

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



FREDERICO DUARTE FAGUNDES

**COMUNICAÇÃO M2M APLICADA EM PLANTAS DIDÁTICAS
DE CONTROLE DE PROCESSOS**

UBERLÂNDIA

2015

FREDERICO DUARTE FAGUNDES

COMUNICAÇÃO M2M APLICADA EM PLANTAS DIDÁTICAS
DE CONTROLE DE PROCESSOS

Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como exigência parcial para a obtenção do título de mestre em Ciências.

Área de concentração: Controle e Automação

Orientador: Dr. Fábio Vincenzi Romualdo da Silva

Co-orientador: Dr. Márcio José da Cunha

Uberlândia

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

F156c Fagundes, Frederico Duarte, 1988-
2015 Comunicação M2M aplicada em plantas didáticas de controle de
processos / Frederico Duarte Fagundes. - 2015.
60 f. : il.

Orientador: Fábio Vincenzi Romualdo da Silva.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Controle de processo - Teses.
3. Sistemas de comunicação sem fio - Teses. 4. Sistemas de transmissão
de dados - Teses. I. Silva, Fábio Vincenzi Romualdo da, 1974-.
II. Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

FREDERICO DUARTE FAGUNDES

COMUNICAÇÃO M2M APLICADA EM PLANTAS DIDÁTICAS
DE CONTROLE DE PROCESSOS

Dissertação de mestrado apresentada à Universidade
Federal de Uberlândia, como exigência parcial para
a obtenção do título de mestre em Ciências.

Data de aprovação:

_____, _____ de _____ de _____.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Fábio Vincenzi Romualdo da Silva.
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Márcio José da Cunha.
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Josué Silva de Moraes.
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Henrique José Avelar.
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Uberlândia

2015

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha namorada, atual noiva, Angélica, e minha família, Edna, Geraldo e Gustavo, pela complacência, carinho e incentivo durante todo o mestrado. Desde a decisão de me inscrever até a etapa final de apresentação de trabalhos e defesa, o apoio foi incondicional.

Agradeço também o professor Márcio, por me aceitar como orientando, além de incentivar a ideia que tive de trabalho e me ajudar na lapidação dessa ideia.

Reservo um agradecimento especial aos meus colegas do CEFET-MG, unidade Araxá. Além da compreensão e ajuda quando eu não podia estar presente, devido ao desenvolvimento desse trabalho, sempre me incentivaram quando ainda era aluno de graduação e, por isso, serei eternamente grato. Foram os exemplos de professores que convivi na graduação que me despertaram o desejo de seguir a mesma profissão, e hoje me sinto muito satisfeito com essa escolha.

RESUMO

FAGUNDES, Frederico Duarte. **Comunicação M2M aplicada em Plantas Didáticas de Controle de Processos**. 2015. 59 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2015.

O presente trabalho apresenta a aplicação de comunicação *Machine-to-Machine* (Máquina-a-máquina) em um sistema de controle de processos. O sistema onde o projeto foi implantado consiste de plantas didáticas de controle de temperatura, vazão e nível. Essas plantas eram isoladas, comunicando-se através do padrão RS-232 com uma estação de trabalho cada, dedicada à supervisão e controle. Foi desenvolvida uma interface de comunicação entre o padrão RS-232 e o padrão ZigBee de comunicação sem fio, visando agregar mobilidade e expansibilidade ao sistema. Com a comunicação sem fio, foi possível que a estação de trabalho fosse realocada e que as plantas trocassem informações. O sistema foi colocado em rede com uso da topologia em estrela, sendo que uma única estação de trabalho passou a monitorar e controlar todas as plantas. A comunicação em rede ocorreu de forma automática, através de um *software* com as funções de configuração da rede, envio e recebimento de dados, armazenamento de variáveis e aplicação de lógicas de controle. Dessa forma, foi possível o controle e monitoramento das plantas em um único ponto.

Palavras-chave: Redes industriais. *Machine-to-Machine*. ZigBee. Controle de processo.

ABSTRACT

FAGUNDES, Frederico Duarte. **M2M Communication applied in Didactic Plants of Process Control**. 2015. 59 p. Dissertation (Master's Degree) – Post-Graduate Program in Electrical Engineering, Electrical Engineering Faculty, Federal University of Uberlândia. Uberlândia, 2015.

This paper presents the application of Machine-to-Machine communication into a system of process control. The project was implemented in a system that consists of didactic plants of temperature, flow and level control. These plants were isolated, communicating via RS-232 with a workstation each, dedicated to monitoring and control. A communication interface between the RS-232 standard and the ZigBee wireless standard was developed, in order to add mobility and expansibility to the system. With wireless communication, it was possible to relocate the workstation and to exchange information among plants. Using star topology, the system was networked, with a single workstation monitoring and controlling all plants. Communications occurred automatically through a software, which functions includes network configuration, sending and receiving data, variable storage and logic control. Therefore, control and monitoring of all plants at a single point was made possible.

Key-words: Industrial network. Machine-to-Machine. ZigBee. Process Control.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – <i>Layout</i> de uma mensagem enviada em um protocolo baseado na IEEE C37.1.	14
Figura 2 – Exemplo de rede industrial com topologia em estrela.	16
Figura 3 – Exemplo de rede industrial com topologia em barramento.	16
Figura 4 – Exemplo de rede industrial com topologia em anel.	17
Figura 5 – Exemplo de rede industrial com topologia em árvore.	18
Figura 6 – Técnica do espalhamento espectral.	20
Figura 7 – Diagrama de radiação de antenas direcionais (a) e omnidirecionais (b).	21
Figura 8 – Módulo UBeeMax® de comunicação ZigBee.	22
Figura 9 – Topologia em árvore em uma rede ZigBee.	25
Figura 10 – Topologia em malha em uma rede ZigBee.	26
Figura 11 – Exemplo de arquitetura M2M.	29
Figura 12 – Plantas no Laboratório de Automação e Controle.	31
Figura 13 – Esquema da planta didática CRT.	32
Figura 14 – Esquema da planta didática CRF.	33
Figura 15 – Esquema da planta didática CRL.	34
Figura 16 - Conversor de sinal analógico para RS-232.	35
Figura 17 - Diagrama de ligação do Max3232® com a porta serial RS-232.	37
Figura 18 - Diagrama de ligação do módulo UBeeMax®.	37
Figura 19 - Diagrama de ligação do LM317®.	37
Figura 20 - Placa de comunicação finalizada conectada à porta serial RS-232 da planta.	38
Figura 21 - Módulo USBee® associado ao UBeeMax®.	38
Figura 22 - Simplificação do algoritmo de execução do <i>software</i>	39
Figura 23 - Arquitetura da rede.	40
Figura 24 - Representação do local de testes.	42
Figura 25 - Interface gráfica do <i>software</i> durante o monitoramento.	44
Figura 26 - Interface gráfica do <i>software</i> durante o controle.	45
Figura 27 - Dados de controle mostrados graficamente.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – <i>Frame</i> de dados ZigBee da camada física.	23
Tabela 2 – <i>Frame</i> de dados ZigBee da camada MAC.....	24
Tabela 3 – <i>Frame</i> de dados ZigBee da camada de rede.	24
Tabela 4 - Falhas ocorridas na comunicação entre a planta e a estação de trabalho.	43
Tabela 5 - Resultados das medições de falhas.....	43

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	9
2 REDES INDUSTRIAIS	13
2.1 Protocolos	13
2.2 Topologias	15
3 COMUNICAÇÃO SEM FIO	19
3.1 Padrão de comunicação sem fio ZigBee.....	22
3.2 Aplicações de ZigBee.....	26
4 MACHINE-TO-MACHINE.....	27
4.1 Aplicações M2M	29
5 METODOLOGIA.....	31
5.1 Desenvolvimento da interface de comunicação	36
5.2 Rede de comunicação	39
6 RESULTADOS	42
7 DISCUSSÃO.....	46
8 CONCLUSÕES	47
9 PRODUÇÕES	48
REFERÊNCIAS	49
APÊNDICE A - Descrição e código-fonte do software desenvolvido	52

1 INTRODUÇÃO

Equipamentos com funções de medição, atuação e controle estão cada vez mais presentes nos mais variados setores. Na indústria, são necessários para o monitoramento e controle de processos, buscando principalmente maior produtividade (ALVES, 2010). Na saúde, já há muito tempo estão presentes os marca-passos, ajudando pessoas no tratamento da bradicardia (MEDTRONIC, 2015). No trânsito, a instalação de redutores eletrônicos de velocidade é responsável por considerável redução de acidentes nas estradas (ORNELAS, 2009).

Com o avanço da tecnologia, esses dispositivos tornam-se cada vez mais funcionais, contando com capacidade de comunicação, configuração dinâmica e comportamento autônomo, ou seja, sem intervenção humana para executar funções. Com isso, uma comunicação entre dispositivos que permita a troca de informações de forma segura e confiável torna-se algo essencial (BRAZELL *et al.*, 2005).

Quando a comunicação entre dispositivos ocorre, permitindo que um dispositivo troque informações com alguma aplicação ou outro dispositivo, temos a definição de comunicação M2M (*Machine-to-Machine*) (BOSWARTHICK; ELLOUMI; HERSENT, 2012).

Entre as aplicações da comunicação M2M está a possibilidade de controle de frota, na qual instrumentos instalados em automóveis se comunicam através de uma rede de telefonia móvel (BOSWARTHICK; ELLOUMI; HERSENT, 2012). Há também a domótica, que inclui o controle multimídia, o controle de temperatura e o controle de iluminação de um ambiente residencial (MINOLI, 2013).

Além desses exemplos, temos aplicações em saúde e controle de processos. Com o nome *e-Health*, o sensoriamento biométrico permite o monitoramento remoto de condições físicas (parâmetros hemodinâmicos e ventilatórios) de um indivíduo. Esses dados podem ser usados por um médico, nutricionista, treinador, entre outros (MINOLI, 2013). No controle de processos, há a necessidade de monitoramento constante dos sistemas de produção, principalmente em processos críticos como o controle de temperatura de um processo de fundição ou o controle da pressão em um oleoduto (BRAZELL *et al.*, 2005).

Na indústria, predomina a utilização de cabeamento para a comunicação dos instrumentos de campo com os controladores e sistemas de supervisão. São inúmeros cabos saindo das salas de controle e supervisão para o chão-de-fábrica, recebendo e transmitindo os mais diversos tipos de dados (RAMOS, 2012).

A principal vantagem do uso de cabos é a confiabilidade na transmissão de dados, pois há poucas perdas nos dados que precisam ser transmitidos e recebidos. Outro fator importante

é que os instrumentos instalados no campo necessitam de cabeamento para alimentação e, muitas vezes, é viável que a transmissão de dados seja feita através da mesma estrutura e, em alguns casos, até pelo mesmo cabo (ALVES, 2010).

Um padrão bastante utilizado em sistemas cabeados, desenvolvido pela EIA (*Electronic Industries Alliance*), é o RS-232. É um padrão de comunicação digital serial, utilizado em portas seriais de computadores e, apesar de limitações quando utilizado em conexões de mais de dois pontos, também é utilizado em conjunto com protocolos de comunicação industrial (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA, 2009).

Com o desenvolvimento no setor de transmissão de dados, surgem novas tecnologias, abrindo mais opções para as empresas. Uma das tecnologias que mais se desenvolveu é a transmissão sem fio (*wireless*), em que o transmissor e o receptor comunicam-se sem a necessidade de cabeamento. Esse tipo de transmissão já é muito utilizado e substitui bem a comunicação por cabeamento em alguns casos, como na transmissão de voz por radiofrequência, na telefonia e na internet. Inicialmente, não se utilizava essa tecnologia na indústria devido à perda relativamente alta de dados em sua transmissão, causada por interferências de campos magnéticos e barreiras físicas, por exemplo (RAMOS, 2012).

As redes industriais que utilizam transmissão cabeada necessitam de altos investimentos em infraestrutura e mão-de-obra, sempre que a rede sofre manutenção ou é expandida. Já com a utilização de redes sem fio há redução do custo da infraestrutura e simplificação das instalações, pois não há necessidade de uso de bandejas e dutos. O custo de manutenção também é reduzido, pois, sem o cabeamento, a substituição de dispositivos é facilitada (RAMOS, 2012; RIEGO, 2009).

Atualmente, há opções de tecnologias de transmissão sem fio que prometem baixa interferência, alta confiabilidade na transmissão de dados e trabalham com baixa potência. Uma dessas tecnologias é o padrão ZigBee, que vem sendo utilizado com sucesso no processamento de sinais biomédicos (ANDRIGHETTO, 2008), no monitoramento de parques eólicos (PEREZ; HELENA, 2011) e até no sensoriamento remoto de pranchas de surfe (BONA; FERREIRA; SCHWARZ, 2012).

No Laboratório de Automação e Controle do CEFET-MG, em Araxá, encontram-se plantas de controle que se comunicam através de interface RS-232 com uma estação de trabalho. A tecnologia atual do laboratório não permite a comunicação entre plantas, somente entre a planta e a sua estação. Com base nisso, foi proposto um projeto de aplicação do padrão ZigBee nessas plantas. O padrão ZigBee, por ser sem fio, traria vantagens como mobilidade

dos nós da rede e expansibilidade da mesma. Além disso, a aplicação deveria ser feita sem modificações na infraestrutura do sistema.

Para estabelecer essa comunicação, deveria ser desenvolvida uma placa de comunicação que servisse como interface entre os padrões RS-232 e ZigBee. Essa placa então deveria ser aplicada nas plantas de controle. Com o estabelecimento da comunicação sem fio, o objetivo seria fazer com essas plantas de controle trocassem informações entre si e de forma autônoma, caracterizando a comunicação M2M.

Uma das justificativas para a aplicação, é que mesmo quando o sistema é dividido em processos distintos, muitas vezes uma variável presente em um subsistema pode interferir com outra fora daquela planta. Isso ocorre quando subsistemas dependem de variáveis externas (ou seja, de outros subsistemas), além da dependência dos próprios estados. Nesse caso, quando um subsistema possui comunicação de forma isolada, não há possibilidade de troca de dados e não é possível monitorar as interferências causadas e intervenções sofridas de subsistemas próximos (ALVES, 2010; CASTRUCCI; BITTAR; SALES, 2011).

Com as plantas de controle de processo do Laboratório se comunicando, trocando informações e enviando comandos, sem a necessidade de intervenção humana, seria possível o monitoramento e o controle do sistema como um todo. A implantação abre caminho para o desenvolvimento de diversas lógicas de controle, não mais limitadas à aplicação em um único processo. São exemplos o desenvolvimento de intertravamentos e lógicas sequenciais envolvendo diversas variáveis, possibilidades até o momento inexistentes com a estrutura anterior.

Na seção 2 do trabalho, é feito um resumo de aspectos importantes para o trabalho com relação às redes industriais. É definido o conceito de protocolo e um exemplo é utilizado para melhor entendimento. Além disso, o conceito de topologia é esclarecido e são exemplificadas as opções mais utilizadas.

Na seção 3, o tópico trabalhado é comunicação sem fio. Como no trabalho foi utilizado o padrão ZigBee, ele recebe grande destaque. São detalhadas as camadas de rede e o formato dos dados. Também são citados trabalhos que foram de grande valia para este projeto, destacando sua contribuição.

O conceito M2M é detalhado na seção 4. São expostas as definições de diversos autores e seus pontos de vista com relação ao futuro das redes de comunicação entre dispositivos. Algumas aplicações são citadas, sendo que todas contribuíram para o presente trabalho de alguma forma.

Na seção 5, é descrita toda a realização da proposta, iniciando com a descrição do sistema onde o projeto foi implantado. O funcionamento de todas as plantas de controle é bem

explanado, de forma a deixar claro como a execução do trabalho contribuiu para o Laboratório. As etapas de implantação são descritas detalhadamente, seguindo a ordem cronológica em que ocorreram. É relatado o desenvolvimento da placa de comunicação e a expansão do sistema para a comunicação com todas as plantas.

Na seção 6, são apresentados os resultados do trabalho, numericamente e graficamente. A seção 7 apresenta a análise dos resultados obtidos e a comparação com os resultados esperados.

Na seção 8, são apresentadas as conclusões obtidas e são mencionados possíveis trabalhos futuros com base no que foi desenvolvido. A seção 9 é onde são apresentados os artigos que esse projeto gerou.

As referências são apresentadas após a seção 9 e, no Apêndice A, é feita a descrição detalhada e comentada de todas as funções contidas no *software* utilizado.

