

UNIOESTE - UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CENTRO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS EXATAS
CURSO DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Desenvolvimento de uma Rede de Sensores Sem Fio de Baixo Custo

Augusto Lopez Dantas

FOZ DO IGUAÇU

2015

Augusto Lopez Dantas

Desenvolvimento de uma Rede de Sensores Sem Fio de Baixo Custo

Monografia submetida à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Curso de Ciência da Computação - Campus de Foz do Iguaçu, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Ciência da Computação.

Orientador(a): Jorge Habib Hanna El Khouri

FOZ DO IGUAÇU

2015

Augusto Lopez Dantas

Desenvolvimento de uma Rede de Sensores Sem Fio de Baixo Custo

Jorge Habib Hanna El Khouri
Orientador(a)

Antonio Marcos Massao Hachisuca
Membro

Carlos Henrique Zanelato Pantaleão
Membro

Dedico este trabalho ao Movimento Maker, que está revolucionando a indústria mundial, e ao Movimento de Software Livre, que preza pela liberdade e pelo compartilhamento de conhecimento.

Agradecimentos

Aos meus pais, José Aparecido Dantas e Rosângela Lopez Dantas, que sempre apoiaram e incentivaram os meus estudos.

Aos professores, que tiveram um papel fundamental em todo o processo de formação. Em especial ao professor Jorge Habib Hanna El Khouri que foi sempre solícito e paciente em todo processo deste trabalho.

Aos meus colegas de faculdade, pelas viradas de madrugadas estudando e pelas partidas de truco jogadas.

E aos meus colegas do Centro Latino Americano de Tecnologias Abertas, pelo convívio profissional e pelas informações trocadas.

“Há uma teoria que indica que se alguém descobrir exatamente para que serve o Universo e por que ele está aqui, o mesmo desaparecerá imediatamente e será substituído por algo ainda mais bizarro e inexplicável. Há uma outra teoria que indica que isso já aconteceu.”

Douglas Adams

Resumo

A integração de sensores em ambientes domiciliares e em escritórios em conjunto com a entrega eficiente das informações observadas resulta em uma aprimoramento na comodidade e segurança. Dessa forma, tem-se as chamadas redes de sensores sem fio (RSSF), que, apesar do nome, também incluem atuadores e que podem atuar como um dos componentes fundamentais em um sistema de automação residencial. Este trabalho tem como objetivo ratificar a possibilidade da construção de uma RSSF barata e econômica com capacidade para atuar em ambientes não críticos. Através de uma análise dos dispositivos existentes que atuam nesse âmbito, selecionou-se aqueles que eram mais compatíveis com o resultado desejado. A partir de então, iniciou-se o processo de estudo e desenvolvimento da solução, obtendo como resultado uma implementação de RSSF para ambientes não críticos com uma melhor eficiência energética e um custo monetário significativamente menor do que as soluções normalmente encontradas no mercado. Essa abordagem possibilita com que mais pessoas tenham acesso a esse tipo de tecnologia, permitindo-as usufruir das vantagens que um sistema de automação traz ao cotidiano.

Palavras-chaves: Rede de Sensores Sem Fio; Automação Residencial; Microcontrolador; Transceptor de Rádiofrequência.

Listas de ilustrações

Figura 1 – Esboço de uma automação residencial	3
Figura 2 – Modelo de Raspberry Pi	7
Figura 3 – RTD com cabeça de conexão	13
Figura 4 – Modelo de termistor NTC	13
Figura 5 – Exemplo de termopar	14
Figura 6 – Sensor de temperatura eletrônico	15
Figura 7 – Fotodiodo	16
Figura 8 – Fototransistor	17
Figura 9 – Fotoresistor	17
Figura 10 – Sensor de umidade capacitivo	18
Figura 11 – Sensor de umidade resistivo	19
Figura 12 – Sensor de umidade termicamente condutivo	19
Figura 13 – Sensor de umidade em solo	20
Figura 14 – Sensor de fumaça	20
Figura 15 – Sensor de gás	21
Figura 16 – Relé Eletromecânico	22
Figura 17 – Composição de um nó em uma RSSF	24
Figura 18 – Microcontroladores AVR	25
Figura 19 – Módulo Transceptor NRF24L01+	27
Figura 20 – Rede Estrela	28
Figura 21 – Rede Malha	28
Figura 22 – Rede Árvore	29
Figura 23 – Exemplo Ponto a Ponto	35
Figura 24 – Pacote <i>Enhanced ShockBurst</i>	36
Figura 25 – Exemplo Roteamento	37
Figura 26 – Exemplo Broadcast	38
Figura 27 – Exemplo de recebimento de uma nova rota	39
Figura 28 – Formato Geral de Mensagem	40
Figura 29 – Mensagem do Tipo Endereço, Falha ou Pai	40
Figura 30 – Mensagem do Tipo Emergência	41
Figura 31 – Mensagem do Tipo Medição	41
Figura 32 – Mensagem do Tipo Novo Nó	41
Figura 33 – Mensagem do Tipo Leitura	42

Figura 34 – Mensagem do Tipo Escrita	42
Figura 35 – CuteCom	43
Figura 36 – Protótipo Estação Principal	43
Figura 37 – Protótipo Estação Remota	44

Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparação entre microcontroladores	25
Tabela 2 – Comparação entre módulos transceptores	26
Tabela 3 – Processo de roteamento testado	44
Tabela 4 – Exemplos de testes realizados	45
Tabela 5 – Comparação entre implementações de RSSF	45

Lista de abreviaturas e siglas

6LoWPAN	IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks
ACK	Acknowledgement
ADC	Analog-to-Digital Converter
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
CE	Chip Enable
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSN	Chip Select Not
FC	Fotocondutivo
FIFO	First In First Out
FV	Fotovoltaico
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IPv4	Internet Protocol version 4
IPv6	Internet Protocol version 6
IRQ	Interrupt Request
ISR	Interrupt Service Routine
LDR	Light Dependent Resistor
LED	Light Emitting Diode
MAC	Media Access Control
MCU	Microcontroller Unit
MISO	Master In Slave Out
MOSI	Master Out Slave In
NTC	Negative Temperature Coefficient
PRX	Primary Receiver

PTC	Positive Temperature Coefficient
PTX	Primary Transmitter
PWM	Pulse Width Modulation
RFID	Radio-Frequency Identification
RF	RadiofrequênciA
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio
RTD	Resistance Temperature Detector
SCK	Source Clock
SPI	Serial Peripheral Interface
SS	Slave Select
USART	Universal Synchronous and Asynchronous serial Receiver and Transmitter
USI	Universal Serial Interface

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivo	4
1.2	Organização	4
2	Automação Residencial	5
2.1	Considerações Iniciais	5
2.2	Conceitos Chaves	5
2.2.1	Dispositivos Sob Controle	6
2.2.2	Dispositivos de Controle Remoto	6
2.2.3	Rede de Controle	6
2.2.4	Controlador	7
2.2.5	Sensores e Atuadores	7
2.3	Desafios	8
2.4	Considerações Finais	9
3	Sensores e Atuadores	10
3.1	Considerações Iniciais	10
3.2	Sensores	10
3.2.1	Temperatura	11
3.2.1.1	Termorresistências	12
3.2.1.2	Termistores	12
3.2.1.3	Termopares	13
3.2.1.4	Eletrônicos	14
3.2.1.5	Critério de Escolha	15
3.2.2	Luz	15
3.2.2.1	Fotodiodos	16
3.2.2.2	Fototransistores	16
3.2.2.3	Fotoresistores	17
3.2.2.4	Critério de Escolha	17
3.2.3	Umidade	17
3.2.3.1	Capacitivos	18
3.2.3.2	Resistivos	18
3.2.3.3	Termicamente Condutivos	19
3.2.3.4	Umidade em Sólidos	19
3.2.3.5	Critério de Escolha	20

3.2.4	Gás e Fumaça	20
3.2.4.1	Químicos	21
3.2.4.2	Iônicos	21
3.2.4.3	Ópticos	21
3.2.4.4	Critério de Escolha	21
3.3	Atuadores	22
3.4	Considerações Finais	22
4	Rede de Sensores Sem Fio	23
4.1	Considerações Iniciais	23
4.2	Composição dos Nós	24
4.2.1	Microcontrolador	24
4.2.2	Transceptor	26
4.2.3	Fonte de Energia	27
4.3	Topologia da Rede	27
4.3.1	Estrela	27
4.3.2	Malha	27
4.3.3	Árvore	28
4.4	Considerações Finais	29
5	Desenvolvimento	30
5.1	Arquitetura Proposta	30
5.2	Elementos da Arquitetura	30
5.2.1	Comunicação Entre MCU e Transceptor	30
5.2.2	Interrupção de <i>Hardware</i>	31
5.2.3	Estação Principal	32
5.2.3.1	Comunicação Entre MCU e Computador	32
5.2.4	Estações Remotas	33
5.2.4.1	Interação com Sensores e Atuadores	33
5.3	Endereçamento	34
5.4	Comunicação Ponto a Ponto	35
5.5	Roteamento	36
5.5.1	Busca do Caminho	37
5.6	Mensagem	39
5.6.1	Endereço, Falha e Pai	40
5.6.2	Emergência	41
5.6.3	Medição	41
5.6.4	Novo Nó	41
5.6.5	Leitura	42
5.6.6	Escrita	42

5.7	Experimentação	42
5.7.1	Protótipos	43
5.7.2	Testes	44
5.8	Custo e Consumo	45
5.9	Considerações Finais	46
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	47
	Referências	48

1 Introdução

Ao longo dos anos, a computação e suas aplicações se tornaram cada vez mais presentes no nosso cotidiano. Uma série de fatores contribuiu com a rápida difusão da tecnologia em vários setores, como os ambientes domésticos e empresariais, com o objetivo de melhorar aspectos de controle, eficiência e gestão.

Embora já na década de 60 casas eletricamente sofisticadas eram construídas, foi durante a primeira metade da década de 1980 que o termo “casa inteligente” passou a ser utilizado, pois o que determina uma casa inteligente não é o quanto bem é construída ou quanto efetiva ela é em relação ao espaço, mas sim as tecnologias interativas que ela contém [HARPER, 2003].

Para Aldrich [2003], uma casa inteligente pode ser definida como uma residência equipada de tecnologias computacionais que antecipam e respondem às necessidades dos ocupantes, promovendo conforto, conveniência, segurança e entretenimento através do gerenciamento da tecnologia interna e conexões com o mundo afora.

Além disso, como a redução de consumo elétrico é um dos principais atrativos ao empregar este conceito de inteligência, a casa normalmente possui integrações com fontes de energias renováveis, como a solar e a eólica.

Uma casa inteligente pode ser obtida através da aplicação de domótica, que é um termo que se origina através da junção das palavras *domus*, latim para “casa”, e robótica, que remete à automação. Sendo assim, domótica pode ser traduzida como automação residencial, porém, grande parte de seus conceitos também pode ser aplicada a diversos ambientes como escritórios, indústrias, entre outros.

Sob uma perspectiva técnica, automação residencial consiste em cinco princípios: dispositivos sob controle, que são todos os eletrodomésticos e eletrônicos de consumo que estão conectados e controlados pelo mesmo sistema de automatização; sensores e atuadores, que agem como os olhos e mãos da rede residencial medindo e controlando o ambiente; dispositivos de controle remoto, como um *smartphone*, que possibilitam a interação do usuário com a aplicação; controlador, um sistema computacional que coleta informações através dos sensores e recebe comandos através do dispositivo de controle remoto; e redes de controle, que fornecem a comunicação entre as tecnologias envolvidas [KYAS, 2013].

Em relação à rede de controle, essa pode existir em três formatos: sem fio, com fio ou utilizando cabos de energia elétrica. As três tecnologias têm melhorado significamente em termos de velocidade, confiabilidade e interoperabilidade através da padronização nos

últimos dez anos [KYAS, 2013].

Contudo, ainda hoje não há um protocolo de comunicação que seja inteiramente adotado, em parte devido ao fato de requerer que os fabricantes concordem em criar eletrônicos com as mesmas interfaces e protocolos designados em seus produtos. Porém, as tentativas em padronizar a comunicação na domótica existem desde quase seu início. Uma das primeiras tentativas foi o X10, que utilizava a rede elétrica existente para transmitir mensagens através de pulsos codificados, mas devido a diversos problemas, como degradação de sinal e dificuldade para verificação de pacotes, ele acabou não ganhando muita aceitação [RILEY, 2012].

A expectativa é que todos os dispositivos eletroeletrônicos possuam conexão à internet, conceito que vem sendo chamado de Internet das Coisas e que prevê o endereçamento único para todos os nós conectados na rede mundial através da implantação do IPv6. Este último é uma evolução do protocolo de rede IPv4 e surgiu em 1994 com a intenção de resolver a limitação de espaço de endereço prevista e fornecer funcionalidades adicionais [HAGEN, 2002].

Entretanto, a adoção do IPv6 de forma unânime ainda não aconteceu mesmo depois de duas décadas desde sua criação. Além disso, sua utilização completa em domótica levanta a questão quanto à necessidade em conectar dispositivos simples como sensores e atuadores à *internet*, levando em consideração custo de implementação e vulnerabilidade. Alternativamente, existe a possibilidade em desenvolver uma rede específica para esses transdutores, permitindo implementar o monitoramento de um ambiente inteligente de maneira simples e eficaz.

Essa rede específica, conhecida como rede de sensores [e atuadores], é uma infraestrutura composta por dispositivos de medição e atuação, de computação e de comunicação que possibilitam instrumentar, observar e reagir à eventos e fenômenos em um determinado ambiente [SOHRABY; MINOLI; ZNATI, 2007].

