



Universidade Estadual de Feira de Santana
Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada

UM MODELO PARAMETRIZÁVEL DE CONSUMO DE ENERGIA PARA ESTIMATIVAS DE DESEMPENHO EM REDES DE SENSORES VISUAIS SEM FIO

Marcos Vinicius Bião Cerqueira

Feira de Santana

2018



Universidade Estadual de Feira de Santana
Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada

Marcos Vinicius Bião Cerqueira

**UM MODELO PARAMETRIZÁVEL DE
CONSUMO DE ENERGIA PARA
ESTIMATIVAS DE DESEMPENHO EM REDES
DE SENSORES VISUAIS SEM FIO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Feira de Santana como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Computação Aplicada.

Orientador: Daniel Gouveia Costa

Feira de Santana

2018

Ficha Catalográfica - Biblioteca Central Julieta Carteado

C395m Cerqueira, Marcos Vinicius Bião
Um modelo parametrizável de consumo de energia para estimativas de desempenho em Redes de Sensores Visuais Sem Fio / Marcos Vinicius Bião cerqueira. - 2018.
70 f.: il.

Orientador: Daniel Gouveia Costa.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Feira de Santana, Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada, 2018.

1. Redes de Sensores Visuais Sem Fio – Modelo matemático. 2. Energia – Consumo. I. Costa, Daniel Gouveia, orient. II. Universidade Estadual de Feira de Santana. III. Título.

CDU: 004.722

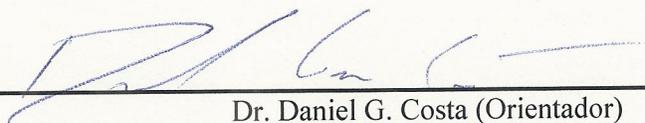
Marcos Vinicius Bião Cerqueira

Um modelo parametrizável de consumo de energia para estimativas de desempenho em redes de sensores visuais sem fio

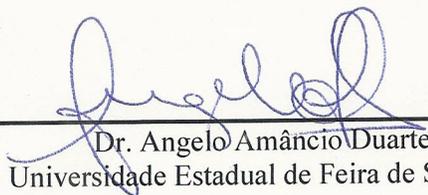
Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Feira de Santana como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Computação Aplicada.

Feira de Santana, 27 de março de 2018

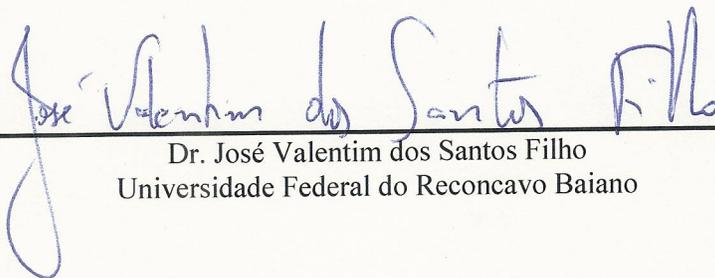
BANCA EXAMINADORA



Dr. Daniel G. Costa (Orientador)
Universidade Estadual de Feira de Santana



Dr. Angelo Amâncio Duarte
Universidade Estadual de Feira de Santana



Dr. José Valentim dos Santos Filho
Universidade Federal do Recôncavo Baiano

Abstract

Wireless Sensor Networks (WSN) are composed of several devices, powered by batteries, distributed by the monitored area, where the use of internet networks is not applied. They have been gaining a lot of space because of the flexibility of applications and their low implementation cost. With the improvement and cheapening of sensors equipped with cameras, and with their integration with the WSN, the Wireless Visual Sensors Networks (WVSN) have appeared, increasing, thus, the possibilities of possible applications. However, visual data demand greater processing in their actions, potentially generating a greater energy consumption, making it necessary to better evaluate the useful life for the network. Therefore, this paper proposes to develop a mathematical model suitable for wireless visual sensor network that can estimate energy consumption. In addition, a tool was developed that implemented the proposed model, which in turn, was promising, obtaining satisfactory results, mainly in the area of image capture.

Keywords: Model, Energy, Visuals Sensor

Resumo

Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) são compostas por vários dispositivos, alimentados por baterias, distribuídos pela área monitorada, onde o uso de redes de internet não é aplicado. Elas vêm ganhando muito espaço devido a flexibilidade de aplicações e do seu baixo custo de implementação. Com o melhoramento e barateamento de sensores equipados com câmeras, e com a sua integração com as RSSF, surgiram as Redes de Sensores Visuais em Fio (RSVSF), aumentando, assim, as possibilidades de aplicações possíveis. Todavia, dados visuais demandam maior processamento em suas ações, gerando potencialmente um maior consumo energético, fazendo-se então necessário uma melhor avaliação do tempo de vida útil para a rede. Portanto, esse trabalho se propõe a desenvolver um modelo matemático próprio para rede de sensores visuais sem fio que possa estimar consumo de energia. Além disso, foi desenvolvido uma ferramenta que implementasse o modelo proposto. O modelo proposto se mostrou promissor, obtendo resultados satisfatórios, principalmente no quesito de captura de imagens.

Palavras-chave: Modelo, Energia, Sensores Visuais

Prefácio

Esta dissertação de mestrado foi submetida a Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS) como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Computação Aplicada.

A dissertação foi desenvolvido dentro do Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada (PGCA) tendo como orientador o Dr. **Daniel Gouveia Costa**.

Esta pesquisa foi financiada pela Fapesb.

Agradecimentos

Primeiramente aos meu pais por todo o apoio até o presente momento.

À minha esposa, Luana, por está sempre ao meu lado.

Ao professor Daniel G. Costa por me aceitar como orientado e me ajudar nessa árdua tarefa.

à João Vitor pela ajuda no processo de medição no Raspberry.

À Fapesb pelo financiamento parcial do projeto.

Sumário

Abstract	i
Resumo	ii
Prefcio	iii
Agradecimentos	iv
Sumário	vi
Lista de Tabelas	vii
Lista de Figuras	viii
Lista de Abreviações	ix
Lista de Símbolos	x
1 Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Justificativa	2
1.3 Objetivo	3
2 Fundamentação teórica	4
2.1 Rede de Sensores Sem Fio	4
2.2 Rede de Sensores Visuais Sem Fio	9
2.3 Questões energéticas	10
2.3.1 Consumo de energia	11
2.3.2 Recarga de energia	15
2.3.3 Pesquisas em recarga de energia	17
2.4 Modelagem de consumo de energia	18
2.5 Redes de Petri	21
2.5.1 Propriedades da Rede de Petri	22
2.5.2 Extensões para Rede de Petri	22
2.5.3 Aplicações com Rede de Petri	23

3	Modelo matemático proposto	25
3.1	Definições e formalismos	27
3.2	Configurações iniciais do modelo	29
3.3	Modelagem do consumo de energia	30
3.3.1	Módulo de captura	30
3.3.2	Módulo de codificação	32
3.3.3	Módulo de criptografia	35
3.3.4	Módulo de paquetização	37
3.4	Considerações finais do modelo	39
4	Resultados	41
4.1	Ferramenta para verificação do modelo	41
4.2	Hardwares pré-tabelados	43
4.2.1	CMOS OV7670 Camera Module	43
4.2.2	CMOS QSXGA OV5640 image sensor	43
4.2.3	Mica 2	44
4.3	Cenários de teste	44
4.3.1	Cenário 1	45
4.3.2	Cenário 2	46
4.4	Análise e discussões	49
5	Considerações finais	52
	Referências Bibliográficas	54

Lista de Tabelas

3.1	Tabela dos algoritmos de encriptação	36
3.2	Parâmetros de configuração.	39
4.1	Custo das ações para câmera ov7670.	43
4.2	Custo das ações para câmera ov5640.	44
4.3	Valores para o microcontrolador Mica2 Motes.	44
4.4	Medições de consumo do Raspberry Pi 2.	47
4.5	Consumo de energia de instruções do Raspberry Pi 2.	49
4.6	Consumo de energia de instruções do Raspberry Pi 2.	49

