Além disso, também há a possibilidade de aplicar outras propriedades dos sistemas ao autômato, como a alcançabilidade, a controlabilidade e a observabilidade (BAIER; KATOEN, 2008).

Com relação à alcançabilidade, o sistema deve ser capaz de ir a cada um dos estados (de forma específica) do sistema a partir da origem em um dado tempo T , de acordo com uma entrada admissível. A controlabilidade já amplia a definição da alcançabilidade a todo o sistema, na forma que seja possível ir a qualquer estado em um intervalo de tempo (BAIER; KATOEN, 2008). Um sistema completamente alcançável é um sistema controlável.

Ambas as propriedades são observadas no modelo proposto, uma vez que cada um dos estados pode ser alcançado, a depender do vetor de probabilidade inicial. Caso um nó sensor não faça parte do grupo de cobertura, terá como resposta ao evento entrar em modo inativo, e não há uma terceira opção que poderia levar a algum mal funcionamento, uma vez que o estado só

Figura 18 – Destaque para as propriedades da modelagem no autômato elaborado.



Fonte: Autoria Própria.

permite duas opções: pertencer ou não ao grupo de cobertura.

Com relação à observabilidade, uma condição inicial pode ser obtida quando se tem entradas e saídas do sistema conhecidas. Tal propriedade também é observada no modelo, uma vez que no caso do nó sensor se encontrar em modo ativo (saída do modelo) é possível definir se o mesmo iniciou com o vetor probabilidade de escolhas em modo selecionado ou não.

Dessa maneira, o modelo pôde ser validado a partir do reconhecimento de uma linguagem válida e aplicação de propriedades dos sistemas e de modelagem, como descrito anteriormente. Assim, o modelo elaborado é aplicado a cada um dos nós sensores a serem utilizados na RSSF.

3.4 Modelagem da RSSF baseado em ACA

Para implementação e análise do modelo levantando para a RSSF, foi utilizado o ambiente MATLAB® como ferramenta principal. Para tanto, são utilizadas ferramentas para elaboração de lógicas, além de modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos, com uso de diagrama de blocos. E mais, a presença de diversas funções já implementadas, por meio de *toolboxes* simplifica bastante a interação dos blocos elaborados com outros sistemas, como por exemplo na implementação prática com placas de desenvolvimento. Assim, o ambiente apresenta várias ferramentas e utilidades para implementação dos SED.

Assim, foram elaborados códigos para a lógica geral e apresentação dos resultados, na forma de gráficos e informações. Além disso, também foi utilizada a ferramenta Simulink® e mais especificamente o Stateflow®. Com o uso de tais ferramentas, é possível associar blocos com códigos de programação, sendo possível elaborar os grafos orientados para corresponder aos autômatos desenvolvidos.

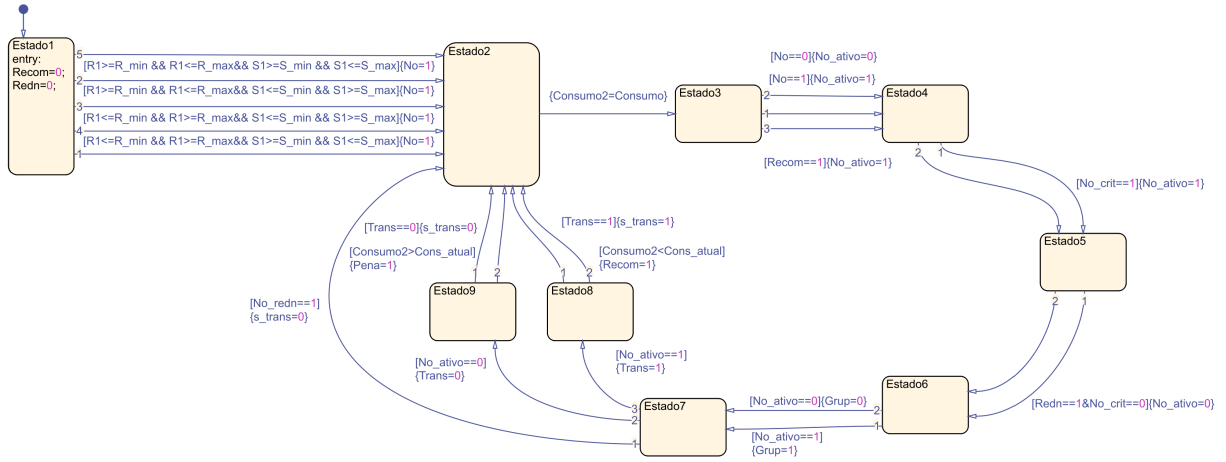
Para corresponder aos AC, o mesmo modelo de nó sensor foi aplicado a todas as células

da RSSF. Além disso, a partir das condições de penalidade ou bonificação, as células evoluem ao longo do tempo de acordo com o consumo apresentado, em etapas discretas e relacionando-se com os demais nós vizinhos. Já para corresponder aos AA, o modelo possui estado inicial aleatório e é aplicado de forma a modificar o vetor de probabilidade de escolhas a partir do resultado obtido. Com isso, o modelo elaborado para a RSSF foi caracterizado a partir dos autômatos ACA para a elaboração de rotas inteligentes.

3.4.1 Modelo da RSSF Em Stateflow®

Dessa forma, com uso das ferramentas do ambiente MATLAB®, foi elaborado um conjunto de blocos para corresponder ao autômato descrito na Figura 16. A lógica em cada bloco foi elaborada de forma que a transição entre cada bloco corresponda à sequência de eventos resumida na Tabela 8. Com isso, o conjunto de estados elaborados é ilustrado na Figura 19. À priori é verificado as informações de posicionamento do sensor referente ao autômato em questão, em relação aos nós coordenadores. À medida que o grafo vai avançando ao longo dos estados, as condições para atender ao estado marcado vão sendo atendidas ou não. O objetivo é que ao completar cada volta a variável correspondente à transmissão seja ativada, o que indica que o autômato atingiu o estado desejado.

Figura 19 – Conjunto de blocos correspondentes aos estados e eventos do ACA elaborado.



Fonte: Autoria Própria.

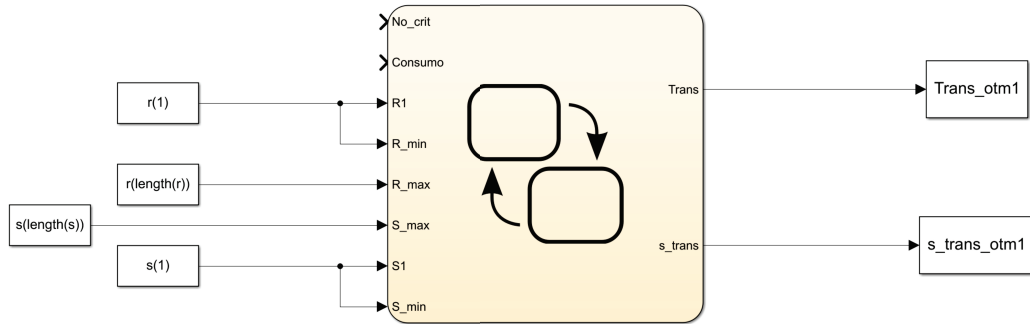
O conjunto de estados foi então replicado a todos os nós da RSSF que compõem o sistema. Para tanto, foi criado um bloco geral que engloba todos os estados. O novo bloco possui como entradas o posicionamento do sensor e o posicionamento dos nós coordenadores, para referência e como saída uma variável indicando se o nó sensor entrou em condição de transmissão ou não, como ilustrado na Figura 20.

Nos quais r e s correspondem às posições em latitude e longitude do sensor, $r(length(r))$ e $s(length(s))$ são utilizados para definir o número máximo de sensores na rede e as saídas

$Trans_otm1$ e s_trans_otm1 correspondem à indicação se o sensor irá transmitir ao final do algoritmo e o vetor de como ocorreram as iterações até o momento da seleção de transmissão do sensor, respectivamente.

Para cada nó sensor da rede, há um bloco geral correspondente. A rede geral dos autômatos utilizados nos nós sensores é apresentada na Figura 21.

Figura 20 – Bloco com conjunto de estados.



Fonte: Autoria Própria.

Cada vez que um sensor entra em estado ativo, o mesmo consome uma quantidade maior de energia para poder realizar a transmissão da informação. Para parâmetros de caracterização, foram utilizados os dados de referência do módulo transceptor sem fios NRF24L01, o qual possui um consumo de 11,3 mA (equivalente a uma potência de 37,29 mW, a uma tensão de 3,3 V) para uma transmissão com potência de 0 dBm (SEMICONDUCTOR, 2007). Desse modo, para cada transmissão, acrescenta-se 37,3 mW ao consumo do nó sensor, até que o montante de consumo do sensor atinja o limiar de 1 W, momento no qual o tempo de vida do sensor finaliza e o mesmo passa a estágio de repouso, sem transmitir.

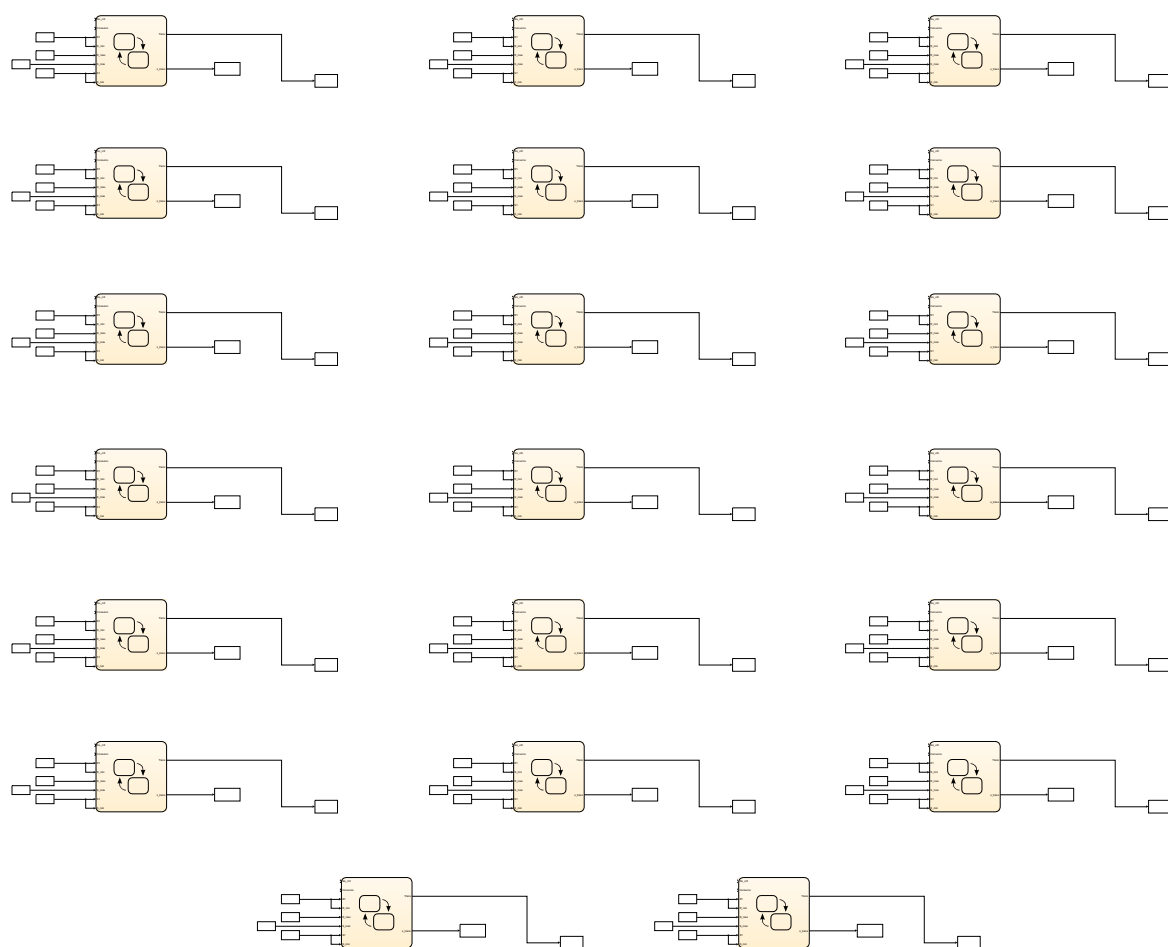
Com isso, o consumo de cada nó sensor (C_s) é caracterizado pela Equação 8, correspondendo ao somatório de cada rodada e o consumo geral C_{geral} da rede é definido pela Equação 9, a qual corresponde à soma do consumo de todos os nós que compõem a rede. Quando todos os nós sensores ou a maioria atingem o limiar de consumo individual de 1 W, tem-se o fim do tempo de vida da rede, que passa a não ter mais capacidade de transmissão da mensagem entre o nó sensor de origem e o nó de chegada.

$$C_s = \sum_{i=1}^n C_i \quad (8)$$

$$C_{geral} = \sum_{i=1}^n C_{si} \quad (9)$$

Com isso, diante das condições e lógicas explanadas, o modelo para a rede RSSF foi elaborado para análise de uma rede de sensores visando a otimização do tempo de vida, com base nos autômatos ACA.

Figura 21 – Conjunto de autômatos utilizados na caracterização da RSSF.



Fonte: Autoria Própria.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são abordados tanto os materiais quanto os métodos utilizados para elaboração do projeto proposto. Para tanto, inicialmente é descrito o *hardware* utilizado, seguido dos procedimentos metodológicos aplicados durante a execução do trabalho, assim como os parâmetros definidos.

4.1 Hardware

Para a aplicação prática é necessário que haja uma integração entre comunicação e processamento. Assim, dentre os principais componentes utilizados é possível destacar o microcontrolador e os transceptores associados na elaboração da rede de sensores sem fio. Com isso, buscou-se uma solução de baixo custo e que ao mesmo tempo apresente amplo suporte, versatilidade e facilidade de interação com os demais elementos da rede de sensores. O principal critério de seleção dos componentes foi o custo e praticidade de uso, assim como especificado em cada um dos itens descritos nesta seção.

4.1.1 Plataforma Arduino

O Arduino é uma plataforma *open-source* para prototipagem eletrônica, visando a flexibilidade e com destaque para facilidade de uso tanto em *hardware* quanto em *software*. Além disso, foi desenvolvida para ser modular, contando com expansões que levam a característica de instalação simples e necessitando apenas de fonte de alimentação para execução das tarefas elaboradas (MARCHESAN, 2012).