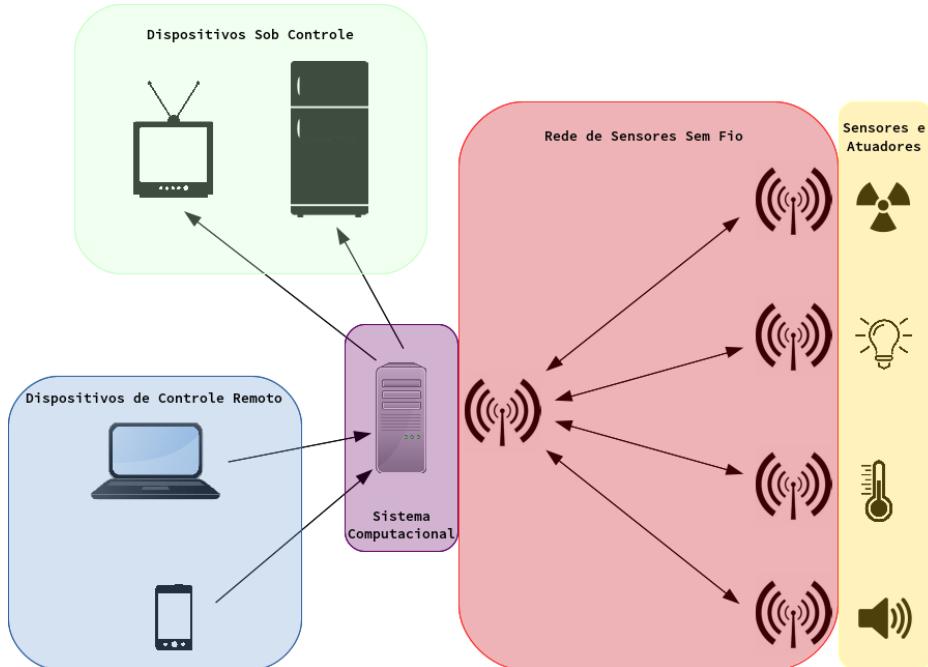
Os quantitativos físicos que podem ser medidos são diversos, como temperatura, umidade, som, luz, radiação, etc. Como consequência, são várias as possibilidades de aplicação. Algumas das mais comuns são automação residencial e comercial, monitoramento ambiental e industrial, controle de tráfego, aplicações militares e assistência médica. A complexidade da rede deve ser proporcional à sua aplicação e vários aspectos devem ser levados em consideração, como por exemplo o meio de comunicação optado [KUORILEHTO et al., 2007].

A utilização de fios para realizar tal tarefa é normalmente descartada devido a diversos fatores como custo, manutenção, localização e mobilidade. Portanto, uma comunicação sem fio, na maioria dos cenários, é um requisito inevitável. Com isso, surgiu o termo Rede de Sensores Sem Fio (RSSF), que, apesar do nome, frequentemente também

inclui atuadores [KARL; WILLIG, 2005].

A Figura 1 ilustra um sistema de domótica utilizando uma rede sem fio para comunicação apenas com os sensores e atuadores ao invés de uma única rede de controle entre todos os dispositivos.

Figura 1: Esboço de uma automação residencial



Fonte: elaborada pelo autor

Para este caso é preferível que a implementação da RSSF seja simples, a fim de obter uma solução com baixo custo e baixo consumo de eletricidade. Sendo assim, é necessário escolher a tecnologia adequada para tal feito. O protocolo Wi-Fi, por exemplo, foi taxado como muito complexo e com suporte a largura de banda maior que o necessário; já sistemas infravermelho requerem uma linha de visão, o que nem sempre é possível neste caso. A tecnologia Bluetooth, por sua vez, aparentou ser promissora no início mas logo foi julgada como cara e complexa [SOHRABY; MINOLI; ZNATI, 2007].

O padrão IEEE 802.15.4 é uma especificação de comunicação por radiofrequência de baixo alcance projetado para ter baixa complexidade, baixo custo, baixo consumo de energia e baixa taxa de transmissão de dados. Esse padrão implementa as camadas física e de controle de acesso ao meio (MAC) e é amplamente utilizado na construção de RSSFs. Além disso, serve como base para outros protocolos que implementam camadas superiores, como por exemplo o protocolo ZigBee, que fornece mecanismos para entrada e saída em uma rede, segurança de pacotes, roteamento, descoberta de caminho, entre outros recursos [BURATTI et al., 2011].

Outro protocolo que se baseia no padrão IEEE 802.15.4 é o 6LoWPAN(*IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks*), que possibilita o uso eficiente do IPv6

sobre redes sem fio de baixa taxa e baixo consumo de energia em dispositivos embarcados simples através de uma camada de adaptação e da otimização dos protocolos relacionados [SHELBY; BORMANN, 2009].

Porém, os módulos que utilizam esses protocolos sofisticados possuem um preço relativamente maior em relação aos módulos com funcionamento mais básico e acabam inflando o custo total da RSSF de acordo com o número de nós da mesma. Portanto, a fim de se obter uma solução barata é necessário utilizar um transceptor simples e uma unidade de controle externa de baixo custo para implementar as demais funcionalidades não realizadas pelo módulo.

Como consequência, ao abrir mão das facilidades que os protocolos de comunicação avançados proporcionam, o esforço requerido para o desenvolvimento de uma RSSF acaba se tornando maior, sendo necessário definir e implementar diversos aspectos da mesma.

1.1 Objetivo

Desenvolver uma rede de sensores sem fio, simples e eficaz, para aplicação em automação de residências e escritórios utilizando tecnologias existentes e visando baixo custo e baixo consumo elétrico.

1.2 Organização

Para o melhor entendimento, essa monografia foi organizada da seguinte forma:

- O Capítulo 2 aborda o tema automação residencial, onde são apontados e descritos alguns conceitos chaves tal como desafios que uma solução desse porte apresenta.
- No Capítulo 3 são apresentados diversos sensores, onde são explicados seus funcionamentos e aplicações.
- O Capítulo 4 trata sobre as redes de sensores sem fio, onde se descreve a definição, características e sua inserção na domótica. Além disso, algumas tecnologias são apresentadas e, por fim, comenta sobre possíveis topologias de rede.
- No Capítulo 5 é descrito todo o processo de desenvolvimento, como a proposta de arquitetura da rede e seus componentes, mecanismos de endereçamento e roteamento, mensagens utilizadas na comunicação e protótipos obtidos.
- Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões do autor e possíveis trabalhos futuros.

2 Automação Residencial

2.1 Considerações Iniciais

De acordo com Groover [1987], automação é a tecnologia pela qual um processo é realizado sem assistência humana através de um sistema de controle, instruções de programa e alguma forma de energia, sendo a elétrica a mais comum.

Seguindo esta mesma definição, uma automação residencial é um produto ou serviço que proporciona algum nível de ação ou mensagem para o ambiente domiciliar, um evento que foi gerado sem a intervenção direta do morador. Um despertador ou um alarme de incêndio são exemplos disso, porém, esses dispositivos autônomos não necessariamente possuem um mecanismo de comunicação entre eles, limitando o nível da automação e inteligência da solução [RILEY, 2012].

A automação residencial é um componente fundamental para que se possa construir casas inteligentes, ou seja, ambientes inteligentes que interagem dinamicamente e respondem prontamente às necessidade dos ocupantes a às mudanças condicionais de uma maneira adaptativa [AL-QUTAYRI, 2010].

A variedade de aplicações suportadas por uma casa inteligente é bastante abrangente. Algumas das mais comuns incluem monitoramento e controle do ambiente, segurança, entretenimento, serviços baseados em localização, cuidados de crianças e idosos, entre outros [AL-QUTAYRI, 2010].

É desejável que essa automação seja pervasiva, ou seja, que a interação entre o usuário e o ambiente ocorra naturalmente. Os dispositivos de uma solução pervasiva, ou ubíqua, possuem três características fundamentais: miniaturização, comunicação e autonomia [LALANDA et al., 2010].

O atendimento desses critérios está ocorrendo de uma forma crescente nos últimos anos através da evolução dos equipamentos computacionais, tornando ainda mais acessível o desenvolvimento de uma automação residencial, seja por empresas ou entusiastas na área.

2.2 Conceitos Chaves

Para Kyas [2013], uma automação residencial consiste em cinco blocos de construção:

- Dispositivos sob controle;
- Dispositivos de controle remoto;
- Rede de controle;
- Controlador;
- Sensores e atuadores.

2.2.1 Dispositivos Sob Controle

Pode-se considerar todos os componentes de uma residência, como eletrodomésticos, móveis, objetos e até partes da construção, como portas e janelas. Atualmente, muitos desses dispositivos já possuem diversas funcionalidades embutidas, podendo ser chamados de inteligentes por si só.

Um grande exemplo são as *smart TVs*, que possibilitam com que a televisão deixe de ser apenas um aparelho de reprodução de conteúdo para ser um centro de entretenimento interativo.

As aplicações nessa área de aparelhos de consumo inteligentes são diversas. É possível, por exemplo, que uma cama seja programada para lembrar as configurações de temperatura, som, aroma e luz do usuário, ou então que uma geladeira possa controlar o estoque e validade dos alimentos mantidos, entre muitas outras utilidades [JIANG; LIU; YANG, 2004].

O principal desafio está em integrar todos esses eletrodomésticos ao sistema de automação residencial, sendo necessário definir um mecanismo de comunicação e adaptar os aparelhos que não o possuam.

2.2.2 Dispositivos de Controle Remoto

São responsáveis por oferecer uma interface remota ao usuário para gerenciar o sistema de automação. Para isso, eles se conectam ao controlador, seja através da própria rede de controle ou outro meio fornecido, como a *Internet*. Atualmente esses dispositivos são representados principalmente por *smartphones* e *tablets*, cuja existência é um dos principais motivos pelo aumento da aceitação de sistemas de automação em ambientes residenciais [KYAS, 2013].

2.2.3 Rede de Controle

É quem possibilita a conexão entre os dispositivos sob controle, sensores e atuadores com o controlador e, às vezes, com os dispositivos de controle remoto [KYAS, 2013].

Embora existam várias implementações que utilizam fios (sejam eles de energia elétrica ou apenas de dados) para transportar as mensagens, a comunicação sem fio é a melhor alternativa para obter uma solução ubíqua, além de normalmente ter um custo de desenvolvimento e implantação muito menor.

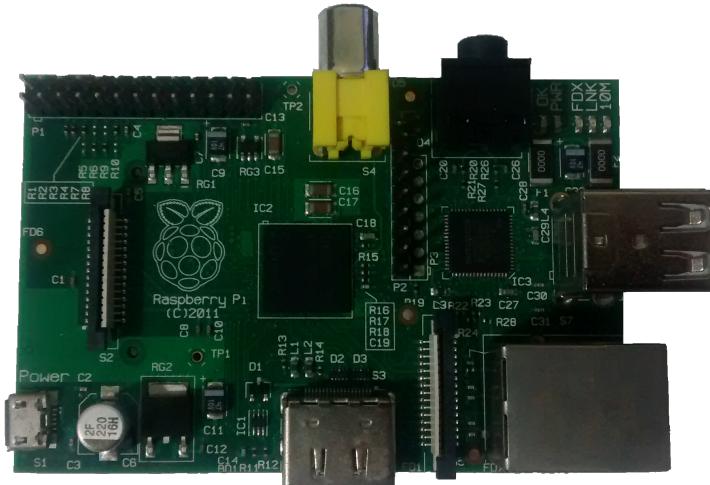
2.2.4 Controlador

É um sistema computacional onde se localiza a aplicação de controle da automação. É responsável por receber comandos do usuário e interagir com os dispositivos e transdutores.

Qualquer computador pessoal pode assumir esta função, mas normalmente se utiliza microcomputadores de pequeno porte com sistema operacional embarcado devido ao baixo preço e baixo consumo elétrico que eles proporcionam.

Um dos principais exemplos de microcomputadores dessa categoria é o Raspberry Pi, ilustrado na figura 2. Foi desenvolvido inicialmente com o propósito de ensinar crianças a programar, porém ganhou uma imensa aceitação e passou a ser utilizado para diversos propósitos, como centro multimídia, servidor *web*, e, principalmente, para experimentação com eletrônicos [SCHMIDT, 2014].

Figura 2: Modelo de Raspberry Pi



Fonte: fotografada pelo autor

2.2.5 Sensores e Atuadores

São as verdadeiras interfaces para o mundo físico, ou seja, são dispositivos que podem observar ou controlar parâmetros físicos do ambiente [KARL; WILLIG, 2005].

Para Fraden [2010], o propósito de um sensor é receber algum tipo de propriedade física como entrada e convertê-la para um sinal elétrico que seja compatível com circuitos

eletrônicos. Já um atuador pode ser descrito como o oposto de um sensor, pois converte um sinal elétrico para algum tipo de energia, geralmente não elétrica.

Este tópico será melhor aprofundado no Capítulo 3.

2.3 Desafios

Embora a área de automação residencial avançou muito na última década, ainda existem algumas barreiras que dificultam o desenvolvimento e gerenciamento de um sistema dessa categoria.

Para Jiang, Liu e Yang [2004], existem três desafios fundamentais ao implementar um ambiente automatizado. O primeiro consiste em desenvolver o sistema utilizando uma abordagem de planejamento e integração desde o início, para que não ocorra adições crescentes de componentes tecnológicos sem que eles se beneficiem da solução. O segundo problema consiste na interoperabilidade devido aos inúmeros fabricantes existentes e a falta de um protocolo de comunicação acordado entre todos. Por último, tem-se a confiabilidade como um dos principais critérios a ser atendidos.

Em uma pesquisa realizada por Brush et al. [2011] foram entrevistados 14 moradores de residências automatizadas, e as principais barreiras encontradas por eles foram:

- **Alto custo de propriedade:** custo relacionado em adquirir e manter o sistema de automação, seja ele monetário, de tempo gasto, ou ambos;
- **Inflexibilidade:** dificuldade em alterar ou adicionar componentes devido à necessidade de mudanças estruturais e à falta de compatibilidade entre dispositivos;
- **Gerenciamento precário:** o sistema deve prever futuras iterações do desenvolvimento para que essa barreira seja amenizada, além disso, é desejável que haja uma interface de usuário intuitiva para realizar procedimentos de manutenção;
- **Dificuldade em obter segurança:** normalmente o nível de segurança é inversamente proporcional ao de comodidade, deixando os usuários na dúvida quanto algumas questões como acesso remoto, travamento de portas e janelas e vigilância.

Além desses, a característica pervasiva de uma automação domiciliar acarreta em alguns outros desafios, como a necessidade de auto-adaptação devido ao dinamismo de comportamento, localização e hábitos dos usuários tal como mudanças ambientais. A solução deve ser também capaz de lidar com um grande número de equipamentos dinâmicos, de modo que ela seja facilmente escalável. Por fim, a facilidade de uso é uma das principais barreiras que devem ser solucionadas a fim de popularizar cada vez mais esse tipo de automação [LALANDA et al., 2010].

2.4 Considerações Finais

Automação residencial é um conceito extremamente promissor cuja popularidade vem crescendo nos últimos anos. Isso se deve ao avanço de tecnologias em *hardware* que permite a fabricação de componentes eletrônicos cada vez mais acessíveis e fáceis de se trabalhar, aumentando o número de pessoas aptas a pensar e desenvolver novas soluções.