Lista de Figuras

2.1	Esquema dos principais componentes do nó sensor.	5
2.2	Funcionamento de uma RSSF.	6
2.3	Exemplo de uma Rede de Petri.	22
3.1	Modelo global.	25
3.2	Módulos possíveis e fluxo lógico para os nós fontes.	27
3.3	Modelo genérico proposto para entrada e saída de dados.	28
3.4	Rede de Petri do modelo proposto.	29
3.5	Esquema do módulo de captura.	30
3.6	Esquema do módulo de codificação.	32
3.7	Esquema do módulo de criptografia.	35
3.8	Esquema do módulo de paquetização.	37
4.1	Tela principal da ferramenta.	41
4.2	Tela de configuração para as variáveis do sensor.	41
4.3	Configuração dos aspectos de captura.	42
4.4	Configuração dos aspectos referentes a paquetização.	42
4.5	Exemplo de um resultado possível da ferramenta.	43
4.6	Câmara OV7670.	43
4.7	Câmara OV5647.	44
4.8	Configuração da escolha da etapa de captura.	45
4.9	Configuração da escolha da etapa de paquetização.	45
4.10	Configuração da escolha da etapa de codificação e criptografia.	45
4.11	Resultados do cenário 01.	45
4.12	Ligação elétrica do INA219.	46
4.13	Esquema de hardwares.	46
4.14	Código assembly do <i>script</i> de multiplicação.	48

Lista de Abreviações

Abreviação	Descrição
CH	Cluster Head
DCT	Discrete Cosine Transform
DWT	Discrete Wavelet Transform
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
QoS	Quality of Service
RFID	Radio Frequency Identification
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio
RSVSF	Rede de Sensores Visuais Sem Fio

Lista de Símbolos

Símbolo	Descrição
ϵ_{add}	Energia consumida pelo nó sensor com instrução de adição
ϵ_{and}	Quantidade de energia consumida por uma instrução <i>and</i>
ϵ_{div}	Energia consumida com instrução de divisão
ϵ_{mult}	Energia consumida pelo nó sensor com instrução de multiplicação
ϵ_{or}	Quantidade de energia consumida por uma instrução <i>or</i>
ϵ_r	Energia consumida pelo nó sensor com instrução de ROUND
ϵ_{rmem}	Energia consumida para ler 1 byte da memória flash
ϵ_{shift}	Quantidade de energia consumida por uma instrução <i>shift</i>
ϵ_{wmem}	Energia consumida para escrever 1 byte na memória flash
cc	Quantidade de energia consumida pela câmera para processar 1 byte
co	Constante que identifica a coloração da imagem
E_{dct}	Energia consumida com a transformada 2D DCT
E_{dwt}	Energia consumida no processo de codificação Jpeg2000
E_{huf}	Energia consumida na etapa de Huffman
E_p	Energia consumida em todo o processo de codificação Jpeg
E_q	Energia consumida na quantização
E_{rle}	Energia consumida na etapa RLE
E_z	Energia consumida na etapa de zigzag
Em_c	Quantidade de energia consumida pelo processo de captura das informações
$Em_{(d)}$	Quantidade de energia consumida pelo processo de codificação das informações
$Em_{(p)}$	Quantidade de energia consumida pelo processo de paquetização de divisão dos dados em pacotes
Em_y	Quantidade de energia consumida pelo processo de codificação das informações
fr	Frequência de captura
k	Tamanho do bloco
M	São as dimensões, em pixels, da imagem a ser codificada
np	Número total de pacotes gerados
n_b	Tamanho do bloco utilizado
n_r	Número de interações por bloco
N	Dimensão da imagem a ser codificado

<i>nbl</i>	Quantidade de blocos a ser encriptado
<i>o</i>	Reconstrutor da imagem
<i>Qb</i>	Quantidade de bytes gerada no módulo anterior
<i>Qs</i>	Quantidade de bytes produzidas no módulo atual (será a entrada de dados do módulo seguinte)
<i>qtd</i>	Quantidade de capturas realizadas no processo
<i>r</i>	Resolução da câmera
<i>T</i>	Quantidade de interações
<i>tb</i>	Total de bytes a ser transmitido
<i>ts</i>	Tempo de simulação
<i>TipoCod</i>	Identificação de qual codificação será utilizada
<i>TipoCripto</i>	Indicação de qual criptografia usar
<i>up</i>	Tamanho do último pacote
<i>z</i>	Cabeçalho do pacote

Capítulo 1

Introdução

Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) são redes *ad hoc*, redes que não possuem um nó centralizador, comumente compostas por vários dispositivos alimentados por baterias, sendo destinadas a aplicações de monitoramento, nas quais o uso da rede Internet não é indicado [Costa et al. 2015]. Esses dispositivos são pequenos e apresentam capacidades computacionais limitadas, podendo perceber, medir e coletar informações do meio onde se encontram e, com base nessas informações, podem tomar algum tipo de decisão [Yick et al. 2008].

As RSSF vêm ganhando muito espaço devido ao baixo custo de implementação e sua flexibilidade de aplicações [Machado e Souza 2013], podendo ser utilizadas em diversas áreas, como, por exemplo, monitoramento de ambientes e automação residencial [Lacerda e Lima 2011].

Com o melhoramento e barateamento de sensores equipados com câmeras e microfones, e com a sua integração com as RSSF, surgiram as Redes de Sensores Visuais Sem Fio (RSVSF). Com isso, aumentaram-se as possibilidades de aplicações, como vigilância, rastreamento e localização. Contudo, transmissão de dados visuais requer uma maior banda de comunicação do que transmissão de dados escalares, além de demandar maior processamento em suas ações, gerando um potencial maior consumo energético [Costa 2013].

De modo geral, a transmissão de imagens requer uma quantidade elevada de recursos, em relação à realidade dos nós sensores que transmitem dados escalares. Com isso, o desempenho energético deve ser prioritário no desenvolvimento do projeto, levando em consideração que o tempo operacional da rede é proporcional à quantidade de energia remanescente nos nós da rede.

Para propor métodos que possam minimizar o gasto de energia em RSSF, é preciso compreender com exatidão as características de consumo energético dos nós da rede. Com esse intuito, é possível desenvolver modelos matemáticos que podem estimar, com precisão, o consumo de energia de um nó sensor [Shareef e Zhu 2010]. Assim, os

modelos podem ser usados então como ferramentas para estimativas de desempenho nesse quesito.

Desenvolver um sistema complexo, sem antes estimar o seu comportamento, pode ocasionar diversos problemas durante a execução. Projetar uma rede é uma forma de planejar o que será desenvolvido, ajudando profissionais e pesquisadores a entenderem como será o seu funcionamento. Além disso, os custos de implantação de uma rede de sensores podem ser elevados, dependendo do seu tamanho e complexidade, então é necessário que o projeto esteja bem ajustado para não haver gastos desnecessários.

Existem algumas formas de validar um projeto de rede de sensores. Uma delas é implantar uma rede real em escala reduzida. Esse método pode trazer resultados confiáveis, contudo, implementar uma rede, apenas para validação, pode ser um desperdício de recursos, levando em consideração o material necessário, as pessoas envolvidas e o tempo para testes. Outra maneira é utilizar simulações computacionais com algum software específico, que apesar de apresentar resultados satisfatórios, em parte dos casos, pode requerer configurações de todo o ambiente de simulação. Além disso, pode levar um tempo considerável para tornar a simulação mais parecida com uma situação real e, geralmente, necessita-se de alto poder computacional para executá-la. Por outro lado, um modelo matemático apresenta-se como uma solução viável para validação de redes. Com um computador simples, é possível realizar testes de forma rápida, modificando apropriadamente os parâmetros de configurações.

1.1 Motivação

Para a implantação adequada de redes de sensores visuais sem fio, é necessário realizar estudos que consigam verificar por quanto tempo a rede permanecerá ativa. Utilizando modelos matemáticos, é possível testar protocolos, algoritmos e analisar quais os mais indicados para cada projeto. Os modelos existentes na literatura abrangem as redes de sensores sem fio convencionais, porém quando trabalha-se com dados visuais, é necessário fazer adaptações que podem gerar resultados pouco confiáveis.

A literatura traz várias equações para o cálculo do consumo de energia de nós sensores, porém, essas equações calculam aspectos pontuais de consumo, como, por exemplo, codificação e transmissão. Elas encontram-se dispersas entre dezenas de trabalhos publicados.