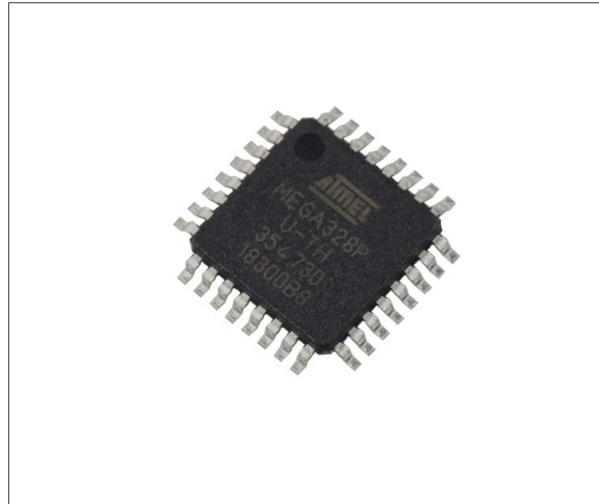
A plataforma é baseada nos microcontroladores da família AVR. As versões mais simplificadas, possuem o ATmega 328 como elemento central. O Atmega 328P possui alimentação entre 2,7 V e 5,5 V, 14 portas de entrada/saída digital, sendo 6 com geração de pulsos PWM (modulação por largura de pulso, do inglês *Pulse-Width Modulation*), 6 portas de entrada analógica, memória flash de 32 kB e velocidade de processamento de 16 MHz (ATMEL, 2015).

Além disso, é possível elaborar circuitos com o mínimo de componentes possíveis. Por isso, foi utilizado a versão em SMD (dispositivo montado em superfície, do inglês *Surface Mount Device*), que apresenta menor custo e dimensões em comparação com o chip similar em encapsulamento padrão utilizado nas placas de desenvolvimento. Na Figura 22 é apresentado o microcontrolador utilizado no projeto, com encapsulamento TQFP-32 (ATMEL, 2015).

O principal propósito do microcontrolador no projeto é fazer a interligação entre os comandos recebidos via comunicação sem fio pelo transceptor NRF24L01 e realizar acionamentos diversos, como ligar ou desligar sistema de iluminação, refrigeração, entre outros.

Em comparação com outros microcontroladores, como a STM32, STMicroelectronics e a KL82, da NXP, o ATmega 328P possui configuração mais simples, mas preço bem abaixo dos demais. Além disso, possui um maior suporte à bibliotecas e uma comunidade mais ampla de usuários, o que facilita o uso do microcontrolador no projeto.

Figura 22 – Microcontrolador ATmega328PU-TH.



Fonte: (ATMEL, 2015)

4.1.2 Módulo Para Comunicação Sem Fio ESP32

Para os nós coordenadores, são utilizadas placas baseadas no microcontrolador ESP32. A placa possui comunicações Bluetooth e Wi-Fi, operando a 2,4 GHz, embutidas. Além disso também possui baixo custo e suporte a aplicações de baixo consumo de energia. Também vale destacar a Unidade Central de Processamento (CPU, do inglês *Central Processing Unit*) da Xtensa, com dois núcleos 32-bit e microprocessador LX6, operando entre 160 ou 240 MHz, com 520 kB de memória SRAM. Para conexões físicas, a placa suporta até 34 pinos de uso geral de entrada e saída digitais, pinos tanto com conversores Digital Analógico quanto Analógico Digital, suporte à comunicação serial, comunicação com sensores de toque, entre outras interfaces (ESPRESSIF SYSTEMS, 2020).

Com isso, é utilizada a versão WROOM da placa de desenvolvimento da ESP32, ilustrada na Figura 23. No projeto, a placa tem função tanto de gerenciar os dados de todos os nós da rede, assim quanto fazer a interface entre computador (para tratamento dos dados e exibição ao usuário) e demais elementos da rede de sensores. Também é possível elaborar comunicação via protocolo MQTT (do inglês, *Message Queue Telemetry Transport* ou Transporte de Telemetria para Fila de Mensagens em tradução livre), ideal para aplicações envolvendo Internet das Coisas, possibilitando comunicação com smartphones, por exemplo (THIRUPATHI; SAGAR, 2018).

Figura 23 – Placa de desenvolvimento ESP32.



Fonte: (ESPRESSIF SYSTEMS, 2020)

4.1.3 Transceptor NRF24L01

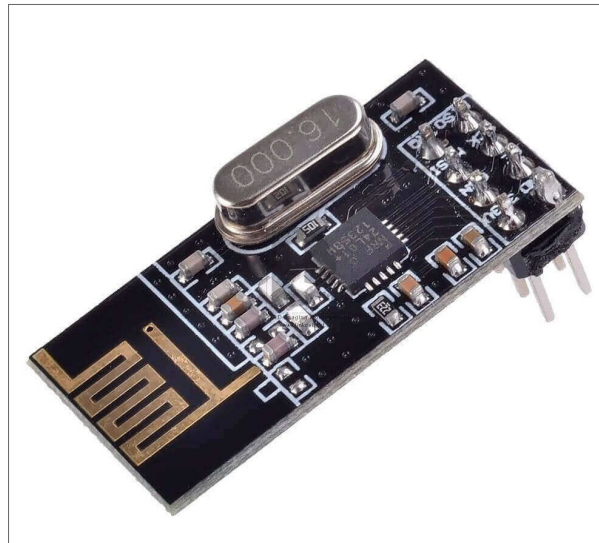
O NRF24L01 é um transceptor sem fio em chip único, que opera na frequência ISM, entre 2,4 a 2,5 GHz. A taxa de transmissão chega a 2 Mbps. Além disso, o transceptor é configurado e operado via comunicação SPI (Interface Periférica Serial ou do inglês, *Serial Peripheral Interface*). Deste modo, é possível realizar o mapeamento dos registradores e definir os modos de operação do mesmo. O protocolo base do dispositivo é baseado no Enhanced ShockBurst™, para uma comunicação em pacotes de dados. E ainda, o transceptor possui eficiente modulação GFSK (do inglês, *Gaussian Frequency Shift Keying* ou Chaveamento por Deslocamento em Frequência Gaussiano), contando ainda com características para evitar interferências externas no sinal, por meio de filtros seletivos na recepção (SEMICONDUCTOR, 2007).

O transceptor possui módulos em diferentes versões, variando com a antena utilizada, se será interna ou externa, dimensões da placa e configurações gerais. Para o projeto foi definida a versão mais compacta, ilustrada no módulo da Figura 24.

O módulo possui baixo consumo de energia, podendo ser alimentado com valores de tensão entre 1,9 e 3,6 V. Em modo *power down* (desligamento) chega a 900 nA de consumo. Em uma transmissão a uma potência de 0 dBm o consumo passa a ser 11,3 mA, o qual corresponde a uma potência de 37,29 mW, a uma tensão de 3,3 V (valor de tensão comum em aplicações práticas) (SEMICONDUCTOR, 2007).

No projeto, o módulo é utilizado para realizar a comunicação sem fio dos módulos de acionamento, tanto entre eles, quanto com os nós coordenadores, por meio de uma rede em malha. Permitindo assim, tanto o recebimento de comandos da central, quanto a transmissão de

Figura 24 – Módulo transceptor NRF24L01.



Fonte: (OLIVEIRA, 2019)

comandos da central aos demais nós da rede, em situações onde é necessária a transmissão com mais de um salto de transmissão, por questões de alcance (LOUREIRO et al., 2003).

4.1.4 Módulo de Acionamentos

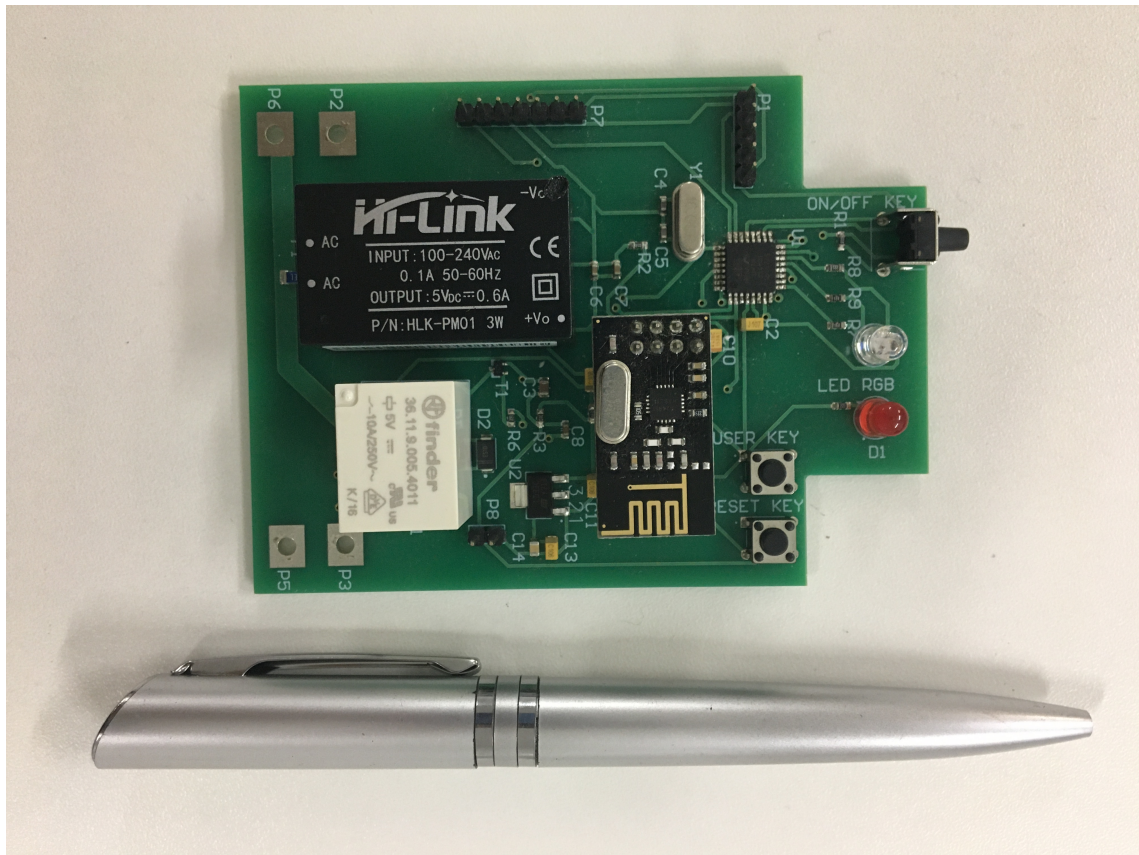
Reunindo o microcontrolador ATmega e o transceptor NRF24L01, foi desenvolvida o módulo de acionamentos utilizado nos estudos. Além de fonte de alimentação, a placa também dispõe de LEDs para sinalização da operação, botões para o usuário e pinos para leitura de sinais digitais ou analógicos do ambiente. A placa foi desenvolvida visando o acionamento e monitoramento remoto de dispositivos diversos, desde iluminação, motores, entre outros (INOVATHYS, 2020).

Por meio da comunicação sem fio, cada módulo pode receber ou transmitir informações que venham do nó coordenador, ou entre outros módulos, por meio da rede em malha elaborada. E mais, a placa de acionamentos possui interface para acionamentos diversos via relé, permitindo assim o gerenciamento dos mais diversos equipamentos e dispositivos, seja residencial ou industrial.

Como a placa foi desenvolvida ao longo do projeto, tem-se mais liberdade para a realização de modificações e ajustes. Assim como, tem característica de ser modular, permitindo expansões para um número maior de acionamentos ou mesmo interagir com outras placas e módulos, via comunicação serial ou via rede. Além disso, possui disposição otimizada para instalações em quadros diversos ou ambientes industriais, tal como dimensões reduzidas e baixo consumo. Na Figura 25 o módulo desenvolvido é apresentado.

Em um ambiente residencial, a placa de acionamentos pode corresponder a uma ou mais

Figura 25 – Módulo de acionamentos.



Fonte: Autoria Própria.

lâmpadas, ou tomadas. Em um ambiente industrial, cada módulo pode acionar bombas, motores, válvulas, com o auxílio de outros componentes adequados. Com a interação entre módulos, toda a rede pode ser informada do estado de cada um dos nós e mais, o nó central permite a transmissão da informação via internet, permitindo o gerenciamento remoto e ainda, funções de controle e otimização energética.

4.2 Metodologia

A metodologia aplicada no desenvolvimento deste trabalho se deu em quatro etapas principais. Inicialmente, foi realizado um levantamento de referências bibliográficas sobre SED e aplicações práticas relacionadas ao tema.

A partir do estudo foi definido o uso da teoria dos autômatos no projeto, mais especificamente aplicação dos ACA. Para mais, também na etapa inicial foram definidas os equipamentos e tecnologias empregadas no projeto, como utilização do ambiente computacional MATLAB®, da plataforma Arduino para processamento nos nós e dos módulos ESP e NRF24L01 para comunicação da rede.

Na segunda etapa, foram elaborados os códigos e lógicas empregados para constituir a

rede de sensores sem fio baseadas em ACA. Assim, os algoritmos foram desenvolvidos seguindo as especificações do projeto e visando a aplicação prática.

Na terceira etapa foram definidos os demais componentes a constituir o *hardware* do projeto, assim como foram elaborados os esquemas e *layout* das placas de acionamento utilizadas nos nós sensores da rede.

A última etapa do projeto consistiu na fase de aplicação, na qual foram realizadas simulações para análise e validação dos algoritmos elaborados. Ademais, também foram executadas as montagens da bancada experimental para testes práticos da RSSF alvo do projeto.

4.2.1 Parâmetros Definidos

Para a bancada de testes, foram utilizados dois nós coordenadores (um para origem dos dados e outro para chegada dos dados) e quatro nós intermediários com as placas de acionamentos, devido à disponibilidade no momento da implementação.

O plano lógico definido é apresentado na Figura 26. O plano consiste em um computador com o algoritmo desenvolvido, funcionando como a central de controle, em comunicação com o nó de origem por meio de comunicação serial RS232. O nó de origem define a rota de transmissão de acordo com a lógica implementada, determinando por qual rota a informação será enviada, selecionando algum dos nós intermediários. Ao final, a mensagem é enviada ao nó de chegada, o qual retorna uma mensagem de confirmação à origem, via nuvem por meio da rede Wi-Fi disponível. Tanto os nós coordenadores quanto os nós intermediários possuem transceptores NRF24L01, de forma a facilitar a comunicação entre os nós da rede.