2 REDES INDUSTRIAIS

Os sistemas de controle de processos visam, basicamente, manter uma grandeza física em determinado valor. Quando isso é feito sem atuações manuais no processo, temos o controle automático. Para isso, as plantas industriais contam com diversos dispositivos, cada um com uma função, para que a variável controlada chegue e se mantenha no valor desejado (CASTRUCCI; BITTAR; SALES, 2011).

Os principais dispositivos que constituem as plantas industriais são: os atuadores, que interferem diretamente no processo, alterando seu comportamento; os sensores/transmissores, que são unidades sensíveis a variações físicas no processo, além de sentir essas variações devem também transmiti-las; e os controladores, que são responsáveis por aplicar lógicas de controle com base nos dados recebidos dos transmissores e enviar comandos aos atuadores (ALVES, 2010).

Vale ressaltar a importância do envio de dados pelos transmissores e o envio de comandos (que também são dados) pelos controladores. Logo, a comunicação entre os dispositivos é uma parte indispensável para que o controle do processo seja satisfatório (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA, 2009).

Todos os componentes de um sistema de controle industrial seguem a tendência de se tornarem cada vez mais funcionais. Como exemplo pode-se citar transmissores que, além da leitura e envio de dados de variáveis de processo, podem executar lógicas de controle, possuir intertravamentos e disparar alarmes, isso sem o auxílio de controladores externos (DORF; BISHOP, 2013).

Com isso as requisições de conectividade entre os elementos presentes na rede crescem cada vez mais. Isso ocorre devido ao volume de dados que se torna cada vez maior, conforme crescem as funções (características) de um nó da rede.

Com maior quantidade de dados, crescem os requisitos básicos de conectividade, como confiabilidade (confiança que o dado transmitido chegue ao destino e chegue inalterado), segurança (acesso restrito à informação e proteção contra interferências nos meios de acesso), e eficiência (vazão de dados aceitável) (COULOURIS *et al.*, 2013).

2.1 Protocolos

Os dispositivos citados utilizam diversas formas para transmissão de dados, como os pulsos elétricos em cabos coaxiais e pares trançados, os pulsos luminosos em fibras óticas e as ondas

eletromagnéticas através do ar. Além disso, é necessário que os dados sigam um conjunto de regras, chamado de protocolo, para que tanto o remetente quanto o destinatário possam entender o que aquele dado representa (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA, 2009).

Segundo Boyer (2004), o protocolo fornece a codificação para a criação dos *bits* em uma comunicação digital, bem como a decodificação para que o receptor entenda o que os *bits* significam. Esses *bits* são enviados em uma frequência pré-determinada, também como parte das regras do protocolo. Um exemplo de mensagem utilizando um protocolo baseado na norma IEEE C37.1 é mostrado na Figura 1. Esse protocolo é utilizado em sistemas SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*).

Figura 1 – *Layout* de uma mensagem enviada em um protocolo baseado na IEEE C37.1.

ENVIADO PRIMEIRO

SINCRONIZAÇÃO	ENDEREÇO REMOTO	FUNÇÃO	ENDEREÇO INTERNO	MODIFICADOR	ORDENS ESPECIAIS	DADOS	CRC
8 BITS	8 BITS	8 BITS	8 BITS	8 BITS	8 BITS	0 - 192 BITS	16 BITS

Fonte: adaptado de Boyer, 2004.

Na Figura 1, o campo “SINCRONIZAÇÃO” é utilizado para sincronizar o relógio do receptor com o transmissor. O campo “ENDEREÇO REMOTO” define o endereço lógico do receptor. Para definir o tipo de resposta requerida ou o tipo de mensagem de controle enviada, é utilizado o campo “FUNÇÃO”. No campo “ENDEREÇO INTERNO” é definido o endereço interno para o qual a mensagem se destina (se o dispositivo receptor possui diversas funções, além de seu endereço lógico, cada função que desempenha pode ter um endereço interno).

O campo “MODIFICADOR” é o modificador da função, que define a quantidade de unidades de dados requeridos. Em “ORDENS ESPECIAIS”, podem ser enviadas instruções específicas ao receptor. No campo “DADOS” são enviados os dados propriamente ditos. Em mensagens de requisição de dados, podem ter 0 *bit*, enquanto nas respostas podem ser usados todos os 192 *bits*. O último campo, “CRC”, corresponde ao *Cyclic Redundancy Check*, um método de verificação de erros na mensagem.

Cada campo tem sua quantidade de *bits* pré-determinada pelo protocolo e serão interpretados no receptor de acordo com as regras pré-definidas (BOYER, 2004). O exemplo citado ilustra o funcionamento de um protocolo particular, mas a visão geral pode ser aproveitada para o entendimento de diversos outros, que se diferenciam muitas vezes alterando poucos parâmetros, como quantidade de *bits* em alguns campos, presença de outros campos, ausência de alguns, etc.

São diversos os protocolos disponíveis, pois antes que organizações padronizadoras como a IEEE (*Institute for Electrical Electronics Engineers*), ISA (*International Society of Automation*), ISO (*International Organization for Standardization*) e EIA se interessassem pela padronização dos mesmos, os fabricantes de equipamentos eram os responsáveis pelo seu desenvolvimento. Protocolos proprietários são usados ainda hoje, mesmo com a popularização dos protocolos abertos, que são aqueles de livre uso, desenvolvidos pelas organizações supracitadas ou quando essas organizações assumem o desenvolvimento de um protocolo já criado (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA, 2009; BOYER, 2004).

Para a utilização de um protocolo aberto, normalmente as normas estão disponíveis nos endereços eletrônicos das organizações. Um exemplo é a norma IEEE 802.15.4 (ver seção 3.1), que pode ser acessada no endereço de padrões da IEEE¹. Os protocolos de uso industrial são diversos, cada um adequado para determinada aplicação. São exemplos a rede AS-i, a DeviceNet, a Profibus, o protocolo HART e a rede Foundation Fieldbus.

2.2 Topologias

A forma como os dispositivos estão conectados entre si e a forma como trocam informações define a topologia da rede. Segundo Albuquerque e Alexandria (2009), são quatro as principais topologias de rede. Na topologia em estrela, exemplificada na Figura 2, existe um nó central, chamado de mestre, e diversos nós escravos. A comunicação é feita exclusivamente pelo mestre, sendo que os escravos não comunicam entre si, necessitando enviar dados ao mestre para que esse repasse os dados². Com isso, uma de suas vantagens é que escravos com protocolos diferentes possam entrar na rede, desde que o mestre possua os requisitos para interpretar aquele protocolo. Além disso, falhas nos escravos não prejudicam a rede. Porém, uma falha no nó central compromete toda a rede.

Na topologia em barramento (Figura 3) os nós da rede são conectados a um barramento. Todas as estações recebem os dados que trafegam pelo barramento, sendo que somente a estação destino irá tratar aquele dado. Como o meio de transmissão é compartilhado, é necessário um controle de acesso e de tráfego, que pode tornar-se lento. Essa topologia só apresenta

¹ <https://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2011.pdf>

² Algumas redes específicas podem ser exceção a essa regra, permitindo comunicação direta entre escravos (VERHAPPEN; PEREIRA, 2012).

problemas se o barramento for rompido (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA, 2009; MORAES; CASTRUCCI, 2001).

Figura 2 – Exemplo de rede industrial com topologia em estrela.

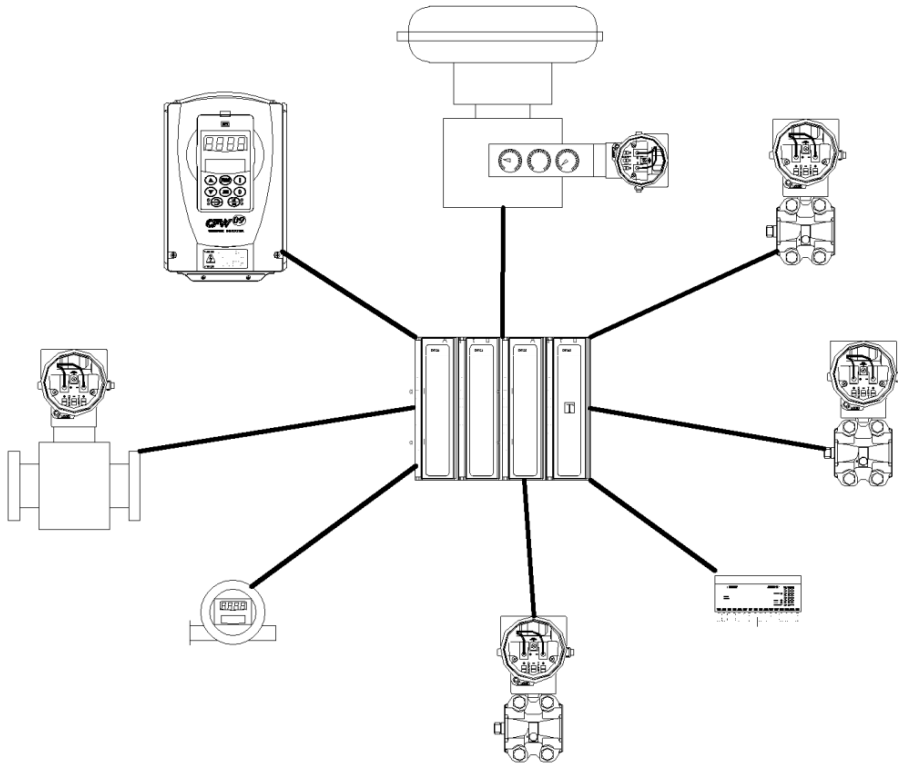
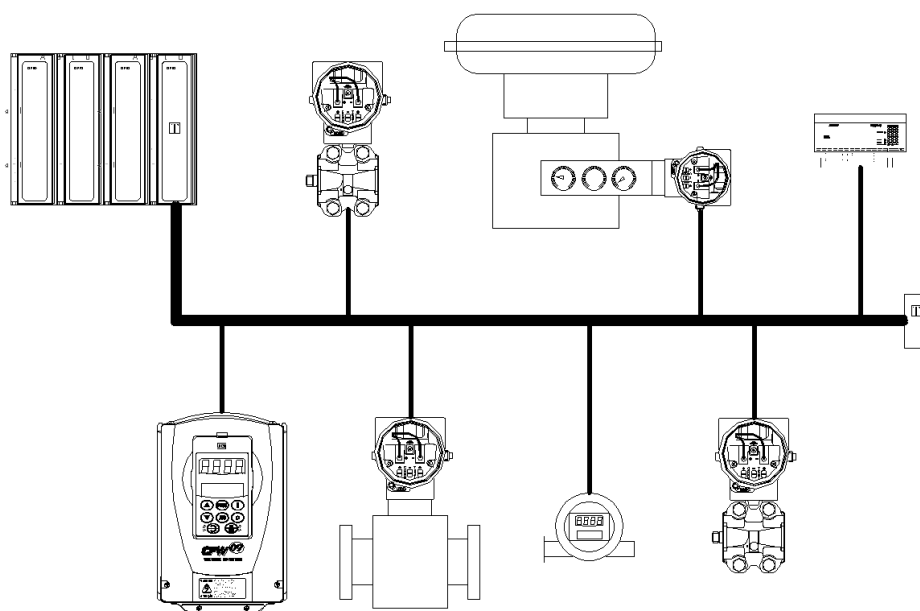
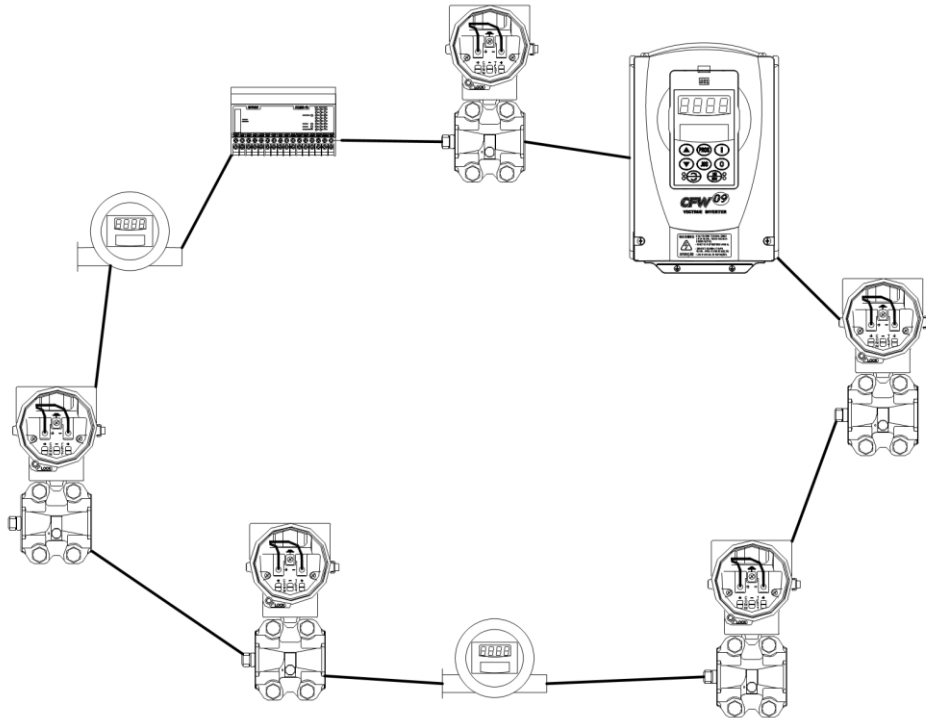


Figura 3 – Exemplo de rede industrial com topologia em barramento.



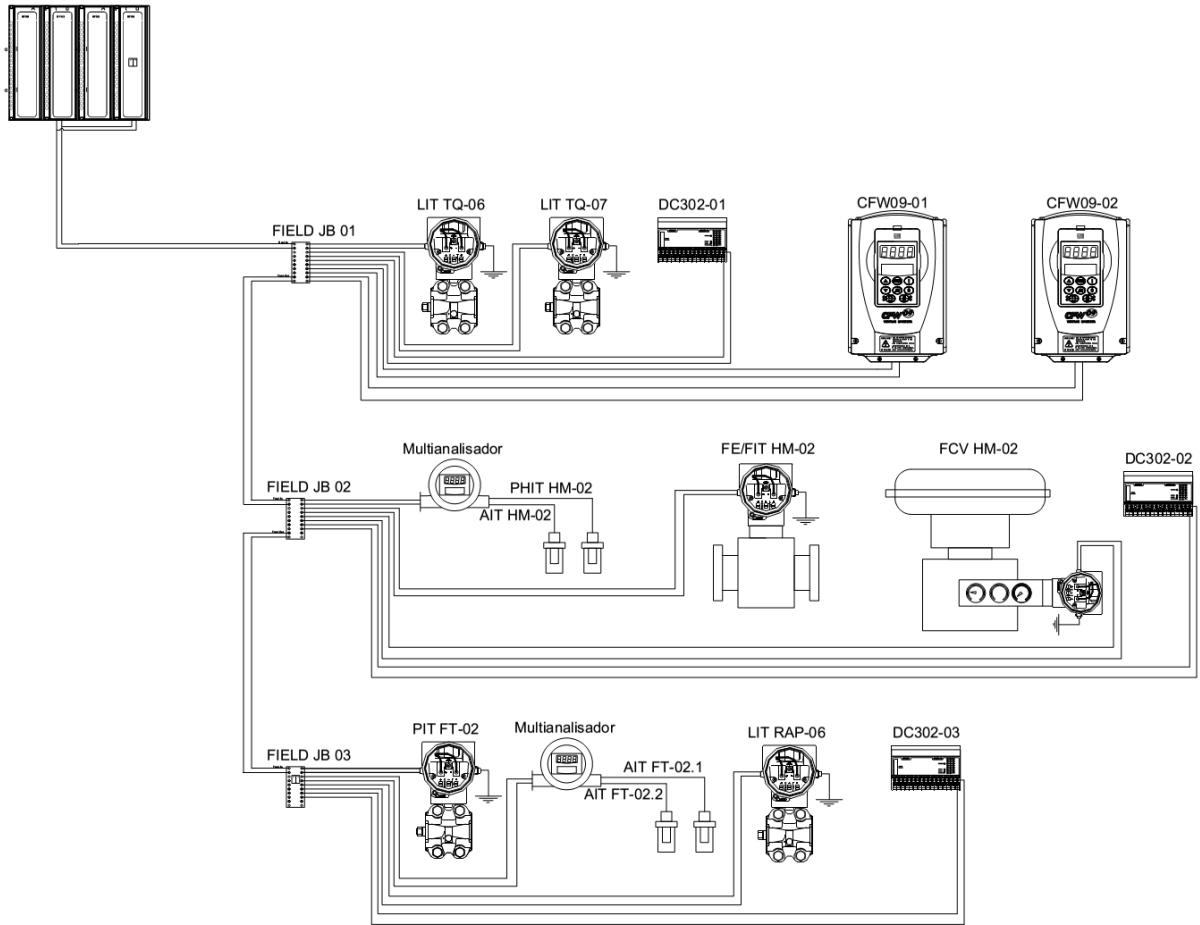
A Figura 4 mostra um exemplo da topologia em anel, onde há uma ligação sequencial fechada entre todas as estações. Os dados circulam no anel, sendo enviados de um ponto a outro até o destino. É de fácil implantação, porém a falha em um nó pode comprometer toda a rede (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA, 2009; MORAES; CASTRUCCI, 2001).