1.2 Justificativa

O consumo de energia é um dos pontos mais críticos em uma rede de sensores sem fio. Por muitas vezes a rede torna-se inativa prematuramente por gasto excessivo de

energia, sobretudo porque os nós sensores irão operar geralmente com o uso de baterias. A literatura traz vários métodos que possibilitam estimar o gasto energético de uma RSSF. Dentre esses métodos, pode-se evidenciar os modelos matemáticos. Muitos modelos matemáticos vêm sendo propostos para redes de sensores sem fio, porém nenhum desenvolvido especificamente para redes visuais. Alguns pesquisadores tentam adaptar modelos já existentes utilizando um maior número de pacotes, para representar a transmissão de imagens, por exemplo. Entretanto, devidas as aproximações necessárias, os resultados se distanciam de uma situação real. Para que os resultados sejam mais satisfatórios, é necessário desenvolver um modelo próprio para um nó sensor visual sem fio.

Com o resultado desse trabalho, pesquisadores e profissionais poderão utilizar o modelo apresentado para otimizar e avaliar por quanto tempo as RSSF permanecerão ativas. Com a análise mais apurada do consumo energético, pode-se organizar melhor a rede, diminuindo a quantidade de nós sensores usados, reduzindo o custo de implementação e o impacto ambiental esperado.

1.3 Objetivo

Esse trabalho desenvolveu um modelo matemático parametrizável e unificado de um nó fonte visual sem fio para estimar os gastos energéticos dos dispositivos, que envolvam desde a captura dos dados, passando por codificações e criptografia, até a etapa de paquetização dos dados. Optou-se por utilizar o método de Rede de Petri por apresentar o formalismo necessário para o problema em questão.

Capítulo 2

Fundamentação teórica

Esse trabalho envolve a modelagem de um nó sensor visual sem fio para estimativa de energia. Então é necessário estabelecer alguns pontos sobre as redes de sensores visuais sem fio e sobre consumo de energia.

2.1 Rede de Sensores Sem Fio

As RSSF diferem das redes de computadores tradicionais em diversos aspectos [Loureiro et al. 2003]. Elas, geralmente, possuem um grande número de nós distribuídos, restrições de energia e podem possuir mecanismos de auto configuração adaptativa. Essas redes podem está equipadas com os mais diversos sensores, como pressão, luminosidade, calor, entre outros.

Tipicamente, as RSSF são redes *ad hoc* que têm como característica a não uniformidade em suas localizações dos nós da rede e comunicações entre eles. Essa abordagem permite que os nós da rede possam se comunicar diretamente entre si ou através de múltiplos saltos dentro da rede de transmissores e receptores sem fio, excluindo a necessidade de uma infra-estrutura fixa [Corrêa et al. 2006]. Uma das grandes propostas nessas redes é a forma que os fenômenos naturais são observados, acreditando-se em uma considerável melhora na precisão da informação conduzindo a uma melhor compreensão de tais fenômenos [Santi 2005]. Em contra partida, redes tradicionais transmitem seus dados através de roteadores com endereçamento IP (*Internet Protocol*).

Um nó sensor possui cinco componentes principais : bateria, memória, processador, transceptor e dispositivo de sensoriamento. A bateria armazena a energia disponível para o dispositivo, geralmente possuem pouca capacidade e pouca possibilidade de reposição. A memória e o processador têm tamanho e velocidades reduzidas devido ao tamanho físico do sensor [Lima 2015]. Os dispositivos de sensoriamento são os elementos responsáveis por capturar as informações da área de estudo e podem ser

classificados como terrestres, subterrâneos ou aquáticos [Yick et al. 2008], podendo ser classificados também como analógicos e digitais [Wendling 2012]. A Figura 2.1 mostra esse esquema.

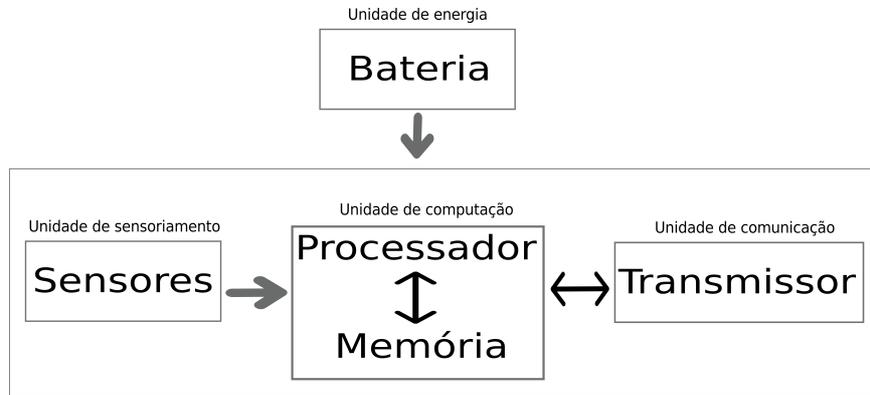


Figura 2.1: Esquema dos principais componentes do nó sensor.

Os sensores do tipo terrestres são colocados na superfície, seja próximo ao solo, em árvores ou postes, por exemplo, podendo ser implantados de forma *ad hoc* ou de forma pré-planejada [Yick et al. 2008]. Uma comunicação confiável pode ser estabelecida em um ambiente denso de sensores, fazendo com que os dados sejam enviados a estação base. A problemática energética pode ser reduzida utilizando placas solares para o recarregamento da energia, por exemplo.

Sensores subterrâneos são nós sensores enterrados no solo, implantados em minas ou em cavernas, tendo o intuito de monitorar as condições subterrâneas [Yick et al. 2008]. Esse nó sensor é mais caro se comparado com do tipo terrestre, tanto em termos de equipamento, da implantação e da manutenção. Isso ocorre porque é necessário garantir a comunicação entre os nós através do solo, rocha e água, tornando a perda de sinal um desafio [Yick et al. 2008]. Como em redes subterrâneas é difícil realizar a substituição de baterias ou recarga-las, se faz necessário o uso de protocolos eficientes para aumentar o tempo de vida útil da rede. A tecnologia atual consiste em conectar os sensores enterrados com um registrador de dados localizado na superfície [Akyildiz e Stuntebeck 2006].

Sensores subaquáticos consistem em nós sensores implantados em baixo da água. Esse tipo de sensor é mais caro do que sensores terrestres e menos nós são utilizados [Yick et al. 2008]. É possível utilizar comunicação sem fio através de ondas acústicas ou pode-se utilizar um veículo submarino autônomo para fazer a coleta dos dados [Yick et al. 2008]. Como não é possível realizar troca de baterias nem recarga das mesmas, energia é um ponto crucial nesse tipo de rede [Chen et al. 2009].

Sensores analógicos são aqueles que podem fornecer qualquer valor dentro de sua faixa de operação. Sensores de temperatura, luminosidade e de umidade são exemplos de sensores analógicos. Já sensores digitais só possuem dois resultados possíveis

0 ou 1. Sabe-se que não existe grandeza física que assuma esses valores, mas são convertidos por um circuito eletrônico [Wendling 2012].

RSSF possuem uma estação base, conhecida também por *sink*. O *sink* pode tanto ser um computador pessoal quanto um servidor. Ele é responsável por coletar os dados da rede, sendo que, os nós mais próximos ao *sink* são responsáveis por encaminhar os dados de toda a rede para o *sink* [Peixoto et al. 2015], fazendo esses nós esgotarem sua energia mais rapidamente. O *sink* não terá restrições de armazenamento, processamento e nem energia [Karl e Willig 2007]. A Figura 2.2 exemplifica o seu funcionamento.

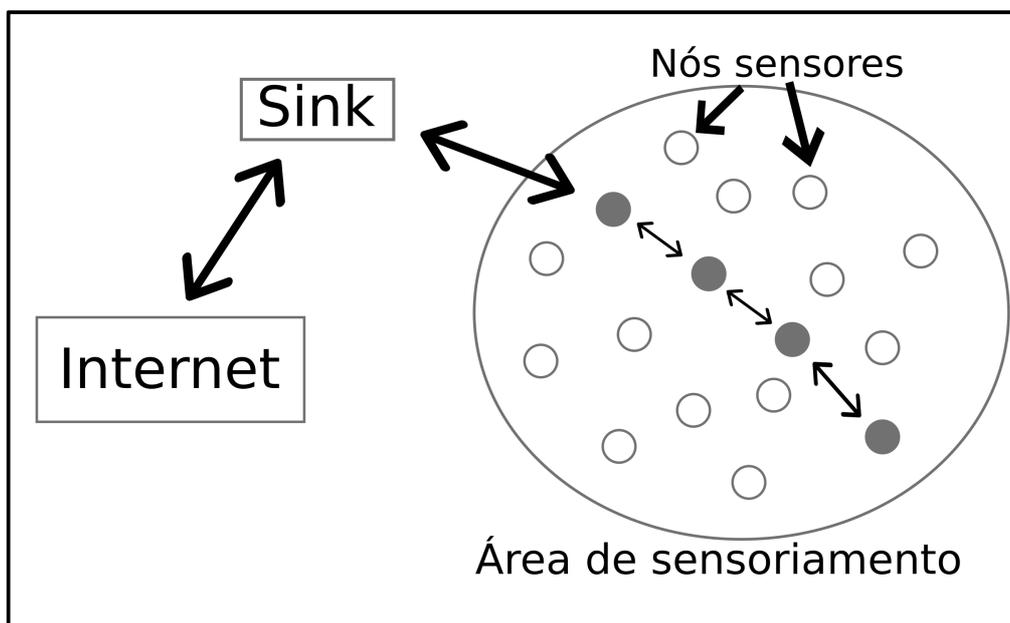


Figura 2.2: Funcionamento de uma RSSF.