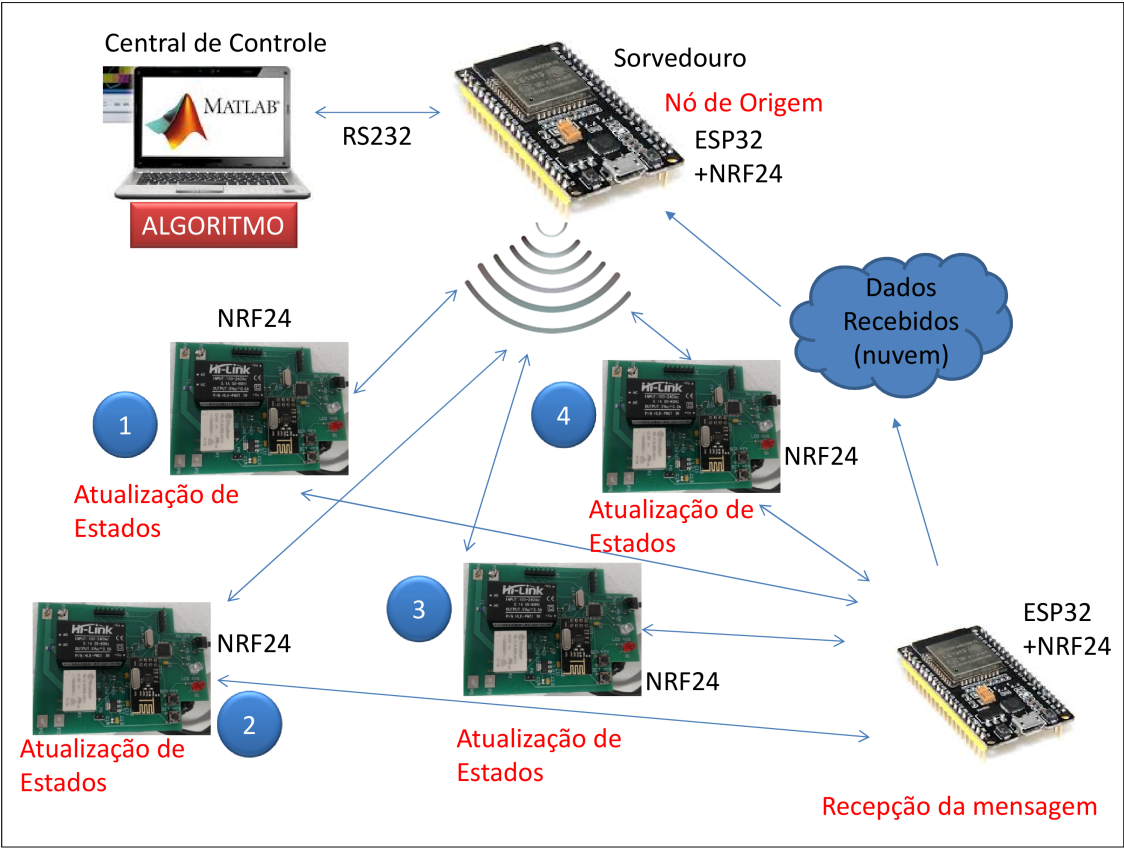
Com isso, nos nós intermediários ocorre a atualização dos estados, definidos a partir da central de controle. Após o processamento, a informação é enviada ao sorvedouro, o qual seguirá a rota definida de acordo com o algoritmo, selecionando um nó intermediário, que envia a mensagem ao nó de chegada.

4.2.1.1 Definição da Mensagem

Para definição da mensagem a ser enviada, foi utilizado o *Enhanced Shockburst™*, que é um gerenciador de pacotes do NRF24. Por meio desse gerenciador é possível organizar a mensagem em cinco campos distintos. Foi utilizada a distribuição de acordo com o apresentado na Figura 27.

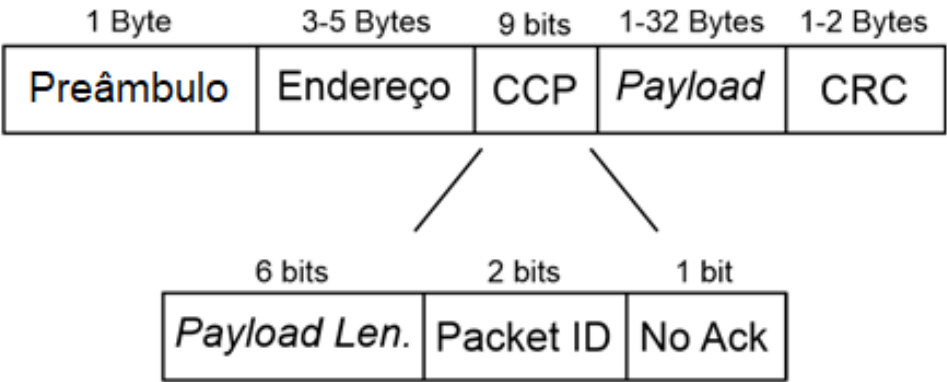
O preâmbulo consiste na porção inicial da mensagem, com função de indicar o recebimento de uma nova mensagem. No endereço o receptor da mensagem é identificado, de forma que o restante da informação só é processado se houve coincidência com o *pipe* do transmissor, ou seja, se tanto o transmissor quanto o receptor estiverem em um mesmo canal e endereço para comunicação.

Figura 26 – Esquema do plano lógico aplicado.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 27 – Organização da mensagem.



Fonte: (INOVATHYS, 2020).

No Campo de Controle de Pacote (CCP), que possui 9 bits, são definidos outros três subcampos. Os 6 primeiros bits correspondem ao tamanho da mensagem (*payload length*), indicando quantos bytes tem o campo de dados da mensagem. O identificador do pacote (*Packet ID*) possui a função de evitar que o mesmo pacote seja processado mais que uma vez em um receptor. E o último subcampo é o de reconhecimento ou não (*No Acknowledgement*), no qual é indicado ou não a necessidade de envio de volta uma mensagem de confirmação que a mensagem foi recebida. O *ack* foi utilizado para confirmar o recebimento das mensagens ao longo dos nós e assim ser possível realizar a contagem dos nós sensores utilizados em cada rota elaborada.

A estrutura de endereço utilizada no projeto é indicada na Figura 28. São até 5 bytes de endereço, visando aplicações que necessite de mais informações, como setor, bloco, sala, etc nos três primeiros campos. Os dois últimos campos são utilizados para identificação dos nós, dividido em byte superior (*high*) e inferior (*low*).

Figura 28 – Organização do endereçamento.

```
/*! Definições de Endereço*/  
#define My_HOME_ID0      0  
#define My_HOME_ID1      0  
#define My_HOME_ID2      1  
#define My_NODE_IDH      100  
#define My_NODE_IDL      100
```

Fonte: (INOVATHYS, 2020).

O campo *Payload* corresponde à mensagem a ser transmitida em si e o campo CRC corresponde à Verificação Cíclica de Redundância (do inglês, *Cyclic Redundancy Check*), utilizado para verificação da validade da mensagem.

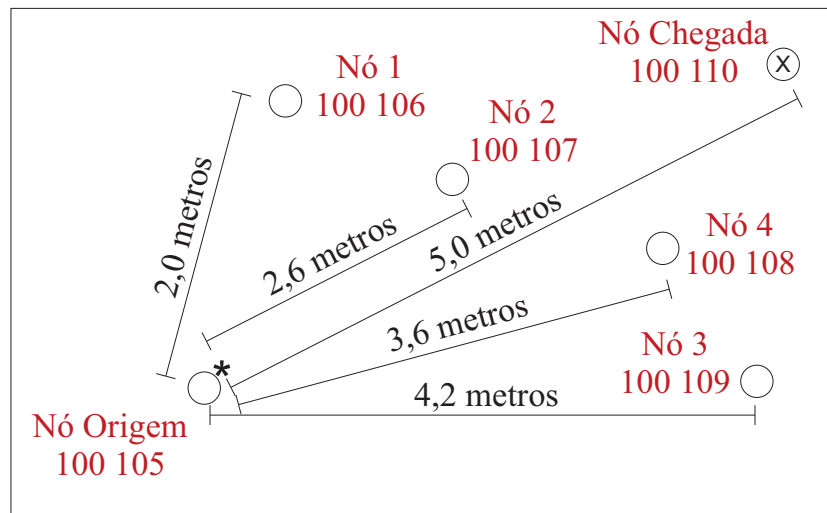
4.2.1.2 Distribuição no Ambiente

Os testes experimentais foram realizados no Laboratório do Grupo de Inteligência Computacional Aplicada a Engenharia Elétrica (GICA EE). Os dois nós coordenadores e os quatro nós intermediários foram distribuídos no ambiente de acordo as distâncias indicadas na Figura 29.

As distâncias foram definidas de acordo com a disponibilidade de alimentação para os módulos no laboratório, por isso foi utilizado um cenário reduzido para os testes. Na mesma figura são indicados os endereços definidos para cada um dos nós utilizados. O nó indicado com um "*" é o nó de origem, enquanto que o nó indicado com "X" ao centro é o nó de chegada.

Com as distâncias indicadas, os nós sensores foram distribuídos no ambiente. Na Figura 30 é apresentada uma visualização anterior aos nós sensores, enquanto que na Figura 31 tem-se

Figura 29 – Disposição dos nós sensores e endereços utilizados.



Fonte: Autoria Própria.

uma visualização posterior aos nós sensores da rede. Foi utilizado um ambiente sem obstáculos, em um cenário inicial para validação experimental do estudo de caso.

Assim, os módulos de acionamento foram alimentados de acordo com a disponibilidade no local que cada um se encontrava, visto que é possível energizar a placa tanto em 220 VAC (alimentando a fonte DC do módulo) ou alimentando em 5 VCC, por meio de alguma porta USB. Na placa há um regulador de tensão, garantindo que seja entregue a tensão de 3,3 V ao transceptor.

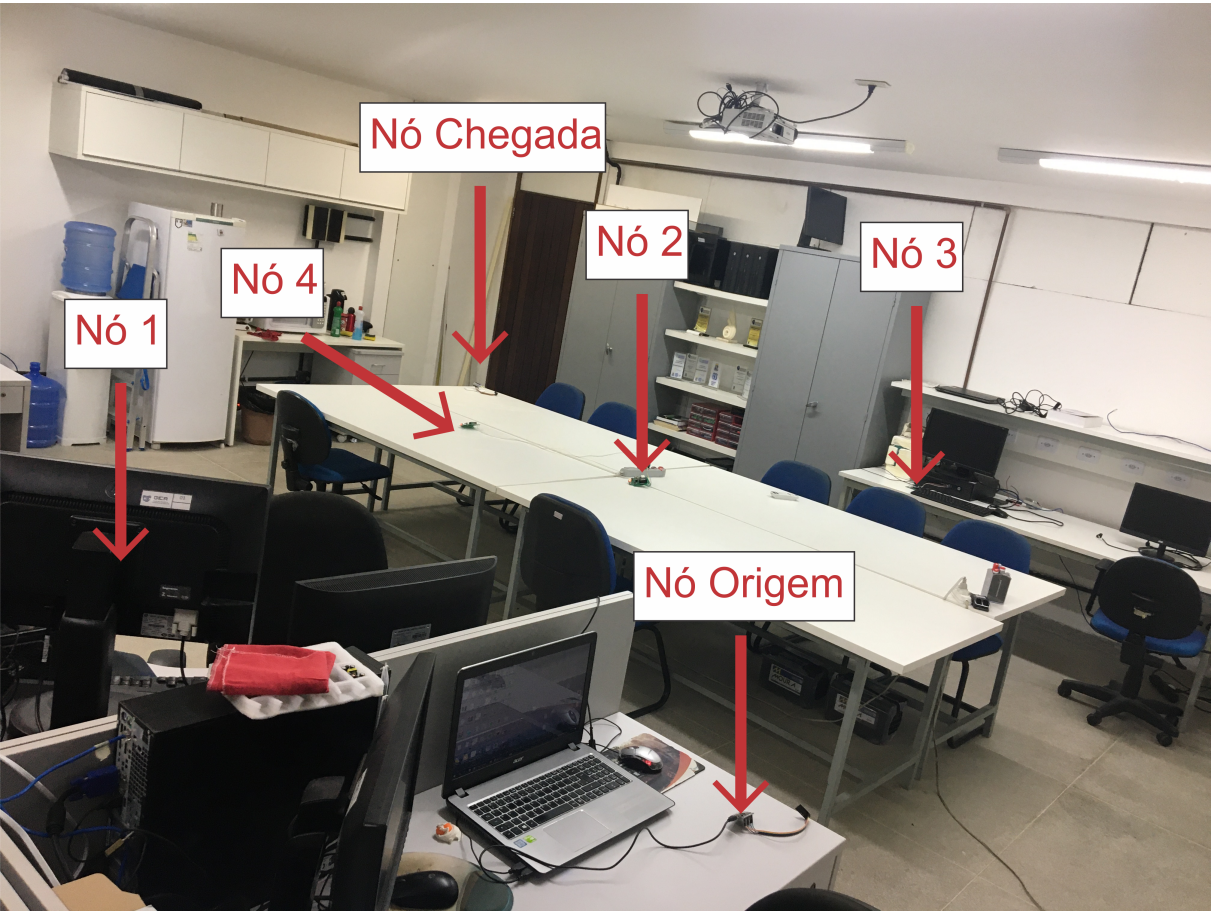
Para a mensagem transmitida (*payload*), foi definido um total de 3 Bytes, definidos como três números, apenas para confirmar o recebimento no nó de chegada, fora os demais 8 Bytes que constituem o restante da mensagem. Por fim, na Tabela 9 há um resumo das configurações utilizadas para os testes experimentais, indicando as alimentações, distâncias e endereços utilizados. A alimentação utilizada foi incluída na tabela para reforçar a operação do módulo em ambas as situações, tanto em 220 VAC, quanto em 5 VCC. Em todos os nós foi utilizado um início de endereço (0,0,1,100).

Além disso, foi utilizada a configuração padrão de transmissão do NRF24, definido a uma potência de 0 dBm, suficiente para cobrir a transmissão entre todos os nós da rede. Nesta potência de transmissão, o transceptor consome em cada transmissão uma potência de 37,29 mW, de acordo com o fabricante.

Para os testes práticos dos algoritmos elaborados à priori algumas condições foram pré-determinadas, como definições de nós críticos ou nós redundantes, de acordo com a distribuição no ambiente. Posteriormente, o ideal é que o próprio algoritmo seja capaz de mapear e definir cada um dos nós que compõem a rede.

Além disso, outro aperfeiçoamento possível é a utilização de modos de baixo consumo,

Figura 30 – Disposição dos nós sensores no ambiente, vista anterior.



Fonte: Autoria Própria.