O simples fato de uma residência monitorada remotamente ser considerada ficção científica há algumas décadas e hoje poder ser implementada por qualquer pessoa com vontade suficiente em aprender é só mínimo extraordinário.

3 Sensores e Atuadores

3.1 Considerações Iniciais

Um sensor é um dispositivo que detecta ou mede um quantitativo físico e o transforma, normalmente, em um sinal elétrico. O dispositivo oposto é o atuador, que converte um sinal elétrico para alguma ação, normalmente mecânica [SINCLAIR, 2001].

Um transdutor é definido como qualquer dispositivo que converte um tipo de energia para outro. Alguns autores diferenciam-os de sensores, seja alegando que transdutores possuem uma preocupação maior com a eficiência da conversão de energia ou que o sensor é apenas uma parte do transdutor responsável por detectar a variável do ambiente [SINCLAIR, 2001; KONDRAVAS, 2013].

Contudo, neste trabalho considera-se que, por definição, sensores e atuadores são tipos de transdutores.

3.2 Sensores

Ananços tecnológicos recentes tem permitido o desenvolvimento de dispositivos sensores de baixo custo, baixo consumo de energia e pequenos portes. Eles podem medir distância, direção, velocidade, umidade, temperatura, luz, vibração, pressão, propriedades acústicas e muitos outros atributos [LIU; NAYAK; STOJMENOVIC, 2010].

De acordo com Karl e Willig [2005], os sensores podem ser divididos em três categorias:

- **Passivos e omnidirecionais:** medem informações físicas sem manipular o ambiente, utilizando apenas os fenômenos existentes (vibração, luz, radiação, etc). Além disso, não possuem noção de direção envolvida na medição. A maioria dos sensores pertencem à esta categoria, alguns exemplos são sensores de temperatura, luz, umidade, gases, entre outros.
- **Passivos e de feixe estreito:** diferenciam-se dos anteriores pois possuem uma noção bem definida de direção. Um exemplo típico é uma câmera, que atua sobre uma faixa de detecção direcionada e limitada.
- **Ativos:** ao contrário dos anteriores, sensores deste tipo emitem algum tipo de sinal, como ondas ou elétrons, e captam as informações através do reflexo desses sinais emitidos. Os exemplos mais conhecidos são os sensores sonares, radares e sísmicos.

Também podem ser classificados quanto à referência selecionada, sendo ela absoluta ou relativa. Um sensor absoluto converte um estímulo para uma escala física absoluta que é independente das condições de medição, já um sensor relativo produz um sinal que se refere à algum caso especial. Os sensores de pressão, por exemplo, podem ser absolutos, cujo sinal produzido é relativo ao vácuo (zero absoluto na escala de pressão), ou relativos, que produzem sinais referentes à algum patamar, como a pressão atmosférica [FRADEN, 2010].

Uma maneira lógica de classificá-los é através da propriedade física que está sendo medida, como temperatura, pressão, movimento, etc [KENNY; KESTER, 2005].

Podem também ser divididos em analógicos e digitais. Segundo Thomazini e Albuquerque [2005], um sensor analógico é capaz de assumir qualquer valor em seu sinal de saída ao longo do tempo, desde que esteja dentro da sua faixa de operação, já um digital pode assumir apenas dois valores, que podem ser interpretados como zero ou um, após serem convertidos pelo circuito eletrônico do transdutor.

Há diversas características relevantes quando se trata de sensores, uma delas é a resolução, que mede a menor alteração do quantitativo físico que um sensor consegue detectar [SINCLAIR, 2001].

Outra característica importante é a área de cobertura ou alcance de um sensor, que consiste na distância em que ele consegue captar a informação de maneira precisa e confiável [KARL; WILLIG, 2005].

Além desses, existem alguns outros atributos que caracterizam um sensor, sendo eles: sensibilidade, a relação entre o sinal físico de entrada e o elétrico de saída; exatidão, a diferença entre o valor real e o valor gerado pelo sensor; precisão, a capacidade de reproduzir os resultados que foram obtidos experimentalmente da mesma forma; ruído, produzido pelo sensor e adicionado ao sinal de saída; largura de banda ou tempo de resposta, velocidade com que o sensor consegue prover uma corrente de leitura [KENNY; KESTER, 2005; KONDRAOVAS, 2013].

3.2.1 Temperatura

Devido à grande significância de seu efeito em materiais, a temperatura é a variável mais medida e determina o grau de “quentura” ou “frieza” referenciada à uma escala específica. Ela é proporcional à taxa de energia cinética das moléculas e átomos pertencentes a um objeto ou sistema. [FONTES, 2005b; PEETERS; PEETERMANS; INDESTEEGE, 2007].

Segundo Fontes [2005b], sensores de temperatura detectam uma mudança em um parâmetro físico, como resistência ou tensão de saída, que corresponde à uma mudança

de temperatura e que pode ser medida através de duas maneiras:

- **Com contato:** requer que o sensor esteja em contato físico direto com o objeto ou sistema a ser mensurado;
- **Sem contato:** a medição interpreta a energia radiante de uma fonte de calor emitida na faixa infravermelha do espectro eletromagnético.

Essa leitura pode ser realizada de maneira estática, onde a temperatura do corpo permanece estável, e dinâmica, quando a temperatura varia durante a medição. No caso da leitura dinâmica, existe um tempo de retardo entre a temperatura e o valor medido que é chamado de erro dinâmico. Esse erro depende do tempo de resposta do sensor e da taxa de variação da temperatura [PEETERS; PEETERMANS; INDESTEEGE, 2007].

Os sensores de temperatura absoluta utilizam como referência o zero absoluto (0 K) ou qualquer outro ponto na escala de temperatura absoluta, como o 0°C (273.15 K), já os relativos medem a diferença de temperatura entre dois objetos, sendo um deles a referência [FRADEN, 2010].

Existem diversos tipos de sensores de temperatura, cada qual com suas vantagens e desvantagens de acordo com a aplicação. A seguir serão apresentados quatro dos principais tipos.

3.2.1.1 Termorresistências

Também chamados de RTD (*Resistance Temperature Detector*), são sensores de temperatura cujo funcionamento se baseia na variação de resistência elétrica do elemento condutor em função da temperatura. Esse elemento responsável pela medição pode ser platina, níquel ou cobre [THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005].

A platina possui a relação entre temperatura e resistência mais estável sobre a maior faixa de temperatura. Já o cobre possui a resistência mais linear mas oxida facilmente e o níquel é o mais barato porém possui uma faixa de temperatura limitada [BURNS, 2014].

Devido à essa grande estabilidade e exatidão, a termorresistência mais utilizada é a de platina, sendo capaz de trabalhar na faixa de -200°C a 850°C [THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005].

A figura 3 mostra um modelo de RTD que contém uma cabeça de conexão que é comumente utilizada neste tipo de sensor e serve para fornecer uma transição entre o RTD e a fixação da aplicação além de prover uma proteção contra condições ambientais, como água e outros contaminantes [BURNS, 2014].

Figura 3: RTD com cabeça de conexão



Fonte: <http://www.apcs.net.au>

3.2.1.2 Termistores

Assim como os RTDs, os termistores são dispositivos que alteram a resistência elétrica em relação à temperatura. No entanto, são formados por semicondutores fabricados com misturas de óxidos metálicos [WHITE; SAPOFF, 2014].

Há dois tipos diferentes de termistores disponíveis: PTC (*Positive Temperature Coefficient*), que exibem um aumento de resistência ao passo que a temperatura aumenta e NTC (*Negative Temperature Coefficient*), que decrementam a resistência elétrica de acordo com o crescimento da temperatura [FONTES, 2005b].

Os termistores do tipo PTC possuem um coeficiente de temperatura extremamente variável, que é denominado por uma região de temperatura em que o coeficiente de resistência aumenta rapidamente. Fora desse limite, o coeficiente é negativo ou nulo, o que os torna não viáveis para medições de temperatura [WHITE; SAPOFF, 2014; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005].

Os do tipo NTC, por outro lado, são ideais para medições de temperatura, pois mesmo operando com uma faixa de temperatura útil pequena em comparação à um RTD, por exemplo, conseguem realizar medições mais sensíveis dentro dessa faixa, que normalmente varia entre -80°C à 250°C [SINCLAIR, 2001; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005].

Devido ao simples processo de fabricação, termistores podem ser feitos em escala pequena, conforme ilustrado na figura 4, o que torna o tempo de resposta térmico extremamente rápido [PEETERS; PEETERMANS; INDESTEEGE, 2007; SINCLAIR, 2001].

3.2.1.3 Termopares

Também chamados de sensores de contato termoelétrico, os termopares são formados quando dois condutores elétricos de metais diferentes são ligados à uma extremidade de um circuito. Entretanto, é necessário ter pelo menos duas ligações para obter um sen-

Figura 4: Modelo de termistor NTC



Fonte: <http://www.globalsources.com>

sor prático. Desse modo, esses sensores possuem uma ligação de medição, que é exposta à temperatura do processo, e uma ligação de referência, que é mantida à uma referência de temperatura conhecida [FRADEN, 2010; FONTES, 2005b].

Quando as duas junções estiverem em temperaturas diferentes, uma corrente irá fluir pelos fios proporcionalmente à essa diferença. A temperatura na junção de medição pode então ser determinada a partir do tipo de termopar utilizado e da temperatura da junção de referência [FRADEN, 2010].

Os termopares, exemplificados pela figura 5, são amplamente utilizados em ambientes industriais, pois são os que cobrem a maior faixa de temperatura (-200 a 2.300°C aproximadamente) e possuem uma boa exatidão e precisão [THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005].

Figura 5: Exemplo de termopar



Fonte: <http://www.kalkaheater.com>

3.2.1.4 Eletrônicos

São dispositivos à base de silício que utilizam propriedades de resistência elétrica para medir a temperatura e oferecem uma curva de resistência quase linear. Dois grandes exemplos são os diodos, que possuem um decaimento de tensão para cada aumento de grau térmico, e os transistores, cujos parâmetros variam com a temperatura [THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005].

Esses sensores eletrônicos também podem vir na forma de circuito integrado, que além de fornecer uma leitura de temperatura direta e digital, também possuem outras funções como filtros, reguladores e proteções [FONTES, 2005b; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005].

A figura 6 mostra um sensor de temperatura eletrônico que utiliza um diodo para efetuar a medição.

Figura 6: Sensor de temperatura eletrônico



Fonte: <https://www.sparkfun.com>

3.2.1.5 Critério de Escolha

Os quatro tipos apresentados são opções viáveis para medição de temperatura, porém, os que mais se adequam a aplicações residenciais são os termistores e eletrônicos, pois atuam em uma faixa de temperatura compatível com a encontrada nesse tipo de ambiente e possuem um ótimo custo-benefício.

Os termopares são os menos estáveis e sensíveis e requerem fios de extensão especiais. Já os RTDs, apesar de serem os mais exatos e precisos, são relativamente grandes e caros [FONTES, 2005b].

3.2.2 Luz

São considerados sensores de luz dispositivos que são capazes de detectar radiação eletromagnética na faixa espectral entre microondas e ultravioleta, que engloba as radiações infravermelhas e a luz visível ao olho humano. Esses sensores podem ser divididos em quânticos e térmicos [FRADEN, 2010].

A luz e as demais formas de radiação possuem partículas elementares chamadas fôtons, que são responsáveis por quantificar a força eletromagnética. Os sensores quânticos absorvem esses fôtons e emitem elétrons contendo a energia radioativa correspondente, efeito conhecido como fotoelétrico. Já os sensores térmicos, recebem a radiação infravermelha e utilizam um termômetro para medir o aumento de temperatura do corpo detector [KENNY, 2005].

Para aplicações residenciais e prediais, a faixa que mais interessa é a de luz visível. Sendo assim, é preferível a utilização de sensores de luz quânticos, pois oferecem o melhor desempenho para detecção de radiação ótica e que geralmente são produzidos nas formas de fotodiodos, fototransistores ou fotoresistores [FRADEN, 2010].

3.2.2.1 Fotodiodos

O fotodiodo, representado na figura 7, é um diodo cuja junção de semicondutores está exposta à incidência de raios luminosos, onde a energia recebida através dos fótons permite com que essa junção se comporte como condutora elétrica independente da polarização aplicada, gerando assim uma energia elétrica correspondente [SINCLAIR, 2001].

Figura 7: Fotodiodo



Fonte: <http://www.digikey.com>

Ele possui dois modos de operação, fotovoltaico (FV) e fotocondutivo (FC). No modo FV não há polarização do diodo, dessa forma, ele opera como um dispositivo gerador de corrente pois converte a energia luminosa em tensão elétrica. Normalmente é utilizado como uma pequena bateria solar e raramente como sensor [FRADEN, 2010].

Já no modo FC, o diodo é polarizado. Se essa polarização for direta, o aumento de corrente gerado pela incidência luminosa será pequeno refente à corrente negra (gerada pelo circuito e conduzida pelo diodo na ausência de luz), tornando-os não muito úteis para atuarem como sensores. Senso assim, normalmente os fotodiodos no modo FC são inversamente polarizados, gerando uma corrente elétrica quase linearmente proporcional à intensidade de luz [ĐAĐO; FISCHER, 2007].

3.2.2.2 Fototransistores

Opera como uma combinação de um fotodiodo polarizado inversamente e um transistor convencional. Dessa forma, a corrente gerada pelo efeito fotoelétrico na junção do transistor é amplificada, o que torna um fototransistor, ilustrado na figura 8, um sensor de luz extremamente sensível [ĐAĐO; FISCHER, 2007].

Figura 8: Fototransistor



Fonte: <http://www.digikey.com>

Contudo, a penalidade para este grande aumento de sensibilidade é um tempo de resposta muito maior que o dos fotodiodos. Devido a isso, os fototransistores são pouco utilizados, pois é possível obter uma boa sensibilidade e tempo de resposta utilizando fotodiodos integrados com amplificadores operacionais [SINCLAIR, 2001].

3.2.2.3 Fotoresistores

Também chamados de LDR (*Light Dependent Resistor*), são dispositivos cuja resistência altera sob a incidência luminosa na superfície, que normalmente é fabricada com materiais baseados em cádmio como o mostrado na figura 9 [ĐAĐO; FISCHER, 2007].

Figura 9: Fotoresistor



Fonte: <http://www.digikey.com>

A sensibilidade desses dispositivos varia dependendo do tamanho da superfície, mas normalmente é maior que a de um fotodiode e possuem o pior tempo de resposta entre os três fotosensores mencionados [THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005].