Figura 4 – Exemplo de rede industrial com topologia em anel.



Na topologia em árvore, vários barramentos são conectados (como galhos de uma árvore), geralmente um deles centralizado (associado a um tronco). Na Figura 5, o barramento central alimenta três barramentos secundários, representados pelas caixas de junção FIELD JB 01, 02 e 03. Essa topologia apresenta boa confiabilidade, porém, é de difícil implantação, principalmente em sistemas cabeados (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA, 2009; MORAES; CASTRUCCI, 2001).

Figura 5 – Exemplo de rede industrial com topologia em árvore.



3 COMUNICAÇÃO SEM FIO

Apesar dos inúmeros recursos dos meios de transmissão eletrônica e do surgimento de protocolos cada vez mais completos, a transmissão cabeada ainda esbarra num grande obstáculo, sua dependência de infraestrutura torna o sistema pouco flexível, pois uma vez montada a estrutura, tornava-se muitas vezes inviável qualquer reformulação, além do custo elevado de ampliação. Com isso, cresceu o interesse e os estudos sobre a utilização dos meios de comunicação sem fio em aplicações industriais. Essa técnica mostrou-se a mais promissora e a que mais evoluiu nos últimos anos. Desde os primeiros sistemas de transmissão de voz, houve uma miniaturização e grande aumento das funcionalidades dos componentes envolvidos. A transmissão dos dados é feita através da modulação do sinal, que pode ser transmitida através da modulação por amplitude (AM), modulação por frequência (FM) e a modulação digital (RAMOS, 2012).

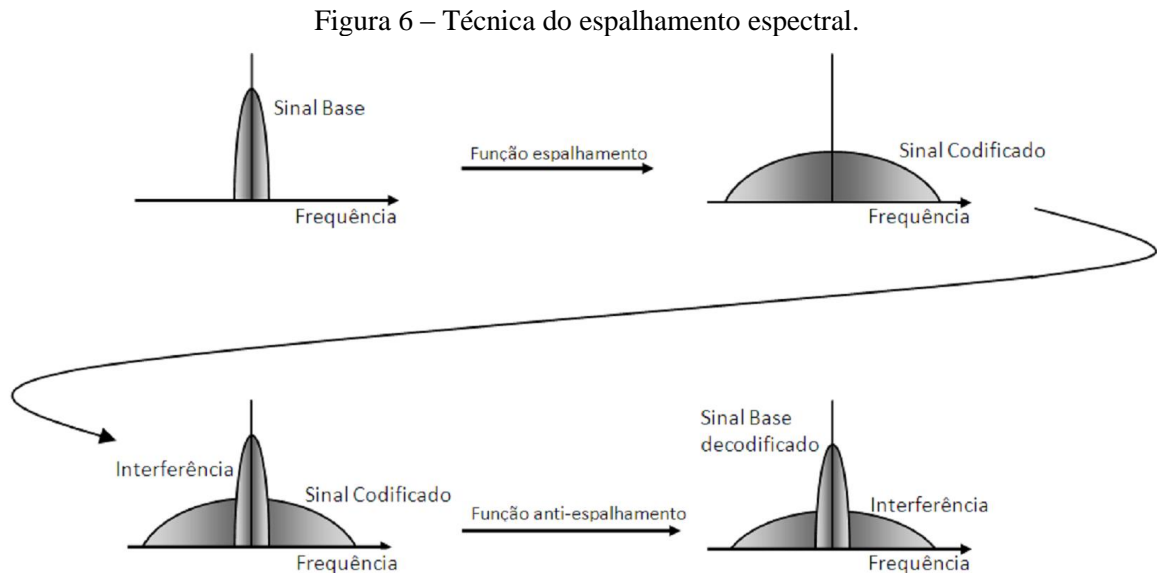
A modulação digital é a técnica mais moderna e que apresenta maior confiabilidade, pois possibilita técnicas de correção de erros, codificação e criptografia e oferece maior imunidade a ruído. Existem diversas formas de modulação digital, cada uma com uma forma de diferente de codificar os bits. São exemplos a modulação em frequência por chaveamento (FSK), a modulação em fase por chaveamento (PSK) e a modulação em amplitude por chaveamento (ASK) (RACKLEY, 2007; RAMOS, 2012)

Na área industrial a utilização das redes sem fio começou com a comunicação entre sistemas de controle, viabilizada em situações onde era necessário percorrer grandes distâncias. Até o início da década de 1990, a utilização de sistemas de comunicação sem fio sofria com poucas opções de *hardwares* a preços elevados, que não permitiam interoperabilidade (sistemas proprietários) e não possuíam sistemas eficientes de segurança. Porém, a indústria possuía uma crescente necessidade de sistemas abertos e confiáveis para diversas aplicações, inclusive sem fio. As redes sem fio começaram a ser aplicadas também em sensores, transmissores e atuadores, o que introduziu uma maior flexibilidade de implementação (RIEGO, 2009).

A crescente tecnologia trazia opções mais confiáveis de transmissão de dados, com características como redução dos custos de instalação e manutenção e diferentes possibilidades de topologia de rede (RAMOS, 2012).

Os dispositivos sem fio devem ser projetados para reduzir interferências de outros equipamentos sem fio e de induções eletromagnéticas, muito comuns na indústria. Uma das formas de atingir esse objetivo é o uso do espalhamento espectral, que consiste na distribuição

da informação transmitida ao longo da faixa de frequência. Ou seja, o sinal a ser transmitido ocupa toda uma faixa de frequência, diversas vezes maior que a faixa de frequência necessária para os dados a serem transmitidos, o que reduz as frequências de interferência (RACKLEY, 2007). A técnica é exemplificada na Figura 6.



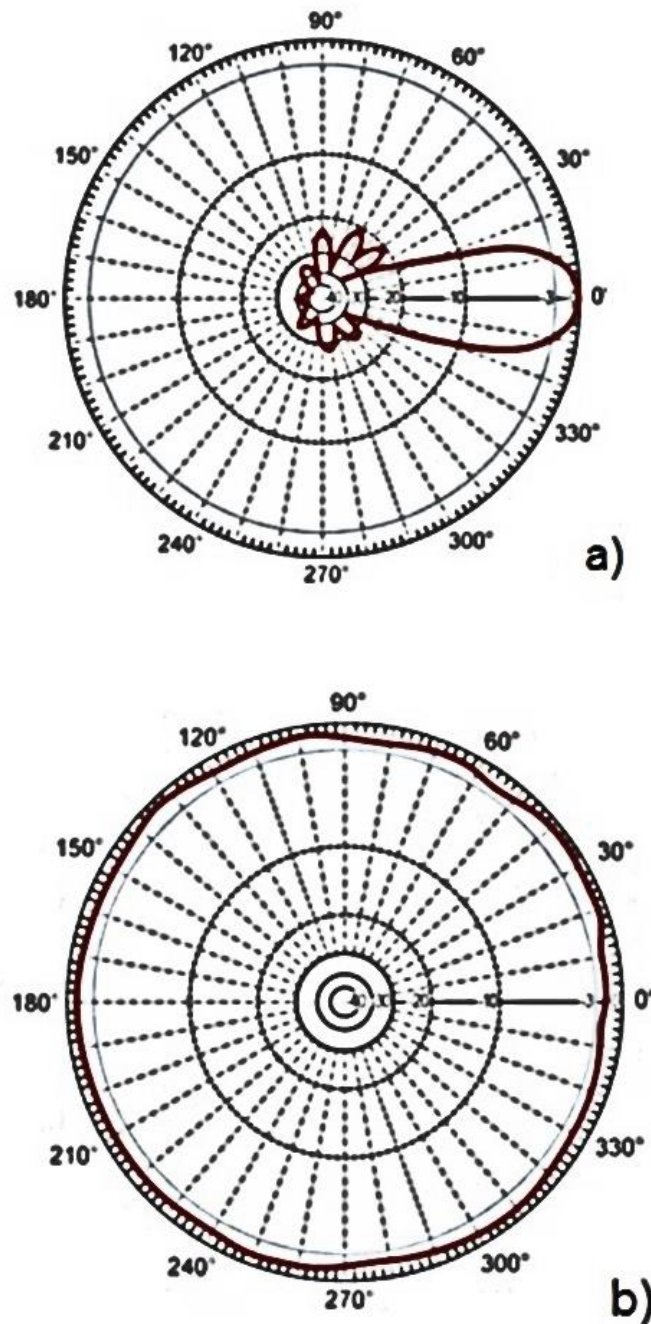
Fonte: Rackley, 2007.

Para Rackley (2007), o espalhamento espectral também aumenta a segurança dos dados transmitidos, visto que os dados são transmitidos de forma codificada. O módulo receptor dos dados deve possuir a função específica para decodificação dos dados.

Outro aspecto importante na transmissão sem fio é a utilização de antenas. Tais antenas podem ser de dois tipos, omnidirecionais ou direcionais. As omnidirecionais transmitem os dados em todas as direções enquanto as direcionais focam o sinal em determinada direção.

As antenas direcionais possuem maior relação alcance/consumo, além de permitirem transmissões simultâneas. A desvantagem é que pequenos desvios na direção torna a comunicação indisponível. Para cada aplicação, um tipo de antena é o ideal (LIMA, 2002). A Figura 7a mostra a forma como o sinal é espalhado na antena direcional e a Figura 7b mostra a forma na antena omnidirecional.

Figura 7 – Diagrama de radiação de antenas direcionais (a) e omnidirecionais (b).



Fonte: <<http://fullwireless.com.br>>

As principais tecnologias atuais de transmissão de dados focadas para aplicação industrial são WirelessHART e ZigBee. O protocolo WirelessHART foi desenvolvido para permitir a integração de dispositivos sem fio com os sistemas existentes no mercado, como o próprio HART (RIEGO, 2009). Os dispositivos que utilizam protocolo WirelessHART são:

- Sensores em contato direto com o processo que dependem de roteadores ou provedores de acesso para transmitir seus dados;

- Adaptadores de rede sem fio, com capacidade de se comunicar com dispositivos tradicionais cabeados que utilizam protocolo HART;
- Provedores de acesso, responsáveis por realizar a interface entre os dispositivos físicos do campo e o sistema de controle;
- E roteadores, com função de direcionamento do sinal de um dispositivo a outro ou a um provedor de acesso.

3.1 Padrão de comunicação sem fio ZigBee

O padrão ZigBee foi desenvolvido por grandes empresas de eletrônicos e automação, que formaram a *ZigBee Alliance* (Aliança ZigBee). Eles desenvolveram esse conjunto de protocolos aberto de comunicação sem fio através de modulação digital de sinal com particularidades que tornaram possível a utilização em diversos campos. A vantagem do ZigBee sobre outros padrões é que é totalmente aberto, possui custo muito baixo de dispositivos e é de fácil aplicação. Para estabelecer a comunicação utilizando ZigBee, geralmente um microcontrolador troca dados com outros microcontroladores, todos com o padrão gravado em suas memórias (RAMOS, 2012).

A Figura 8 mostra o módulo UBeeMax®, da Fractum. O módulo conta com um microcontrolador de vinte pinos, sendo alguns deles entradas e saídas digitais e analógicas, além de interface com o padrão USART³. A implantação de dois ou mais desses módulos em um sistema é suficiente para estabelecer uma comunicação sem fio com o padrão ZigBee.

Figura 8 – Módulo UBeeMax® de comunicação ZigBee.



Fonte: Fractum, 2015.

³ *Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter.*

Conforme a configuração da rede e dos dispositivos, é possível a solicitação de confirmação de recebimento de dados, o reenvio de dados não recebidos e o uso de diferentes caminhos para que as mensagens cheguem ao endereço final (RAMOS, 2012).

O padrão ZigBee possui quatro camadas de rede, sendo elas as camadas de aplicação, de rede, de controle de acesso ao meio e física. As camadas física e de controle de acesso ao meio são definidas pelo padrão IEEE 802.15.4, enquanto as camadas mais altas (de rede e de aplicação) são próprias do padrão ZigBee. O padrão IEEE 802.15.4 foi criado pelo IEEE como modelo para todas as redes sem fio de baixa taxa de comunicação e baixo alcance, categoria onde se encontra o ZigBee (RAMOS, 2012; ZIGBEE ALLIANCE, 2004).

No padrão ZigBee, a informação é transmitida utilizando a técnica de espalhamento espectral e os dados são modulados utilizando a técnica BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), que é a modulação em fase por chaveamento, em que o dado pode assumir apenas dois valores (ZIGBEE ALLIANCE, 2004).

O padrão IEEE 802.15.4 define que a camada física possui as funções de ativação e desativação do transceptor de rádio; detecção de nível de energia; indicação de qualidade do sinal; acesso ao canal de transmissão livre; seleção de frequência de sinal; e transmissão e recepção de dados (IEEE, 2011). Na Tabela 1 é mostrado um *frame* (quadro) de dados ZigBee da camada física.

Tabela 1 – *Frame* de dados ZigBee da camada física.

Tipo	Cabeçalho de sincronização		Cabeçalho camada Física		Dados
Descrição	Preâmbulo	Delimitador inicial	Tamanho do frame	Reservado	Dados para camada superior
Tamanho	4 bytes	1 byte	7 bits	1 bit	0-127 bytes

Fonte: adaptado de ZigBee Alliance, 2004.

No *frame* ZigBee, o preâmbulo corresponde a um conjunto de 32 *bits* em nível lógico baixo (zero), para sincronização. Logo depois se inicia o delimitador, com valor 11100101, indicando o início da mensagem. O preâmbulo e o delimitador inicial formam o cabeçalho de sincronização. O próximo *byte* corresponde ao cabeçalho da camada física, dividido entre os sete *bits* que indicam a quantidade de bytes do *frame* de dados e um *bit* reservado (ZIGBEE ALLIANCE, 2004).

A camada de controle de acesso ao meio, chamada MAC (*Medium Access Control*), provê o serviço de dados e a interface de gerenciamento. Suas funções são o gerenciamento de alertas; acesso ao canal; validação de dados; e confirmação de envio/recebimento (IEEE,

2011). Na Tabela 2, um exemplo de *frame* da camada MAC é mostrado. Esse *frame* é embutido na parte de dados da Tabela 1.

Tabela 2 – *Frame* de dados ZigBee da camada MAC.

Tipo	Cabeçalho MAC		Dados
Descrição	Controle do <i>frame</i>	Nº de sequência	Dados para camada superior
Tamanho	2 <i>bytes</i>	1 <i>byte</i>	Variável

Fonte: adaptado de ZigBee Alliance, 2004.

Na camada de rede, entre as principais funções estão o comando para iniciar uma nova rede, entrar e sair de uma rede, configurar um dispositivo, endereçar um dispositivo, roteamento específico (enviar um dado para um receptor final ou para um receptor intermediário, que roteará o dado), descoberta de dispositivos e descoberta de rota. Os dispositivos podem ser configurados como RFD (*Reduced Function Device*), dispositivo de funções reduzidas; e FFD (*Full Function Device*), dispositivos de funções completas. O FFD pode ser um roteador ou coordenador da rede, enquanto o RFD só pode ser um dispositivo final (ZIGBEE ALLIANCE, 2004). A Tabela 3 mostra a ordenação dos *bits* em um *frame* de dados geral de rede, embutido na porção “Dados” da Tabela 2.

Tabela 3 – *Frame* de dados ZigBee da camada de rede.