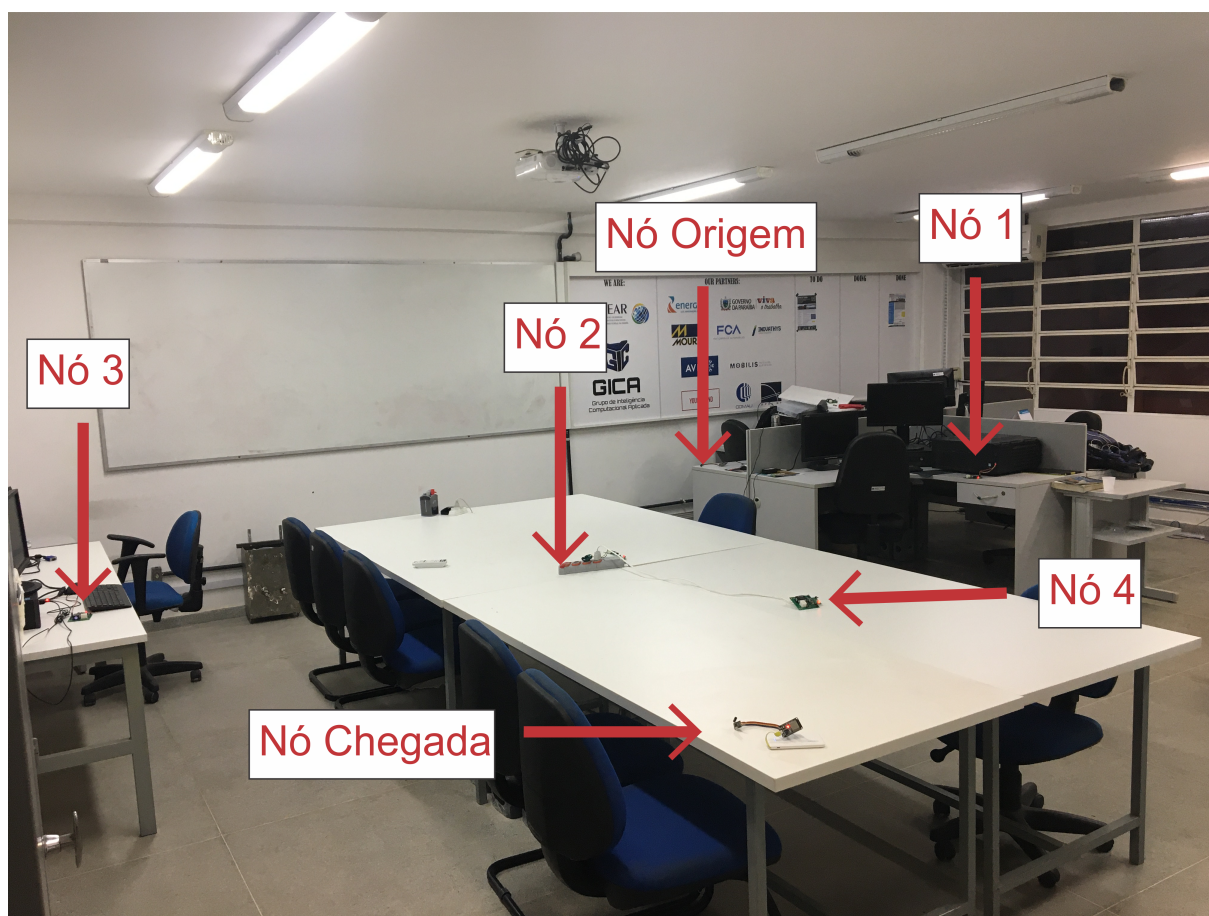
Tabela 9 – Configurações definidas para testes experimentais.

| Nó Sensor | Endereço (Final) | Alimentação | Distância do Nó de Origem |
|---------------|------------------|-------------|---------------------------|
| Nó de Origem | 105 | 5 VCC | 0 m |
| Nó 1 | 106 | 5 VCC | 2,0 m |
| Nó 2 | 107 | 220 VAC | 2,6 m |
| Nó 3 | 109 | 5 VCC | 4,2 m |
| Nó 4 | 108 | 220 VAC | 3,6 m |
| Nó de Chegada | 110 | 5 VCC | 5,0 m |

Fonte: Autoria Própria.

associados com verificações cíclicas de estado para análise da necessidade ou não de utilizar o sensor em questão. O ciclo pode ser de 30 segundos por exemplo, se o sensor não for utilizado na rodada, retorna ao modo *sleep*, aguardando um novo ciclo.

Figura 31 – Disposição dos nós sensores no ambiente, vista posterior.



Fonte: Autoria Própria.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos com o projeto proposto, por meio de simulações implementados em MATLAB® e testes experimentais.

Para tanto, em simulação foram elaborados dois cenários distintos para utilização do algoritmo elaborado para modelagem de uma RSSF baseada em autômatos do tipo ACA. Para validação dos cenários, foi elaborada uma interface de apresentação da rede de sensores com base em gráficos de duas dimensões. Dessa maneira, foi considerada uma rede contendo 20 nós sensores, que são distribuídos em uma área com dimensões de 100 x 100 metros.

Dessa forma, inicialmente foi elaborada uma estrutura gráfica para apresentação da RSSF. Foram utilizadas linhas para limitar a área de distribuição dos sensores e círculos para corresponder aos sensores, com diferenciação entre o sensor coordenador de origem e sensor coordenador de chegada. Além disso, os sensores que não estejam em uso permanecem na cor preta, enquanto que os sensores em modo ativo ganham destaque verde. A legenda dos símbolos utilizados é apresentada na Figura 32.

Figura 32 – Legenda utilizada nos gráficos das RSSF elaboradas.

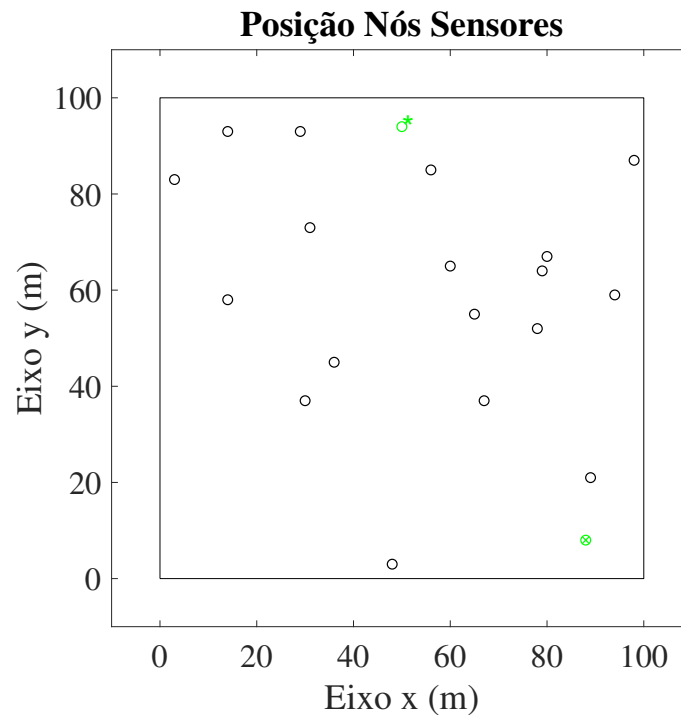


Fonte: Autoria Própria.

Assim, os elementos foram utilizados para demonstração do funcionamento do algoritmo. Na Figura 33 é apresentada uma distribuição geral entre os nós sensores. Em ambos os cenários elaborados, a condição inicial de posicionamento dos nós sensores é definido de forma aleatória, além disso, o vetor probabilidade de escolhas também é iniciado de forma aleatória com valores entre 0 e 1, no qual 0 corresponde ao nó sensor em estado inativo e 1 corresponde a seleção de um nó sensor em estado ativo inicialmente, uma das características dos ACA. Visando a simplificação da análise, foi utilizando um cenário de distribuição dos sensores em um ambiente aberto e sem obstáculos, como uma sala por exemplo.

Além disso, pelo fato de caracterizarem autômatos do tipo ACA, os algoritmos utilizados em cada um dos nós sensores possui características dos AC e AA. Dos AC vale destacar que cada um dos nós sensores evoluem a partir de etapas discretas de tempo, possuem um conjunto

Figura 33 – Visualização gráfica para a distribuição dos nós sensores.



Fonte: Autoria Própria.

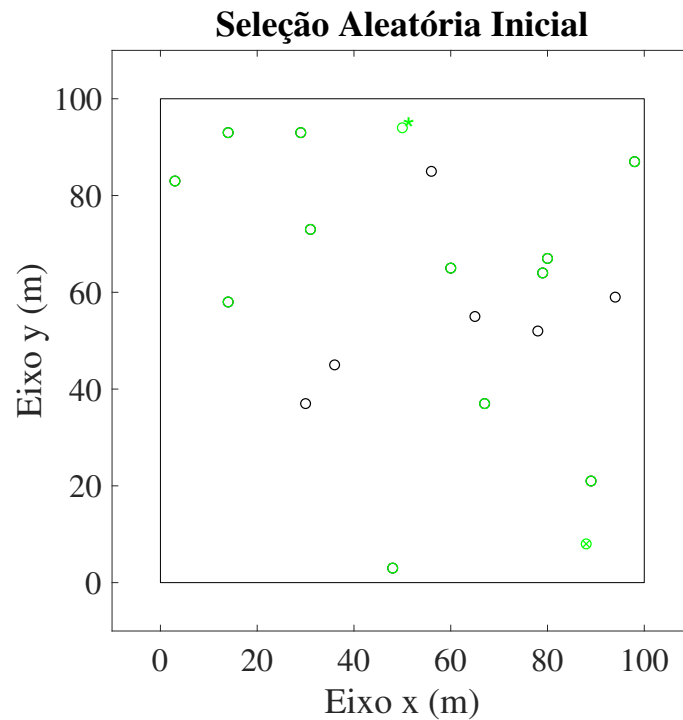
finito de estados e estão dispostas a um mesmo conjunto de regras. Além disso, as relações entre os nós ocorre de forma uniforme, identificando os nós da vizinhança e ainda, os nós fazem parte de um conjunto de células. Dos AA é possível salientar que a rede está disposta a um conjunto de ações de entradas, que são atualizadas a partir das interações com o restante do ambiente. Além disso, há um conjunto de saídas a serem observadas, como o consumo e quais sensores entraram em transmissão, a partir de condição de bonificação ou penalidade.

5.1 Resultados do cenário 1

O primeiro cenário é baseado na aleatoriedade de todos os nós sensores, incluindo os nós sensores coordenadores de origem e de chegada. Assim, a cada nova rodada, todos os sensores têm suas posições modificadas. O algoritmo atua então, identificando qual o conjunto de sensores deve ser selecionado para que seja possível levar a informação do nó coordenador de origem até o nó coordenador de chegada.

Inicialmente, alguns nós sensores são selecionados aleatoriamente para passarem ao estado ativo, por meio do vetor de probabilidade de escolhas. Tal escolha serve para realizar o mapeamento da posição dos nós sensores no ambiente. Utilizando a distribuição inicial apresentada na Figura 33, alguns nós foram selecionados para o estado ativo, conforme ilustrado na Figura 34.

Figura 34 – Seleção aleatória inicial de alguns nós sensores.



Fonte: Autoria Própria.

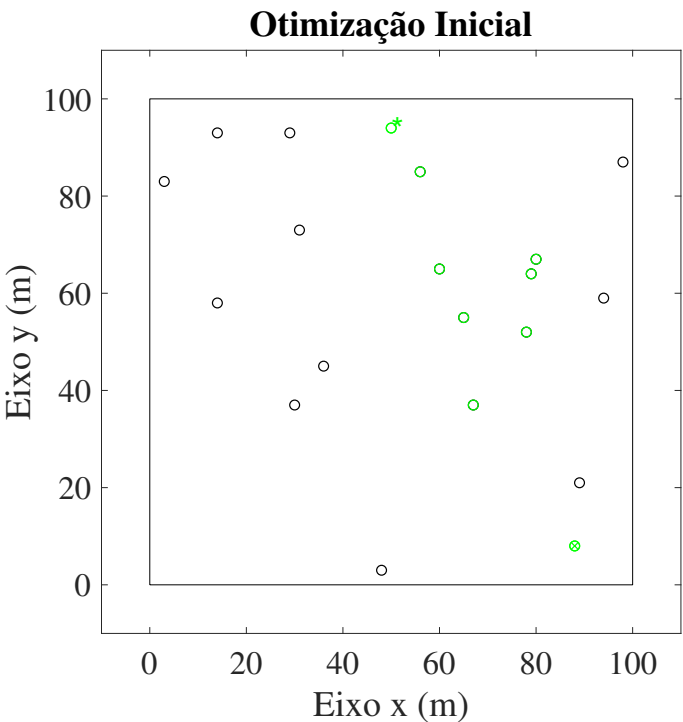
Além de mapear, a ativação inicial também pode ser utilizada para uma primeira transmissão de dados. Contudo, dada a aleatoriedade de tal modo de transmissão, podem ser apresentados valores elevados de consumo, visto a ausência de uma otimização neste primeiro caso. A segunda etapa consiste em ir identificando todos os nós sensores da rede e ir penalizando a probabilidade de escolha de acordo com os critérios citados apresentados nas seções anteriores, como no caso de haver algum nó sensor que seja redundante, que passa a ser penalizado. Com isso, há a formação do grupo de cobertura inicial, como apresentado na Figura 35. Tal passo também é apresentado em (MANJU; CHAND; KUMAR, 2018b).

Apesar da formação da rota inicial, ainda há nós redundantes. Com isso, na sequência os nós redundantes são desabilitados, de forma a utilizar apenas os nós necessários para a transmissão da informação entre o coordenador de partida e o de chegada. Assim, o resultado após a seleção é apresentado na Figura 36 que também corresponde à rota final de nós sensores escolhidos.

Logo, em uma rota inicialmente elaborada com 7 nós sensores, houve uma redução para apenas 2 nós sensores, com exceção dos nós coordenadores. Ou seja, apenas nesse caso é observada uma redução de 71,43 % dos nós sensores utilizados.

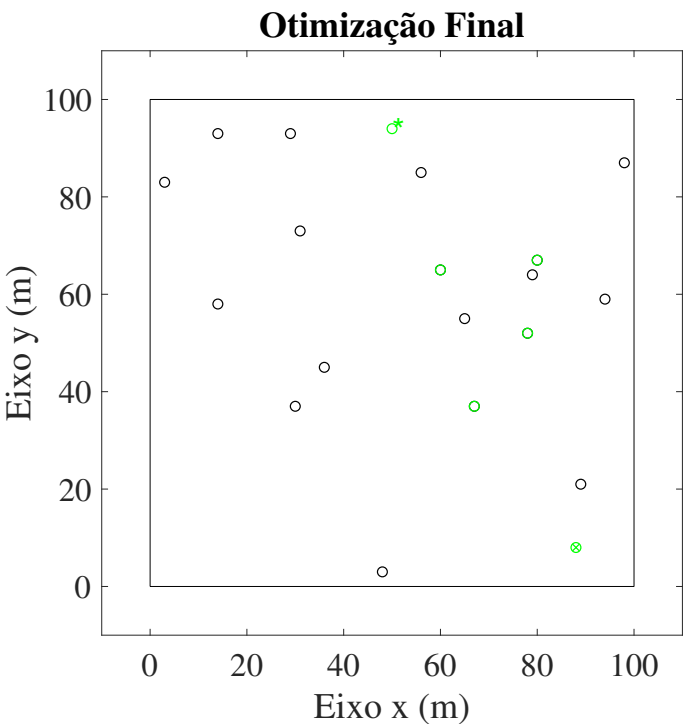
Como forma de validar o cenário 1, foi elaborada uma rotina de repetição para comparar as etapas descritas. A cada rodada, o posicionamento de todos os nós sensores da rede, incluindo os nós coordenadores é atualizado e o modelo atua de forma a obter o grupo de cobertura de forma

Figura 35 – Formação do grupo de cobertura.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 36 – Rota selecionada após remoção dos nós em redundância.