As RSSF têm potencial para possibilitar o desenvolvimento de várias aplicações [Akyildiz et al. 2007b]. Essas aplicações podem ser classificadas em dois grandes grupos: monitoramento e rastreamento.

As aplicações de monitoramento incluem monitoramento ambiental, de saúde, abalos sísmicos e automatização de processos industriais [Yick et al. 2008]. Alguns exemplos são apresentados a seguir:

- Zebranet: Essa aplicação consiste em implantar um colar com sensores nas zebras. O colar fornecia, periodicamente, a posição geográfica das zebras, onde pode-se fazer um estudo do seu comportamento de movimentação e pastoreio [Juang et al. 2002]. Em intervalos regulares, um carro ou um avião passa pelo local recolhendo os dados dos colares [Romer e Mattern 2004], funcionando como um *sink* móvel;

- Great Duck Island: Essa aplicação visa a observação do comportamento de reprodução de pequenos pássaros. Os nós sensores são instalados dentro das tocas que medem a umidade, pressão, temperatura e luminosidade [Romer e Mattern 2004]. Cada *cluster* de rede é equipado com uma antena direcional de longo alcance que conecta o *cluster* a um computador na estação base [Romer e Mattern 2004];
- ARGO: Essa rede se propõe a observar a temperatura, salinidade e o perfil das correntes marítimas do oceano superior. O objetivo é a visão quantitativa do oceano e os padrões de variabilidade do clima [Romer e Mattern 2004]. Os nós são dispersados por aviões ou navios e os dados são transmitidos para um satélite [Romer e Mattern 2004]. O tempo de vida útil dos nós sensores é de quatro a cinco anos.

Já as aplicações de rastreamento incluem rastreamento de objetos, animais, veículos e pessoas [Yick et al. 2008]. Várias aplicações como acompanhamento e vigilância de alvos militares, observação de desastres naturais e explorações em ambiente perigoso também podem ser realizados [Akyildiz et al. 2007a], como por exemplo:

- RSSF está sendo utilizado para rastrear tanques de guerra. Para isso a rede deve ser imperceptível e difícil de ser destruída [Romer e Mattern 2004]. Os nós sensores são implantados por um drone e são equipados com sensores de magnetômetro, podendo determinar estimativas de percurso e velocidade do tanque. Os resultados do rastreamento são enviados para o drone;
- Jogos estão emergindo como uma atividade recreativa popular. As RSSF encontrarão aplicações em protótipos futuros que melhorem o efeito do ambiente de jogo para os jogadores. Como exemplo, os jogos de realidade virtual que assimilam as entradas de toque e visão do usuário como parte da resposta do jogador precisam retornar dados multimídia sob restrições de tempo estritas [Yong et al. 2006];
- As redes de sensores multimídia podem ser utilizadas para monitorizar e estudar o comportamento de idosos, podendo inferir em situações de emergência e conectar imediatamente idosos em situação de risco com parentes ou cuidadores [Hu e Kumar 2003].

As redes de sensores são comumente utilizadas nas cidades inteligentes (*smart cities*). Diversos sensores são instalados pela cidade, realizando o monitoramento e coleta de dados, onde são enviados para uma central para serem processados. A partir disso as decisões podem ser tomadas, seja de forma independente ou com supervisão do homem.

Entre as aplicações de RSSF para cidades inteligentes pode-se ressaltar o uso de sensoriamento para controle de tráfego, monitoramento de trilhos de trem e metrô para o monitoramento de desgastes e falhas nos trilhos e utilização de sensores na rede elétrica para identificar, com precisão, locais de queda de energia.

A saúde estrutural dos edifícios também pode ser monitorada, coletando informações por sensores adequados localizados nos edifícios, tais como sensores de vibração e de deformação para monitorar o stress de construção, sensores de agentes atmosféricos nas áreas circundantes para monitorar os níveis de poluição e sensores de temperatura e umidade para ter uma caracterização completa das condições ambientais [Lynch e Loh 2006].

Pode-se citar também a gestão de resíduos utilizando contentores de resíduos inteligentes, que detectam o nível de carga e permitem uma optimização da rota dos caminhões de coleta, pode reduzir o custo da coleta de resíduos e melhorar a qualidade da reciclagem. Para realizar um serviço inteligente de gestão de resíduos, o IoT (*Internet of Things*) deve ligar os contentores de resíduos inteligentes a um centro de controlo onde um software de optimização processa os dados e determina a gestão ótima da frota dos caminhões coletores [Nuortio et al. 2006].

RSSF apresentam características diferentes de uma rede de computadores. Muitas dessas características são particulares conforme a área da aplicação, fazendo com que várias questões precisem ser resolvidas [Loureiro et al. 2003]. Algumas dessas características são:

- Endereçamento dos nós: Dependendo da aplicação, cada sensor por ser endereçado unicamente, como por exemplo em uma linha de montagem em fábricas, ou *ad hoc*, como por exemplo em florestas onde o objetivo é o valor de uma variável [Loureiro et al. 2003];
- Agregação de dados: Para reduzir a quantidade de pacotes trafegados pela rede, as RSSF podem agregar, juntar, informações para reduzir o tráfego da rede [Junior 2010];
- Auto-organização: Os nós sensores podem ter sua energia esgotada ou ser danificado e para que a rede não fique sem funcionar é necessário que ela se adapte as novas configurações, formando novas rotas [Ruiz et al. 2003] [Loureiro et al. 2003];
- Mobilidade: A RSSF pode ser composta por nós estáticos ou nós móveis [Loureiro et al. 2003]. É possível que em uma única rede encontrem-se nós tanto estáticos quanto móveis;
- Tarefas colaborativas: Uma das principais vantagens de RSSF é realizar tarefas em conjunto, onde é importante detectar e estimar eventos de interesse para realizar a colaboração [Loureiro et al. 2003].

As RSSF apresentam problemas que, mesmo com as recentes pesquisas, desafiam profissionais e pesquisadores. Os principais desafios encontrados na literatura são:

- Comunicação de baixa qualidade: Por muitas vezes, os nós sensores são dispostos em ambientes abertos, tendo que operar sob mal tempo, por exemplo. A qualidade de comunicação pode ser prejudicada fazendo da coleta de da-

dos uma tarefa difícil [Corrêa et al. 2006]. É necessário que a rede seja bem projetada para evitar falhas em seu funcionamento;

- Recursos computacionais limitados: Os nós sensores têm recursos computacionais limitados. Na tentativa de solucionar esse problema, os protocolos para redes de sensores devem prover requisitos de qualidade de serviços suficientes para as aplicações;
- Processamento de dados: Com o nível limitado de energia e com relativa qualidade baixa de comunicação, os nós sensores precisam processar os dados [Corrêa et al. 2006], sejam comprimindo-os ou agregando-os com dados de outros nós sensores, por exemplo;
- Economia de energia: Levando em consideração o tamanho dos nós sensores, sua bateria é de tamanho reduzido, possuindo assim uma quantidade de carga limitada.

2.2 Rede de Sensores Visuais Sem Fio

Com o melhoramento e barateamento de sensores equipados com câmeras e microfones e com a sua integração com as RSSF, surgiu as Redes de Sensores Visuais Sem Fio (RSVSF). Redes visuais têm o potencial de melhorar os níveis de informações capturadas, ampliando a gama de cobertura, em comparação as medições escalares [CHANG e WANG 2004]. Com isso, aumentaram-se as possibilidades de aplicações, onde vídeo-sensores podem ser empregados para uma abordagem de visão computacional [PINTO et al. 2007], possibilitando uma tomada de decisão pelos nós sensores. A seguir, encontra-se algumas dessas aplicações.