Tipo	Cabeçalho de Rede				Dados
Descrição	Rede do receptor	Endereço do receptor	Rede do emissor	Endereço do emissor	Dados para camada superior
Tamanho	0 ou 2 <i>bytes</i>	0, 2 ou 8 <i>bytes</i>	0 ou 2 <i>bytes</i>	0, 2 ou 8 <i>bytes</i>	Variável

Fonte: adaptado de ZigBee Alliance, 2004.

Os endereços no padrão ZigBee são de 16 *bits*. Também é função da camada de rede gerenciar a forma com que a mensagem será destinada, se por *broadcast* (todos na rede recebem a mensagem), *multicast* (mensagem destinada a um grupo) ou *unicast* (mensagem destinada a um único endereço) (RAMOS, 2012).

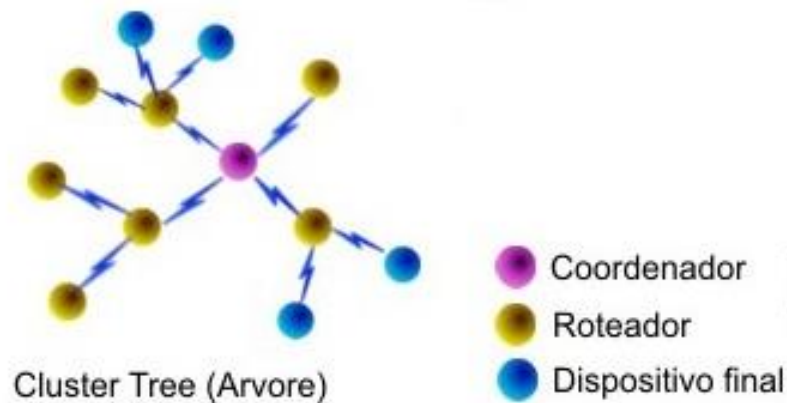
Na camada de aplicação as empresas fabricantes de dispositivos ZigBee desenvolvem objetos específicos para cada aplicação ZigBee. Esses objetos são armazenados no dispositivo. Podem ser, por exemplo, preparados para comandar lâmpadas em uma aplicação de automação residencial (RAMOS, 2012).

No caso dos módulos UBeeMax®, a camada de aplicação conta com objetos de leitura e escrita de dados digitais e analógicos, além da comunicação pelo padrão USART, como já citado. Nesse trabalho foi utilizada a comunicação por esse padrão, que é uma forma de

transmissão serial de dados usada em conjunto com outros padrões, como RS-232 e RS-485. Essa escolha se justificou, pois o sistema onde o projeto foi aplicado contava com comunicação serial já utilizando o RS-232, bastando pequenas adaptações, detalhadas na 31.

Uma das topologias de rede possíveis no padrão ZigBee é a estrela, onde um dos dispositivos FFD assume a função de coordenador (mestre) e todos os outros dispositivos só se comunicam com ele (ver seção 2.2). Caso os dispositivos ZigBee tenham liberdade para se comunicar uns com os outros, a topologia pode ser árvore ou malha. Na topologia em árvore, pode haver a adição de dispositivos FFD roteadores, com a função de encaminhar as mensagens dos dispositivos finais para o coordenador (MESSIAS, 2008; RAMOS, 2012). Analogamente à informação vista na seção 2.2, o coordenador seria o barramento principal (tronco) e os roteadores seriam os barramentos secundários (galhos), como pode ser visto na Figura 9.

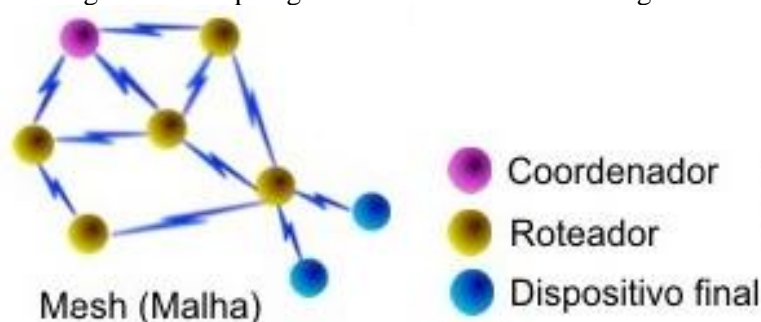
Figura 9 – Topologia em árvore em uma rede ZigBee.



Fonte: Adaptado de Messias, 2008.

A topologia em malha (ou *mesh*) tem maior destaque em sistemas onde há dificuldade de comunicação direta entre os dispositivos, como barreiras físicas ou interferências eletromagnéticas. Nela os dispositivos finais podem se comunicar com qualquer roteador dentro de seu alcance, otimizando o tráfego de dados. A topologia em malha é exemplificada na Figura 10.

Figura 10 – Topologia em malha em uma rede ZigBee.



Fonte: Adaptado de Messias, 2008.

3.2 Aplicações de ZigBee

Uma aplicação interessante do padrão ZigBee é o sensoriamento remoto de pranchas de surfe (BONA; FERREIRA; SCHWARZ, 2012). Essa aplicação demonstrou o baixo consumo de energia dos módulos de comunicação. Segundo os resultados demonstrados, a bateria utilizada de 3,6 V apresentou duração de 3 horas e 30 minutos com transmissão constante de dados. O trabalho permitiu também observar que mesmo em condições adversas, como água, excesso de movimentação, sal e impactos, os dados não sofreram perdas significativas na transmissão.

Sobre a questão da confiabilidade, foi visto que no processamento de sinais biomédicos (ANDRIGHETTO, 2008), a transmissão de dados com ZigBee foi satisfatória, com perdas mínimas nesse sistema extremamente preciso. Foram constatados ruídos na transmissão de sinais, porém não eram suficientes para gerar perdas que afetassem o desempenho final do sistema.

No artigo que estudou a viabilidade de aplicação de rede sem fio em parques eólicos (PEREZ; HELENA, 2011) são abordados diversos aspectos que contribuem para incentivar a aplicação de redes sem fio. Um desses aspectos é o menor custo de projeto, aplicação e manutenção das redes sem fio, com relação ao uso de fibras ópticas. Também é explicado que as redes sem fio possuem mais funcionalidades, entre elas o suporte a segurança da informação, com criptografia e gerenciamento no tráfego de dados.

Outro importante fator apontado é a questão ambiental, visto que na transmissão de dados por cabeamento, haveria a necessidade de abertura de valas para passagem de cabos subterrâneos ou a construção de estruturas para suportar cabos aéreos. Ambas as situações agridem o meio ambiente e necessitam de altos investimentos para instalação.

4 MACHINE-TO-MACHINE

Segundo Minoli (2013), a comunicação M2M consiste na comunicação entre dois ou mais dispositivos, com pouca ou nenhuma necessidade de intervenção humana. Essa definição de M2M é bastante abrangente, englobando diversas formas de comunicação entre máquinas. Já para WU *et al.* (2011), M2M representa a IoT - *Internet of Things* (Internet das coisas), que é a interconectividade entre dispositivos triviais e o ambiente que os cerca. Essa conectividade é mantida pelos próprios dispositivos, pela rede de comunicação entre eles e pelos servidores. Seu principal desafio é prover conectividade de baixo custo que atenda tanto toda escala da rede quanto sua diversidade.

Nesse trabalho, considerou-se M2M como a comunicação entre dispositivos, conforme a primeira definição. Porém houve a disponibilização da informação onde antes a comunicação era limitada, caracterizando, em partes, a segunda definição. Essa intermediação entre as definições foi feita, pois também é utilizada em grande parte das aplicações estudadas de M2M, que consistiram na disponibilização de informações onde antes não havia comunicação entre os dispositivos ou onde a mesma não era bem aproveitada (ver Sessão 4.1).

O futuro das redes de comunicações consiste em diversos dispositivos e redes heterogêneas, agindo em conjunto com um objetivo único. Algumas características diferem, de aplicação para aplicação, mas precisam ser consideradas. São exemplos a mobilidade, a vazão de dados e o volume de dados (CACKOVIC; POPOVIC, 2014).

Uma grande preocupação do mercado M2M é com relação à segurança, pois em uma rede que permite conectar bilhões de dispositivos uma falha na segurança é inadmissível. Outras grandes preocupações são a forma de gerência da rede e o congestionamento de dados (WU *et al.*, 2011).

Além disso, KIM *et al.* (2014) apontam a questão da eficiência energética, visto que diversos dos equipamentos operam com baterias. Além disso, existem dispositivos que transmitem dados de forma periódica, baseada em eventos, aleatória, entre outros, dependendo da aplicação. Isso gera enormes quantidades de dados, tornando difícil o gerenciamento de tráfego.

O mercado M2M vem crescendo aproximadamente 30% ao ano. Algumas previsões, segundo a *Machine Research Corporation* (2015), são:

- A evolução do M2M, onde os dispositivos terão conectividade não só entre si, mas também com a internet. Essa evolução traz grandes oportunidades, porém traz o risco para qualquer empresa que não acompanhe as mudanças;

- Maior tráfego de dados e maiores exigências de vazão pelos nós da rede;
- Empresas do mercado M2M focarão em algumas áreas. Hoje os fornecedores tentam abranger o máximo de soluções possíveis.
- A residência conectada finalmente será realidade, com controle de dispositivos diversos, desde lâmpadas até eletrodomésticos.

O desafio maior é obter um gerenciamento de rede horizontal, reduzindo a complexidade e aumentando a eficiência do custo da rede (CACKOVIC; POPOVIC, 2014).

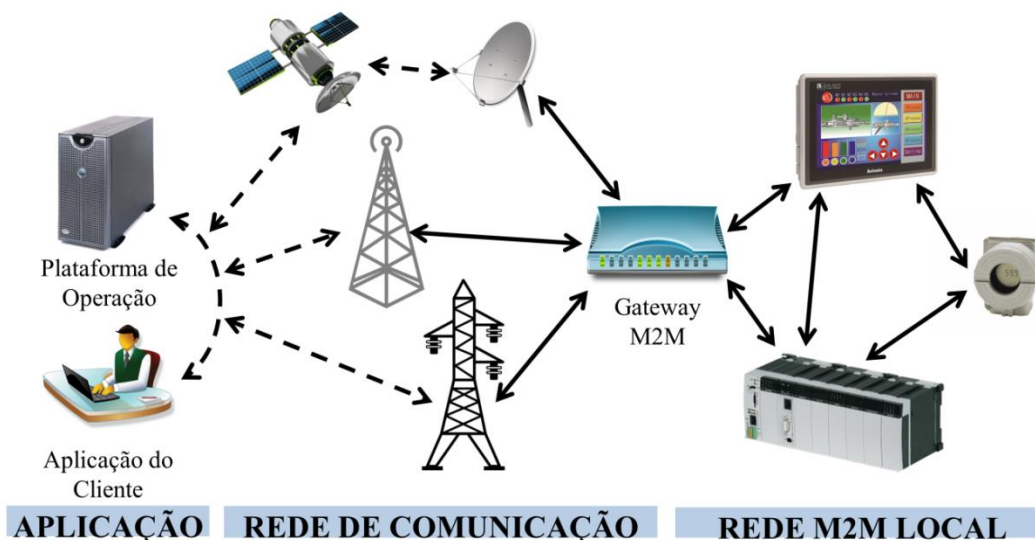
O desenvolvimento de protocolos M2M é recente. Segundo a *Open Mobile Alliance Ltd.* (2012), um conjunto de protocolos comuns às redes locais M2M não é somente uma boa opção, mas uma opção obrigatória. Essa consideração é feita com base na quantidade de dispositivos, que pode chegar a bilhões, com capacidade de comunicação que surgirão no mercado.

Ao desenvolver uma rede de comunicação entre dispositivos, Cackovic e Popovic (2014) apresentam uma visão geral sobre a arquitetura da rede. A arquitetura de rede define a localização física dos componentes e seus papéis e responsabilidades na comunicação (TANENBAUM; VAN STEEN, 2007).

Na Figura 11, é mostrado um exemplo de arquitetura M2M. Nesse exemplo, os dispositivos M2M formam uma rede local, que pode ser desde uma rede residencial até uma grande empresa. Os dados trafegam da rede local para a rede de comunicação através do *gateway*, que é responsável pela conversão dos dados da rede local em algum formato adequado para a rede de comunicação. Uma camada *middleware*, que encaminha os dados e converte os formatos de dados, também pode fazer parte do núcleo da rede, onde se localiza o *gateway*. A camada *middleware* também permite funções de gerenciamento como autenticação e notificações.

A rede externa de comunicação, que recebe os dados do *gateway*, pode ser formada por linhas telefônicas, redes móveis ou até comunicação via satélite. Da rede de comunicação, os dados são encaminhados às aplicações diversas, como medições inteligentes, controle de tráfego, *eHealth*, etc.

Figura 11 – Exemplo de arquitetura M2M.



Fonte: adaptado de Cackovic; Popovic, 2014.

4.1 Aplicações M2M

Como exemplo de aplicação M2M, há a análise em ambiente residencial feita por Lai *et al.* (2013). Nela, os autores abordam questões como segurança de informação através de autenticação de usuários para acesso aos dados. Também foi adotado um sistema de gerenciamento de tráfego de dados, que ajusta a largura de banda conforme a necessidade da rede. Com isso os autores conseguiram eficiência e segurança na aplicação.

Em seu trabalho, Booyesen *et al.* (2012) fazem uma revisão bibliográfica sobre M2M relacionado a redes veiculares. São destacadas as necessidades e os protocolos para esse tipo de aplicação. Além disso, são apontados os desafios futuros do M2M, com destaque na padronização da comunicação, visto que a quantidade e diversidade de dispositivos tende a crescer com o tempo.

Já Faria (2010) demonstra a criação de uma plataforma M2M visando o monitoramento de medidores de consumo energético em prédios públicos de um município português, Ponte da Barca. O trabalho possibilitou a coleta de dados de forma remota, sendo que o tratamento e o monitoramento desses dados foram feitos em outra localidade. Os dados foram transmitidos através da internet e foi desenvolvido um ambiente de monitoramento, similar a um sistema supervisor.

Reis (2012) desenvolveu, em seu trabalho, uma plataforma aberta e interoperável M2M. Foram estudadas as tecnologias envolvidas no desenvolvimento, os protocolos aplicáveis (visto que o sistema deveria ser aberto) e as funcionalidades exigidas para tal. Nesse tra-

balho, testes mostraram uma maior eficiência de protocolos não orientados à conexão. Segundo o autor, na comunicação entre dispositivos é comum que a comunicação sofra interrupções, portanto o estabelecimento de novas conexões para transmitir dados sempre que houver interrupções pode prejudicar o desempenho da rede.

Bons resultados foram alcançados por Watson et al. (2004), onde a tecnologia M2M foi aplicada no controle do consumo energético de cinco instalações, localizadas no estado da Califórnia, EUA. O sistema recebia informações de custo energético (em dólares por quilowatt-hora) de um servidor e diminuía a carga em horários de custo elevado. Isso foi feito alterando parâmetros dos sistemas de ventilação, de ar condicionado e de iluminação, por exemplo. O teste foi feito durante duas semanas e operou totalmente sem intervenção humana, apresentando redução significativa no consumo energético das instalações.

Outras possíveis aplicações são apresentadas pela empresa Gemalto (2014), uma fornecedora de soluções M2M para diversos setores, como o transporte público, o controle de tráfego, a saúde pública, a segurança e o controle de sistemas.

5 METODOLOGIA

Nesse trabalho, foi implantada uma rede de comunicação em plantas de controle de nível, de temperatura e de vazão, localizadas no Laboratório de Automação e Controle do CEFET-MG, unidade Araxá, utilizando o conceito M2M. Uma visão geral do laboratório é mostrada na Figura 12.