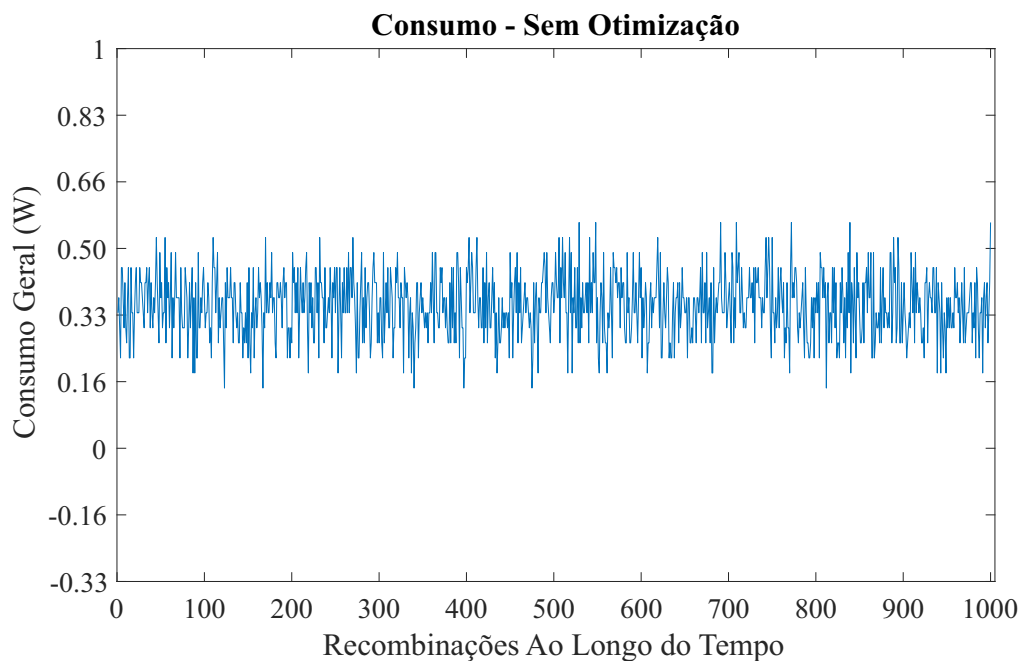


Fonte: Autoria Própria.

mais eficiente possível. Assim, foi utilizada uma repetição de 1000 vezes com posicionamentos aleatórios e quantificado o consumo total da rede em cada rodada, como descrito na Equação 9 e considerando que cada nó sensor em estado ativo possui o consumo equivalente do NRF24L01.

Assim, na Figura 37 é apresentado a distribuição de consumo ao longo das recombinações para uma RSSF sem otimização aplicada, apenas disposta à seleção aleatória dos nós sensores. É possível perceber que o valor médio de consumo de toda a RSSF ficou em torno de 0,33 A. Ao realizar a verificação em *software* o valor médio exato foi de 0,35376 W, que corresponde a uma utilização média de 9,487, ou seja, 9 nós sensores por recombinação. Além disso, foi apresentando um desvio padrão de 0,08019 W. Tal quantidade de nós sensores é condizente com o apresentado na Figura 34, na qual a maioria dos nós sensores foi selecionado como ativo.

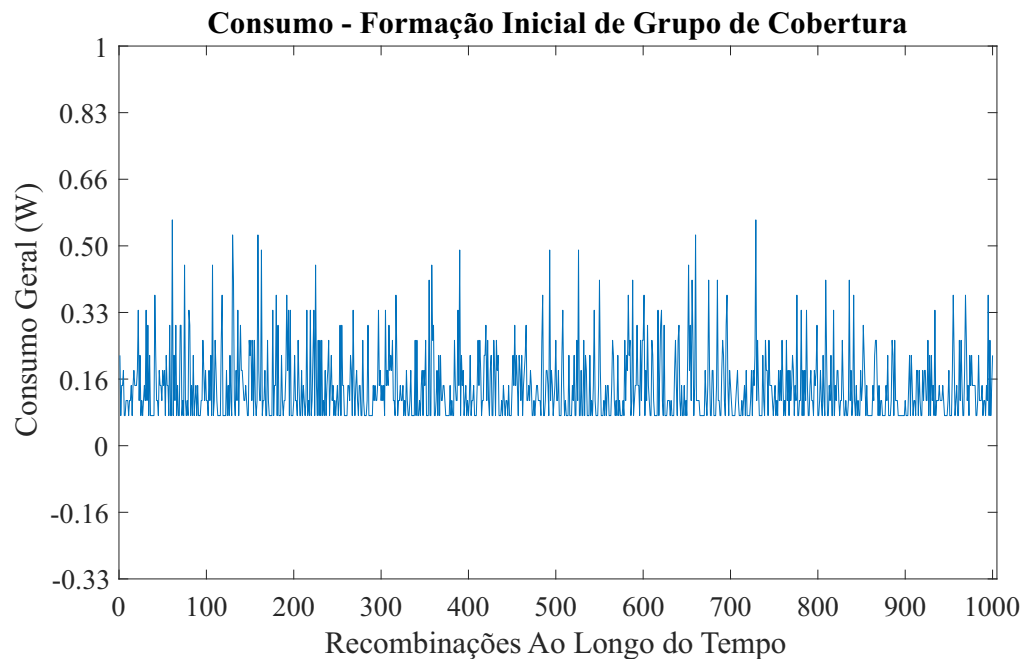
Figura 37 – Consumo geral para RSSF sem otimização.



Fonte: Autoria Própria.

Na sequência, foi verificado o consumo geral da RSSF apenas com a formação das rotas, conforme descrito como passo intermediário em (MANJU; CHAND; KUMAR, 2018b), na seção 2.4. O consumo médio geral ao longo das recombinações foi de 0,14619 W, o que corresponde a uma média de 3,92 sensores (ou seja, 4 sensores) a cada recombinação. Enquanto que o desvio padrão no consumo geral foi superior, de 0,08811 W. Novamente o valor seguiu ao apresentado nas ilustrações de seleção de grupo de cobertura inicial, indicando uma redução com relação a uma seleção aleatória. Na Figura 38 é apresentado o consumo geral da rede com formação inicial do grupo de cobertura. O valor mínimo de 72,6 mW ocorre em casos nos quais apenas o nó coordenador de origem e o de chegada são necessários para a transmissão, este valor é a base do gráfico.

Figura 38 – Consumo geral para RSSF com grupo de cobertura inicial.



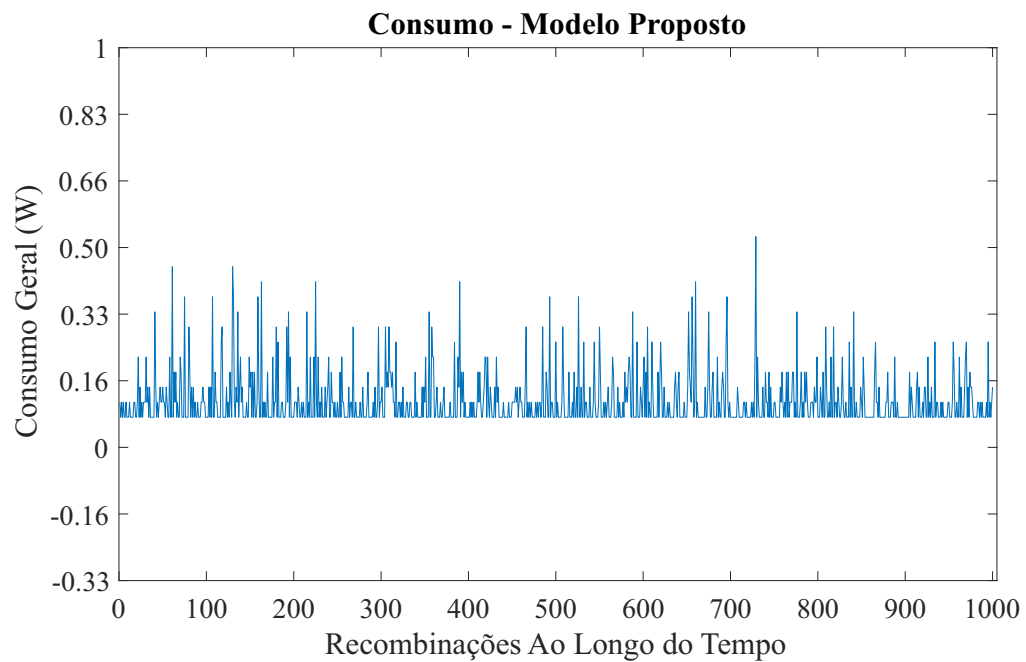
Fonte: Autoria Própria.

Em seguida, foi verificado então o consumo com o modelo proposto, utilizando as penalidades para os nós sensores redundantes a cada nova recombinação. O resultado é apresentado na Figura 39. O valor médio de consumo total da RSSF apresentado foi de 0,11484 W, o que corresponde a uma média de 3,08 sensores (ou seja, 3 sensores) a cada recombinação. Além de um desvio padrão menor que nos modelos anteriores, de 0,066 W. Tal valor médio de consumo é 67,54 % menor que a rede de sensores disposta apenas à seleção aleatória e 21,4 % menor que o valor médio de consumo para uma RSSF apenas com a formação de uma rota de nós sensores sem ponderações. O valor base do gráfico novamente corresponde a 0,0726 W, que representa a utilização mínima de apenas dois sensores.

Vale destacar que o desvio padrão mesmo sendo menor que nos modelos anteriores, ainda apresenta valor relativamente elevado em comparação com o valor médio. Isto se deve ao fato que dependendo da distribuição dos sensores, o método pode ser mais eficiente na determinação da rota para transmissão dos dados.

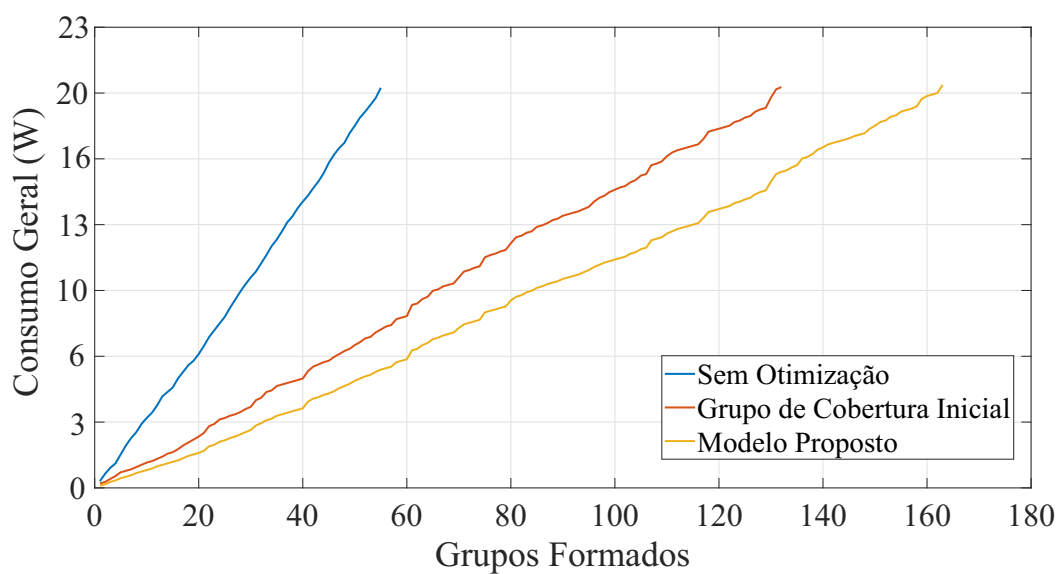
Como última verificação do cenário 1, foi analisado o tempo de vida para as três situações descritas: sem otimização, formação de grupo de cobertura inicial e o modelo proposto, como apresentado no capítulo III deste trabalho. Para tanto foi estabelecido uma potência máxima consumida de 1 W para cada nó sensor, que é um dos menores valores observados para eletrodomésticos em modo *standby* (LIM et al., 2016). Tal valor corresponde a um consumo total de 0,303 A por sensor, considerando uma tensão de 3,3 V. Considerando os 20 nós sensores da rede, tem-se um total de 20 W para toda a rede. Dessa forma, foi verificado quantas recombinações cada uma das três situações leva para atingir este valor de consumo, como ilustrado na Figura 40.

Figura 39 – Consumo geral para RSSF com o modelo proposto.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 40 – Análise do tempo de vida nas três situações.



Fonte: Autoria Própria.

Por meio do gráfico apresentado na Figura 40 é possível perceber que para a rota de sensores sem a aplicação de otimização, em 56 recombinações o consumo geral foi ultrapassado. Para o algoritmo com grupo de cobertura inicial, passou a ter 133 recombinações e por fim, com o algoritmo elaborado, o tempo de vida da rede aumentou para 164 recombinações, valor 192,86 % maior que no primeiro modelo em análise. Com isso, o modelo proposto apresentou um aumento do tempo de vida em comparação com o método de cobertura apresentado e foi bastante superior se comparado apenas com uma seleção aleatória dos nós sensores. O aumento no tempo de vida observado se deve principalmente ao conjunto de penalidades impostas, que remove sensores redundantes, o que promove uma diminuição no consumo geral da rede e um consequente aumento no tempo de vida. Portanto, para um mesmo limiar de energia estabelecido, a rede consegue atender aos requisitos de transmissão por mais tempo.

Em aplicações práticas, tal otimização pode ser fundamental, pois em sistemas que utilizem a domótica, como prédios, podem possuir muitos sensores e caminhos intermediários, a utilização do número mínimo possível de sensores pode impactar bastante no consumo e investimento geral. Por exemplo, caso tenha-se cinco sensores em uma determinada área de cobertura e tenha-se a possibilidade de utilizar apenas três para atender à tarefa, o consumo já é reduzido quase pela metade.

Na Tabela 10 é apresentado um resumo dos resultados obtidos para o primeiro cenário elaborado, comparando os métodos apresentados neste cenário em consumo médio, número médio de sensores utilizados e a quantidade de rodadas correspondente ao tempo de vida da RSSF em cada um.