- Vigilância: Sensores de vídeos e áudio são utilizados para reforçar sistemas de vigilância [Akyildiz et al. 2008]. Esses sensores podem registrar potencialmente relevantes, como furtos, roubos, acidentes de trânsito ou até rastreamento em tempo real [Almalkawi et al. 2010];
- Fiscalização de trânsito: Sensores visuais podem monitorar o tráfego em rodovias e áreas urbanas, capturando informações como velocidade média e números de carros e oferecendo serviços como controle de congestionamento [Akyildiz et al. 2008]. Pode-se utilizar esse tipo de sensor em sistemas de aconselhamento de estacionamento [Campbell et al. 2005], indicando possíveis lugares para estacionar [Sharif et al. 2009];
- Jogos: Os jogos estão evoluindo cada vez mais, trazendo uma imersão maior por parte dos jogadores. Alguns jogos de realidade virtual podem usar entradas de toque e a visão do usuário como parte da resposta para o jogador [Yong et al. 2006].

RSVSF têm características e desafios adicionais, além dos encontrados na RSSF, como por exemplo:

- Demanda elevada: RSSF geram dados escalares que necessitam de uma pequena quantidade de pacotes de serem enviados, porém em RSVSF, a quantidade de dados a serem transmitidos é muito grande, necessitando de uma quantidade grande de pacotes para enviar todos os dados [Almalkawi et al. 2010];
- Largura de banda: Como a quantidade de tráfego na rede aumenta, é necessário aumentar a largura da banda para poder cumprir prazos de entrega em tempo real [Almalkawi et al. 2010];
- Entrega em tempo real: Prazo de entrega é um problema crítico por causa da quantidade de dados trafegados, podendo gerar atrasos no nó destino [Almalkawi et al. 2010];
- Melhoramento do campo visual: Apenas conectar uma câmera aos nós sensores não garante um bom resultado. É necessário estudos que objetivam melhorar a resposta dada por essas câmeras [PINTO et al. 2007].

Com essas características, é notório dizer que dados visuais requerem um maior processamento em suas ações, seja por conta da captura das informações ou por transmissão das mesmas, gerando um maior gasto energético [Costa 2013].

Para atender os requisitos de qualidade de serviço (QoS), e usar os escassos recursos da rede de forma justa e eficiente, pesquisadores utilizam seus recursos a fim de melhorar o desempenho das redes de sensores [Almalkawi et al. 2010]. As características das RSVSF abrem muitas questões para futuras pesquisas, sejam com novos algoritmos, protocolos, arquiteturas e dispositivos, desde que satisfaçam os requisitos dos mais variados serviços.

2.3 Questões energéticas

O primeiro desafio e muitas vezes o mais importante em se tratando de rede de sensores é a eficiência energética [Lima 2015]. Esse pode ser um dos requisitos que antecede todos os outros aspectos do nó sensor e da rede, considerando que eles não estarão ligados a uma rede elétrica, já que escolhas de protocolos e algoritmos não adequados podem gerar gastos de energia desnecessários.

O tempo de vida da rede está diretamente ligado a energia remanescente nos nós, que, por sua vez, dependem da quantidade de carga das baterias. Em alguns casos, o nó está ligado a uma fonte de alimentação (tomada) onde não existiria preocupações com energia, porém, em sua maioria, os nós possuem uma fonte de energia limitada (baterias AA 1,5V) e a recarga ou a substituição das mesmas são limitadas ou inviáveis [Lima 2015]

Um ponto importante é que existe uma relação natural entre consumo de energia e desempenho [Gomes et al. 2008]. Na tentativa de aumentar o tempo de vida útil

das redes de sensores, é possível impactar no desempenho, em contrapartida, usando protocolos que priorizam a performance, aumenta-se o gasto energético.

O gerenciamento energético é uma função crítica, fazendo com que sejam desenvolvidas novas pesquisas de algoritmos e protocolos que otimizam a energia em um nó sensor [Lima 2015].

2.3.1 Consumo de energia

Qualquer dispositivo eletroeletrônico necessita de energia para poder realizar as suas funções. Os nós sensores não são diferentes. Toda ação executada gera um consumo de energia que varia de acordo com a complexidade da ação. A seguir, encontram-se algumas subseções que descrevem ações que consomem energia e algumas estratégias que visam a sua economia.

Transmissão de dados

O transmissor do rádio é um dos principais componentes que causam esgotamento de energia [Rault et al. 2014]. Para reduzir a quantidade de energia gasta, pesquisadores tentam otimizar parâmetros utilizados, como codificação e esquema de modulação, para preservar energia.

- Potência de transmissão: Quanto maior a potência usada na transmissão maior é o gasto energético. A ideia é usar uma faixa de transmissão inferior fazendo o rádio consumir menos energia [Rault et al. 2014]. Ao utilizar uma menor potência, diminui-se a interferência na transmissão, já que, uma quantidade menor de nós irá ouvir o sinal enviado. Porém isso acarreta um atraso no recebimento do pacote, pois será necessário uma maior quantidade de saltos para os pacotes chegarem ao destino. [Chu e Sethu 2012] propõem uma regulagem da potência de transmissão dos nós de forma adaptativa. Um nó com maior quantidade de energia restante pode aumentar a sua potência de transmissão, permitindo que os outros nós possam diminuir a potência de transmissão, economizando energia;
- Direcionamento de antena: As antenas permitem que o sinal seja enviado e recebido, um de cada vez, melhorando assim a taxa de transmissão da rede [Rault et al. 2014]. Antenas multidirecionais são propícias a receber toda a comunicação ao seu redor, gerando um consumo de energia indevido, por outro lado antenas unidirecionais limitam-se a ouvir o sinal de um pequeno intervalo, requerendo menos energia. Em contrapartida, as antenas unidirecionais podem ocasionar outros problemas como ajuste da antena e surdez. [Karapistoli et al. 2009] propõe um protocolo de localização de vizinhos e redirecionamento de antena para evitar o problema da surdez;

- **Rádio cognitivo:** Um rádio cognitivo é um rádio inteligente que pode mudar dinamicamente o seu canal de comunicação adaptando seus parâmetros de transmissão e recepção [Rault et al. 2014]. Ao utilizar um canal muito concorrido, pode-se haver interferência e necessidade de retransmissão. [Naeem et al. 2013] sugere um estudo sobre rádio cognitivo para diminuição do consumo de energia.

Compressão de dados

Diminuir a quantidade de dados trafegados também é uma forma de economizar energia [Rault et al. 2014]. Enviar grandes quantidades de dados pode gerar, além do aumento do consumo energético, atraso no tempo de resposta que, dependendo da aplicação, pode invalidar os dados [DE AQUINO 2008].

- **Agregação de dados:** A agregação dos dados consiste em realizar uma fusão dos dados a fim de reduzir a quantidade de dados transmitidos. Por exemplo, 5 nós fontes podem fazer a medição da temperatura e mandarem para um nó intermediário, que por sua vez, calcula a média deles ou verifica qual o menor encontrado e envia apenas o resultado para o *sink*. [DE AQUINO 2008] apresenta uma técnica de redução baseada em *stream*, onde mostrou que a solução pode ser utilizada em diferentes aplicações. [Fasolo et al. 2007] faz uma revisão literária sobre o tema;
- **Amostragem adaptativa:** Detecção é uma tarefa que consome uma quantidade de energia considerável. Por muitas vezes, dados são capturados em momentos que eles não serão muito úteis [Rault et al. 2014]. Técnicas de amostragem adaptativa ajustam a taxa de amostragem dos sensores, assegurando que as necessidades de cobertura e precisão atenderão todas as demandas da aplicação. Em [Tacconi et al. 2010], é utilizado câmeras que consomem uma quantidade de energia menor para detectar um evento, para então ligar as câmeras de melhor resolução, tendo imagens melhores e mais limpas. Já [Yan et al. 2012] mostra uma aplicação que usa detecção contínua em um sensor, presente nos smartphones. Um exemplo é o uso do acelerômetro para indicar a localização do indivíduo. Caso as pessoas estejam se movimentando, a frequência de leitura do acelerômetro deve ser maior, caso as pessoas não estejam em movimento, é reduzida a quantidade de vezes que o acelerômetro deve ser lido;
- **Codificação de Rede:** Em um cenário de comunicação em *broadcast*, um nó sensor envia uma cópia de um determinado pacote, ou conjunto de pacotes, para todos os nós da rede, gerando um tráfego elevado. A Codificação de Rede propõe-se a enviar uma combinação linear de vários pacotes em vez de enviar uma cópia dos pacotes para cada nó da rede. Apesar dessa estratégia economizar energia, o seu desempenho é menor do que o *broadcast* [Rault et al. 2014]. Em [Wang et al. 2011] possui um esquema de roteamento *broadcast* baseado em codificação da rede, chegando a ter ganhos de até 169% de economia. Já