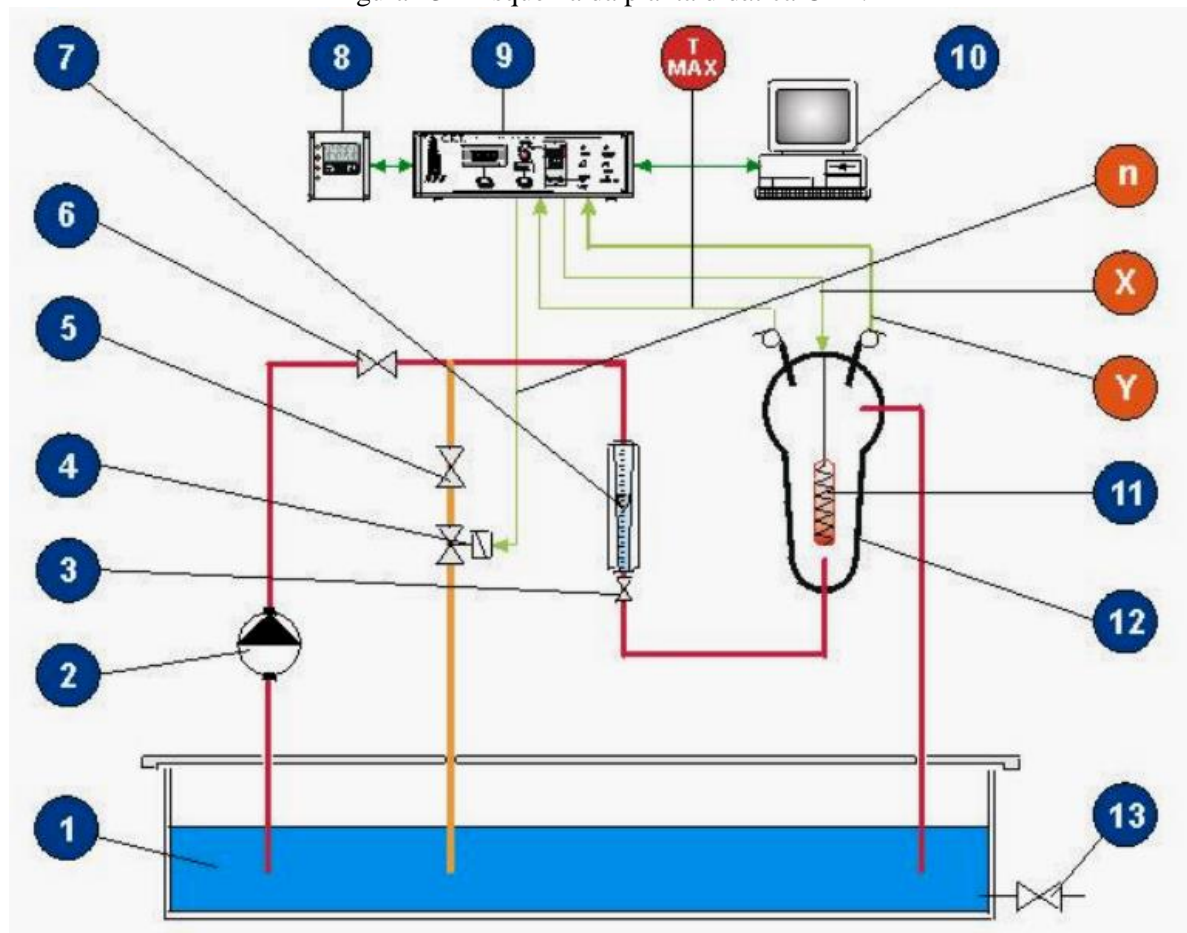
Figura 12 – Plantas no Laboratório de Automação e Controle.



Todas as plantas presentes no projeto são sistemas didáticos, da marca Didacta®. Uma delas, a planta de controle de temperatura CRT (*Controllo e Regolazione Temperatura*), tem seu esquema de funcionamento ilustrado na Figura 13. O sistema conta com um reservatório de água (1), uma bomba (2), uma válvula de controle de alimentação (3), uma válvula de simulação de distúrbio (4) (sinal representado por n) e uma resistência para aquecimento da água (11). A água do reservatório é bombeada para um bulbo (12), passando pela válvula de controle (3). No bulbo se encontram a resistência responsável pelo aquecimento da água (alimentação da resistência, representada por X) e transmissores de temperatura (sinal representado por Y). A válvula de controle (3) tem sua vazão monitorada por um indicador (7). As válvulas (5) e (6) são para controle manual de abertura/fechamento de suas respectivas tubulações. Há uma válvula para esgotamento do tanque (13), se necessário. O equipamento eletrônico (8) é um item opcional de controle que não está presente no Laboratório. O equipamento (9) representa a interface da planta, podendo também ser utilizados para controle eletrônico sem a utilização do computador (10). O computador (10) recebe os dados da planta

através de interface serial RS-232 e conta com um *software* próprio para controle, disponibilizado pelo fabricante (DIDACTA ITALIA, 2012c).

Figura 13 – Esquema da planta didática CRT.

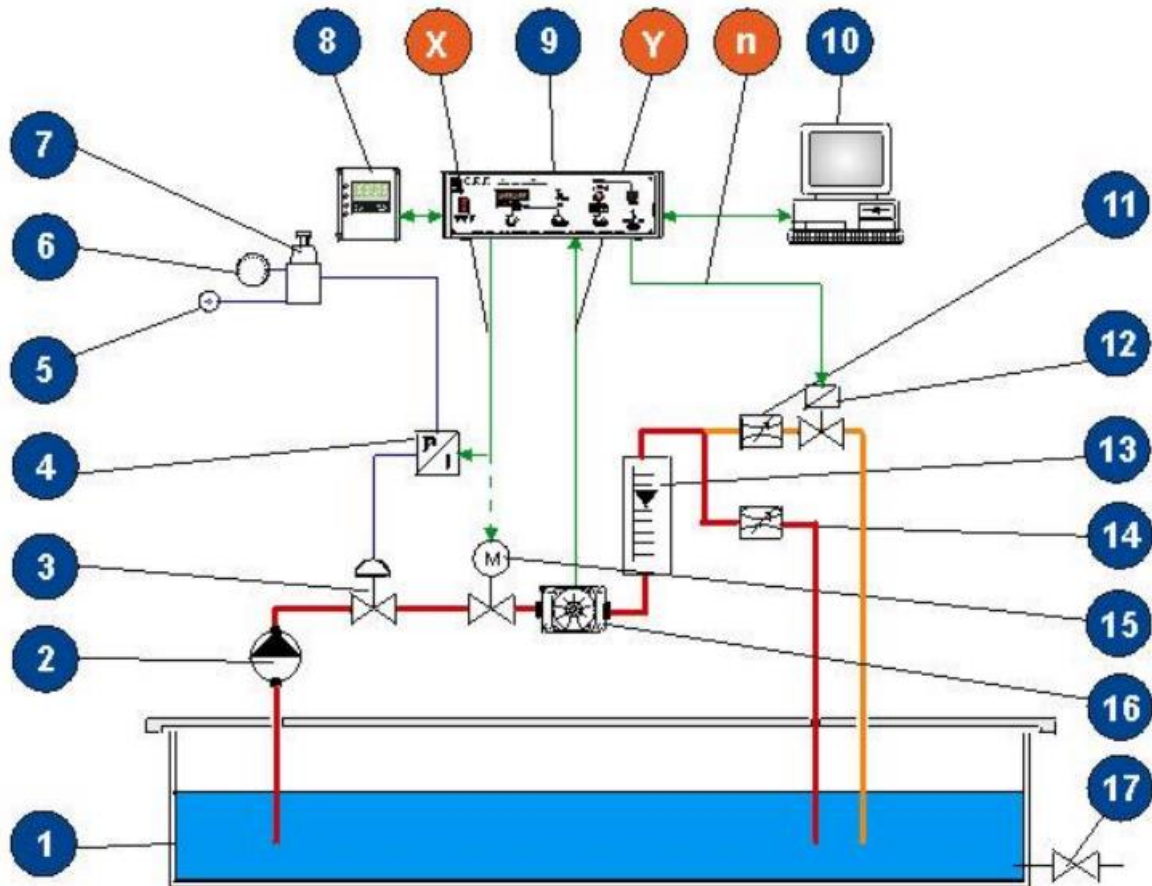


Fonte: Didacta Italia, 2012c.

A planta de controle de vazão CRF (*Controllo e Regolazione Flusso*) tem seu esquema mostrado na Figura 14. A planta, assim como a CRT, conta com um reservatório de água (1) e uma bomba (2). A água passa pela bomba e vai até a válvula (14). A medição da vazão é feita pelo transdutor (16) e o sinal (Y) é enviado ao controlador eletrônico (9). A vazão pode ser monitorada através de um indicador (13). O controle é feito através da válvula pneumática (3) (com o auxílio do conversor I/P do sinal de corrente X para pressão (4)). A planta, por contar com uma válvula pneumática, é alimentada com ar comprimido (5). A pressão do ar é monitorada através de um manômetro (6) e pode ser controlada com uma ferramenta de ajuste manual (7). As válvulas (11) e (12) têm o objetivo de adicionar um distúrbio ao processo, ao receber um comando (n). Assim como na CRT, o tanque pode ser esgotado através de uma válvula (17) e o dispositivo (8) não está presente na planta do Laboratório. O controle pode ser feito com o equipamento eletrônico (9) ou com um *software* instalado no computador (10), que se

comunica com a planta com interface serial RS-232. A válvula elétrica (15) pode substituir a pneumática, conforme requisição do cliente (DIDACTA ITALIA, 2012a).

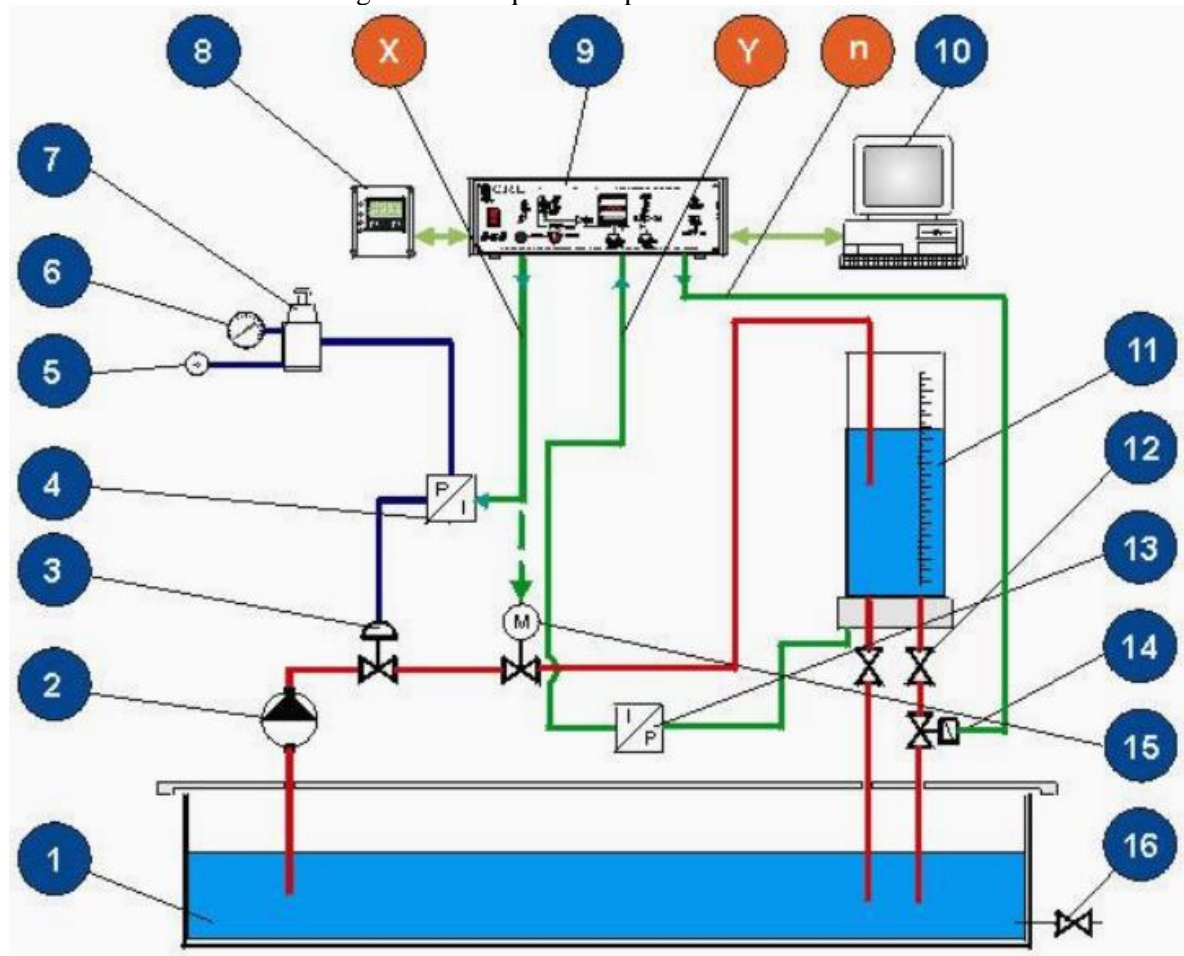
Figura 14 – Esquema da planta didática CRF.



Fonte: Didacta Italia, 2012a.

A terceira planta utilizada no projeto é a de controle de nível CRL (*Controllo e Regolazione Livello*). Seu esquema é mostrado na Figura 15. Assim como as demais, a planta conta com um reservatório de água (1) e uma bomba (2), para alimentação do processo; um sistema de controle eletrônico (8) (não presente no Laboratório); uma interface (9); um computador (10) para controle via *software*; e uma válvula de esgotamento (16). O processo visa controlar o nível no tanque (11). O transdutor (13) envia o sinal (Y) do nível para a interface (9). A válvula pneumática (3) é responsável pelo controle da alimentação do tanque (com o mesmo sistema de alimentação de ar comprimido e conversão I/P do sinal elétrico X visto na CRF). Há duas válvulas manuais (12) e uma solenoide (14) (recebe o sinal n) para introdução de distúrbio. Também há a opção da planta ter controle elétrico, substituindo o pneumático, através da válvula elétrica (15) (DIDACTA ITALIA, 2012b).

Figura 15 – Esquema da planta didática CRL.



Fonte: Didacta Italia, 2012b.

A comunicação entre cada planta e sua estação de trabalho, conforme descrito individualmente, é feita com base no padrão RS-232. Um módulo de conversão de variáveis analógicas para dados seriais está presente em todas as plantas, com a função de converter as informações analógicas dos sensores e enviá-las para a estação, e receber os comandos da estação e enviá-los para os atuadores de forma analógica. A conexão desse módulo de conversão com a planta não foi trabalhada, pois a comunicação direta com os valores analógicos acarretaria na inclusão de amostradores, conversores e registradores, dispositivos já presentes nesse módulo. Decidiu-se, então, trabalhar com os dados já no padrão RS-232, na saída dos módulos conversores de cada planta. O módulo descrito é mostrado na Figura 16. Na parte superior da figura, observa-se a conexão com as variáveis analógicas da planta e, na parte inferior, a conexão com a estação de trabalho.

Para a comunicação pelo padrão RS-232, são utilizados cabos pares trançados e conectores de 9 pinos, chamados DB-9. Esse tipo de enlace, nessa aplicação, permite somente a conexão ponto a ponto, ou seja, a planta se comunica com a estação de trabalho e nenhum

outro ponto de comunicação pode ser adicionado. Isso exemplifica a dificuldade de expansão da rede, citada na Sessão 1 do trabalho. Com base nisso, foi pensado que o padrão de comunicação sem fio ZigBee seria uma solução para esse sistema.

Figura 16 - Conversor de sinal analógico para RS-232.



A escolha do padrão ZigBee baseou-se no estudo de outras formas de comunicação sem fio, como a Bluetooth e a Wi-Fi, e nas aplicações descritas na Sessão 3.2. Comparativamente ao ZigBee, o Bluetooth apresenta menor alcance e maior velocidade (BLUETOOTH SIG, 2015). Para essa aplicação, a vazão de dados do ZigBee é satisfatória, portanto o seu maior alcance tornou-o uma melhor opção que o Bluetooth. Quanto ao Wi-Fi, é um padrão bem consolidado em dispositivos que acessam a internet, principalmente devido à grande velocidade na transferência de dados. Da mesma forma que o Bluetooth, não há necessidade dessa maior vazão de dados. Além disso, o consumo energético é alto, principalmente se for desejado atingir maiores distâncias (WI-FI ALLIANCE, 2015).

Para a implantação da comunicação por ZigBee, o projeto foi dividido em duas etapas, sendo a primeira o desenvolvimento da placa de comunicação, que faria a interface entre os padrões RS-232 e ZigBee, e a segunda o desenvolvimento de uma rede de comunicação entre as plantas, constituindo o nível local de uma arquitetura M2M, como visto na 4 MACHINE-TO-MACHINE. A segunda etapa incluiu o desenvolvimento de um *software* responsável por gerenciar a comunicação.