3.2.2.4 Critério de Escolha

Embora possuam algumas diferenças de performance, tanto os fotodiodos, fototransistores e fotoresistores possuem baixo custo e são opções válidas para atuarem como sensores de luz em uma aplicação residencial.

3.2.3 Umidade

É um quantitativo físico definido como a quantidade de vapor de água contida no ar ou em outros gases e é um dos fatores mais importantes quando se refere à conforto e bem-estar, juntamente com a temperatura [FONTES, 2005a; FRADEN, 2010].

A quantidade real de vapor de água, expressa em gramas por metro cúbico de ar (densidade), contida na atmosfera é chamada de umidade absoluta e muda de acordo com a temperatura do ambiente. Quando o valor máximo em que essa densidade pode atingir é alcançado à determinada temperatura, diz-se que o ar está saturado, condição conhecida como ponto de orvalho. Com isso, é possível obter a chamada umidade relativa, que é o quociente entre a umidade absoluta e o ponto de orvalho [FRADEN, 2010; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005].

Os avanços recentes no desenvolvimento de tecnologias semicondutoras permitiram a existência de sensores de umidade que são altamente precisos, duráveis e eficazes em relação ao custo. Os mais comuns são os capacitivos, resistivos e termicamente condutivos [FONTES, 2005a].

3.2.3.1 Capacitivos

São sensores de umidade relativa que respondem às variações de quantidade de vapor de água alterando a permissividade relativa¹ de maneira diremente proporcional. Podem funcionar à altas temperaturas de ambiente (até 200° C) e representam mais de 75% dos sensores de umidade disponíveis no mercado [FARAHANI; WAGIRAN; HAMIDON, 2014].

O modelo mostrado na figura 10 é um exemplo desse tipo de sensor.

Figura 10: Sensor de umidade capacitivo



Fonte: <http://www.epluse.com>

¹ Permissividade relativa é uma propriedade que indica o quanto facilmente um material dielétrico pode se tornar polarizado pela imposição de um campo elétrico sobre ele [The Engineeringtoolbox, s. d.].

3.2.3.2 Resistivos

Medem a variação da impedância elétrica² gerada por um relacionamento exponencialmente inverso com a umidade [FONTES, 2005a].

Assim como os capacitivos, também são sensores de umidade relativa, e estão representados pela figura 11.

Figura 11: Sensor de umidade resistivo



Fonte: <http://www.amazon.co.uk>

3.2.3.3 Termicamente Condutivos

É possível utilizar a condutividade térmica do ar para medir a umidade através de um sensor baseado em termistor. Esse tipo de sensor utiliza dois termistores NTC conectados por um circuito ponte, onde um deles é exposto ao gás atmosférico e o outro é hermeticamente selado em ar seco. A diferença das resistências entre os dois é diretamente proporcional à umidade absoluta [FRADEN, 2010; FONTES, 2005a].

Na figura 12 tem-se um sensor termicamente condutivo, sendo que à esquerda são mostrados os dois termistores que o compõem.

Figura 12: Sensor de umidade termicamente condutivo



Fonte: <http://www.ohmicinstruments.com>

² Impedância elétrica é a medição da oposição que um circuito possui em relação à corrente elétrica [Encyclopedia Britannica Online, 2015].

3.2.3.4 Umidade em Sólidos

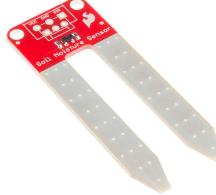
Diferente da língua inglesa onde há as palavras *humidity* e *moisture* que, em termos práticos, significam a quantidade de água no ar e em material sólido, respectivamente, em português ambas são traduzidas para umidade.

A maneira mais simples para detectar a presença de umidade em sólidos de composição aproximadamente fixa é realizar uma leitura de resistência entre conectores postos à um determinada distância sobre o material, pois a presença de água no mesmo altera sua condutividade elétrica [SINCLAIR, 2001; FRADEN, 2010].

Um das utilizações mais comum deste tipo de detecção é para verificação de umidade em solos, que embora não resulta em uma medição precisa, é suficiente para determinar se uma planta precisa ser regada ou não, por exemplo [SINCLAIR, 2001].

A figura 13 exemplifica um sensor de umidade que utiliza esse conceito de resistividade do solo.

Figura 13: Sensor de umidade em solo



Fonte: <https://www.sparkfun.com>

3.2.3.5 Critério de Escolha

Realizar a medição de umidade absoluta do ar é uma técnica bastante utilizada em alguns utensílios, como forno de microondas e secadoras de roupa, e em processos industriais, como máquinas de secagem e desidratação de alimentos [FONTES, 2005a].

Contudo, para aplicações residenciais é mais viável e prático medir a umidade relativa do ar, podendo utilizar tanto os sensores capacitivos quanto os resistivos, além, é claro, de utilizar sensores de umidade em sólidos.

3.2.4 Gás e Fumaça

A detecção de gás é um dos principais fatores quando se trata de segurança, seja em ambientes residenciais ou industriais, devido a existência de gases tóxicos e inflamáveis, como o monóxido de carbono. Além disso, a presença desse tipo de gás pode indicar ocorrências de incêndios, juntamente com a detecção de fumaça, que consiste em um

conjunto de fragmentos sólidos, partículas líquidas e gases emitidos normalmente em um processo de combustão [MULHOLLAND, 1995].

Em relação aos gases, são utilizados sensores químicos que reagem à determinada composição molecular. Quanto à fumaça, há os sensores iônicos e ópticos, que são externamente semelhantes conforme mostrado na figura 14.

Figura 14: Sensor de fumaça



Fonte: <http://www.dsc.com>

3.2.4.1 Químicos

De acordo com McMahon [2007], um sensor químico pode ser definido como um dispositivo que possui uma membrana sensitiva e que gera um sinal em resposta à alguma reação química, como uma ligação entre duas moléculas.

Duas características importantes para sensores químicos são a seletividade, que descreve o grau em que o sensor responde apenas para o composto desejado, e a sensibilidade ao composto alvo, que dita a concentração mínima necessária para que determinado alvo seja detectado [FRADEN, 2010].

A figura 15 contém um sensor de monóxido de carbono que gera uma resistência como sinal de saída de acordo com a concentração do gás.

Figura 15: Sensor de gás



Fonte: <https://www.sparkfun.com>

3.2.4.2 Iônicos

Consiste de uma fonte fraca de material radioativo entre duas superfícies metálicas com uma diferença de potencial entre elas, tudo dentro de um espaço chamado câmara de ionização³. As partículas provenientes desse material ionizam o ar contido nesse espaço o que permite uma pequena corrente elétrica passar entre os dois eletrodos. Desse modo,

³ Ionização é a geração de partículas eletricamente positivas ou negativas.

as partículas de fumaça, ao entrarem na câmara de ionização farão com que essa corrente diminua, ativando assim o sensor [SINCLAIR, 2001].

3.2.4.3 Ópticos

Baseiam-se no uso de um LED pulsante e de uma célula fotoelétrica posicionada de forma a não receber nenhum tipo de luz. No momento em que ocorre a entrada de fumaça nesse ambiente, a mesma dispersa os raios luminosos do LED que refletem sobre o sensor fotoelétrico [THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005].

3.2.4.4 Critério de Escolha

Em relação aos gases, normalmente utiliza-se sensores de monóxido de carbono e de alguns gases inflamáveis como metano ou butano.

Quanto aos sensores de fumaça, os iônicos são mais adequados para detectar fogos no estágio de fumaça visível enquanto os ópticos detectam melhor fogos no estágio latente. Recomenda-se utilizar os dois tipos de sensores em conjunto [SINCLAIR, 2001].

3.3 Atuadores

São responsáveis pela variação de parâmetros do ambiente a ser controlado, a partir da recepção de sinais provenientes do agente controlador do sistema. Podem realizar com maior precisão quase todas as ações físicas realizáveis por um humano [KONDRA SOVAS, 2013].

Alguns dos principais atuadores são os motores, para controle de movimentos de rotação e deslocamentos, e as válvulas, para controle de fluxo.

O relé eletromecânico, ilustrado na figura 16, é raramente considerado um atuador, isso porque a energia mecânica que ele produz não altera diretamente algum parâmetro físico do ambiente, ao invés disso, ele controla o estado de um circuito elétrico. Contudo, é válido classificá-lo nesta categoria pois em um sistema de automação residencial ele é essencial, sendo utilizado para o controle de lâmpadas, tomadas elétricas e eletrodomésticos.

Figura 16: Relé Eletromecânico



Fonte: <https://www.sparkfun.com>

3.4 Considerações Finais

O processo de escolha dos sensores e atuadores é um trabalho de pesquisa por si só, pois, como se observa neste capítulo, para cada parâmetro físico há inúmeros modelos que são adequados em determinadas situações.

Apesar da quantidade desses transdutores mencionada aqui, isso é apenas uma pequena parcela dos quantitativos que podem ser medidos e manipulados. Isso explica a importância de uma rede de sensores sem fio e porquê ela tem inúmeras aplicações no mundo real.

4 Rede de Sensores Sem Fio

4.1 Considerações Iniciais

A integração de sensores em estruturas, máquinas e ambientes, associada com a entrega eficiente das informações observadas, pode oferecer inúmeros benefícios para a sociedade, como prevenção de catástrofes, conservação de recursos naturais e aprimoramento de comodidade e segurança. Isso pode ser alcançado através da implantação de uma rede de sensores sem fio (RSSF) [TOWNSEND; ARMS, 2005].

Uma RSSF pode ser definida como uma rede de dispositivos, denominados nós, que podem monitorar o ambiente e comunicar a informação adquirida através de ligações sem fio. Esses dados são transmitidos, diretamente ou por múltiplos saltos, dependendo da topologia da rede, para um dispositivo principal, que pode estar conectado à outras redes, como a *Internet*, e que oferece uma interface de interação entre o usuário e a RSSF [BURATTI et al., 2011].

Segundo Liu, Nayak e Stojmenovic [2010], há três tipos de aplicação para RSSFs:

- **Orientada à Eventos:** os sensores reportam a informação obtida ao controlador quando alguma evento específico é detectado;
- **Periódica:** os sensores adquirem informações sobre o ambiente em tempos determinados e as enviam para o controlador periodicamente;
- **Sob Demanda:** os usuários é quem decidem quando obter dados ao enviar uma solicitação à RSSF e aguardar respectiva resposta.

Quanto à sua aplicação em um sistema de automação residencial, de acordo com os princípios mencionados no Capítulo 2, ela torna-se parte integrante da rede de controle, pois atua apenas sobre os sensores e atuadores e não sobre os aparelhos de consumo e possibilita com que o residente a gerencie através de um dispositivo de controle remoto.

Para [TOWNSEND; ARMS, 2005], a RSSF ideal deve ser escalável, consumir muito pouca energia, ter capacidade de rápida aquisição de dados, ser confiável e precisa a longo prazo, possuir baixo custo de desenvolvimento e instalação e não necessitar manutenção significativa.

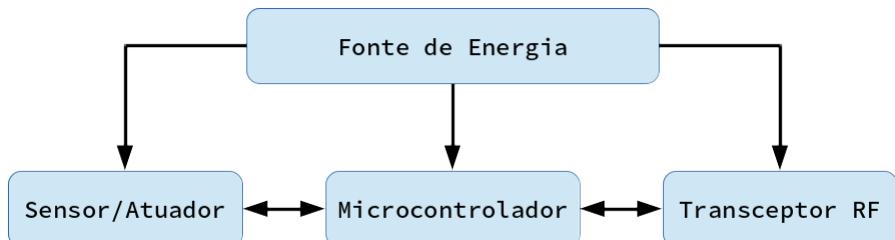
Em relação à sua implementação, alguns aspectos importantes devem ser definidos antes do processo de desenvolvimento, sendo eles a composição dos nós, a topologia da rede e os mecanismos de segurança.

4.2 Composição dos Nós

Os nós de uma RSSF são formados de cinco componentes principais, sendo eles uma unidade controladora, um dispositivo de armazenamento de memória, sensores e atuadores, um transceptor¹ sem fio e uma fonte de energia. Cada um desses componentes deve operar seguindo um equilíbrio entre o menor consumo de energia possível e a necessidade de cumprir suas tarefas [KARL; WILLIG, 2005].

Na prática, a unidade controladora e o armazenamento de memória tornam-se um só componente com o uso de microcontroladores, ou MCU (*Microcontroller Unit*), para cumprir tais funções. Desse modo, a composição de um nó de uma RSSF é normalmente conforme ilustrado na figura 17.

Figura 17: Composição de um nó em uma RSSF



Fonte: elaborada pelo autor

Segue uma breve descrição de cada um dos componentes, com exceção dos sensores e atuadores, já descritos no Capítulo 3.

4.2.1 Microcontrolador

Microcontroladores são geralmente definidos como computadores completos em um único *chip*, pois consistem de um núcleo de processamento com memórias de dados e de programa, pinos de E/S configuráveis e outras funcionalidades, dependendo do modelo utilizado, como temporizadores, portas de comunicação serial, conversor analógico-digital, etc [WILLIAMS, 2014; KUORILEHTO et al., 2007].

Além disso, algumas características como flexibilidade em conectar dispositivos externos, conjunto de instruções favoráveis à processamento de tempo-crítico e baixo consumo elétrico fazem com que os MCUs sejam amplamente utilizados em diversas aplicações, como sistemas embarcados e, evidentemente, redes de sensores sem fio [KARL; WILLIG, 2005].

Atualmente existem inúmeros modelos de MCU de fabricantes diferentes no mercado, alguns deles são mostrados na Tabela 1, sendo que o modelo L106 é o que vem embutido nos módulos transceptores ESP8266EX.

¹ Transceptor refere-se a um dispositivo que atua como transmissor e receptor.