[Hou et al. 2008] propõe um protocolo onde cada nó só poderia enviar um novo pacote depois que recebesse N pacotes, gerando uma economia de $(N-1)/N$ de largura de banda;

- Compressão de dados: Como a quantidade de dados a ser trafegado, em parte dos casos, é muito grande, comprimir os dados é uma opção, reduzindo o tamanho da mensagem inicial. Essa estratégia reduz o gasto de energia na transmissão, devido à diminuição no número de pacotes [Rault et al. 2014], entretanto deve-se levar em consideração a quantidade de energia gasta para realizar o processo de compressão. Algoritmos convencionais de compressão não podem ser usados em nós sensores devido a suas limitações de *hardware*, portanto técnicas específicas foram desenvolvidas para se adaptarem às capacidades dos nós sensores. Em [Kimura e Latifi 2005] são abordados algoritmos de compressão para RSSF;
- Tamanho do pacote: Para transmitir dados pela rede, é preciso dividi-los em pacotes para poder enviar. Todo pacote, além do dado útil, é necessário um conjunto de informações para poder rotear os pacotes até o destino e para remontar os dados ao final do processo. Essas informações estão presentes em todos os pacotes e possuem um tamanho fixo. Considerando uma quantidade determinada de dados a ser transmitida, ao aumentar o tamanho do pacote, diminui-se a quantidade de pacotes necessários, diminuindo o volume de informação de controle a ser trafegado. Entretanto quanto maior o tamanho do pacote, maiores são as taxas de erro, sendo necessário retransmissão e consumo de energia. O trabalho [Costa et al. 2012] faz um estudo da influência do tamanho de pacotes no consumo de energia para RSVSF.

Modos de operação do transmissor

A fim de conter o gasto de energia, um nó sensor pode entrar em um estado de “sono”, onde ele desliga o seu módulo de transmissão, ficando impossibilitado de enviar ou receber quaisquer pacotes de dados. De mesmo modo, ele deve ser capaz acordar, realizar suas tarefas e voltar a dormir, fazendo todo esse processo de forma eficiente.

- Esquemas de ciclo de serviço: Uma forma de evitar desencontros entre as transmissões dos nós sensores é programando os horários em que eles farão essa tarefa. Em [Anastasi et al. 2009] mostra que protocolos baseados em ciclo de trabalho têm um maior desempenho energético, contudo, podem sofrer com latência na rede, devido à espera dos nós pelo receptor. Comunicações em *broadcast* são prejudicadas pela possibilidade de não encontrar todos os nós acordados simultaneamente;
- Rádios auxiliares de baixa potência: Ciclos de serviços fixos podem desperdiçar energia fazendo os nós despertarem em momentos que não irão fazer transmissões. Alguns pesquisadores utilizam rádios de baixa potência para receberem

requisições de transmissão, para então, ligar o transmissor de maior potência para enviar os pacotes necessários [Rault et al. 2014]. Em [Ba et al. 2013] utiliza uma rede composta por módulos RFID (*Radio Frequency IDentification*) para despertar os nós sensores;

- Controle de topologia: Em determinadas redes implanta-se sensores redundantes para garantir uma boa cobertura da área estudada, possibilitando a desativação de alguns nós para economia de energia. Existem protocolos de topologia que exploram a redundância dos nós sensores para adaptar dinamicamente a topologia da rede baseada nas necessidades da aplicação, minimizando o número de nós ativos [Rault et al. 2014]. Em [Misra et al. 2011], é abordado o problema de cobertura com nós redundantes, onde foi proposto a ativação de subgrupos de nós, fazendo com que o restante dos nós ficassem em estado de sono. O trabalho [Karasabun et al. 2013] aborda a estratégia de correlação espacial, onde os dados de nós sensores inativos podem ser inferidos pelos dados dos nós sensores ativos.

Roteamento

Transmissão de pacote é uma tarefa que pode consumir muita energia dos dispositivos. Em topologias de salto-a-salto, os nós mais próximos ao *sink* são estressados devido ao grande número de encaminhamentos, fazendo que a energia das baterias ser consumida com maior rapidez [Rault et al. 2014]. O trabalho [Ehsan e Hamdaoui 2012] é focado em fazer um levantamento de protocolos de roteamento que possam preservar uma maior quantidade de energia tanto em RSSF quanto RSVSF.

- Arquitetura de *cluster*: A estratégia é dividir a rede em subgrupos, também chamado de *cluster*, onde cada *cluster* terá um nó sensor fazendo o seu gerenciamento (*cluster head*, CH) [Rault et al. 2014]. O chefe do *cluster* é responsável por coordenar as atividades dos membros do *cluster* e por se comunicar com outros CH e com o *sink*. Essa técnica é utilizada visando a economia de energia, pois ela ajuda a limitar o consumo pelas seguintes formas:
 - Reduzir o alcance de comunicação dentro do *cluster*. Os nós sensores podem utilizar uma potência de transmissão menor para conseguir se comunicar com o CH;
 - O CH reduz o número de transmissões. Ele pode realizar fusão dos dados produzidos em seu *cluster* antes de transmitir pela rede;
 - Permite o desligamento de nós do *cluster*, enquanto o CH assume a responsabilidade de transmissão;
 - Permite a alternância do CH entre os nós do *cluster* para balancear o consumo de energia.

- Roteamento baseado em energia: Existem protocolos de roteamento que em vez de escolher o menor caminho como a rota, eles se baseiam na quantidade de energia residual para definir para onde será o próximo salto [Rault et al. 2014]. No trabalho [Liu et al. 2012] foram propostas funções que mapeavam pequenas variações de energia nos nós, dando preferência a nós com maior energia remanescente no momento da escolha da rota;
- Roteamento multi rota: Protocolos de rota única são mais simples de serem implementados, contudo, drenam a energia dos nós sensores do caminho selecionado de forma muito rápida [Rault et al. 2014]. Protocolos multi rota permitem a alternância dos caminhos a serem usados, diminuindo o gasto energético de nós específicos. Em [Wang et al. 2009] é proposto um protocolo que constrói duas rotas distintas e que não se cruzam entre a fonte e o destino. Esse tipo de protocolo aumenta a confiabilidade da rede fornecendo várias rotas. Em caso de falha, a rede consegue se recuperar mais rapidamente [Rault et al. 2014];
- Nós de redistribuição: O esgotamento de energia de nós em uma determinada região, pode dividir a rede ou criar os chamados, buracos de energia. Isso pode ser evitado através de uma distribuição uniforme dos nós ou posicionando alguns nós com recursos especiais [Rault et al. 2014]. Em [Ergen e Varaiya 2006] propõe a inserção de nós extra para eliminar a deficiência geometria da topologia de rede e para poder gerar novas possibilidades de rotas;
- Mobilidade de *sinks*: Em uma rede de sensores, usam-se uma estação base para coletar os dados da rede e os nós sensores localizados próximo ao *sink* esgotam a bateria rapidamente. Isso ocorre devido todo o tráfego ser direcionado para o *sink*, fazendo que os nós próximos transmitam uma maior quantidade de pacotes [Rault et al. 2014]. É possível utilizar um *sink* móvel, possibilitando a mudança dos nós vizinhos e diminuindo a carga de trabalho dos nós vizinhos iniciais.

2.3.2 Recarga de energia

Uma alternativa que tem sido aplicada para minimizar o problema do tempo de vida útil das Redes de Sensores é a recarga de energia. Existem muitas formas de recarga energética. Essa estratégia não depende, necessariamente, da intervenção humana, sendo aplicada, principalmente, em locais inóspitos ou redes muito grandes. Em comparação com nós sensores tradicionais, nós sensores recarregáveis podem funcionar, teoricamente, por um período ilimitado [Rault et al. 2014].