Tabela 10 – Resumo dos resultados obtidos em simulação.

| Método | Consumo Médio (W) | Desvio Padrão do Consumo (W) | Número Médio de Sensores | Tempo de Vida da Rede |
|----------------------------|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| Seleção Aleatória | 0,35376 | 0,08019 | 9,487 | 56 rodadas |
| Grupo de Cobertura Inicial | 0,14619 | 0,08811 | 3,92 | 133 rodadas |
| Modelo Proposto | 0,11484 | 0,066 | 3,08 | 164 rodadas |

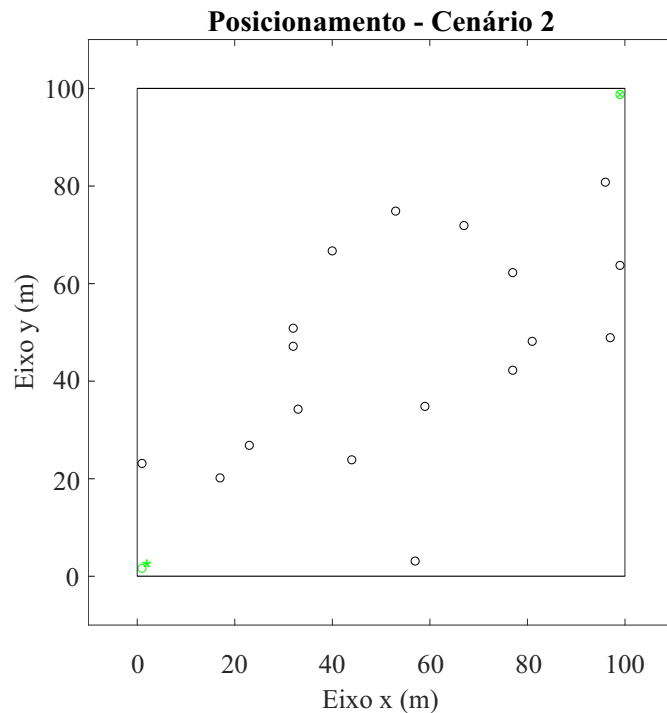
Fonte: Autoria Própria.

5.2 Resultados do cenário 2

O segundo cenário consiste em fixar os nós coordenadores em duas extremidades do ambiente e verificar a capacidade do algoritmo de realizar recombinações de rotas e aumentar o tempo de vida da rede. Com isso, apenas a distribuição dos demais nós sensores da rede é definida aleatoriamente. Na Figura 41 é apresentada uma distribuição geral para o segundo cenário, com destaque para o nó coordenador de partida à esquerda e o nó coordenador de chegada à direita.

Ao contrário do primeiro cenário, nesta análise uma vez definidas as posições de cada nó sensor, o algoritmo analisa as diversas rotas possíveis, de forma a utilizar o maior número de nós

Figura 41 – Posicionamento geral no segundo cenário.



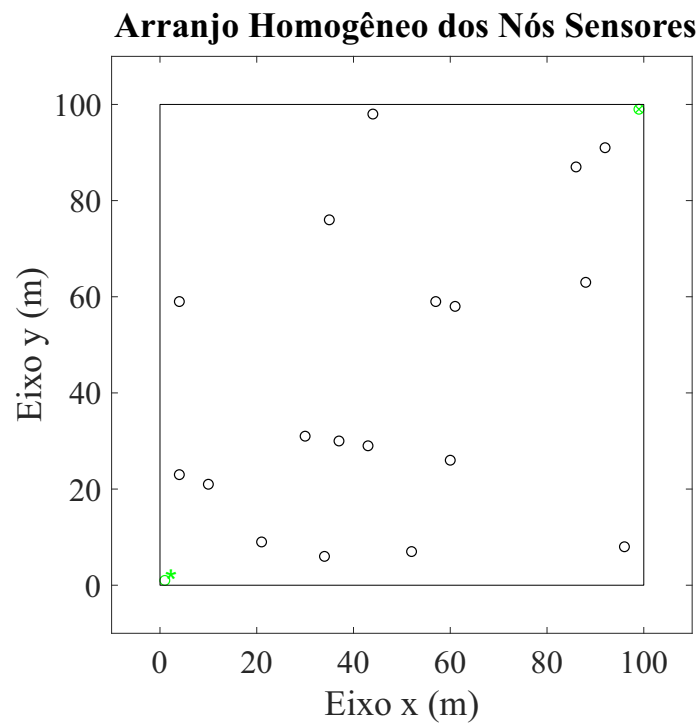
Fonte: Autoria Própria.

sensores possível. Ao formar a rota mais otimizada, há a transmissão da informação e assim há energia consumida pelos nós utilizados. Na próxima rodada, os nós utilizados são penalizados por terem consumo mais elevado que os demais, que ainda não foram utilizados. Assim, outra rota é formada e ocorre a transmissão novamente. Quando todas as possibilidades de rotas são atendidas, a primeira rota é formada novamente e assim sucessivamente, até o limiar de consumo de cada nó sensor ser atingindo e com isso ocorre o desligamento do grupo envolvido. Ao ir variando entre rotas, o consumo se torna mais homogêneo entre os membros da rede.

Foram analisadas diversas distribuições dos sensores e como o algoritmo respondeu a cada um deles. Para tanto foi utilizada a função *seed* no código elaborado em MATLAB®, na qual é possível replicar um conjunto de valores definidos para o posicionamento dos sensores. Foi observada que uma distribuição de ramificação entre os sensores corresponde a um melhor aproveitamento por parte do modelo, de forma que os sensores não fiquem tão próximos, mas também não formem rotas isoladas, como ilustrado na Figura 42. Nesta distribuição foi observado um cenário mais homogêneo dos nós sensores, facilitando a formação das rotas, dado o equilíbrio entre o espalhamento no ambiente dos sensores, e ao mesmo tempo os mesmos estarem dispostos a uma distância dentro do alcance do sinal dos nós sensores vizinhos.

Na Figura 42 é possível perceber que há possibilidade de formação de diversos caminhos em diagonal, além de também possibilitar a utilização dos nós um pouco mais afastados dos nós coordenadores, pois não há nós mais isolados. No conjunto de imagens apresentadas na Figura 43 é possível verificar alguns dos arranjos elaborados para cobertura ao longo das rodadas até o

Figura 42 – Posicionamento homogêneo no segundo cenário.



Fonte: Autoria Própria.

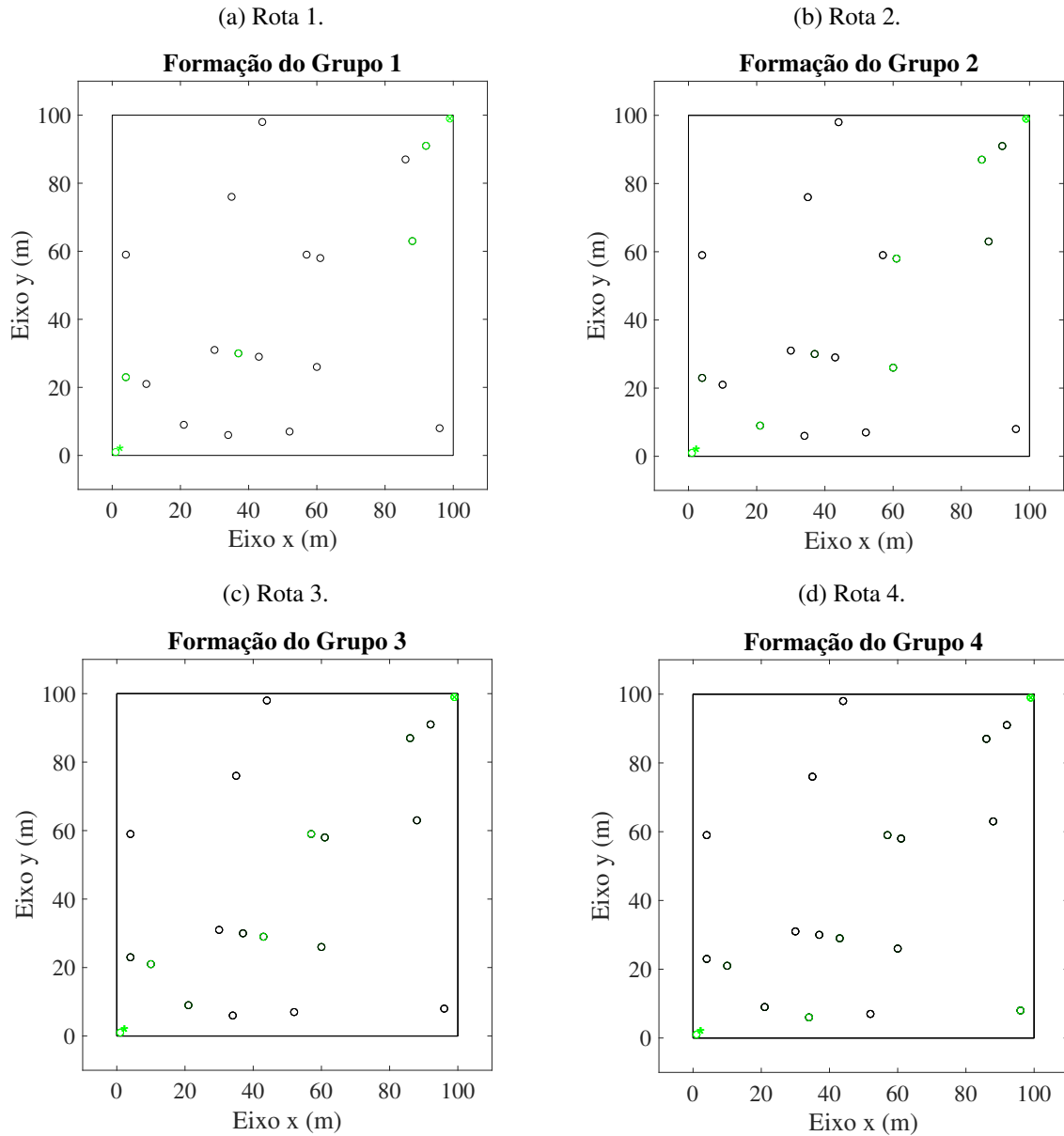
limiar de consumo estabelecido, que foi o mesmo do cenário anterior, 1 W para cada nó sensor.

Foram elaborados diversas rotas de cobertura, realizando uma ponderação ao longo das recombinações, de acordo com o consumo ao longo do tempo. Neste cenário, o algoritmo alcançou a marca de 187 recombinações de rotas, 14,02 % maior que no modelo proposto no cenário anterior. Além disso, na distribuição apresentada na Figura 41, todos os 20 nós sensores da rede foram utilizados. Com relação ao cenário anterior, o aumento no tempo de vida se deve ao fato do algoritmo poder aplicar as penalidades de forma contínua no sistema e possuir mais tempo para buscar o melhor resultado possível, enquanto que no cenário anterior os posicionamentos eram constantemente modificados.

Por fim, foi realizado um levantamento do consumo de cada nó sensor da rede ao longo das formações das rotas e transmissões. O resultado é apresentado na Figura 44, na qual há uma visualização em três dimensões, indicando cada um dos 20 nós sensores da rede e o consumo para cada um ao longo das recombinações das rotas. Na Figura destaca-se o montante do consumo ao longo da formação dos grupos utilizados nas rotas. Outro fator de destaque é a homogeneidade de consumo entre os 20 nós sensores utilizados na simulação, visto que o montante do consumo aumenta de forma semelhante entre os nós, até atingir o limiar de 1 W estabelecido para cada nó sensor.

Portanto, é apresentando um consumo de característica linear, visto que o uso da energia nos sensores ao longo das transmissões ocorre de acordo com o apresentado na seção 3.4.1.

Figura 43 – Algumas rotas formadas no cenário 2.

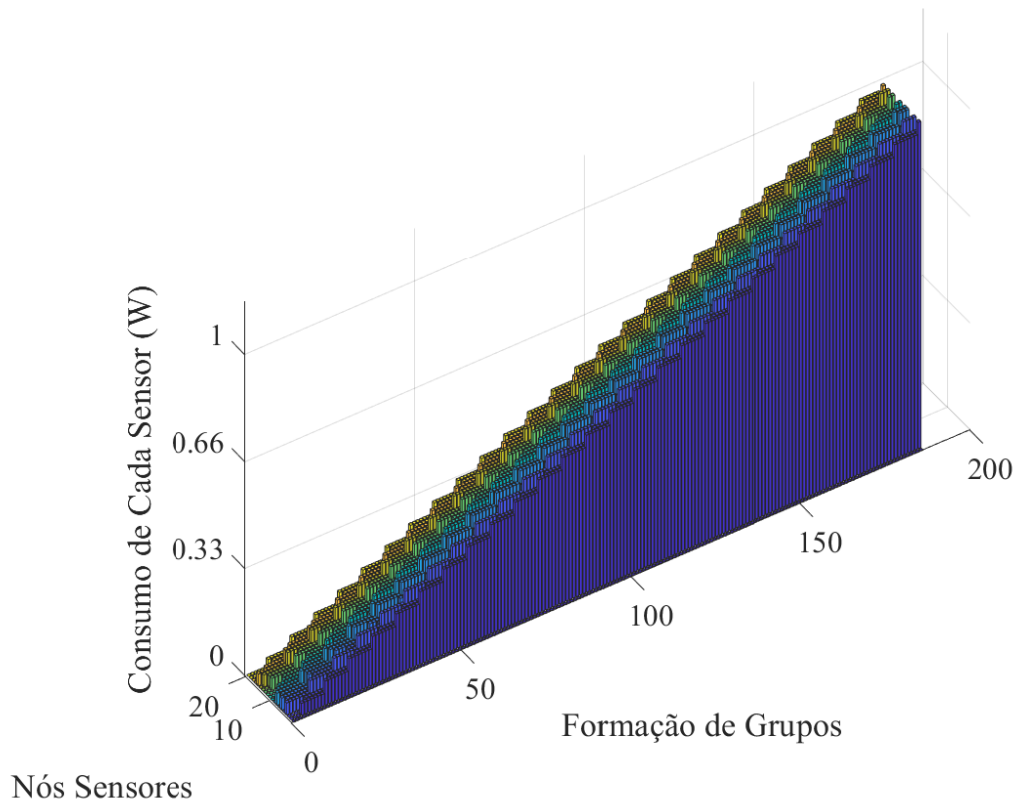


Fonte: Autoria própria.

Além disso, tem-se uma homogeneidade do consumo entre os sensores ao longo das formações, de modo a evitar que algum nó sensor seja esgotado ou mais exigido que os demais, um dos objetivos do algoritmo. Assim, no eixo no qual são ilustrados cada um dos 20 sensores, pode-se perceber que o consumo de todos cresce de forma similar, de forma que todos atingem o limiar de 1 W em instantes similares.