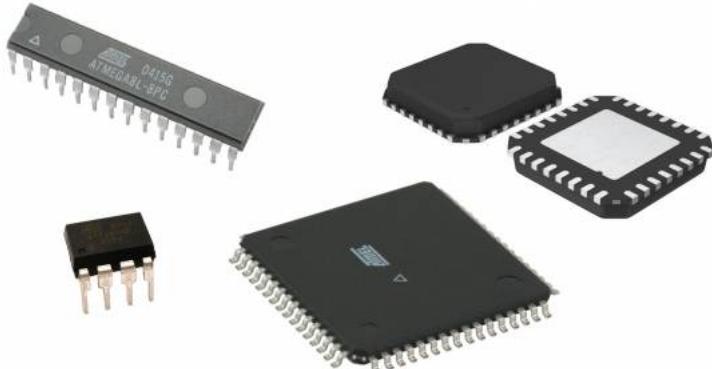
Microcontrolador	Pinos	Flash	RAM	Clock	Arquitetura	Consumo	Preço
Atmega328p	32	32 KB	2 KB	20 MHz	8-bit RISC	Active Mode: 0.2 mA Power-down Mode: 0.1 µA Power-save Mode: 0.75 µA	U\$ 3.70
PIC16F1718	28	28 KB	2 KB	32 MHz	8-bit RISC	Operating Current: 0.03 mA Sleep Mode: 0.05 µA	U\$ 1.68
MSP430G2553IN20	20	16 KB	512 B	16 MHz	16-bit RISC	Active Mode: 0.23 mA Off Mode: 0.1 µA Standby Mode: 0.5 µA	U\$ 2.66
L106 (ESP8266EX)	20	16 MB (externa)	36 KB	80 MHz	32-bit RISC	Não fornecido	U\$ 2.00 - U\$ 7.00

Tabela 1: Comparação entre microcontroladores

Dentre eles, destaca-se o Atmega328p que pertence à família de microcontroladores AVR da empresa *Atmel Corporation*. O principal motivo pela difusão desses modelos, além do baixo preço, é que eles oferecem *softwares* abertos e gratuitos para realizar a implementação do código embarcado. Um deles é o compilador **avr-gcc**, que é uma montagem do *GNU Compiler Collection* específica para os AVR e utiliza a biblioteca **AVR-Libc**, que fornece um subconjunto da biblioteca C padrão. Além disso, há também o programa **avrdude**, que é o responsável em transferir o código binário gerado para o microcontrolador.

Conforme mostra a figura 18, os microcontroladores AVR estão disponíveis em diversos tamanhos e pacotes, sendo que as funcionalidades embutidas, quantidade de memória disponível e outros atributos dependem do modelo utilizado.

Figura 18: Microcontroladores AVR



Fonte: <http://home.roboticlab.eu>

Os modelos AVR são os mesmos utilizados pelo **Arduino**, que nada mais é que uma camada de abstração ao MCU e que oferece algumas facilidades como conectores mais convenientes, bibliotecas implementadas, entre outras. Contudo, o objetivo principal do **Arduino** é permitir que novatos e pessoas fora da área possam realizar prototipações de computação de baixo nível. Embora seja uma ótima plataforma, seu custo chega a ser quatro vez mais que um AVR separado [TREVENNOR, 2012].

4.2.2 Transceptor

O uso da comunicação por radiofrequência (RF) tem se tornado cada vez mais abrangente, indo desde as aplicações tradicionais, como transmissão de sinais de rádio e televisão, para as mais diversas utilidades, como monitoramento de pacientes em um hospital, *mouses* e teclados sem fio, identificação por radiofrequência (RFID) e, naturalmente, redes de sensores sem fio [MISRA, 2001].

Embora transceptores baseados em ondas ópticas possuam uma eficiência energética melhor, sua necessidade por uma condição de linha de visão devido ao seu comportamento direcional faz com que a comunicação baseada em RF seja a mais relevante para a construção de uma RSSF, pois, além de ser omnidirecional, provê uma distância de alcance e uma taxa de transferência de dados relativamente altas [KUORILEHTO et al., 2007; KARL; WILLIG, 2005].

Conforme mencionado no Capítulo 1, os módulos transceptores RF que implementam protocolos de comunicação avançados como o ZigBee e o Wi-Fi deixam a desejar em relação ao preço e consumo energético, sendo necessário optar por módulos mais simples.

Uma possibilidade é utilizar o transceptor CC2500 da empresa *Texas Instruments*, que implementa o padrão IEEE 802.15.4. Devido ao baixo consumo elétrico e ótimo custo-benefício, esse dispositivo é amplamente utilizado.

Outro transceptor de rádio frequência bastante difundido é o nRF24L01+ da empresa *Nordic Semiconductor*. Embora possua a desvantagem de não seguir o padrão aberto da IEEE, esse dispositivo apresenta vantagens quanto ao custo e consumo em relação aos demais módulos dessa categoria, podendo ser observadas na Tabela 2, que exibe uma comparação entre os dois transceptores mencionados e dois que implementam protocolos de comunicação mais avançados. As informações foram retiradas de seus respectivos *datasheets* e os preços são de módulos prontos para o uso encontrados em *sites* de comércio eletrônico varejista.

Transceptor	Padrão/Protocolo	Taxa de Transmissão Máxima	Consumo	Alcance Ar Livre (aprox.)	Preço
nRF24L01+	Enhanced ShockBurst	2 Mbps	RX: 13.5 mA TX: 11.3 mA Espera: 26 µA	50 m.	U\$ 1.00
CC2500	IEEE 802.15.4	500 Kbps	RX: 17 mA TX: 21.2 mA Espera: 1.5 mA	50 m.	U\$ 2.00
xBee Series 1	IEEE 802.15.4 / ZigBee	250 Kbps	RX: 50 mA TX: 45 mA Espera: 10 µA	100 m.	U\$ 25.00
ESP8266-E01	Wi-Fi	54 Mbps	RX: 60 mA TX: 145 mA Espera: 0.9 mA	300 m.	U\$ 2.00

Tabela 2: Comparação entre módulos transceptores

O nRF24L01+, ilustrado na figura 19, ainda oferece serviços como reconhecimento

e retransmissão de pacotes automáticos, diminuindo o número de comunicação com a unidade microcontroladora tal como o processamento utilizado pela mesma. Dessa forma, além de reduzir ainda mais o consumo elétrico necessário, possibilita uma implementação eficiente utilizando microcontroladores simples e baratos.

Figura 19: Módulo Transceptor NRF24L01+



Fonte: <http://www.techmake.com>

4.2.3 Fonte de Energia

Consiste de um mecanismo de armazenamento de energia (normalmente uma bateria não recarregável), um regulador de tensão e, opcionalmente, uma unidade de obtenção energética. Essa obtenção pode ser através de diversos fenômenos, como a luz, vibrações, variação de temperatura, variação de pressão, entre outros [KUORILEHTO et al., 2007; KARL; WILLIG, 2005].

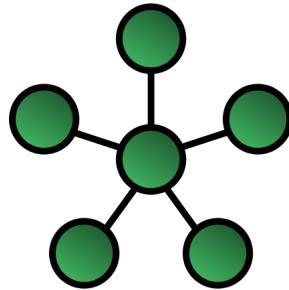
A característica de energia excassa que aplicações RSSF possuem, implica em alguns requerimentos de eficiência energética no planejamento dos nós, ou seja, o consumo deve ser minimizado. Há algumas estratégias que podem ser usadas para atingir esse objetivo, como reduzir a quantidade de informações transmitidas através de compreensão de dados ou redução, ativar o sensor apenas quando estiver coletando dados, implementar uma estratégia orientada à eventos para a coleta e transmissão, etc [KUORILEHTO et al., 2007; TOWNSEND; ARMS, 2005].

4.3 Topologia da Rede

4.3.1 Estrela

Em uma rede deste tipo, cada nó se comunica diretamente com a estação base (controlador). A vantagem desta topologia consiste na sua simplicidade e na capacidade de manter o menor consumo de energia possível, entretanto, o alcance fica limitado ao alcance do módulo transceptor, dificultando a escalabilidade da solução [DARGIE; POLLABAUER, 2010; TOWNSEND; ARMS, 2005].

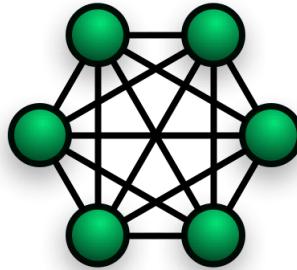
Figura 20: Rede Estrela

Fonte: <https://www.wikipedia.org/>

4.3.2 Malha

Nessa rede, cada nó pode se comunicar diretamente com qualquer outro nó dentro de seu alcance, o que permite a chamada comunicação *multihop*, ou seja, caso um nó queira se comunicar com outro fora de seu alcance, ele pode utilizar um intermediário para transmitir a mensagem adiante. Dessa forma, torna mais fácil escalar a aplicação e diminui a necessidade de uma estação central para certas operações. Em contrapartida, a complexidade aumenta pois surge a necessidade de criar mecanismos de roteamento, além de aumentar o consumo de energia elétrica [TOWNSEND; ARMS, 2005].

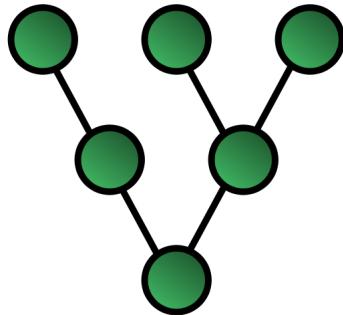
Figura 21: Rede Malha

Fonte: <https://www.wikipedia.org/>

4.3.3 Árvore

Também chamada de hierárquica, essa topologia permite uma comunicação *multihop*, porém com um protocolo de roteamento mais simples, pois nela existe apenas uma rota para cada nó remoto a partir do controlador. Sendo assim, consome menos energia e é mais simples de implementar que uma rede malha e possui uma área de abrangência maior que uma rede estrela.

Figura 22: Rede Árvore



Fonte: <https://www.wikipedia.org/>

4.4 Considerações Finais

Embora uma implementação de RSSF para residências e escritórios seja mais simples que uma industrial, por exemplo, não significa que ela não possua suas particularidades e dificuldades.

Melhorar a experiência de um morador com sua residência, ou de um funcionário com seu ambiente de trabalho, e proporcioná-los uma melhor qualidade de vida é uma responsabilidade e satisfação que não se encontra em outros ambientes de aplicação.

5 Desenvolvimento

5.1 Arquitetura Proposta

Para atingir o objetivo de desenvolver uma RSSF de baixo custo monterário e baixo consumo elétrico para uso residencial e em escritório, propõe-se utilizar o transceptor **nRF24L01+** para a comunicação e modelos de microcontroladores AVR como unidade controladora dos nós.

A rede será da topologia árvore e terá as três características consideradas por Liu, Nayak e Stojmenovic [2010] citadas anteriormente: sob demanda para os nós que possuem atuadores; periódica para os sensores em geral; e orientada à eventos para sensores considerados críticos, como o de gás.

Cada nó da rede poderá comportar até 2 sensores ou atuadores. Isso é útil pois existem alguns dispositivos que normalmente atuam em conjunto como o sensor de temperatura com o de umidade ou o sensor de tensão com um relé eletromecânico em tomadas elétricas.

A implementação possuirá um mecanismo de busca de caminho, de modo que os nós recém inseridos possam se comunicar com a estação principal sem a necessidade de configuração explícita de rotas.

Para o desenvolvimento da RSSF foi implementada uma biblioteca contendo as funcionalidades utilizadas nos códigos embarcados nos microcontroladores. Os modelos AVR testados foram o **ATmega328P** e o **ATTiny84**.

5.2 Elementos da Arquitetura

Os nós, ou estações, da RSSF dividem-se em duas categorias com funcionalidades diferentes. Uma é o nó principal da rede árvore e os outros são os demais nós acessados remotamente. Ambas as categorias tem em comum um MCU e ao menos um transceptor de rádio frequência.

5.2.1 Comunicação Entre MCU e Transceptor

A interação do AVR com o módulo **nRF24L01+** é realizada utilizando a interface de comunicação SPI (*Serial Peripheral Interface*) que permite uma transferência de dados em alta velocidade e de forma síncrona.

O SPI consegue essa alta taxa de transferência devido ao seu sistema de *clock* que é baseado na transição do estado da onda digital da tensão. Um dos dispositivos é responsável por gerar essa onda e é chamado de mestre, o outro que recebe o sinal de *clock* é denominado escravo. Além disso, diferentemente de comunicações como a USART, não há acréscimo de informação na mensagem, como os bits de início e parada [WILLIAMS, 2014].

Devido à isso, o SPI é o mecanismo de comunicação utilizado na maioria dos periféricos, como transceptores, memórias externas e até mesmo o próprio MCU no processo de gravação do código embarcado.

São necessários quatro canais (quatro fios) para efetuar uma comunicação utilizando o protocolo SPI, sendo eles:

- **MOSI:** *Master Out Slave In*, responsável por transmitir dados do dispositivo mestre para o escravo;
- **MISO:** *Master In Slave Out*, responsável por transmitir dados do dispositivo escravo para o mestre;
- **SCK:** *Source Clock*, é o sinal gerado pelo dispositivo mestre e utilizado para determinar a frequência da comunicação;
- **CSN:** *Chip Select Not*, é utilizado para selecionar o periférico, permitindo assim uma comunicação com mais de um dispositivo escravo de forma não paralela. Possui esse nome pois é ativado no nível baixo da tensão. Também é chamado de **SS** (*Slave Select*).

Além desses, o nRF24L01+ ainda possui um pino denominado **CE** (*Chip Enable*) que determina o estado do transceptor entre transmissor/receptor e em espera.

Essa quantidade de pinos disponíveis no MCU necessários dificulta a utilização de modelos AVR de oito pinos, pois com o transceptor, VCC, *ground* e *reset*, não restam pinos para realizar a interação com sensores, atuadores ou unidades computacionais.

Para o modelo ATmega328P a utilização do SPI é trivial, pois ele possui um circuito dedicado para isso, sendo necessário apenas manipular alguns registradores designados. Já o modelo ATTiny84 não possui SPI dedicado e sim uma interface para comunicação serial (USI - *Universal Serial Interface*) que deve ser configurada para atuar como um SPI.

5.2.2 Interrupção de *Hardware*

Em um programa embarcado em microcontrolador há um ciclo principal que é executado enquanto for fornecida eletricidade. Sendo assim, ao implementar um sistema multi-tarefas é necessário organizá-las em forma de *polling*, ou seja, são posicionadas sequencialmente dentro do ciclo principal e executadas atomicamente, de modo que uma tarefa precisa aguardar o encerramento de outra tarefa antes de entrar em vigor.

Esse modo de implementação impossibilita que alguma ação crítica seja executada imediatamente em determinada condição e requer que o MCU esteja em execução o tempo todo. Para contornar esses empecilhos, usa-se interrupções de *hardware*.

Esse mecanismo funciona através de um conjunto de *flags* que sinalizam as possíveis interrupções e que são constantemente verificadas. Quando há alguma ocorrência, o MCU armazena o estado atual e executa a rotina ISR (*Interrupt Service Routine*) responsável por determinada requisição de interrupção. O endereço de memória em que a ISR se encontra é fornecido pela tabela de vetores de interrupção. Ao finalizar a rotina, o MCU executa as demais ISRs e retorna ao ciclo principal quando não houver mais sinalizadores de interrupção ativos [WILLIAMS, 2014].