5.1 Desenvolvimento da interface de comunicação

O ZigBee é um padrão de comunicação aberto, por isso existem diversos fabricantes e dispositivos para aplicação desse padrão. Um desses fabricantes é a Fractum®, responsável pelo desenvolvimento do UBeeMax®. O dispositivo possui uma boa relação custo/benefício comparado com os módulos ZigBee de outros fabricantes, por isso foram escolhidos para a realização dos testes práticos.

Os módulos UBeeMax® contam com uma porta de comunicação serial assíncrona, que pode comunicar com outros dispositivos compatíveis com os níveis lógicos e de tensão do padrão USART. O USART é um padrão de comunicação serial, usado como referência em dispositivos e padrões que utilizam tanto comunicação síncrona quanto assíncrona.

As plantas industriais do Laboratório de Automação e Controle enviam os dados para a estação de trabalho através de cabo par trançado, com base no padrão RS-232. O protocolo RS-232 pode tornar-se compatível com o padrão USART por meio da conversão do nível de tensão. Os módulos UBeeMax® utilizam níveis de tensão entre 2,4 e 3,6 Volts para seus *bits*, já o padrão RS-232 comunica-se utilizando níveis entre 3 e 25 Volts, positivos ou negativos.

Para que o módulo pudesse estabelecer a comunicação com o padrão RS-232 da planta, foi, então, utilizado o Circuito Integrado (CI) Max3232®, da MaxStream®. O CI tem a função de baixar os níveis de tensão do padrão RS-232, para que se tornem compatíveis com a porta USART do módulo ZigBee, e aumentar os níveis de tensão da porta USART para conciliar com o padrão RS-232. Foram utilizados capacitores associados ao CI Max3232®, conforme indicação do fabricante (MAXIM INTEGRATED, 2007). A Figura 17 mostra o esquema de ligação do Max3232®.

Os terminais 11 (T1IN) e 12 (R1OUT) do CI MAX3232® estão em comunicação com os terminais 2 e 3, respectivamente, do módulo UBeeMax®. A ligação do módulo UBeeMax® pode ser vista na Figura 18.

Para fornecer 3,3 volts ao circuito, foi utilizado o regulador de tensão ajustável LM317®, da Texas Instruments®, capaz de receber até 37 volts na entrada, mantendo fixa a tensão de saída. A tensão de saída é ajustada de acordo com a associação dos resistores R1 e R2, mostrados na Figura 19 (TEXAS INSTRUMENTS, 2014).

Figura 17 - Diagrama de ligação do Max3232® com a porta serial RS-232.

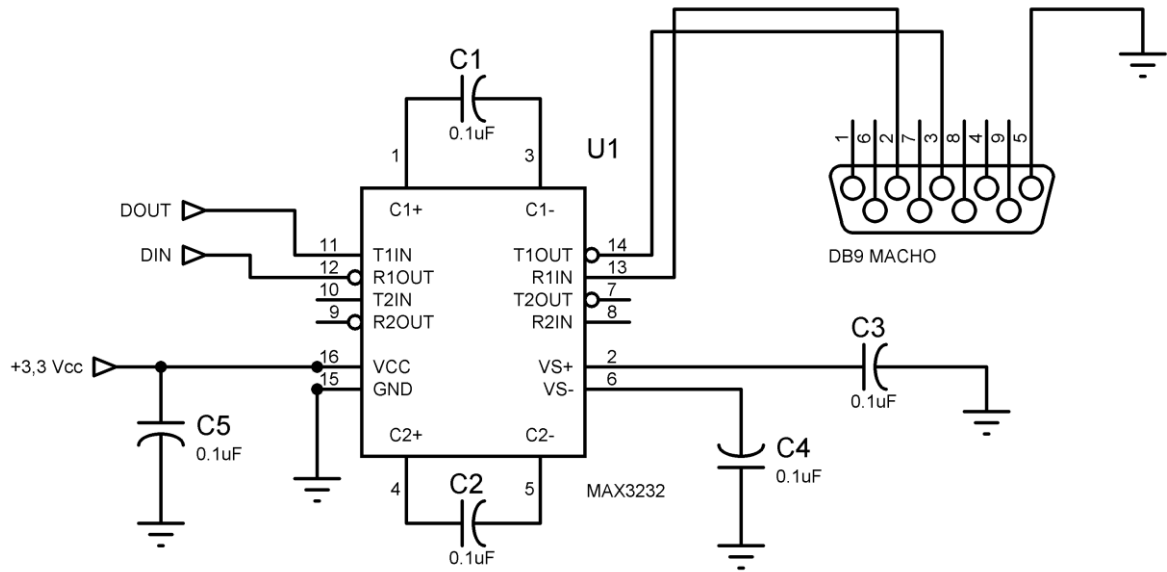


Figura 18 - Diagrama de ligação do módulo UBeeMax®.

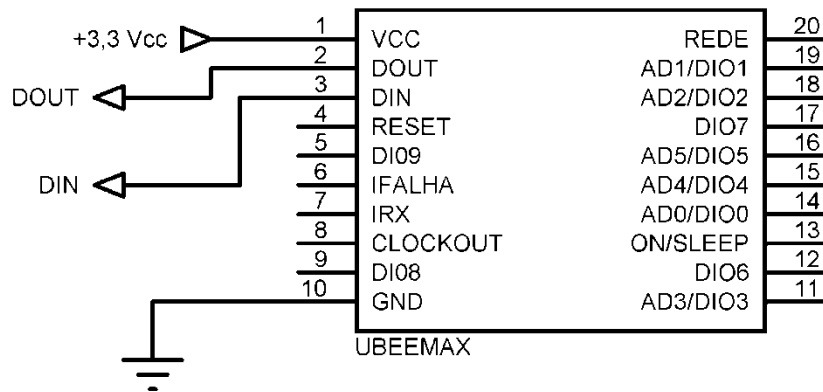
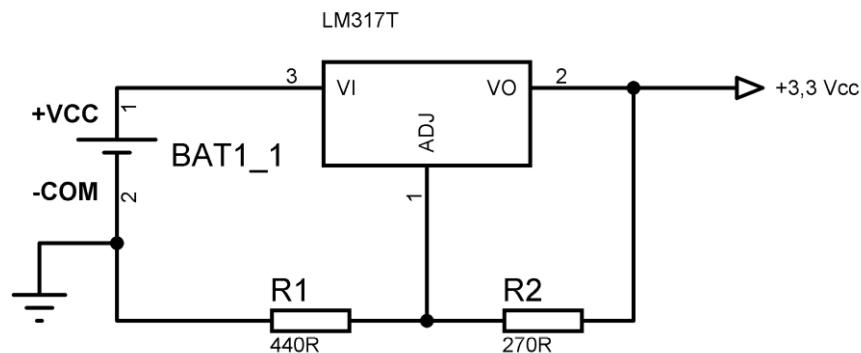


Figura 19 - Diagrama de ligação do LM317®.



Seguindo o projeto, a placa foi desenvolvida e montada na saída da interface eletrônica da planta didática de temperatura CRT. A placa final, com a conexão RS-232, é mostrada na Figura 20.

Figura 20 - Placa de comunicação finalizada conectada à porta serial RS-232 da planta.



Para se comunicar com a planta, a estação de trabalho conta com uma interface mais simples de trabalhar com ZigBee, que é a USB (*Universal Serial Bus*). O fabricante Frac-tum® fornece o dispositivo USBee®, para que o módulo UBeeMax® possa ser conectado à porta USB da estação. O módulo USBee® associado ao UBeeMax® é mostrado na Figura 21.

Figura 21 - Módulo USBee® associado ao UBeeMax®.



Com a placa de comunicação na planta e o módulo na estação de trabalho, foi iniciada a troca de dados através do padrão ZigBee. Para avaliar a eficiência da interface de comunicação, foi feito um teste de mobilidade, utilizando um notebook como estação de trabalho e afastando-o da planta até que o sistema apresentasse falhas na comunicação, ou seja, perda ou alteração de *bits* na transmissão. Essas falhas foram quantificadas e analisadas. Esse teste ava-

liou somente os *bits* contidos na camada de aplicação do padrão (ver seção 3.1), pois esta é a única camada onde a manipulação e avaliação dos *bits* é acessível.

5.2 Rede de comunicação

Concluído o teste de mobilidade, a comunicação foi expandida. Foram desenvolvidas outras duas placas e as mesmas foram aplicadas às plantas didáticas de controle de vazão CRF e de nível CRL. A estação passou a ter a função de mestre de uma rede com topologia em estrela (ver seção 2.2), e as plantas tornaram-se os escravos da rede. Foi desenvolvido um *software* na estação de trabalho com as funções de gerenciar a rede, coletar e armazenar os dados obtidos, tomar as decisões de controle e enviar os comandos para as plantas. O algoritmo detalhado do *software* é descrito no apêndice A, na Figura 22 é mostrado seu algoritmo simplificado.

Figura 22 - Simplificação do algoritmo de execução do *software*.

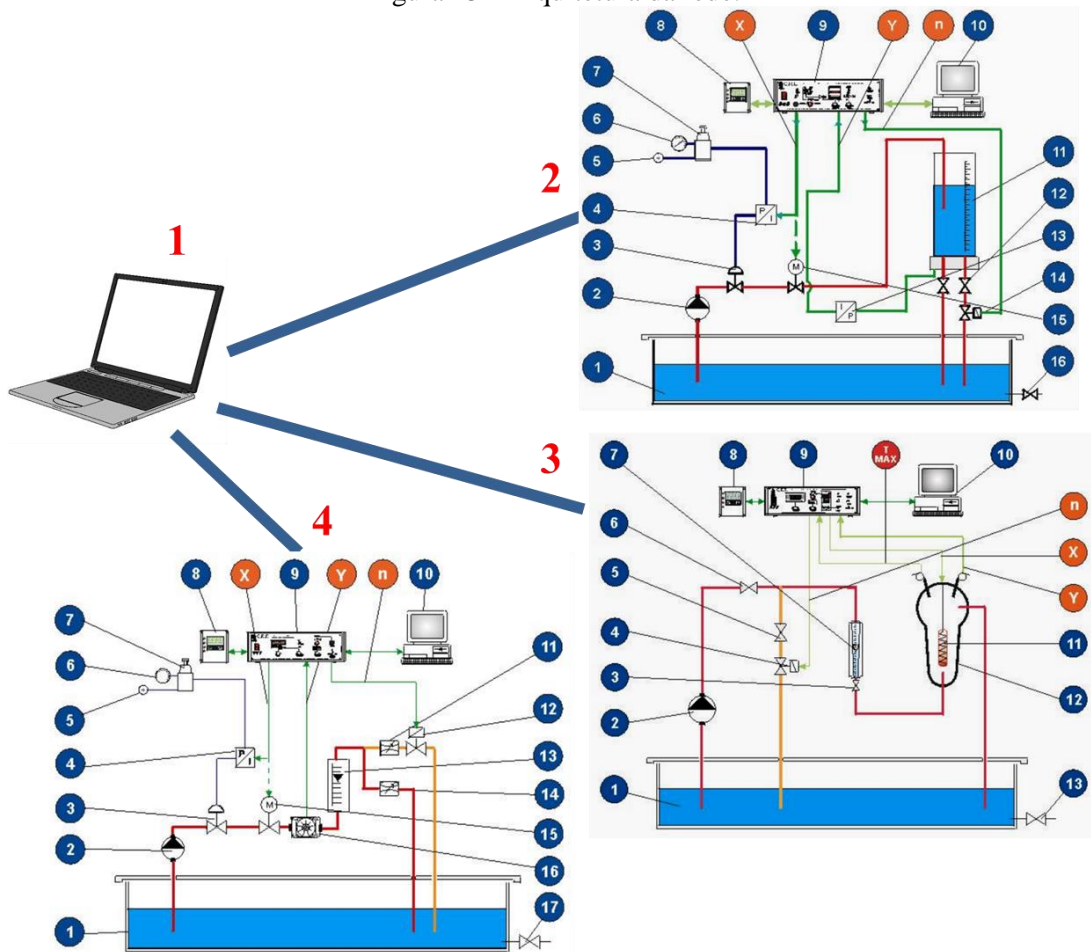
- Configuração da porta de comunicação;
- Enquanto ciclos executados \leq total de ciclos:
 - $n=2$;
 - Enquanto $2 \leq n \leq 4$:
 - Configuração da comunicação com nó n ;
 - Requisição da PV;
 - Armazenamento da variável;
 - Atuação sobre a MV;
 - $n = n + 1$.
 - Ciclos executados = ciclos executados + 1.

Dentre as funções mais importantes do gerenciamento da rede estão a definição de um identificador para os dispositivos na rede, a definição das regras de comunicação e o ordenamento da comunicação. Seguindo recomendações do fabricante dos módulos UBeeMax®, os módulos foram identificados numericamente, sendo que o mestre foi identificado como nó 1 e os escravos como nós 2, 3 e 4 (FRACTUM, 2015). A Figura 23 ilustra a arquitetura da rede.

A configuração de cada módulo UBeeMax® é feita através do envio de comandos específicos, quando o módulo está conectado à um computador. Como os módulos escravos foram conectados às plantas de controle, não era possível que essa configuração fosse feita dinamicamente. Por isso, os escravos foram pré programados para entrar em comunicação exclusivamente com o mestre, reconhecendo somente o próprio endereço e o endereço do mestre. Esse é o motivo da escolha da topologia em estrela. Dessa forma, sempre que os es-

cravos recebem uma requisição, enviam a resposta diretamente para o mestre. Para entrar em comunicação com os escravos, o *software* conta com uma rotina de rodízio entre os nós, requisitando dados do nó 2, depois do nó 3, depois do nó 4, e repetindo o ciclo, através da configuração da comunicação citada, realizada pelo *software*. A quantidade de ciclos pode ser limitada ou não, ocorrendo indefinidamente até o envio de um comando de parada.

Figura 23 - Arquitetura da rede.



O único dado requisitado das plantas, nesse projeto, foi o valor atual da sua Variável de Processo (PV), que é o nível no nó 2 (CRL), a temperatura no nó 3 (CRT) e a vazão no nó 4 (CRF). Para o controle, são enviados comandos de atuação sobre as Variáveis Manipuladas (MV) de cada planta. Na CRL, a MV é a posição da válvula pneumática responsável pela alimentação do tanque. Na CRT, a MV é a tensão de alimentação da resistência elétrica de aquecimento. Na CRF, a MV é a posição da válvula pneumática por onde passa a água.

O teste da rede consistiu, primeiramente, na comunicação entre as três plantas. Esse teste objetivou comprovar a expansibilidade da rede. O segundo teste de rede (terceiro teste

geral) foi o de controle, onde as variáveis de uma planta deveriam interferir no funcionamento de outra, através do envio de comandos dependentes dos estados de plantas distintas.

Não foi objetivo do trabalho comparar ou demonstrar diferentes lógicas de controle, por isso a lógica aplicada foi simples, visando apenas demonstrar a aplicação da comunicação M2M entre as plantas. O sistema foi reduzido para duas plantas, CRT e CRF, e a lógica consiste no monitoramento constante da temperatura e da vazão. Quando a temperatura atingir 30% de seu valor (escala de 0 a 100°C), é enviado um comando de abertura em 80% da MV da planta CRF. Quando a temperatura atingir 35%, um comando é enviado para alterar a MV da planta CRF para 60%.

Os testes consistiram na validação da comunicação e configuração da rede. Para isso, foi verificado se os comandos eram enviados para a CRF conforme acompanhamento da CRT.

6 RESULTADOS

O primeiro teste, de mobilidade, mostrou que a comunicação entre os dispositivos começou a falhar quando a distância entre os mesmos chegou a aproximadamente 80 metros. Isso em uma situação onde a estação de trabalho estava em ambiente aberto e a planta didática no laboratório.

Quando a estação de trabalho passou para um ambiente fechado, aumentando assim os obstáculos físicos entre os dispositivos, a perda passou a ocorrer em uma distância de aproximadamente 40 metros. Esse teste foi feito mantendo a planta no laboratório e movendo a estação de trabalho para outro laboratório. A imagem de satélite da Figura 24 representa essas duas etapas.

Figura 24 - Representação do local de testes.



Fonte: Adaptado de Google Maps®.