É necessário fazer um gerenciamento efetivo da energia. A coleta pode ser para uso imediato, não sendo necessário a utilização de uma bateria, ou para armazenamento e uso posterior, sendo que, a depender do método utilizado, a coleta é realizada apenas em um período do dia. A estratégia de recarga de energia tem potencial para

abortar o esgotamento energético. O desafio consiste em estimar a periodicidade e a magnitude da fonte escolhida e decidir os parâmetros corretos, evitando o esgotamento das baterias [Sudevalayam e Kulkarni 2011]. A seguir, encontra-se algumas formas de recarregamento de energia.

- Energia solar: Nós sensores podem ser equipados com uma placa solar que converte a energia solar em energia elétrica, recarregando as baterias do dispositivo. Como a coleta da energia só pode ser realizada no período diurno, existem estratégias que colocam os nós sensores em estado de sono no período da noite para economizar energia [Nintanavongsa et al. 2013]. É importante ressaltar que os nós sensores podem ter energia residual diferente. Isso depende das ações realizadas, alguns nós podem realizar uma quantidade de transmissões superior a outros nós, e da quantidade de energia coletada, algumas placas solares podem não estar tão expostas ao sol [Rault et al. 2014];
- Energia eólica: Diferente da energia solar, a energia eólica pode ser capturada em qualquer período do dia [Rault et al. 2014], dependendo apenas das correntes de vento. Para esse tipo de sistema, é necessário que a região, onde a rede foi implantada, tenha incidência de vento em grandes períodos do dia;
- Carregamento *wireless*: Pesquisas nessa área, visam o aumento da sustentabilidade das RSSF e torná-las perpetuamente operacionais [Rault et al. 2014]. Essa transferência pode ocorrer de duas formas: Radiação Eletromagnética e Acoplamento Magnético Ressonante. Em [Xie et al. 2013] mostra que a técnica de Radiação Eletromagnética é aplicável às RSSF com exigências de energia ultra-baixas e atividades de baixa sensibilidade, como temperatura, luz e umidade. Isso ocorre devido às Radiações Eletromagnéticas sofrerem com queda rápida de eficiência em relação à distância, sem levar em consideração o prejuízo à saúde humana. Entretanto o Acoplamento Magnético Ressonante é uma técnica mais promissora. Ele possui maior eficiência energética dentro de um mesmo raio de alcance;
- Vibração: A energia mecânica gerada pelas vibrações também pode ser convertida em energia elétrica. As vibrações estão presentes, especialmente em pontes, estradas e trilhos [Seah et al. 2009]. O método de recarregamento por vibração, consiste no uso de um capacitor piezoelétrico enquanto a energia pode ser colhida utilizando um mecanismo de molas. O trabalho [Vijayaraghavan e Rajamani 2008] mostra o uso dessa técnica para alimentar sensores de tráfego, que são recarregados quando um veículo passa pelo sensor. Resultados experimentais mostram que ao ser pressionado, é gerada energia suficiente para a transmissão de duas palavras de 12 bits [Tan et al. 2006];
- Movimento: Energia elétrica também pode ser convertida através de movimento. Essa estratégia também utiliza um capacitor piezoelétrico para converter a energia. Um sistema de recarga através de caminhadas foi demonstrado em [Paradiso 2006]. Em [McGarry e Knight 2011], é proposto a utilização do balanço das árvores na geração de energia para alimentar os nós sensores;

- Termal: A energia é provida quando há diferença de temperaturas entre a junção de dois materiais condutores [Seah et al. 2009]. Essa recarga pode acontecer com o dispositivo em contato com o corpo humano e o ambiente ao seu redor por meio de um termo-gerador [Mateu et al. 2006]. Por não haver necessidade de movimentação e problemas com impactos, dispositivos termo-geradores tendem a durar, mecanicamente, mais tempo do que dispositivos baseados em vibração e movimento [Seah et al. 2009];
- Ruído acústico: O ruído acústico é o resultado de ondas de pressão produzidas por uma fonte de vibração. O ouvido humano traduz essas ondas em sinais elétricos que são interpretadas pelo cérebro [Yildiz 2009]. O ouvido humano percebe frequências entre 20Hz e 20000Hz. Em [Kasyap et al. 2002] foi proposto um sistema composto por um feixe piezocerâmico PZT vibratório conectado a um conversor de retorno AC/DC. Foi concluído que a quantidade de energia disponível a partir do ruído acústico foi insuficiente, no cenário investigado;
- Eletrostática: Esse método é dependente da capacitância de um capacitor dependente de vibração [Yildiz 2009]. Um capacitor variável é carregado inicialmente, separando as suas placas por vibração, dessa forma, a energia mecânica é transformada em energia elétrica. Com isso, as placas são divididas e a capacitância é reduzida, até que a carga seja expulsa do dispositivo [Yildiz 2009]. A energia pode ser usada para carregar uma bateria.

2.3.3 Pesquisas em recarga de energia

Pesquisas em RSSF e RSVSF são extensas e ainda existem áreas a serem analisadas. Contudo, pesquisas na área de recarga de energia ainda não possuem tanta maturidade [Seah et al. 2009]. Em seguida encontra-se esses pontos de pesquisa.

- Gerenciamento de energia: Vários pesquisadores propõem o uso de recarregamento para completar o nível de bateria. Logo, é imprescindível maximizar o uso eficiente da energia acumulada. É importante ressaltar que métricas tradicionais de energia residual não devem ser empregadas quando nós sensores utilizam mecanismos de recarga de energia [Seah et al. 2009]. Então, se faz necessário a obtenção de informações sobre níveis futuros de energia para tomadas de melhores decisões de roteamento. Em [Kansal e Srivastava 2003] é proposto um *framework* que consegue aprender adaptativamente a coleta de energia e fornece algoritmos para o compartilhamento e escalonamento de tarefas entre os nós da rede;
- Armazenamento de energia: Além da troca das baterias ser uma tarefa difícil, deve-se lembrar que elas também possuem um ciclo de recarga limitado, de tal modo que o seu funcionamento, na prática, não será perpetuo. Uma alternativa é a utilização de super capacitores [Seah et al. 2009]. O trabalho

[Simjee e Chou 2008] relata que os supercapacitores podem ser recarregados por mais de meio milhão de ciclos de carga e tem vida operacional média de 10 anos antes que a capacidade de energia seja reduzida para 80%. As baterias são mais utilizadas por conter uma maior densidade de carga, podendo ter seu tamanho reduzido;

- Fontes de energias sustentável: Um fator vital para recarga de energia é a sua fonte, ela irá ditar as taxas de energia disponíveis para o uso [Sudevalayam e Kulkarni 2011]. Com uma fonte de energia controlável, a energia deve ser absorvida sempre que necessário, já fontes de energia não controláveis, a energia deve ser absorvida sempre que possível. Nesse último caso, é necessário um modelo que preveja a disponibilidade da fonte, onde indique o tempo para o próximo ciclo de recarga [Sudevalayam e Kulkarni 2011];
- Mecanismos de conversão de energia: A escolha do mecanismo de conversão de energia está diretamente ligada à escolha da fonte de energia [Sudevalayam e Kulkarni 2011]. Supondo que energia solar seja a escolha para o projeto da rede, serão utilizadas placas solares como mecanismos de conversão. As pesquisas atuais visam mecanismos que possam ter um rendimento energético melhor.

2.4 Modelagem de consumo de energia

A modelagem matemática é aplicável quando necessita-se representar um sistema real através de expressões matemáticas [Procopio et al. 2012]. Ao modelar um sistema, tenta-se aproximar ao máximo os resultados obtidos pelo modelo com os medidos em situações reais. Isso ocorre porque o modelo não consegue representar todas as características sobre o sistema. Uma forma de reduzir essa diferença é utilizar vários modelos para compor um único sistema, aumentando assim o número de características representadas por ele [Mota et al. 2005].

O objetivo mais importante da modelagem é conseguir entender o próprio modelo de forma mais simples ou descrever o modelo de forma mais complexa de modo que possa ser tão preciso como o mundo real [Sodré 2007].