O AVR possui suporte para interrupções internas e externas. As interrupções internas são referentes à algumas funcionalidades disponíveis, como SPI, USART, conversor analógico para digital, contadores, etc.

Quanto às externas, a maioria dos modelos AVR disponibilizam ao menos um pino dedicado à um circuito responsável por disparar a interrupção. Nesse canal dedicado é possível selecionar qual nível ou borda da tensão aplicada atua como gatilho. Há também uma outra forma mais simples de gerar interrupção externa, onde um conjunto de pinos compartilham a mesma *flag* e o gatilho se dá por qualquer alteração lógica ocorrente.

O módulo nRF24L01+ possui um pino **IRQ** (*Interrupt Request*) que sinaliza três possíveis eventos: envio de pacote bem sucedido, número máximo de retransmissão atingido e pacote recebido. O nível baixo nesse pino significa a ocorrência desses eventos e, portanto, para interrupção externa proveniente do transceptor foram utilizados os pinos dedicados à isso. Sendo assim, a implementação necessita que o MCU utilizado possua esta funcionalidade embutida.

5.2.3 Estação Principal

É a estação responsável pela coleta de dados e envio de comandos aos nós remotos da RSSF e pela comunicação com o sistema computacional da automação.

5.2.3.1 Comunicação Entre MCU e Computador

A comunicação entre o AVR e o computador é realizada através do dispositivo serial USART (*Universal Synchronous and Asynchronous serial Receiver and Transmitter*) disponível em alguns modelos de microcontrolador.

O USART permite que o AVR transmita e receba dados sequencialmente de outros dispositivos. Essa transferência é feita utilizando uma comunicação *full-duplex* e pode ser de forma síncrona ou assíncrona. A forma utilizada foi a assíncrona, que possui apenas os canais RX e TX e não possui um que determina o *clock*. Dessa forma, a frequência da comunicação deve ser igual e pré-determinada em ambas as partes [WILLIAMS, 2014].

Para utilizar este recurso, é necessário apenas configurar os registradores que controlam a interface USART. Alguns dos critérios a serem configurados são a taxa de transferência, o modo de comunicação (síncrono ou assíncrono), a paridade (ativada ou desativada), a quantidade de *stop bits* e o tamanho de cada caractere da mensagem.

5.2.4 Estações Remotas

São todos os nós da rede que realizam interação com o ambiente físico, ou seja, que possuem atuadores e/ou sensores. Também atuam como repetidor, sendo utilizados para passar a mensagem adiante para os nós não acessíveis diretamente pela estação principal.

5.2.4.1 Interação com Sensores e Atuadores

Diferentemente da estação principal, onde a comunicação com o sistema computacional se dá sempre por USART, a forma de interação desses nós com os sensores e atuadores depende do sensor ou atuador utilizado.

No caso de sensores digitais, a comunicação varia ainda mais, pois normalmente cada um utiliza um protocolo de comunicação próprio. A vantagem de utilizar esse tipo de sensor é que, embora o tempo de resposta normalmente seja maior que o de um analógico, o valor retornado já está convertido para a compreensão do usuário. Além disso, possibilita o uso de MCUs mais simples, pois o único requisito passa a ser apenas a possibilidade de se comunicar com o nRF24L01+ por SPI, seja de maneira dedicada ou por USI.

Já com sensores analógicos, a leitura é realizada de forma mais uniforme, pois basta apenas converter o sinal recebido para um valor digital. No AVR, isso é feito através do circuito ADC (*Analog-to-Digital Converter*)

O ADC converte uma entrada analógica para um valor digital de 10 bits através de aproximação sucessiva. Esse método consiste em utilizar um intervalo de tensão como referência e comparar o valor central desse intervalo com a tensão de entrada resultante do sensor. Se a entrada for maior, o bit 1 é escrito no registrador de saída de 10 bits e o

intervalo de referência passa a ser a metade superior. Se for menor, o bit 0 é escrito e o intervalo passa a ser a metade inferior. Esse processo é repetido 10 vezes, até preencher o registador de saída [WILLIAMS, 2014].

O circuito ADC é compartilhado por mais de um pino do MCU, sendo necessário selecionar o pino em que o sensor está conectado. É necessário também definir o fator de divisão de frequência, que divide o *clock* do MCU resultando no *clock* do ADC. Segundo o *datasheet*, para obter um resultado de máxima resolução, a frequência deve ser entre 50 kHz e 200 kHz. Em um MCU com 8 MHz de frequência, por exemplo, o fator de divisão pode ser o valor 64, que resulta num *clock* de 125 kHz.

É possível também selecionar algum evento para atuar como gatilho da inicialização de uma conversão, como contador ou interrupção externa, ou utilizar o modo normal, que torna necessário inicializar o processo do ADC manualmente quando necessário.

A vantagem em utilizar sensores analógicos é que eles normalmente são mais baratos e mais rápidos que os digitais, em contrapartida, fica a cargo do sistema computacional da rede de controle transformar o valor obtido em algo comprehensível ao usuário.

Em relação aos atuadores, também depende do tipo utilizado. Normalmente a interação é feita através de PWM (modulação por amplitude de pulso) que simula uma saída analógica. No caso dos relés eletromecânicos, a comunicação é apenas uma variação de estado do pino conectado ao mesmo.

5.3 Endereçamento

O endereço é um valor que identifica a estação na rede e garante que o pacote seja detectado e recebido pelo receptor correto. No nRF24L01+ o endereço pode ter de 3 a 5 bytes, e quanto maior ele for, menor é a chance de detectar incorretamente pacotes de dados.

O nRF24L01+ possui 6 canais de recepção paralelos unicamente endereçáveis. Todos eles operam na mesma faixa de frequência e com a mesma taxa de transferência, monitorando o meio físico à espera de pacotes simultaneamente. Embora apenas um canal possa receber pacotes por vez, eles podem ser utilizados para comportamentos individuais.

No desenvolvimento da RSSF foram utilizados apenas dois desses canais, sendo o canal 0 utilizado para atuar como receptor de *broadcast* e o canal 1 para receber pacotes direcionados ao módulo. Ambos os canais possuem endereços de 5 *bytes* de tamanho.

O endereço de *broadcast* é utilizado para que novos nós inseridos na rede possam encontrar um caminho até o nó principal e deve ser igual em todos os transceptores da rede. Seria possível utilizar o endereço padrão do canal 0, porém, isso dificultaria a existência

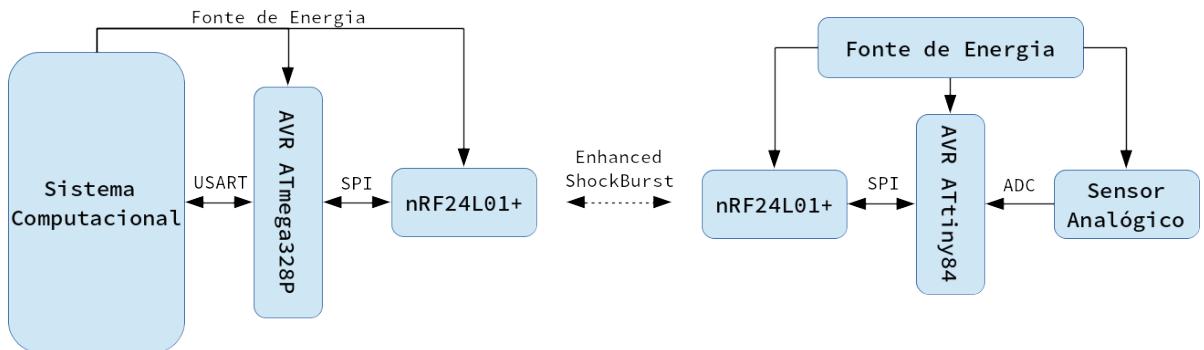
de RSSFs próximas umas das outras. Portanto, ele deve ser definido previamente.

5.4 Comunicação Ponto a Ponto

A comunicação direta entre dois transceptores acontece utilizando o protocolo Enhanced ShockBurst, que atua na camada de enlace de dados e é responsável pelo tratamento de pacotes e outras funcionalidades automáticas. Devido a isso, torna-se possível a implementação de comunicação de alto desempenho e energia ultra baixa com MCU de baixo custo.

A Figura 23 ilustra uma comunicação ponto a ponto entre uma estação central e um nó remoto com sensor analógico.

Figura 23: Exemplo Ponto a Ponto



Fonte: Elaborada pelo autor

De acordo com o *datasheet* do nRF24L01+, o tratamento da transação de pacotes entre um dispositivo PTX (*Primary Transmitter*) e PRX (*Primary Receiver*) ocorre da seguinte maneira:

1. A transação incia-se quando um pacote de dados é transmitido ao PRX. O Enhanced ShockBurst automaticamente coloca o PTX em modo de recepção para esperar pelo pacote de confirmação.
2. Se o PRX receber o pacote, o Enhanced ShockBurst monta e transmite o pacote ACK (Acknowledgement) ao PTX.
3. Se o PTX não receber o pacote ACK em um determinado tempo, ele automaticamente retransmite o pacote de dados. Esse processo repete-se em uma quantidade de vezes configurável ou até que o pacote ACK seja recebido.

Essa transação ocorre em uma faixa de frequência entre 2.4 GHz e 2.4835 GHz e a uma taxa de transferência que pode ser de 250 Kbps, 1 Mbps ou 2 Mpbs que devem ser pré-definidos e iguais em ambos os transceptores [NORDIC SEMICONDUCTOR, 2008].

Na implementação da RSSF foram definidos um tempo de espera de retransmissão de $1250\ \mu s$ e uma quantidade máxima de 15 retransmissões a uma taxa de 1 Mbps para todos os módulos. Essa configuração permitiu uma comunicação direta a 15 metros de distância com 3 obstáculos de alvenaria no caminho e com o Wi-Fi de rede doméstica ligado.

O formato do pacote utilizado pelo protocolo Enhanced ShockBurst é ilustrado na Figura 24

Figura 24: Pacote *Enhanced ShockBurst*

1 byte	3 – 5 bytes	9 bits	0 – 32 bytes	1 – 2 bytes
Preâmbulo	Endereço	Campo de Controle de Pacote	Payload	CRC

Fonte: Elaborada pelo autor

O preâmbulo é uma sequência de bits alternados usados para sincronizar o demodulador do receptor para o fluxo de bits do pacote. O endereço, mencionado anteriormente, é anexado no pacote logo após o preâmbulo. O campo de controle de pacote contém o tamanho do *payload* utilizado, um identificador do pacote e uma flag indicando se é necessário enviar o ACK. O *payload* é onde vai o conteúdo do pacote e o tamanho utilizado pode ser estático (pré-configurado em ambas as pontas da comunicação) ou dinâmico (utiliza a informação sobre o tamanho contida no campo de controle). Por fim, o CRC (*Cyclic Redundancy Check*) é um mecanismo de detecção de erros no pacote [NORDIC SEMICONDUCTOR, 2008].

Tanto para transmissão como para recepção, os pacotes são enfileirados em um mecanismo de FIFO (*First In First Out*) com capacidade de até 3 pacotes. Se o FIFO de transmissão estiver cheio ao inserir um novo, o mais antigo é descartado. Já no FIFO de recepção não é inserido um novo pacote caso o mesmo já esteja cheio.

Além disso, é possível também encapsular dados no pacote ACK, o que diminui a quantidade necessária de transmissões em uma comunicação bi-lateral pela metade. Para isto, é necessário ativar a funcionalidade de *payload* dinâmico e deixar o pacote pronto para ser encapsulado no ACK colocando-o no FIFO de transmissão e definindo para qual canal de recepção ele deve responder.

Portanto, para o canal de *broadcast* (canal 0) o dado a ser encapsulado é o endereço do canal 1, que é o endereço único do transceptor e para o canal 1, o dado de resposta é o valor obtido pelos sensores.

5.5 Roteamento

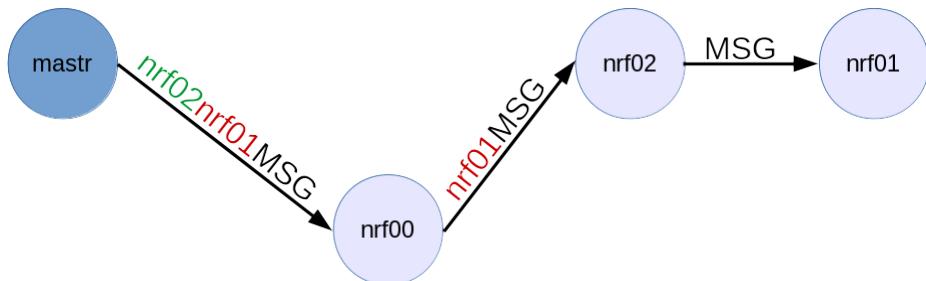
O protocolo de roteamento é o responsável por permitir uma comunicação indireta entre estações. Devido ao baixo poder de processamento e baixa memória disponíveis em um MCU, o roteamento deve ser realizado de uma maneira simples. Não é viável, por exemplo, armazenar todos os endereços das estações adjacentes nem calcular as rotas dinamicamente como ocorre normalmente em redes de computadores.

Para atender essa necessidade, utilizou-se o próprio corpo do pacote de dados para transmitir a rota que ele deve percorrer até o destino. Isso é possível pois o nRF24L01+ permite até 32 *bytes* de dados em seus pacotes.

Considerando que o endereço possui 5 *bytes* de tamanho, 20 *bytes* do *payload* são reservados para a transmissão da rota, restando 12 *bytes* para a mensagem. Isso possibilita uma comunicação indireta com até 5 saltos, pois permite com que o nó principal envie uma mensagem com uma rota de até 4 endereços em seu *payload*.

Conforme mostra a Figura 25, a cada salto são retirados 5 *bytes* do *payload* e utilizados como endereço do próximo salto. Esse processo se repete até chegar ao destino, onde a mensagem é processada. Caso ocorra alguma falha no caminho, é informado à estação principal transmitindo o endereço em que ela ocorreu.

Figura 25: Exemplo Roteamento



Fonte: Elaborada pelo autor

No pior caso de uma comunicação bem-sucedida, isto é, quando a comunicação ocorre em 5 saltos com 15 retransmissões em cada um, o tempo de máximo é de aproximadamente 187.5 ms ($1250 \mu\text{s} * 15 * 5 * 2$).

A única informação que os MCUs remotos precisam armazenar é o endereço da estação superior na hierarquia da topologia da rede, ou seja, o endereço do próximo transceptor em direção à estação principal. A responsabilidade em armazenar as rotas para todos os nós fica a cargo do sistema computacional.