Em ambiente fechado, à distância de 40 metros, a transmissão apresentou falhas em 5,696% dos ciclos. Cada ciclo consiste de uma mensagem de requisição de 16 *bits* e uma mensagem de resposta de 16 *bits*. Considerando as perdas *bit a bit*, o percentual de falhas foi de 0,178%. A Tabela 4 demonstra as medições realizadas durante alguns testes. A Tabela 5 mostra os resultados dos testes. Os testes em ambiente aberto apresentaram resultados similares.

Tabela 4 - Falhas ocorridas na comunicação entre a planta e a estação de trabalho.

Ciclos por teste	Falhas	Bits transmitidos	Bits com falha
35	1	1120	1
1	1	32	1
2	1	64	1
6	1	192	1
5	1	160	1
25	1	800	1
10	1	320	1
11	1	352	1
20	0	640	0
20	0	640	0
3	1	96	1

Tabela 5 - Resultados das medições de falhas.

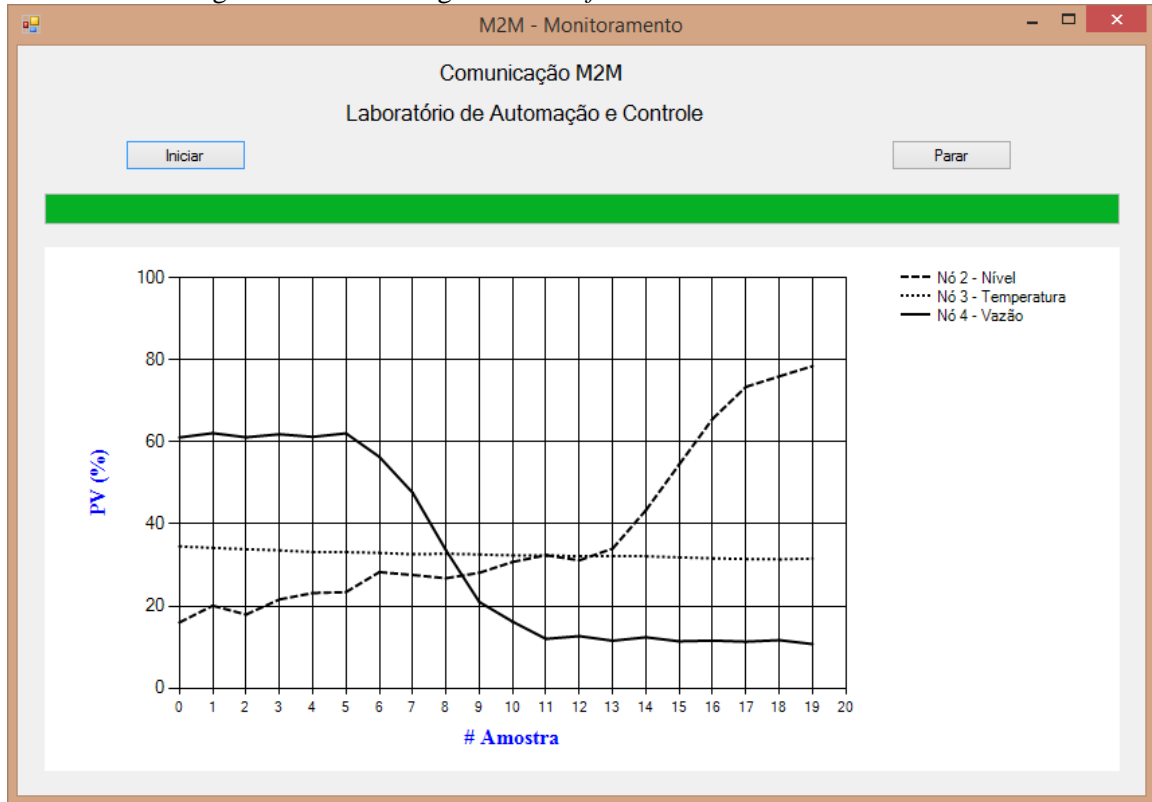
Total de ciclos	158
Total de falhas	9
Total de bits transmitidos	5056
Total de bits com falha	9
Percentual de falhas por ciclo	5,696%
Percentual de falhas por <i>bit</i>	0,178%

O segundo teste realizado foi de expansibilidade. Com ele a estação de trabalho passou a comunicar com três plantas de controle. O *software* desenvolvido para esse fim mostra e armazena os dados das três plantas. Na Figura 25, a interface do *software* é mostrada, durante um dos testes de monitoramento realizados. A interface do *software* conta com um botão de início de operação, um botão de parada, uma barra de progresso e um gráfico. A barra de progresso é utilizada quando se limita a quantidade de ciclos de varredura das variáveis das plantas. O gráfico vai sendo preenchido com a leitura instantânea das variáveis.

A comunicação com as três plantas apresentou aumento de três vezes no tempo de varredura. Como as plantas se comunicam com a estação de trabalho através de requisição e resposta, para cada nova variável lida de uma nova planta de controle, o tempo para completar um ciclo de leitura aumenta proporcionalmente. Não foi configurada nenhuma taxa de amos-

tragem específica para essa aplicação, sendo que os dados são requisitados de todas as plantas em cada ciclo, sem tempo de espera para realizar um novo ciclo ou entre requisições.

Figura 25 - Interface gráfica do *software* durante o monitoramento.



Ainda testando a comunicação M2M, o terceiro teste visou o controle de uma das plantas, com base no comportamento de outra. Para isso, limitou-se a rede em duas das plantas de controle do Laboratório de Automação e Controle, a CRF e a CRT. Através da Figura 26 é possível visualizar a interface gráfica do *software* em seu estado modificado para controlar, e não apenas monitorar as plantas.

Na Figura 27 são mostrados os dados obtidos em uma das amostras. Para melhor visualização, os dados foram lançados em uma planilha do Microsoft Excel®, onde foi gerado o gráfico. No eixo vertical, os valores das variáveis de processo, em escala de 0 a 100%. No eixo horizontal, as amostras enumeradas de 1 a 20.

Pode-se observar que o sistema de controle respondeu adequadamente. Na amostra 7, foi atingido 30% do valor de temperatura e, ainda nesse ciclo de leitura, o comando para alteração da MV da CRF foi enviado. Isso pode ser observado na amostra 8, na qual o valor da PV de vazão passou para aproximadamente 60%. Na amostra 16, quando a temperatura atingiu 35%, observa-se que na amostra seguinte a vazão baixou, logo o comando de alteração da MV da CRF foi enviado.

Figura 26 - Interface gráfica do *software* durante o controle.

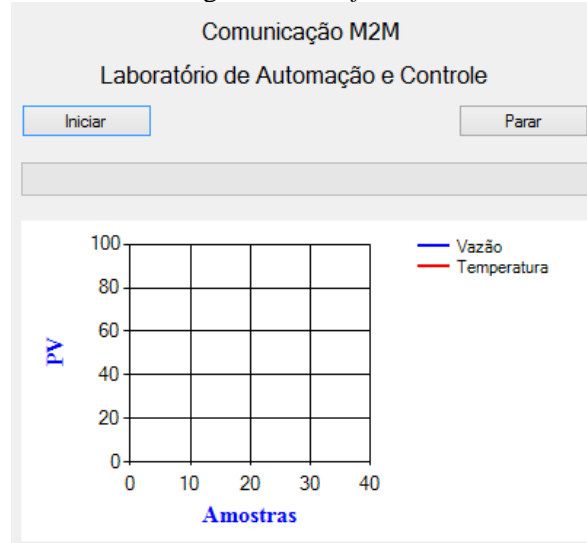
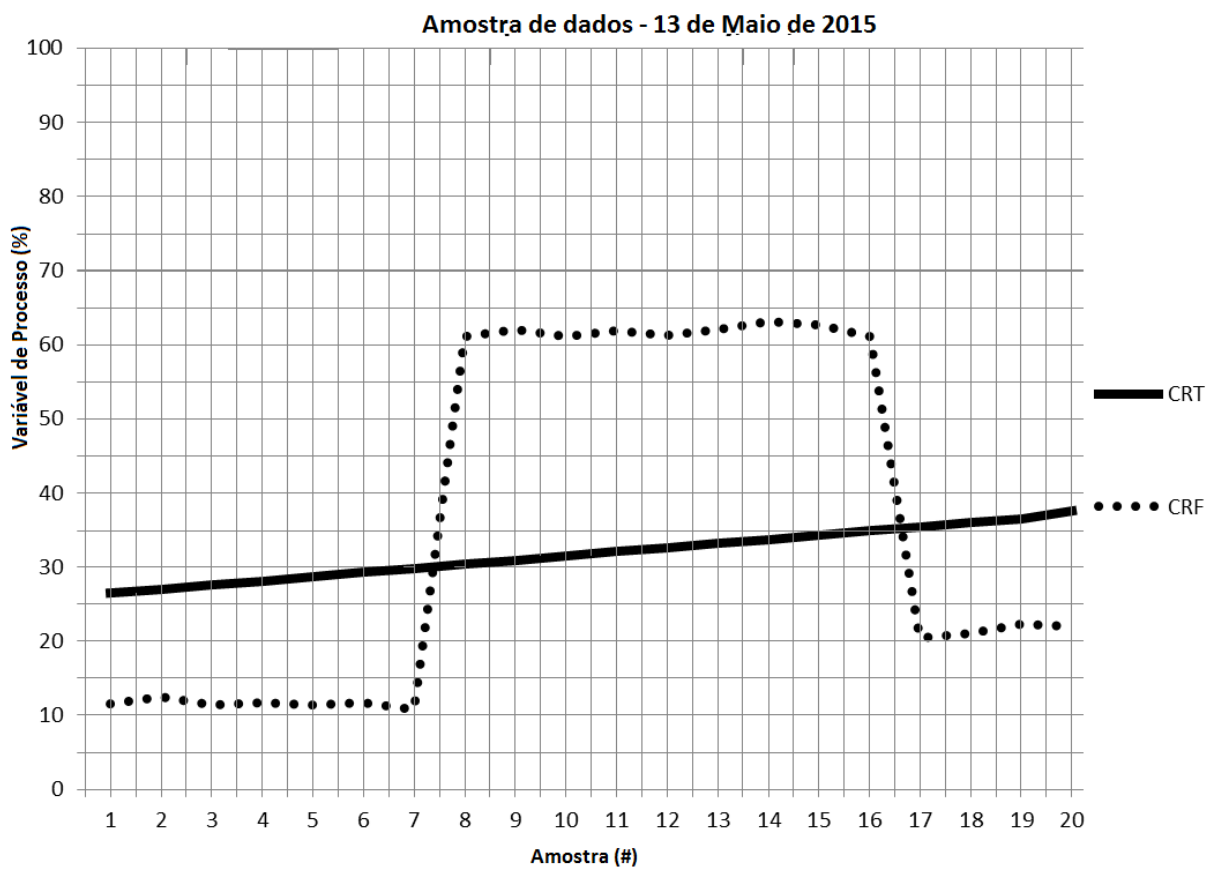


Figura 27 - Dados de controle mostrados graficamente.



7 DISCUSSÃO

O desenvolvimento da interface de comunicação entre os padrões RS-232 e ZigBee apresentou ganhos consideráveis para o sistema. Quanto à mobilidade, o fabricante especifica que o módulo UBeeMax® alcança 300 metros em ambientes fechados (FRACTUM, 2015), entretanto, supõe-se que o fabricante tenha ignorado pequenas perdas ou alterações nos *bits*. Para esse trabalho, a distância alcançada foi considerada aceitável. Em aplicações que exijam longas distâncias, podem-se utilizar módulos ZigBee como roteadores (MESSIAS, 2008).

As falhas ocorridas na transmissão poderiam ser contornadas com algum algoritmo de verificação de erros, como a verificação de paridade, o *checksum* e o *Cyclic Redundancy Check*. Entretanto, a decisão de trabalhar com os dados já codificados para RS-232 impossibilitou qualquer adição ou alteração de *bits* na comunicação e, para a aplicação dessas técnicas, é necessária a adição de *bits*. Os motores no laboratório, todos com potência abaixo de 1kW, são insuficientes para gerar campos magnéticos consideráveis. Por isso, testes de interferência eletromagnética na transmissão não foram realizados.

Como a implantação utilizou um padrão de comunicação sem fio, não foram necessárias alterações na infraestrutura do sistema atual. Outro importante ganho do trabalho é o fato da interface com a estação de trabalho ser USB. Isto eliminou uma limitação do sistema, que é o fato de notebooks geralmente não contarem com interfaces RS-232.

A expansibilidade do sistema foi demonstrada com o monitoramento de três plantas de controle por uma estação de trabalho. Essa expansão foi feita com a adição de novas placas de comunicação e com alterações no *software*. Com essa aplicação, as plantas de controle, que são monovariáveis, podem ser consideradas como parte de um único sistema, possibilitando realizar estudos mais amplos envolvendo diversas variáveis.

Os processos controlados pelas plantas do Laboratório de Automação e Controle, antes, só podiam ser controlados individualmente, com a aplicação permitiu-se que uma única estação de trabalho controlasse as plantas. A rede implantada foi configurada para que a comunicação ocorresse de forma automática, sem necessidade de intervenção humana.

8 CONCLUSÕES

O trabalho mostrou que é possível agregar vantagens de sistemas sem fio em sistemas cabeados. Entre as vantagens, está a fácil realocação de nós em uma rede sem fio, a implantação da interface possibilitou que a estação de trabalho fosse realocada, respeitando as limitações de distância. Outra vantagem sobre sistemas cabeados é a fácil expansibilidade, que é a capacidade de adição de novos nós a rede, o que foi possibilitado com esse trabalho. Além disso, a interface com a estação de trabalho, anteriormente serial RS-232, foi substituída pela USB, ampliando as possibilidades de estações de trabalho, visto que diversos computadores já não contam com a porta de comunicação serial RS-232.

As plantas do Laboratório de Automação e Controle são sistemas de única entrada e única saída, o que limitava os estudos a sistemas monovariáveis no laboratório. O objetivo de um sistema didático de controle é possibilitar o estudo, de forma mais aproximada possível, de um sistema de controle industrial, onde é comum a presença de diversas variáveis.

Com a implantação da rede de comunicação entre diversas plantas, possibilitou-se que o comportamento de uma interfira na outra, caracterizando um sistema de diversas entradas e diversas saídas. Esse monitoramento e controle de diversas plantas traz uma visão mais abrangente do sistema e aproxima o sistema didático de um sistema industrial, além de possibilitar estudos em sistemas multivariáveis. Outras possibilidades de estudos incluem a aplicação de lógicas complexas de controle e o desenvolvimento de sistemas de supervisão completos.

Quanto aos erros de transmissão observados nos testes, para verificação e correção dos mesmos, evidencia-se a necessidade de desenvolver uma técnica que não necessite de adição de *bits* na transmissão. Outra possibilidade é substituir o módulo conversor analógico para serial por outro sistema de conversão. Isso possibilitaria o tratamento dos dados de forma mais adequada à aplicação, como a inclusão de técnicas de verificação de erros e o ajuste da velocidade da transmissão.

Para trabalhos futuros, sugere-se uma análise detalhada dos níveis de confiança da comunicação aplicada. Essa análise pode ser uma importante referência para a decisão da aplicação em sistemas de controle, onde a confiabilidade possui maior importância que em sistemas de monitoramento.