Também foram observadas algumas limitações ao longo do uso do modelo. Em casos em que um ou mais nós sensores ficaram mais isolados dos demais, os mesmos não foram utilizados, pois o nó sensor mais próximo deles poderia ter sido utilizado em uma combinação anterior, que o leva a ter um consumo mais elevado que os demais e entrar em condição de penalidade.

Figura 44 – Consumo ao longo das formações das rotas para cada nó sensor da rede.



Fonte: Autoria Própria.

Com isso, os demais sensores ficam fora do alcance dos demais e não entram em estado ativo. Uma condição semelhante é observada no caso de um nó sensor muito próximo a outro e que não exista mais que um nó vizinho próximo. Neste caso, apenas um dos sensores é utilizado e o outro acaba por não entrar em estado ativo por faltar outros nós para formar a rota. Com exceção destes casos, o modelo respondeu corretamente na formação e análise das rotas de nós sensores.

5.3 Resultados Experimentais

A configuração de montagem foi elaborada conforme parâmetros descritos no Capítulo 4 deste trabalho. Uma vez distribuídos os nós sensores no ambiente, foram realizados levantamentos para o tempo de vida da rede, também na forma de rodadas de transmissão, assim como estimativa de consumo de acordo com a utilização, e por fim, também foi analisada o uso de cada nó sensor e homogeneidade da rede. Para os testes experimentais também foi definido um consumo máximo de 1 W para cada sensor.

Foram utilizados dois algoritmos nos testes, o primeiro baseado na seleção aleatória dos nós sensores e a segunda baseada no algoritmo proposto. O algoritmo intermediário não foi incluído nesta análise devido à baixa quantidade de nós sensores disponíveis, o que acaba não

diferenciando muito do método proposto.

5.3.1 Tempo de Vida da Rede e Falhas de Transmissão

Para análise do tempo de vida da rede, foi verificado em quantas rodadas de transmissão a energia total destinada à rede é atingida. No caso, como estão disponíveis quatro nós sensores intermediários, foi definido um consumo de 1 W para cada, o que totaliza 4 W para a rede. Assim, quando o consumo de todos os nós sensores intermediários atinge 4 W, a transmissão é finalizada e o total de rodadas é contabilizado.

Para a seleção aleatória de nós sensores, o total de rodadas alcançado foi de 82 rodadas. Não houve falhas de transmissão, visto que todos os nós sensores estão em distância satisfatória para a potência de transmissão definida. Na Figura 45 são apresentados os resultados do tempo de vida e falhas de transmissão para a seleção aleatória.

Figura 45 – Rodadas e falhas de transmissão para seleção aleatória.

```
Resultados Obtidos:  
Total de Rodadas = 82  
Falhas de Transmissão:  
Nó 1 = 0 %  
Nó 2 = 0 %  
Nó 3 = 0 %  
Nó 4 = 0 %  
Relação Geral de Transmissão = 0 % de pacotes perdidos.
```

Fonte: Autoria Própria.

Vale destacar que entre cada rodada, foi inserido um atraso no código de 250 ms, necessário para configuração de transmissão no NRF24, de forma a garantir a disponibilidade do *buffer* de recepção. O valor foi definido de forma empírica, sendo o primeiro valor satisfatório à aplicação. Caso não seja inserido um atraso entre as transmissões, muitos pacotes são perdidos, e a rede passa a apresentar muitas falhas na transmissão. Na Figura 46 é apresentado o resultado para a seleção aleatória sem inserir o atraso entre as transmissões.

Também foi observado que no caso de ocorrer instabilidades na rede elétrica, como no caso de utilização de contadoras para acionamento de cargas podem ser gerados arcos elétricos nos elementos de chaveamento, podendo aferar os módulos por meio de ruídos oriundos de interferência eletromagnética, provocando assim falhas na comunicação entre os nós sensores, visto que o transceptor é mais sensível a variações bruscas nos níveis de tensão de alimentação, mesmo ao utilizar uma fonte de alimentação com isolamento elétrico.

No primeiro nó não houve perda de pacotes, enquanto que no segundo houve 31 % de falhas, no terceiro houve 73 % de perda de pacotes e no quarto nó praticamente todos os pacotes foram perdidos, apresentando 91 % de falhas de transmissão. Realizando uma média entre os

Figura 46 – Falhas de transmissão para seleção aleatória sem inserir o atraso entre rodadas.

```
Resultados Obtidos:
  Total de Rodadas = 82
Falhas de Transmissão:
  Nó 1 = 0 %
  Nó 2 = 31 %
  Nó 3 = 73 %
  Nó 4 = 91 %
  Relação Geral de Transmissão = 52 % de pacotes perdidos.
```

Fonte: Autoria Própria.

quatro sensores, observou-se uma relação geral de 52 % de falhas de transmissão. Com isso, o atraso entre rodadas apresenta importância muito significativa para garantir a transmissão ao longo das rodadas.

Na sequência, foi realizado o mesmo procedimento de análise do tempo de vida e transmissão, mas dessa vez utilizando o algoritmo baseado em ACA. O resultado obtido é apresentado na Figura 47. Assim, foram obtidas 108 rodadas para as mesmas condições de limiar de consumo geral da rede. Tal valor corresponde a um aumento de 31,71 % no tempo de vida da rede, em comparação com um uso sem otimização. Também não foram observadas falhas de transmissão, confirmando que todos os nós se encontram dentro da cobertura do transceptor e que o código não provocou interferências nas transmissões.

Figura 47 – Rodadas e falhas de transmissão para algoritmo baseado em ACA.

```
Resultados Obtidos:
  Total de Rodadas = 108
  Nós Sensores Utilizados = 6
  Nós Sensores Não Utilizados = 0
Falhas de Transmissão:
  Nó 1 = 0 %
  Nó 2 = 0 %
  Nó 3 = 0 %
  Nó 4 = 0 %
  Relação Geral de Transmissão = 0 % de pacotes perdidos.
```

Fonte: Autoria Própria.

5.3.2 Consumo dos Nós Sensores

Como parte das análises, foi verificado o consumo de cada nó sensor após as rodadas. Para a seleção aleatória, mais de um sensor pode ser utilizado por rodada, o que reflete em um tempo de vida menor da rede.

Na Tabela 11 é apresentado o resultado obtido para o consumo de cada um dos nós sensores, utilizado o algoritmo de seleção aleatória.

Tabela 11 – Consumo em cada nó sensor para seleção aleatória.

| Consumo Nó 1 | Consumo Nó 2 | Consumo Nó 3 | Consumo Nó 4 |
|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1,19328 W | 1,67805 W | 1,4916 W | 1,64076 W |

Fonte: Autoria Própria.

Em uma primeira análise, percebe-se que nenhum dos nós sensores apresenta o mesmo consumo ao final das rodadas. O segundo nó apresentou um consumo superior, em decorrência de uma utilização maior, apresentando um consumo de 1,67805 W, enquanto que o menos utilizado foi o primeiro nó, com 1,19328 W, uma diferença de 0,48477 W. O nó 1 foi 40,625 % mais utilizado que o nó 2. Os nós 3 e 4 apresentaram consumo de 1,4916 W e 1,64076 W, respectivamente.

Neste algoritmo, todos os nós sensores apresentaram valor de consumo superior que o limiar de 1 W definido. Isso se deve ao fato de que em diversas rodadas foram utilizados mais sensores que o necessário. Por exemplo, em uma rodada na qual três sensores tenham sido utilizados, apenas o sinal de um será recebido pelo nó de chegada, perdendo a informação dos outros dois (que é a mesma). Isto ocorre devido a verificação do código no nó de chegada, no qual apenas a primeira mensagem é recebida, e pela verificação de redundância de mensagem (CRC) as mensagens dos demais nós são descartadas por serem idênticas. Com isso, o valor sobressalente ao limiar de 1 W em cada sensor corresponde ao desperdício do mesmo. No caso do segundo sensor, de 1,67805 W consumidos, os 0,67805 W acima do limiar foram desperdiçados em outras rodadas.

Para utilização do algoritmo baseado em autômatos, o resultado é apresentado na Tabela 12. Neste caso, percebe-se mais semelhança entre o consumo dos nós sensores. Apenas o nó 2 foi menos utilizado, apresentando consumo de 0,96954 W, enquanto os demais apresentaram consumo de 1,00683 W. Além disso, o limiar de 1 W por sensor foi respeitado, de forma que não houve a subutilização dos nós sensores em rodadas nas quais eles não eram necessários. Vale destacar que o único sensor que apresentou consumo ligeiramente inferior se deve ao fato do algoritmo garantir que o limiar global não seja ultrapassado.

Tabela 12 – Consumo para algoritmo baseado em ACA.

| Consumo Nó 1 | Consumo Nó 2 | Consumo Nó 3 | Consumo Nó 4 |
|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1,00683 W | 0,96954 W | 1,00683 W | 1,00683 W |

Fonte: Autoria Própria.

5.3.3 Utilização dos Nós Sensores

Em reflexo ao consumo individual de cada nó sensor, foi analisado quantas vezes cada nó sensor foi utilizado ao longo do tempo de vida da rede, em ambos os algoritmos. Para tanto, dividiu-se o consumo total pelo consumo em cada rodada, de 37,29 mW em cada transmissão.

Como nas demais análises, inicialmente foi verificada a utilização de cada um dos nós sensores para a seleção aleatória. O resultado é apresentado na Tabela 13. Novamente, vale destacar a discrepância entre os sensores 2 e 1, utilizados 45 e 32 vezes, respectivamente. Enquanto que os sensores 3 e 4 foram utilizados 40 e 44 vezes, respectivamente.

Tabela 13 – Utilização de cada nó sensor para seleção aleatória.

| Uso Nó 1 | Uso Nó 2 | Uso Nó 3 | Uso Nó 4 |
|----------|----------|----------|----------|
| 32 vezes | 45 vezes | 40 vezes | 44 vezes |

Fonte: Autoria Própria.

Para o algoritmo baseado em ACA, o resultado de utilização de cada nó sensor é apresentado na Tabela 14. Percebe-se uma utilização mais homogênea, em reflexo do consumo. O segundo nó foi utilizado 26 vezes, enquanto os demais foram utilizados 27 vezes. Percebe-se que os sensores são bem menos exigidos que na seleção aleatória, e ainda apresentando um tempo de vida bem maior. Tal análise reflete diretamente sobre a manutenção da rede. Sensores mais utilizados tendem a apresentarem defeito mais rapidamente, devido ao trabalho em sobrecarga em comparação aos demais.

Tabela 14 – Utilização de cada nó sensor para algoritmo baseado em ACA.

| Uso Nó 1 | Uso Nó 2 | Uso Nó 3 | Uso Nó 4 |
|----------|----------|----------|----------|
| 27 vezes | 26 vezes | 27 vezes | 27 vezes |

Fonte: Autoria Própria.

Com isso, caso os acionamentos ocorressem em um período de uma hora, a potência total consumida pelos quatro nós na seleção aleatória corresponderiam a 6,02 W, frente aos 4 W consumidos pelos mesmos quatro nós sensores no algoritmo baseado em ACA. O mesmo consumo se repetindo ao longo de 24 horas ao longo de um ano com 365 dias corresponde a 52,735 kW para a seleção aleatória e 35 kW para o algoritmo ACA. Considerando a tarifa local como R\$ 0,809, em um ano a seleção aleatória corresponderia a um custo total de R\$ 42,66 e para o modelo proposto R\$ 28,35. Logo, nesta situação haveria uma economia de R\$ 14,31, equivalente a uma redução de 33,54 % no total gasto.

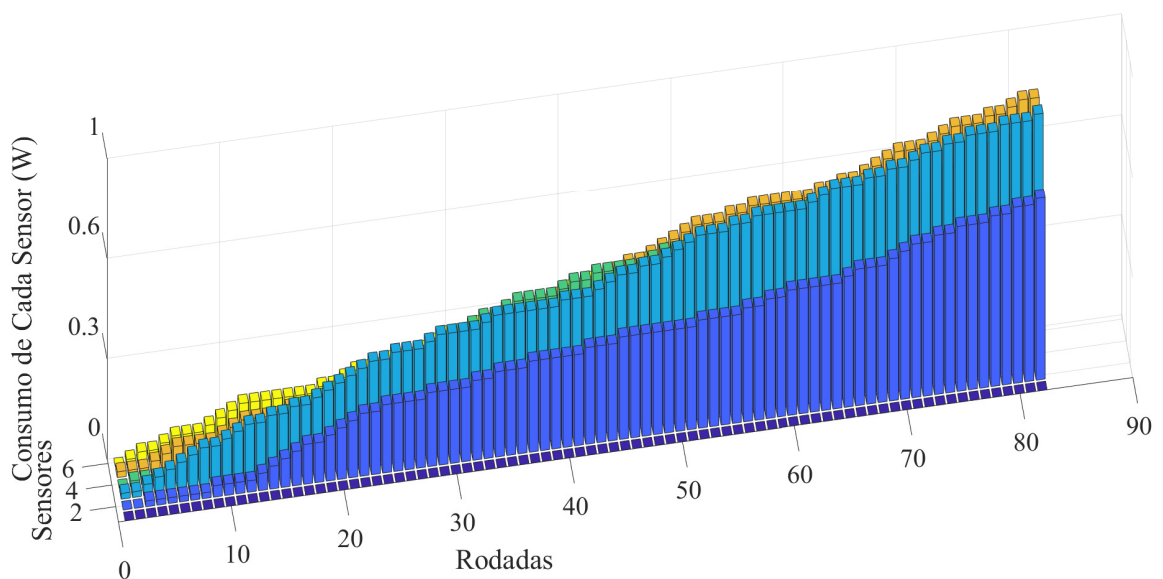
5.3.4 Homogeneidade da Rede

Por fim, foi analisada a homogeneidade da rede ao longo das rodadas. Conforme apresentado anteriormente, a utilização final dos nós sensores no algoritmo baseado em ACA foi

bem melhor distribuída do que em comparação com a seleção aleatória. Nesta seção tem-se um panorama geral dos nós sensores ao longo do tempo de vida da rede.

Para o algoritmo baseado em seleção aleatória os sensores apresentam utilização conforme ilustração apresentada na Figura 48. Novamente foi utilizado um gráfico de barras em três dimensões, na qual no eixo X tem-se cada um dos sensores que compõem a rede, no eixo Y tem-se as rodadas e no eixo Z tem-se o consumo acumulativo em ampère ao longo das transmissões.

Figura 48 – Distribuição do uso dos sensores ao longo das rodadas para a seleção aleatória.



Fonte: Autoria Própria.