5.5.1 Busca do Caminho

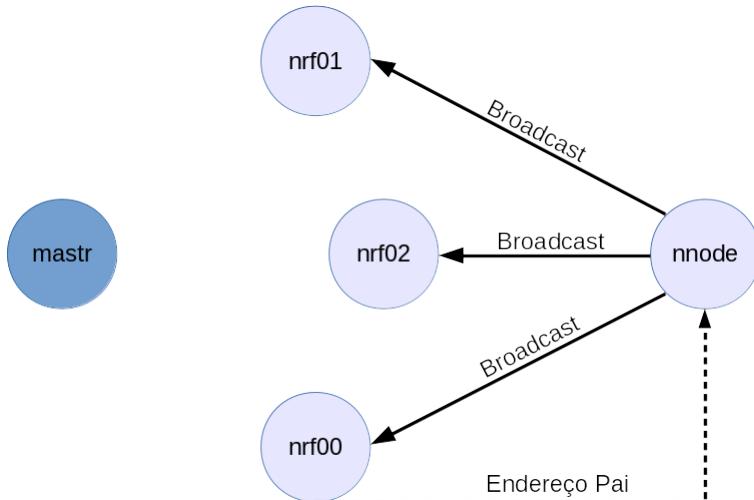
Ao inserir um novo nó em uma RSSF, é preciso que a estação central saiba como se comunicar com ele e vice-versa. A maneira mais simples para fazer isso seria pré-configurar as rotas para cada estação remota.

Porém, além de ser um processo trabalhoso, dessa maneira as rotas seriam estáticas e teriam que ser reconfiguradas manualmente toda vez que algum nó de seu percurso parasse de funcionar ou que a estação fosse movida de posição.

Portanto, foi implementado um processo de busca por *broadcast* cujo objetivo é informar ao nó principal a existência de um novo nó e gerar a ele um endereço.

Para garantir que o um nó posicionado entre o principal e um remoto já existente tenha acesso direto ao principal, é inicialmente realizada uma tentativa de comunicação à estação central. Se bem sucedida, o endereço pai desse novo nó passa a ser o do próprio nó principal. Caso não obtenha resposta, significa que está fora de seu alcance, iniciando então o processo de busca de rota por *broadcast*, ilustrado na Figura 26.

Figura 26: Exemplo Broadcast



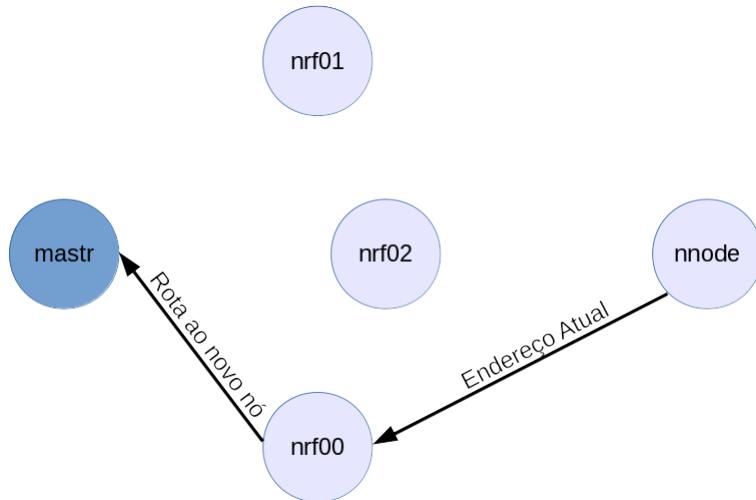
Fonte: Elaborada pelo autor

Esse processo consiste no novo nó enviar um pacote de leitura ao endereço de *broadcast* da RSSF. Como dito anteriormente, o canal do transceptor responsável pelo *broadcast* envia o respectivo endereço do próprio nó encapsulado no pacote ACK. Sendo assim, o primeiro pacote de confirmação que chegar ao novo nó contém o endereço de seu pai na arquitetura da rede, que provavelmente é o nó mais próximo a ele, e o armazena para futuras comunicações. Caso não receba nenhuma confirmação, porque não há algum nó em seu alcance, um LED é ligado para alertar o fracasso.

Caso essa confirmação ocorra, é enviado o endereço atual ao nó pai, que já está localizado na rede e que, por sua vez, anexa seu endereço no *payload* de transmissão

juntamente com a informação proveniente do novo nó e envia esse pacote ao próximo nó de sua rota em direção à estação principal, conforme mostra a Figura 27. Esse processo se repete até que o endereço do novo nó com a rota até ele chegue no final ou que o número de endereços anexados seja maior do que quatro, que é o máximo permitido.

Figura 27: Exemplo de recebimento de uma nova rota



Fonte: Elaborada pelo autor

A estação central repassa a rota recebida para o computador que gera um endereço válido e que será enviado ao novo nó para substituir o endereço padrão contido nele até então. A forma como esse endereço é gerado é indiferente para a RSSF, contanto que não seja igual a algum já existente. Do ponto de vista de segurança, é recomendável que ele seja gerado de forma aleatória.

Se o novo nó não receber a mensagem contendo seu novo endereço após determinado tempo, um LED é ligado para alertar que a tentativa de ingressar na RSSF foi mal-sucedida.

5.6 Mensagem

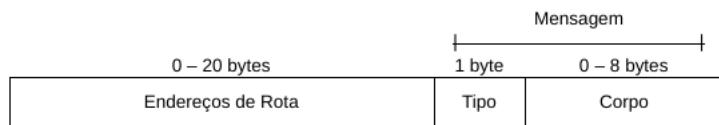
O formato da mensagem recebida é o que determina o comportamento que a estação deve adotar naquele momento. Sendo assim, neste capítulo será abordada a estrutura de mensagens elaborada para o desenvolvimento da RSSF proposta.

Além de conter dados de sensores ou valores de entrada para atuadores, a mensagem também deve possuir informações adicionais sobre os dados para que eles sejam processados de forma adequada. Foi optado por utilizar informações a nível de byte ao invés de *bit* pois torna mais fácil a manipulação dos dados com o custo de alguns *bytes* a mais no corpo da mensagem transmitida.

Como 20 *bytes* dos 32 disponíveis já estão sendo utilizados para envio da rota, as mensagens podem possuir tamanho máximo de 12 *bytes*, o que é suficiente para a implementação da RSSF, pois, como será mostrado a seguir, a maior mensagem utilizada tem apenas 9 *bytes*, deixando os 3 restantes reservados para possíveis usos futuros.

O *payload* utilizado nas comunicações que contém a mensagem é estruturado conforme ilustrado na Figura 28.

Figura 28: Formato Geral de Mensagem



Fonte: Elaborada pelo autor

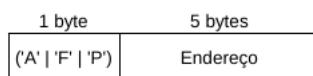
O primeiro *byte* da mensagem indica seu tipo, sendo 8 possíveis valores que são representados pelos seguintes caracteres da tabela ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*):

- **A:** *Address* - Endereço;
- **E:** *Emergency* - Emergência;
- **F:** *Failure* - Falha;
- **M:** *Measurement* - Medição;
- **N:** *New Node* - Novo Nô;
- **P:** *Parent* - Pai.
- **R:** *Read* - Leitura.
- **W:** *Write* - Escrita;

5.6.1 Endereço, Falha e Pai

Esses três tipos possuem a mesma estrutura, diferenciando-se apenas na *flag* representativa do tipo, como mostra a Figura 29.

Figura 29: Mensagem do Tipo Endereço, Falha ou Pai



Fonte: Elaborada pelo autor

O valor 'A' representa um endereço gerado pelo sistema computacional e que, ao chegar ao nó de destino, é configurado no canal de recepção 1 desse nó. O valor 'F' indica que houve uma falha ao tentar se comunicar com aquele endereço e é enviada à estação central quando ocorre. Já a mensagem com o tipo 'P' é a que retorna no ACK pelo canal de *broadcast*, onde o nó que a recebe armazena o endereço nela contido como seu endereço pai na hierarquia da topologia da rede.

5.6.2 Emergência

É a única mensagem orientada à eventos, ou seja, que é enviada ao nó principal sem requisição prévia. Por causa disso, seu endereço deve ser enviado no corpo para que o nó possa ser identificado. A estrutura é como mostrado na Figura 30.

Figura 30: Mensagem do Tipo Emergência

1 byte	5 bytes	2 bytes
'E'	Endereço	Valor

Fonte: Elaborada pelo autor

5.6.3 Medição

É a mensagem retornada no pacote de confirmação quando a comunicação é efetuada no canal 1. Conforme mostra a Figura 31, para cada periférico ela possui um campo que identifica o parâmetro físico medido ou o tipo de atuador, a categoria da medição e o valor medido.

Figura 31: Mensagem do Tipo Medição

1 byte	1 byte	1 byte	2 bytes	1 byte	1 byte	2 bytes
'M'	Periférico 1	Categoria 1	Valor 1	Periférico 0	Categoria 0	Valor 0

Fonte: Elaborada pelo autor

O parâmetro físico medido ou atuador são representados por um valor ASCII que é definido previamente. Os valores utilizados ora são 'T' (Temperatura), 'H' (umidade), 'L' (Luz), 'G' (Gás), 'R' (Relé) e '0' (Vazio). Já no campo categoria, os valores utilizados são 'A' (Analógico) ou 'D' (Digital) e '0' quando o campo Periférico for '0'.

5.6.4 Novo Nô

É a mensagem enviada ao endereço de nó pai recebido no processo de *broadcast*. Ilustrado na Figura 32, também possui campos que indicam o parâmetro ou atuador, assumindo os mesmos valores que os campos "Periférico N" da mensagem de medição.

Figura 32: Mensagem do Tipo Novo Nô

1 byte	1 byte	1 byte	5 bytes
'N'	Periférico 1	Periférico 0	Endereço

Fonte: Elaborada pelo autor

5.6.5 Leitura

Embora qualquer transação com um dos dois canais de recepção de um nó remoto acarrete em uma leitura, esta mensagem, mostrada na Figura 33, existe apenas por questão de padronização.

Figura 33: Mensagem do Tipo Leitura

1 byte
'R'

Fonte: Elaborada pelo autor

5.6.6 Escrita

É o tipo de mensagem utilizado para escrever valores aos periféricos, indicada na Figura 34.

Figura 34: Mensagem do Tipo Escrita

1 byte	2 bytes	2 bytes
'W'	Valor 1	Valor 0

Fonte: Elaborada pelo autor

O valor contido é diretamente o que será transmitido ao atuador. Caso o periférico em questão seja um sensor, o valor é ignorado.

5.7 Experimentação

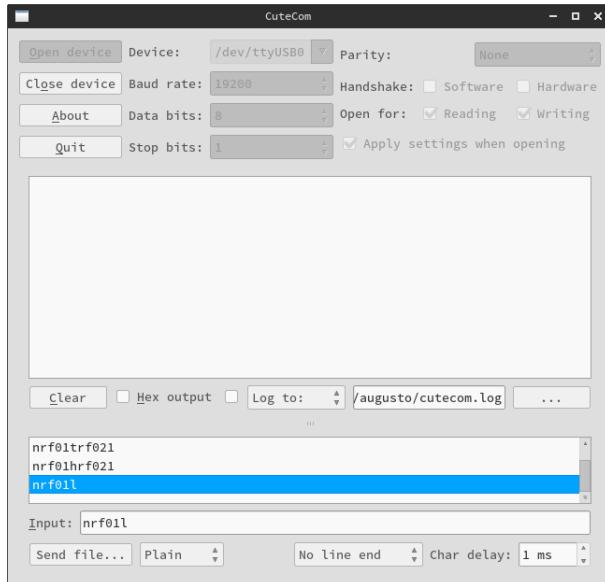
Para experimento foram utilizados cinco estações, onde uma delas é a principal e as demais remotas. Os transdutores foram selecionados de modo que se possa explorar todas as características da implementação da RSSF, sendo eles:

- Fotoresistor: para operar com valores analógicos;
- Temperatura e Umidade Digitais: para ter uma estação com dois periféricos;
- Relé Eletromecânico: um atuador para utilizar a mensagem de comando;

- Sensor de Gás: um sensor de emergência para testar a orientação à evento.

A comunicação entre o computador e o nó central foi realizada através do programa CuteCom, mostrado na Figura 35.

Figura 35: CuteCom

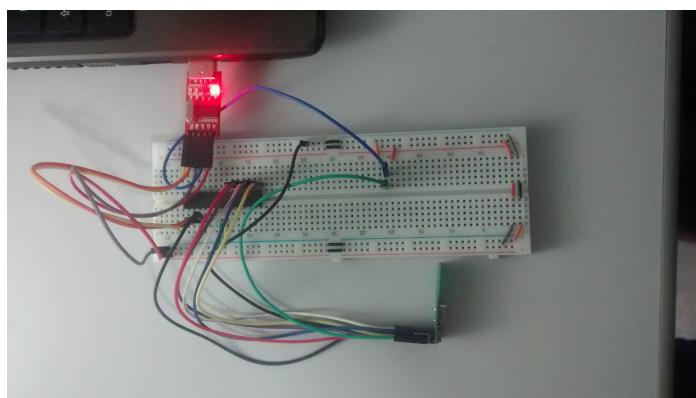


Fonte: Elaborada pelo autor

5.7.1 Protótipos

Como a estação principal utiliza USART para se comunicar com o sistema computacional, o MCU utilizado precisa ter essa funcionalidade, sendo utilizado então o ATmega328P como mostra a figura 36. Para possibilitar a comunicação USART é utilizado um dispositivo conversor USB/Serial, que também atua como fonte de energia ao MCU e ao transceptor, que suporta até 3.3 V.

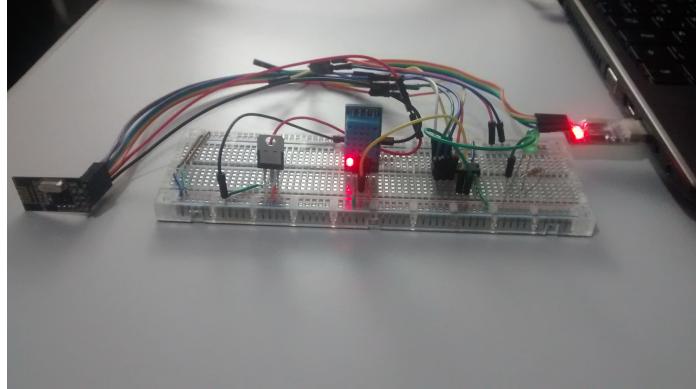
Figura 36: Protótipo Estação Principal



Fonte: Elaborada pelo autor

Já os nós remotos não precisam de USART, tornando possível utilizar MCUs mais simples como o ATtiny84. A Figura 37 exemplifica um protótipo de nó remoto contendo um sensor digital de umidade e temperatura. O LED à direita é utilizado para sinalizar que o ingresso na rede falhou e à esquerda do sensor há um circuito conversor de tensão usado para gerar uma tensão de 3.3 V necessária para alimentar o transceptor.