Modelos matemáticos consistem em conjuntos de equações que representam, de forma quantitativa, as hipóteses que foram usadas na construção do modelo, essas, que se apoiam em situações reais [Sodré 2007]. Essas equações são parametrizáveis com valores pré-estabelecidos ou previstos em situações reais, podendo ser testadas com o auxílio de computadores.

As equações não possibilitam a explicação científica do modelo, elas apenas interpretam as hipóteses de forma quantitativa, possibilitando compreensão das consequências e detalhes que podem ser aceitos ou recusados [Sodré 2007].

Cada rede de sensores possui um perfil de consumo de energia elétrica particular, que é baseado no hardware que compõem a rede e os protocolos utilizados [Queiroz 2015]. Para encontrar o consumo elétrico total, é necessário encontrar o consumo de cada nó da rede, sendo que estes são equipados com uma fonte limitada de energia.

De modo geral, as redes de sensores deverão ser implantadas na área a ser estudada, onde alguns nós farão a coleta de dados e outros criarão uma estrutura de comunicação. Uma única rede pode ser utilizada para mais de uma aplicação, entretanto, por motivos de uso energético, é comum utilizar apenas uma aplicação por rede implantada [Costa 2013]. Levando isso em consideração, o tempo de vida da rede é um fator importante, já que o consumo de energia irá refletir diretamente nesse tempo de vida [Costa 2013]. Algumas aplicações preocupam-se mais com taxas de transmissão ou tempo de entrega, porém o consumo de energia é um parâmetro que precisa ser analisado e otimizado.

Basicamente, existem quatro etapas a serem analisadas. O cálculo de consumo de energia pode variar em aplicações diferentes, considerando uma mesma etapa. Isso ocorre devido ao uso de diferentes algoritmos e protocolos, fazendo com que alguns possam gastar mais energia do que outros para atender as necessidades do projeto, contudo, as redes devem possuir as mesmas etapas.

A primeira etapa é a captura. Seja por câmeras, microfones ou sensores escalares, essa etapa consiste na obtenção de dados de acordo com a aplicação, que pode ser configurada para operar de forma temporizada ou em reposta a algum evento.

A segunda etapa é a codificação. O dado capturado na etapa anterior pode possuir um tamanho muito grande, necessitando que uma grande quantidade de pacotes seja utilizada para transmiti-lo pela rede. Isso se deve, sobretudo, a natureza de comunicação das RSSF, que empregam tecnologias de comunicação que transmitem pacotes pequenos. O objetivo da codificação é representar o dado inicial com o menor número de bits possível, preservando a qualidade e a clareza necessárias para a aplicação. Como em uma rede de sensores os recursos são limitados, comprimir os dados é uma boa alternativa. Pesquisadores procuram a melhor maneira de comprimir os dados que foram capturados. Ao fazer isso, pode-se reduzir o consumo de energia devido ao processamento e transmissão de dados em cada nó, e assim estender o tempo de vida da rede de sensores [Kimura e Latifi 2005]. Além disso, ao reduzir o tamanho dos dados, necessita-se de uma menor largura de banda para enviar e receber os pacotes.

A terceira etapa é a criptografia. A criptografia consiste em aplicar várias técnicas que visam modificar a informação de forma que apenas o receptor possa decifrá-la [Gois et al. 2016]. Diferentes mecanismos podem ser adotados, dependendo da aplicação, para garantir a integridade e a confiabilidade das informações, levando-se em conta que as informações trafegarão pela internet até chegar ao seu destino [Gomes 2015].

A última etapa é a transmissão/recepção. Ela é responsável pelo envio e recebimento

das informações, seja pelos nós de origem ou pelos nós de destino. Inicialmente é necessário dividir a informação a ser trafegada em pacotes menores. Todo pacote possui dois tipos de informação: informação de controle e informação útil. Como todo pacote precisa ter as informações de controle, quanto maior a quantidade de pacotes, maior será a quantidade de informação de controle, o que requer a transmissão de informações na rede que não são úteis para a aplicação, apesar de serem necessárias para o processo de comunicação. Após a divisão dos pacotes, eles serão enviados pelas “rotas” até chegarem ao destino. O envio, a recepção e as rotas dependerão do protocolo de roteamento empregado. Vale lembrar que esse trabalho não se atenta ao processo de envio e recebimento dos pacotes, apenas ao processo de “empacotamento” da informação.

É possível encontrar na literatura alguns trabalhos que estimam, matematicamente, a quantidade de energia consumida por determinadas ações. A seguir, encontra-se alguns desses trabalhos.

- [Wander et al. 2005]: Esse trabalho visou o estudo de algoritmos de criptografia em redes de sensores sem fio. Foi analisado o consumo de energia pelos algoritmos SHA-1 e AES em microcontroladores Mica2dot. Por fim, ele traz algumas tabelas com os valores calculados;
- [Lecuire et al. 2008]: Com o intuito de analisar compressões DWT, verificou-se os tipos de instruções necessárias para tal compressão. Então propõe-se equações para estimar o consumo de energia pela compressão DWT em função das quantidades e tipos de instruções;
- [Costa et al. 2012] : Nesse trabalho estudou-se a relação do tamanho dos pacotes com o gasto energético. Viu-se que quanto maior o tamanho do pacote, menos pacotes são transmitidos, porém tem-se o risco mais erros e retransmissões. Foi proposto algumas equações que estimam o consumo de energia na transmissão, levando em consideração o erro no processo;
- [Ghorbel et al. 2012]: Esse trabalho se propõe a desenvolver equações que estimam consumo de energia em compressões DCT, para tal foi feita uma análise em relação às instruções (adição, multiplicação) utilizadas para realizar a compressão da imagem;
- [Yun et al. 2013]: Esse trabalho analisa o uso de *sinks* móveis para diminuição do consumo de energia na rede. Ao fim, propõe algoritmos para movimentação do *sink*;
- [Climent et al. 2016]: Esse trabalho fez uma análise a cerca da captura de energia por painéis solares. Ele apresentou um modelo matemático para estimar a quantidade de energia capturada por painéis solares. Esse modelo pode ser estendido para suportar novos tipos de captura de energia, como energia eólica, por exemplo;
- [Kim 2016]: Esse trabalho avaliou a questão do balanceamento de carga para evitar o consumo excessivo de energia por parte de alguns nós da rede. Para

tal, foi apresentado um modelo analítico de balanceamento de carga para maximização do tempo que a rede permanece ativa;

- [Kurt et al. 2017]: Esse trabalho fez uma análise da influencia do tamanho dos pacotes com o consumo de energia em rede de sensores. Foi apresentado uma nova estrutura de programação interna para camada de enlace para maximização de energia em rede de sensores, por meio de otimização conjunta do nível de potencia de transmissão e do tamanho do pacote de dado a ser trafegado.

2.5 Redes de Petri

A modelagem matemática é uma área do conhecimento que estuda a simulação de sistemas reais, a fim de prever o comportamento dos mesmos. É aplicada em diversos campos da ciência como biologia, economia, engenharias, entre outros. Esse tipo de modelagem está diretamente ligado à resolução do problema e com os seus procedimentos.

Uma Rede de Petri é uma representação matemática formal. Ela defini graficamente a estrutura de um sistema distribuído como um grafo direcional. Ela foi idealizada em 1962, Carl Adam Petri tinha o objetivo de desenvolver um modelo em que as máquinas de estado fossem capazes de se comunicar A característica principal alcançada por este modelo foi a possibilidade de representar a concorrência [Penha et al. 2004].

Ela um modelo estatístico que pode descrever um sistema discreto [Shareef e Zhu 2010] e [Li et al. 2008]. Ela pode ser descrita como uma 4-tupla PN = (P;T;F;M) em que:

- P é o conjunto de elementos passivos chamados de lugar(estado);
- T é o conjunto de elementos ativos, também chamados de transição;
- F é o conjunto de relacionamentos entre elementos ativos e passivos;
- M é um vetor chamado marcação.

As representações gráficas das Redes de Petri tem se mostrado muito útil, já que, permitem a visualização dos processos e a comunicação entre eles. As Redes de Petri possui alguns elementos que compõem seus gráficos. Esses elementos são:

- Lugar: representa os possíveis estados do sistema;
- Arcos: elementos que conecta lugares e transições. Lugar não pode ser ligado a outro lugar e transição não pode ser legado a outra transição;
- Transição: representa os eventos ou ações que causam mudança de estado. As ações estão sujeitas a disponibilidade de tokens;
- Token: elemento responsável por representar a existência de um estado.