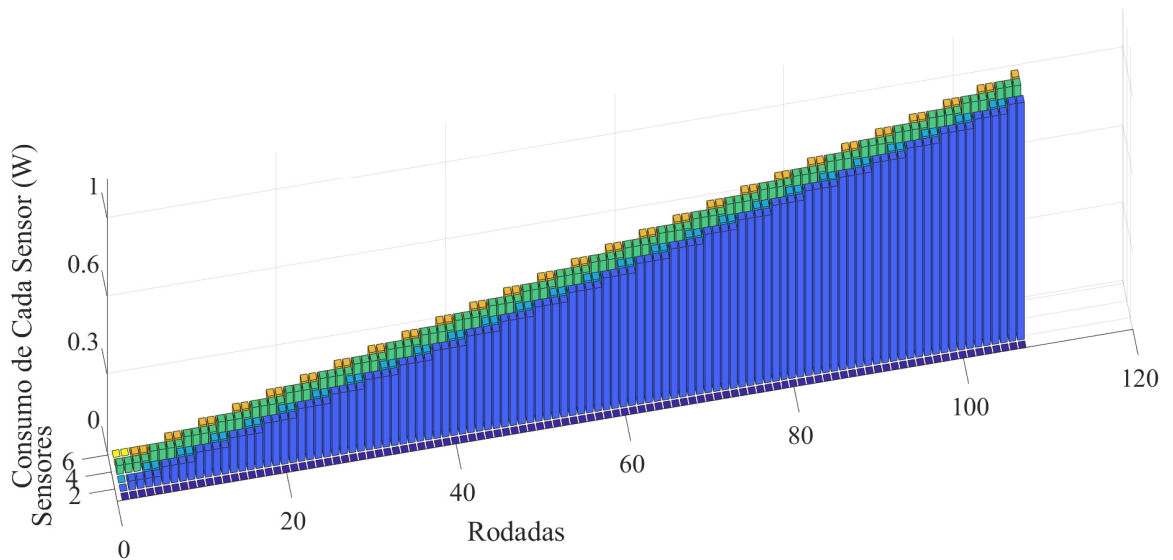
Logo no início, por volta da rodada 20, já percebe-se um uso bem mais acentuado do nó 2 em comparação ao nó 1. E ao final das 82 rodadas do tempo de vida da rede, tal diferença de uso fica ainda mais acentuada. O nó 2 acaba por ser tão utilizado, que o consumo dos nós 3 e 4 acaba por ser encoberto. Porém, tal gráfico ilustra como a rede é utilizada de forma desigual ao longo do tempo de vida da rede. Ao longo das utilizações, seria bem provável que o nó 2 apresentaria defeito bem mais rápido que os demais nós.

De forma semelhante, na Figura 49 é apresentado a utilização dos nós sensores ao longo das rodadas. Pode-se observar que ao longo das 108 rodadas os nós sensores são utilizados de forma bem mais semelhante e ao final do tempo de vida da rede, tem-se um consumo similar entre os elementos da rede, evidenciando a homogeneidade da rede. Tal fato é evidenciado com a tendência linear apresentada ao longo das transmissões, o que não foi observado ao longo das rodadas para o algoritmo baseado em seleção aleatória.

Consequentemente, os nós sensores são igualmente utilizados, evitando sobrecarga de operação entre os nós sensores e aumentando a vida útil dos módulos, ainda mais que os nós são

menos utilizados para um número maior de rodadas da rede.

Figura 49 – Distribuição do uso dos sensores ao longo das rodadas para o algoritmo baseado em ACA.



Fonte: Autoria Própria.

Por conseguinte, o método de otimização da rede de sensores sem fio baseada em ACA apresentou diversas melhoras em comparação com uma utilização sem otimização dos nós sensores. Assim, na Tabela 15 é apresentado um resumo dos resultados obtidos para os dois métodos, destacando o tempo de vida da rede, o máximo consumo e quantidade de vezes em que o sensor mais utilizado foi exigido na rede.

Vale destacar que na aplicação não foi explorado o modo de desligamento dos transceptores, visto que seria necessário inserir uma rotina de verificação do estado dos nós sensores, para que fosse possível trazer de volta ao modo ativo os nós que fossem desligados. Assim, quando não estavam transmitindo, os sensores permaneceram em modo de espera, com consumo de $32 \mu A$, ou $105 \mu W$.

Tabela 15 – Resumo dos resultados obtidos experimentalmente.

| Método | Tempo de Vida | Máx. Consumo | Máx. Utilização Sensores |
|-------------------|---------------|--------------|--------------------------|
| Seleção Aleatória | 82 rodadas | 1,67805 W | 45 vezes |
| Modelo Proposto | 102 rodadas | 1,00683 W | 27 vezes |

Fonte: Autoria Própria.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo para otimização do tempo de vida de uma rede de sensores sem fio, com base na utilização de autômatos ACA. Para tanto, foi realizado um levantamento bibliográfico de técnicas e modelagem com base em sistemas SED e aplicações envolvendo autômatos, analisando e categorizando os autômatos do tipo AC, AA e ACA.

Uma vez elaborado o modelo, foi realizada uma validação com base em propriedades dos autômatos e dos sistemas em geral, além da utilização de um programa para reconhecimento de linguagens em autômatos. E com o modelo validado, foi aplicado o algoritmo em um ambiente elaborado para simulação de uma rede de sensores RSSF, de forma a verificar o consumo e o tempo de vida para uma rede de 20 nós sensores.

Com isso, foram elaborados dois cenários de análise em simulação, envolvendo disposição de forma aleatória dos nós sensores. Para o primeiro cenário, foi verificado que a utilização e aplicação do algoritmo culminou em uma redução no consumo do grupo geral, devido a uma utilização de menos nós sensores para transmissão, em comparação com um algoritmo puramente aleatório e outro algoritmo apenas de formação da rota de cobertura. A utilização de menos nós sensores por rodada também correspondeu a um aumento do tempo de vida da rede com a utilização do modelo e em comparação. No segundo cenário foi verificada a característica do algoritmo de formar rotas para uma mesma distribuição de sensores, na qual foi verificado um aumento no tempo de vida com relação ao cenário 1, devido ao fato das penalidades ocorrerem sequencialmente e não de forma pontual como no cenário anterior.

Logo, as ponderações propostas no modelo na forma de penalidades ou bonificação trouxeram melhorias em comparação com os demais métodos aplicados à distribuição da RSSF. Em comparação com uma seleção e formação de rotas de forma puramente aleatória houve uma redução de 67,54 % no consumo médio do grupo. Em comparação com uma formação de rotas sem ponderação houve uma redução de 21,4 % no consumo do grupo. Assim, o modelo apresentou um avanço tanto no consumo médio do grupo, com um desvio padrão menor, quanto uma utilização de forma mais homogênea dos nós sensores e consequentemente um aumento no tempo de vida.

Também foi realizada uma análise experimental do modelo proposto. Para tanto, utilizou-se dois nós sensores coordenadores e quatro nós sensores intermediários. Seguindo as análises em simulações, observou-se um tempo de vida bem maior em comparação com um algoritmo sem otimização. O aumento no tempo de vida observado foi de 31,71 %.

Como dificuldades observadas para elaboração do projeto, destaca-se a sensibilidade dos transceptores à rede elétrica e condições gerais de transmissão. Flutuações de energia e instabilidades na rede provocavam falhas na comunicação. Além disso, deve-se atentar para

que o algoritmo respeite o tempo necessário para recebimento dos pacotes nos nós sensores, inserindo-se atrasos entre as transmissões para evitar perdas de pacotes.

Para trabalhos futuros pode-se destacar: a utilização de mais nós sensores na rede, para que seja possível também avaliar a formação de rotas iniciais; aplicação em cenários com obstáculos, para análise da influência na relação de pacotes enviados; além da exploração do modo de desligamento dos transceptores, o que pode representar uma economia de energia ainda maior, visto que os transceptores operam a 900 nA (correspondente a $2,97 \mu\text{W}$, em 3,3 V) neste modo.

REFERÊNCIAS

- AKYILDIZ, I. F. et al. Wireless sensor networks: a survey. *Computer networks*, Elsevier, v. 38, n. 4, p. 393–422, 2002. Citado na página 35.
- ATMEL. *ATmega328P - 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash*. [S.l.: s.n.], 2015. Citado 2 vezes nas páginas 53 e 54.
- BAIER, C.; KATOEN, J.-P. *Principles of model checking*. [S.l.]: MIT press, 2008. Citado na página 48.
- CARVALHO, L. K. *Diagnose robusta de sistemas a eventos discretos*. Tese (Doutorado) — Tese (Doutorado em UFRJ COPPE-PEE Programa de Engenharia Elétrica ...), 2011. Citado na página 26.
- CASSANDRAS, C. G.; LAFORTUNE, S. *Introduction to discrete event systems*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2009. Citado 7 vezes nas páginas 21, 22, 23, 24, 26, 27 e 40.
- CASTRO, M. L. A.; CASTRO, R. de O. Autômatos celulares: implementações de von neumann, conway e wolfram. *Revista de Ciências Exatas e Tecnologia*, v. 3, n. 3, p. 89–106, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 28, 29 e 30.
- COSTA, A. A. F. da; LIMA, P. R. B. D. Automação residencial com foco no consumo consciente de energia elétrica. *Revista do CCEI*, v. 19, n. 34, p. p–19, 2017. Citado na página 18.
- DZOGOVIC, B. et al. Enabling smart home with 5g network slicing. In: . [S.l.: s.n.], 2019. Citado na página 17.
- ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32 Series Datasheet - version 3.3*. [S.l.: s.n.], 2020. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 55.
- HO, Y. . Introduction to special issue on dynamics of discrete event systems. *Proceedings of the IEEE*, v. 77, n. 1, p. 3–6, Jan 1989. ISSN 0018-9219. Citado na página 26.
- INOVATHYS. *Inovathys - Sistemas Inteligentes*. 2020. [Http://vps276651.vps.ovh.ca/](http://vps276651.vps.ovh.ca/). Acesso em: 17/01/2020. Citado 3 vezes nas páginas 56, 59 e 60.
- JUNIOR, N. G. R.; ORBOLATO, D. R. S.; NEPOMUCENO, R. M. *Simulador de Autômatos*. 2009. [Http://www.simuladordeautomatos.com.br/home](http://www.simuladordeautomatos.com.br/home). Acesso em: 29/07/2019. Citado na página 47.
- JÚNIOR, W. A. S. et al. Diagnóstico de falhas baseado em autômatos temporizados: aplicação em um sistema modular de manufatura. Universidade Federal de Sergipe, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 17, 18 e 26.
- LATHI, B. P. *Sinais e Sistemas Lineares-2*. [S.l.]: Bookman, 2006. Citado na página 21.
- LEITE, L. S. Autômatos celulares para otimização de cenários em gerenciamento de recursos de energia. 2016. Citado na página 29.
- LIM, J. et al. Caspre: A context-aware standby power reduction scheme for household appliances. In: . [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6. Citado na página 69.

LOUREIRO, A. A. et al. Redes de sensores sem fio. In: SN. *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*. [S.l.], 2003. p. 179–226. Citado na página 56.

MANJU; CHAND, S.; KUMAR, B. Target coverage heuristic based on learning automata in wireless sensor networks. *IET Wireless Sensor Systems*, v. 8, n. 3, p. 109–115, 2018. ISSN 2043-6386. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 35.

MANJU; CHAND, S.; KUMAR, B. Target coverage heuristic based on learning automata in wireless sensor networks. *IET Wireless Sensor Systems*, v. 8, n. 3, p. 109–115, 2018. ISSN 2043-6386. Citado 5 vezes nas páginas 30, 31, 32, 66 e 68.

MARCHESAN, M. Sistema de monitoramento residencial utilizando a plataforma arduino. *Santa Maria*, p. 17–19, 2012. Citado na página 53.

MELOTTI, G. Aplicação de autômatos celulares em sistemas complexos: Um estudo de caso em espalhamento de epidemias. *MACSIN-UFMG, Belo Horizonte*, 2009. Citado na página 17.

MOHAMADI, H.; ISMAIL, A. S.; SALLEH, S. Solving target coverage problem using cover sets in wireless sensor networks based on learning automata. *Wireless Personal Communications*, v. 75, n. 1, p. 447–463, Mar 2014. ISSN 1572-834X. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11277-013-1371-x>>. Citado na página 32.

MORALES, R. A. G. *Modelagem e análise de sistemas flexíveis de manufatura tolerantes à falhas baseado em rede Bayesiana e rede de Petri*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 17, 24 e 25.

MOSTAFAEI, H.; OBAIDAT, M. S. Learning automaton-based self-protection algorithm for wireless sensor networks. *IET Networks*, IET, v. 7, n. 5, p. 353–361, 2018. Citado na página 18.

MOSTAFAEI, H.; OBAIDAT, M. S. Learning automaton-based self-protection algorithm for wireless sensor networks. *IET Networks*, v. 7, n. 5, p. 353–361, 2018. ISSN 2047-4954. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.

MURATA, T. Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 77, n. 4, p. 541–580, 1989. Citado na página 47.

NAKAMURA, F. G. et al. Planejamento dinâmico para controle de cobertura e conectividade em redes de sensores sem fio. In: *Workshop de Comunicação sem Fio e Computação Móvel*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 1, p. 182–191. Citado na página 36.

OLIVEIRA, E. *Como usar com Arduino – Módulo Transceptor Wireless 2.4GHz NRF24L01*. 2019. <https://blogmasterwalkershop.com.br/arduino/como-usar-com-arduino-modulo-transceptor-wireless-2-4ghz-nrf24l01/>. Acesso em: 16/01/2019. Citado na página 56.

SEMICONDUCTOR, N. *nRF24L01 Single Chip 2.4GHz Transceiver Product Specification*. 2007. <https://datasheet.octopart.com/NRF24L01-Nordic-Semiconductor-datasheet-10541936.pdf>. Acesso em: 30/07/2019. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 55.

SILVA, M. S. d. et al. Rede de sensores sem fio de baixo custo para monitoramento ambiental. [sn], 2013. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.

SOUZA, T. R. B. *Eficiência energética de redes de sensores sem fio aplicada ao conforto térmico em ambientes fechados*. Dissertação (Mestrado), 2014. Faculdade de Tecnologia. Disponível em: <<http://tede.ufam.edu.br/handle/tede/3296>>. Citado na página 35.

TEIXEIRA, A. F. S.; VISOTO, N. A. R.; PAULISTA, P. H. Automação industrial: Seus desafios e perspectivas. *Revista Científica da FEPI-Revista Científic@ Universitas*, 2016. Citado na página 17.

THIRUPATHI, V.; SAGAR, K. Implementation of home automation system using mqtt protocol and esp32. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) ISSN*, p. 2249–8958, 2018. Citado na página 54.

TSE, D.; VISWANATH, P. *Fundamentals of wireless communication*. [S.l.]: Cambridge university press, 2005. Citado na página 33.

WEIMAR, J. R. *Simulation with cellular automata*. [S.l.]: Logos-Verlag, 1997. Citado na página 29.