Figura 37: Protótipo Estação Remota



Fonte: Elaborada pelo autor

5.7.2 Testes

Primeiramente foram realizados testes de comunicação ponto a ponto. Nesta etapa houve um contra-tempo pois alguns erros esporádicos estavam ocorrendo. Uma leitura completa ao *datasheet* do transceptor permitiu identificar e corrigir esses erros, que estavam relacionados ao tempo de espera necessário para mudar de um estado ao outro, à necessidade de restaurar as *flags* de interrupções e à limpeza de buffer.

Após essa fase, elaborou-se como a RSSF se comportaria, sendo definidos então a estrutura das mensagens, a taxa de transferência, número de retransmissões automáticas, entre outros quesitos também mencionados anteriormente neste capítulo.

A Tabela 3 exibe o resultado do processo de inserção de nós na rede, onde cada módulo transmitiu seu endereço padrão (nnode), tal como a identificação de seu(s) transdutor(es). Os endereços foram gerados pelo nó principal e de forma sequencial apenas para fins de teste.

Nó	Mensagem Novo Nó	Rota	Endereço Recebido
Luz	NL0nnnode	—	nrf00
Temperatura e Umidade	NTHnnnode	—	nrf01
Gás	NG0nnnode	—	nrf02
Relé Eletromecânico	NR0nnnode	nrf02	nrf03

Tabela 3: Processo de roteamento testado

Na Tabela 4 são expostos os resultados de alguns testes realizados com a solução desenvolvida. Os trechos fora das aspas nas mensagens recebidas correspondem aos valores obtidos pelos sensores já convertidos para um tipo numérico de dados. Após realizar os testes de leitura e escrita aos nós, foi feita uma exposição de gás butano ao sensor de gás, gerando um pacote de emergência após atingir um valor limiar definido como 300.

Em seguida, testou-se uma comunicação de 4 saltos entre o nó principal e o nó de luz. Embora o roteamento para o mesmo tenha sido obtido de forma direta, isto foi possível devido à ausência de um sistema computacional que gerencia as rotas, feitas de forma manual durante os testes. Por fim, foi realizada uma tentativa de comunicação com um endereço inexistente, gerando assim um pacote que indica a ocorrência de falha.

Descrição	Destinatário	Rota	Mensagem Enviada	Mensagem Recebida
Leitura Nó Luz	nrf00	—	“R”	“MLA” 675 “00” 0
Leitura Nó Temperatura e Umidade	nrf01	—	“R”	“MTD” 25 “HD” 67
Leitura Nó Gás	nrf02	—	“R”	“MGA” 123 “00” 0
Escrita Nó Relé	nrf03	nrf02	“W10”	—
Emergência Nó Gás (Limiar = 300)	—	—	—	“Enrf02” 305
Teste Múltiplos Saltos	nrf00	nrf02nrf03nrf01	“R”	“MLA” 678 “00” 0
Teste Endereço Inexistente	nrf04	nrf00nrf01	“R”	“Fnrf04”

Tabela 4: Exemplos de testes realizados

5.8 Custo e Consumo

Considerando uma casa de 10 cômodos, onde cada um possui um nó para temperatura e umidade, um para luz e uma para relé. E ainda considerando um nó para sensor de gás na cozinha, cinco nós de sensor de umidade em sólidos para plantas e um principal, a quantidade total de nós seria igual a 37.

A Tabela 5 baseia-se nessa quantidade para comparar a solução obtida com uma solução utilizando um **Arduino Mini** como MCU e um *XBee* como transceptor, que é a configuração normalmente utilizada em implementações caseiras encontradas na *Internet*. Os preços dos sensores e atuadores não estão sendo levados em consideração pois são constantes, ou seja, independem da implementação utilizada.

	MCU	Transceptor	Nó Principal	Nó Remoto	Total
Solução Obtida	U\$ 3,70 / U\$ 1,80	U\$ 1,00	U\$ 4,70	U\$ 2,80	U\$ 105,50
Solução Comum	U\$ 10,00	U\$ 25,00	U\$ 35,00	U\$ 35,00	U\$ 1.295,00

Tabela 5: Comparação entre implementações de RSSF

Quanto ao alcance, é possível cobrir uma área com raio de até 50 metros com obstáculos no interior. Isso permite instalar a RSSF em uma residência com $500\ m^2$

(50x10), por exemplo. Em relação ao consumo elétrico, o nRF24L01+ é o transceptor com maior eficiência conforme mostrado na Tabela 2 do Capítulo 4 e é o fator determinante neste quesito, já que a diferença de consumo entre os microcontroladores é muito pequena.

5.9 Considerações Finais

O resultado obtido nesta etapa é fruto de um estudo detalhado de várias características dos microcontroladores AVR tal como do funcionamento do módulo transceptor nRF24L01+.

Embora a solução obtida não possua uma característica totalmente *plug-and-play*, a quantidade de configuração necessária é mínima, sendo ela a definição dos endereços da estação principal e de *broadcast* da RSSF.

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho obteve como resultado uma implementação de RSSF para ambientes não críticos com uma melhor eficiência energética e um custo monetário significativamente menor do que as soluções normalmente encontradas no mercado.

Isso possibilita com que mais pessoas tenham acesso a esse tipo de tecnologia, permitindo-as usufruir das vantagens que um sistema de automação traz ao cotidiano.

Embora a transmissão dos dados tenha sido bem sucedida, para que a implementação seja utilizada de modo funcional é necessário ainda desenvolver a parte do sistema computacional, que é responsável por gerenciar a RSSF, integrá-la ao sistema de automação residencial, caso houver, e fornecer aos usuários um modo de interação com os transdutores.

Para aumentar a confiabilidade da rede é desejável que ela seja tolerante à falhas. Embora a solução desenvolvida tenha capacidade em detectar falhas em relação à rota, elas não estão sendo tratadas de forma automatizada, ficando então esta oportunidade para melhoria posterior.

Uma outra possibilidade de trabalho futuro é analisar a viabilidade em aplicar técnicas de segurança, como criptografia, na comunicação. Isso permitiria extender a usabilidade da RSSF, porém, deve ser levado em consideração o baixo poder de processamento disponível.

É possível ainda estudar a possibilidade em integrar a RSSF com fontes de energias renováveis e com sistemas de *Smart Grid*, possibilitando uma melhor gerência de recursos e uma maior segurança aos eletrônicos de consumo.

O processo de pesquisa e desenvolvimento fez com que eu me familiarizasse ainda mais com conceitos de automação e sistemas embarcados, áreas que eu particularmente me interesso, tornando o resultado do trabalho pessoalmente satisfatório.

Referências

- AL-QUTAYRI, M. A. Preface. In: AL-QUTAYRI, M. A. (Ed.). *Smart Home Systems*. Vukovar, Croatia: In-Tech, 2010. Citado na página 5.
- ALDRICH, F. K. Smart homes: Past, present and future. In: HARPER, R. (Ed.). *Inside the Smart Home*. London: Springer, 2003. Citado na página 1.
- BRUSH, A. et al. Home automation in the wild: Challenges and opportunities. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM Conference on Computer-Human Interaction, 2011. Disponível em: <http://research.microsoft.com/apps/pubs/default.aspx?id=145863>. Citado na página 8.
- BURATTI, C. et al. *Sensor networks with IEEE 802.15.4 systems*. Berlin: Springer, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 23.
- BURNS, J. Resistive thermometers. In: WEBSTER, J. G.; EREN, H. (Ed.). *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*. Boca Raton, FL: Taylor Francis Group, 2014. Citado na página 12.
- DARGIE, W.; POELLABAUER, C. *Fundamentals of Wireless Sensor Networks*. Chichester, UK: John Wiley Sons, 2010. Citado na página 27.
- Encyclopedia Britannica Online. *Electrical Impedance*. 2015. Disponível em: <http://www.britannica.com/science/electrical-impedance>. Citado na página 18.
- FARAHANI, H.; WAGIRAN, R.; HAMIDON, M. N. Humidity sensors principle, mechanism, and fabrication technologies: A comprehensive review. *Sensors*, 2014. Disponível em: <http://www.mdpi.com/1424-8220/14/5/7881/htm>. Citado na página 18.
- FONTES, J. Humidity sensors. In: WILSON, J. S. (Ed.). *Sensor Technology Handbook*. Burlington, MA: Elsevier, 2005. Citado 3 vezes nas páginas 18, 19 e 20.
- FONTES, J. Temperature sensors. In: WILSON, J. S. (Ed.). *Sensor Technology Handbook*. Burlington, MA: Elsevier, 2005. Citado 4 vezes nas páginas 11, 13, 14 e 15.
- FRADEN, J. *Handbook of Modern Sensors*. New York: Springer-Verlag, 2010. Citado 9 vezes nas páginas 7, 11, 12, 14, 15, 16, 18, 19 e 21.
- GROOVER, M. P. *Automation, production systems, and computer integrated manufacturing*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1987. Citado na página 5.
- HAGEN, S. *IPV6 essentials*. Beijing: O'Reilly, 2002. Citado na página 2.
- HARPER, R. Inside the smart home: Ideas, possibilities and methods. In: HARPER, R. (Ed.). *Inside the Smart Home*. London: Springer, 2003. Citado na página 1.

- JIANG, L.; LIU, D.-y.; YANG, B. Smart home research. In: *Proceedings of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics*. Shangai: [s.n.], 2004. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 8.
- KARL, H.; WILLIG, A. *Protocols and architectures for wireless sensor networks*. Hoboken, NJ: Wiley, 2005. Citado 7 vezes nas páginas 2, 7, 10, 11, 24, 26 e 27.
- KENNY, T. Optical and radiation sensors. In: WILSON, J. S. (Ed.). *Sensor Technology Handbook*. Burlington, MA: Elsevier, 2005. Citado na página 15.
- KENNY, T.; KESTER, W. Sensor fundamentals. In: WILSON, J. S. (Ed.). *Sensor Technology Handbook*. Burlington, MA: Elsevier, 2005. Citado na página 11.
- KONDRAVASOVAS, I. *Transdutores, Sensores e Atuadores*. Joinville, SC: [s.n.], 2013. Citado 3 vezes nas páginas 10, 11 e 22.
- KUORILEHTO, M. et al. *Ultra-low energy wireless sensor networks in practice*. Chichester, England: John Wiley Sons, 2007. Citado 4 vezes nas páginas 2, 24, 26 e 27.
- KYAS, O. *How To Smart Home*. Wyk, Germany: Key Concept Prees e.K., 2013. Citado 4 vezes nas páginas 1, 2, 5 e 6.
- LALANDA, P. et al. Smart home systems. In: AL-QUTAYRI, M. A. (Ed.). *Smart Home Systems*. Vukovar, Croatia: In-Tech, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 8.
- LIU, H.; NAYAK, A.; STOJMENOVIC, I. Applications, models, problems, and solution strategies. In: NAYAK, A.; STOJMENOVIC, I. (Ed.). *Wireless Sensor and Actuator Networks*. Hoboken, New Jersey: John Wiley Sons, Inc., 2010. Citado 3 vezes nas páginas 10, 23 e 30.
- MCMAHON, G. Chemical sensors and biosensors. In: RIPKA, P.; TIPEK, A. (Ed.). *Modern Sensors Handbook*. Chippenham, Great Britain: ISTE, 2007. Citado na página 21.
- MISRA, D. *Radio-frequency and microwave communication circuits*. New York: Wiley, 2001. Citado na página 26.
- MULHOLLAND, G. W. Smoke production and properties. In: DINENNO, P. J. et al. (Ed.). *Sfpe Handbook of Fire Protection Engineering*. [S.l.]: National Fire Protection Association, 1995. Citado na página 20.
- NORDIC SEMICONDUCTOR. *nRF24L01+: Single Chip 2.4GHz Transceiver - Product Specification v1.0*. [S.l.], 2008. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.
- PEETERS, F.; PEETERMANS, M.; INDESTEEGE, L. Temperature sensors. In: RIPKA, P.; TIPEK, A. (Ed.). *Modern Sensors Handbook*. Chippenham, Great Britain: ISTE, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 11, 12 e 13.
- RILEY, M. *Programming your home*. Dallas, Tex.: Pragmatic Bookshelf, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 5.
- SCHMIDT, M. *Raspberry Pi*. [Firsco, TX]: The Pragmatic Programmers, 2014. Citado na página 7.

- SHELBY, Z.; BORMANN, C. *6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet*. Chichester, U.K.: J. Wiley, 2009. Citado na página 4.
- SINCLAIR, I. R. *Sensors and transducers*. Oxford [England]: Newnes, 2001. Citado 8 vezes nas páginas 10, 11, 13, 16, 19, 20, 21 e 22.
- SOHRABY, K.; MINOLI, D.; ZNATI, T. F. *Wireless sensor networks*. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 3.
- The Engineeringtoolbox. *Relative Permittivity - Dielectric Constant*. s. d. Disponível em: <http://www.engineeringtoolbox.com/relative-permittivity-d_1660.html>. Citado na página 18.
- THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. *Sensores Industriais*: Fundamentos e aplicações. São Paulo, SP: Ed. Érica, 2005. Citado 7 vezes nas páginas 11, 12, 13, 14, 17, 18 e 21.
- TOWNSEND, C.; ARMS, S. Wireless sensor networks. In: WILSON, J. S. (Ed.). *Sensor Technology Handbook*. Burlington, MA: Elsevier, 2005. Citado 3 vezes nas páginas 23, 27 e 28.
- TREVENNOR, A. *Practical AVR microcontrollers*. Berkeley, CA: Apress, 2012. Citado na página 25.
- WHITE, R.; SAPOFF, M. Thermistor thermometers. In: WEBSTER, J. G.; EREN, H. (Ed.). *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*. Boca Raton, FL: Taylor Francis Group, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 13.
- WILLIAMS, E. *Make: AVR Programming*. Sebastopol, CA: Maker Media, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 24, 31, 32 e 33.
- ĎADÓ, S.; FISCHER, J. Optical sensors. In: RIPKA, P.; TIPEK, A. (Ed.). *Modern Sensors Handbook*. Chippenham, Great Britain: ISTE, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.