9 PRODUÇÕES

Os resultados alcançados no projeto possibilitaram a apresentação de três artigos:

1. Artigo “Interface de Comunicação entre os Padrões RS-232 e ZigBee aplicada em um Sistema de Controle”, apresentado oralmente no 7º Simpósio de Instrumentação e Imagens Médicas (SIIM) / 6º Simpósio de Processamento de Sinais da UNICAMP (SPS-UNICAMP 2015). O evento foi organizado pela Universidade Estadual de Campinas. Ocorreu na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC) da UNICAMP, em Campinas, São Paulo, nos dias 21, 22 e 23 de Outubro de 2015.
Nessa apresentação, focou-se no desenvolvimento da interface de comunicação e seus testes de mobilidade e expansibilidade.
2. Artigo “Comunicação ZigBee aplicada em um Sistema de Controle”, apresentado oralmente no I Congresso Internacional de Empreendedorismo Energia Meio Ambiente e Tecnologia (CIEEMAT). O evento foi organizado pelo Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET-RJ). Ocorreu no Hospedagem I, Vila Residencial de Praia Brava, em Angra dos Reis, Rio de Janeiro, nos dias 18, 19 e 20 de Novembro de 2015.
Nesse artigo, como sugestão dos avaliadores do artigo anterior, adicionaram-se os testes de avaliação de falhas na transmissão e seus resultados.
3. Artigo “Controle de Processos através de Comunicação M2M”, também apresentado oralmente no I CIEEMAT.
Esse artigo focou no controle entre as plantas do laboratório e em sua importância na comunicação M2M.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, P. U. B. D.; ALEXANDRIA, A. R. D. **Redes Industriais**. 2. ed. São Paulo: Ensino Profissional, 2009.
- ALVES, J. L. L. **Instrumentação, Controle e Automação de Processos**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.
- ANDRIGHETTO, E. **Sistema de Processamento de Sinais Biomédicos: Rede Wireless ZigBee com Aplicação do Padrão IEEE 802.15.4**. Florianópolis, SC. 2008.
- BLUETOOTH SIG. Bluetooth. **Bluetooth**, 2015. Disponível em: <<http://www.bluetooth.com/>>. Acesso em: 17 Março 2015.
- BONA, D. D. D.; FERREIRA, G. D. S.; SCHWARZ, L. **Sensoriamento Remoto em Pranchas de Surfe utilizando Tecnologia ZigBee**. Florianópolis, SC. 2012.
- BOOYSEN, M. J. et al. Machine-to-Machine (M2M) Communications in Vehicular Networks. **KSII Transactions on Internet and Information Systems**, v. 6, p. 529-546, Fevereiro 2012.
- BOSWARTHICK, D.; ELLOUMI, O.; HERSENT, O. **M2M Communications: A Systems Approach**. Chichester, UK: Wiley, 2012.
- BOYER, S. A. **SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition**. 3. ed. EUA: ISA, 2004.
- BRAZELL, J. et al. **M2M: The Wireless Revolution**. Waco, EUA: Texas State Technical College, 2005.
- CAKOVIC, V.; POPOVIC, Ž. Management in M2M networks. In: 37th INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGY, ELECTRONICS AND MICROELECTRONICS (MIPRO) INTERNATIONAL CONVENTION. Opatija, Croácia: IEEE, 2014, p. 501-506.
- CASTRUCCI, P. D. L.; BITTAR, A.; SALES, R. M. **Controle Automático**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- COULOURIS, G. et al. **Sistemas Distribuídos: Conceitos e Projeto**. [S.l.]: Bookman, 2013.
- DIDACTA ITALIA. **CRF - Flow Control and Regulation Study Unit**. 2012a. Disponível em: <http://didacta.it/allegati/main_catalogs/CE_CRF_E.PDF>. Acesso em: 27 Julho 2015.
- DIDACTA ITALIA. **CRL - Level Control and Regulation Study Unit**. 2012b. Disponível em: <http://didacta.it/allegati/main_catalogs/CE_CRL_E.PDF>. Acesso em: 27 Julho 2015.
- DIDACTA ITALIA. **CRT - Temperature Control and Regulation Study Unit**. 2012c. Disponível em: <http://didacta.it/allegati/main_catalogs/CE_CRT_E.PDF>. Acesso em: 12 Maio 2015.

- DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de Controle Modernos**. 12. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- FARIA, R. M. **Telemetria e Comunicação M2M Aplicados a Serviços de Melhoria da Eficiência Energética**. FEUP, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal, p. 83. 2010.
- FRACTUM. Folha de dados Módulo RF U-BEEMAX, Santa Rita do Sapucaí, 2015. Disponível em: <http://www.fractumrf.com/manuais/UBEEMAX_REV11.pdf>. Acesso em: 03 Maio 2015.
- GEMALTO. Gemalto. **Gemalto World Leader in Digital Security**, 4 Dezembro 2014. Disponível em: <<http://www.gemalto.com/>>. Acesso em: 6 Janeiro 2015.
- HART COMMUNICATION FOUNDATION. Tecnologia WirelessHART. **HART Communication Foundation**, 2014. Disponível em: <<http://pt.hartcomm.org/hcp/tech/wihart/>>. Acesso em: 10 Novembro 2015.
- IEEE. **IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks: Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)**. Nova Iorque, EUA, p. 314. 2011.
- KIM, J. et al. M2M Service Platforms: Survey, Issues, and Enabling Technologies. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, 16, n. 1, primeiro trimestre 2014. 61-76.
- LAI, Y.; KANG, J.; YU, R. Efficient and Secure Resource Management in Home M2M Networks. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, 13, Outubro 2013. 1-12.
- LIMA, A. C. D. C. **Fundamentos de Telecomunicações: Teoria Eletromagnética e Aplicações**. Salvador: UFBA, 2002.
- MACHINE RESEARCH CORPORATION. Machine Research, 2015. Disponível em: <<http://www.machineresearch.com/>>. Acesso em: 06 Abril 2015.
- MAXIM INTEGRATED. MAX3222/MAX3232/MAX3237/MAX3241. **Folha de dados do Max3232**, 2007. Disponível em: <<http://pdfserv.maximintegrated.com/en/ds/MAX3222-MAX3241.pdf>>. Acesso em: 30 Julho 2015.
- MEDTRONIC. O que é um marca-passo?, 2015. Disponível em: <<http://www.medtronicbrasil.com.br/your-health/bradycardia/device/what-is-it/index.htm>>. Acesso em: 20 Julho 2015.
- MESSIAS, A. R. Controle Remoto e Aquisição de Dados via XBee/ZigBee (IEEE 802.15.4) , 2008. Disponível em: <<http://www.rogercom.com/ZigBee/ZigBee.htm>>. Acesso em: 03 Julho 2015.
- MINOLI, D. **Buildind The Internet of Things with IPv6 and MIPv6: The Evolving World of M2M Communications**. Hoboken, EUA: Wiley, 2013.

- MORAES, C. C. D.; CASTRUCCI, P. D. L. **Engenharia de Automação Industrial**. Rio de Janeiro: LTC, 2001.
- OPEN MOBILE ALLIANCE LTD. OMA Open Mobile Alliance: For a Connected World, 2012. Disponível em: <<http://www.openmobilealliance.org/>>. Acesso em: 06 Abril 2015.
- ORNELAS, D. C. **A Eficácia de Políticas Públicas na Redução de Acidentes e Fatalidades de Trânsito no Brasil**. Curitiba: ANTP. 2009.
- PEREZ, F.; HELENA, E. S. **Estudo de Viabilidade de uso de Redes Sem Fio no Monitoramento de Parques Eólicos**. ULBRA. Canoas, RS, p. 20. 2011. Não publicado.
- RACKLEY, S. **Wireless Networking Technology: From Principles to Successful Implementation**. [S.l.]: Newnes, 2007.
- RAMOS, J. D. S. B. **Instrumentação Eletrônica Sem Fio**. São Paulo: Érica, 2012.
- REIS, D. D. O. **Estudo de uma Plataforma Aberta para Comunicações M2M**. FEUP, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal, p. 98. 2012.
- RIEGO, H. B. **Redes Sem Fio na Indústria de Processos: Oportunidades e Desafios**. Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 101. 2009.
- TANENBAUM, A. S.; VAN STEEN, M. **Distributed systems: principles and paradigms**. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2007.
- TEXAS INSTRUMENTS. LM317 3-Terminal Adjustable Regulator. **Folha de dados do LM-317**, Outubro 2014. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm317.pdf>>. Acesso em: 03 Agosto 2015.
- VERHAPPEN, I.; PEREIRA, A. **Foundation Fieldbus**. 4^a. ed. [S.l.]: ISA, 2012.
- WATSON, D. S. et al. Machine to Machine (M2M) Technology in Demand Responsive Commercial Buildings. **Proceedings from the ACEEE 2004 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings: Breaking out of the Box**, Pacific Grove, EUA, 22-27 Agosto 2004. 18.
- WI-FI ALLIANCE. Wi-Fi Alliance. **Wi-Fi Alliance**, 2015. Disponível em: <<http://www.wi-fi.org/>>. Acesso em: 15 Março 2015.
- WIRELESS, F. Full Wireless, 2010. Disponível em: <<http://fullwireless.com.br/>>. Acesso em: 02 Jul 2015.
- WU, G. et al. M2M: From Mobile to Embedded Internet. **IEEE Communications Magazine**, Abril 2011. p. 36-43.
- ZIGBEE ALLIANCE. **ZigBee Specification**. San Ramon, Estados Unidos, p. 378. 2004.

APÊNDICE A - Descrição e código-fonte do software desenvolvido

O *software* disponibilizado pelo fabricante da planta de controle conta com recursos para a comunicação com uma única planta. Concluído o teste de mobilidade, para que o sistema pudesse ser colocado em rede (segunda etapa do trabalho, descrita na seção 5.2), foi necessário o desenvolvimento de um novo sistema. Para isso, foi utilizada a plataforma Microsoft Visual Studio®, e a linguagem de programação Visual Basic. O *software* tem as funções de configuração da rede, envio e recebimento de dados, armazenamento de variáveis e aplicação de lógicas de controle.

Primeiramente, as funções pré-definidas do Visual Studio são importadas.

```
Imports System.Windows.Forms 'uso de aplicações visuais
Imports System.IO.Ports 'uso de portas de comunicação
Imports System.Math 'uso de funções matemáticas
Imports Microsoft.Office.Interop 'interoperabilidade com aplicações do Microsoft Office®
```

Iniciando o programa principal, são definidas as variáveis que serão utilizadas globalmente ao longo da aplicação, cada uma com sua função definida na forma de comentários.

```
Public Porta As String = "COM10" 'nome da porta de comunicação utilizada
Friend WithEvents S1 As New System.IO.Ports.SerialPort 'nome da comunicação serial
Public node As Integer 'armazena o nó de comunicação atual
Dim PV As Double = 0 'armazena a variável instantânea
Dim PV_list(0 To 2, 0 To 99) As String 'lista as variáveis por nó e por amostra (0 até 2 nós, 0 até 99 amostras)
Dim ciclo As Integer 'ciclo de leitura de variável (todos nós)
Dim tempo(0 To 2, 0 To 99) As String 'armazena o instante da leitura da variável por nó e por amostra
Dim amostras As Integer 'configura quantos ciclos serão executados
Dim Comando_parada As Boolean = False 'recebe o comando de parada do programa
Dim MV(0 To 2) As Double 'valor da variável manipulada, usada para envio de comandos
Dim erro_ocorrencia As Integer 'armazena ocorrência de erros detectáveis
'variáveis para importação dos dados para planilha
Dim oExcel As Object
Dim oBook As Object
Dim oSheet As Object
```

Na tela inicial do programa (ver Figuras Figura 25 e Figura 26), ao pressionar a tecla “Iniciar”, a rotina executada compreende todas as funções principais do programa. Iniciando com a configuração da quantidade de amostras que serão executadas, a rotina passa para um *loop*. Nesse *loop*, é feita a chamada das configurações por nó para o estabelecimento da co-

municação, a leitura da PV de cada nó e a atualização do gráfico. Ao final das repetições do *loop* a função chamada é a de exportação dos gráficos para uma planilha.

```

Private Sub Button_Iniciar_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button_Iniciar.Click

    amostras = 40 'configuração da quantidade de amostras

    'configuração da barra de progresso, conforme quantidade de amostras
    ProgressBar1.Value = 0
    ProgressBar1.Maximum = amostras

    ciclo = 0 'inicia a variável ciclo com valor igual a zero

    While ciclo < amostras 'roda a aplicação 'n' vezes, armazenando 'n' vezes a
    variável de cada nó, sendo n a quantidade de amostras

        'verifica se o botão de parada não foi pressionado
        Application.DoEvents()
        If Comando_parada = True Then Exit While

        ProgressBar1.Increment(1) 'incrementa a barra de progresso em uma unidade

        'execução da leitura e armazenamento da variável de processo do nó dois
        'parte desabilitada durante a execução do teste de controle (somente os nós
        três e quatro fazem parte desse teste)
        node = 2
        configura_no()
        Ler_PV()

        'execução da leitura e armazenamento da variável de processo do nó três
        node = 3
        configura_no()
        Ler_PV()

        'execução da leitura e armazenamento da variável de processo do nó quatro
        node = 4
        configura_no()
        Ler_PV()

        With Chart1 'configuração e atualização do gráfico para mostra dos dados
        em tempo real

            'define a forma como cada conjunto de dados será mostrado
            .Series(0).ChartType = DataVisualization.Charting.SeriesChartType.Line
            .Series(1).ChartType = DataVisualization.Charting.SeriesChartType.Line
            .Series(2).ChartType = DataVisualization.Charting.SeriesChartType.Line

            'define o texto da legenda de cada série
            .Series(0).LegendText = "Nó 2 - Nível"
            .Series(1).LegendText = "Nó 3 - Temperatura"
            .Series(2).LegendText = "Nó 4 - Vazão"

            'define o titulo do eixo y, sua fonte e a cor
            .ChartAreas(0).AxisY.Title = "PV"
            .ChartAreas(0).AxisY.TitleFont = New Font("Times New Roman", 12,
            FontStyle.Bold)
            .ChartAreas(0).AxisY.TitleForeColor = Color.Blue

            'define limites para os eixos y e x

```

```

.ChartAreas(0).AxisY.Maximum = 100
.ChartAreas(0).AxisY.Minimum = 0
.ChartAreas(0).AxisX.Maximum = amostras
.ChartAreas(0).AxisX.Minimum = 0

'define o titulo do eixo x, sua fonte e a cor
.ChartAreas(0).AxisX.Title = "Amostras"
.ChartAreas(0).AxisX.TitleFont = New Font("Times New Roman", 12,
FontStyle.Bold)
.ChartAreas(0).AxisX.TitleForeColor = Color.Blue

'duas opções para diferenciar as linhas, por cor:
'Chart1.Series(0).Color = Color.Blue
'Chart1.Series(1).Color = Color.Red
'Chart1.Series(2).Color = Color.Green

'ou por estilo de linha:
Chart1.Series(0).BorderDashStyle = DataVisualiza-
tion.Charting.ChartDashStyle.Dash
Chart1.Series(1).BorderDashStyle = DataVisualiza-
tion.Charting.ChartDashStyle.Dot
Chart1.Series(2).BorderDashStyle = DataVisualiza-
tion.Charting.ChartDashStyle.Solid
Chart1.Series(0).Color = Color.Black
Chart1.Series(1).Color = Color.Black
Chart1.Series(2).Color = Color.Black

'define a espessura das linhas
Chart1.Series(0).BorderWidth = 2
Chart1.Series(1).BorderWidth = 2
Chart1.Series(2).BorderWidth = 2

'para que o programa entenda os dados e insira-os no gráfico, os valo-
res decimais devem ser separados por ponto, e não por vírgula, como foram armazenados
na matriz
Chart1.Series(0).Points.AddXY(ciclo, PV_list(0, ciclo).Replace(",",
"."))
Chart1.Series(1).Points.AddXY(ciclo, PV_list(1, ciclo).Replace(",",
"."))
Chart1.Series(2).Points.AddXY(ciclo, PV_list(2, ciclo).Replace(",",
"."))

'desabilita a exibição dos valores nos eixos, tornando o gráfico mais
"limpo"
.Series(0).IsValueShownAsLabel = False
.Series(1).IsValueShownAsLabel = False
.Series(2).IsValueShownAsLabel = False

.ChartAreas(0).Area3DStyle.Enable3D = False 'desabilita a exibição 3D

'atualização dos dados no gráfico e "segura" os dados anteriores para
recepção de novos
Chart1.Update()
Chart1.DataBind()

End With 'fim da configuração e atualização do gráfico

ciclo = ciclo + 1 'atualiza a quantidade de ciclos já executados

End While 'fim da execução das leituras, caso a quantidade de ciclos configu-
rada seja atingida

```



```

Exportar() 'chamada da função de exportação de dados para a planilha
End Sub 'fim da função que lida com o botão iniciar pressionado

```

Enquanto o programa está no *loop*, é chamada a função de configuração da comunicação. Dentro dela, a função de configuração da porta é chamada. A configuração da comunicação consiste no envio de comandos AT para que o mestre possa entrar em comunicação com determinado nó (FRACTUM, 2015).

```

Public Sub configura_no() 'função que lida com a configuração da comunicação com o
nó selecionado

    configura_porta() 'chamada da função para configuração da porta serial

    'verifica se é possível abrir a porta serial, caso não seja armazenada a ocorrência de erro
    Try
        S1.Open()
    Catch
        erro_ocorrencia = 1
    End Try

    If S1.IsOpen Then 'verifica se a porta foi aberta com sucesso, para início da
configuração da comunicação

        S1.Write("+++ " & vbCr) 'inicia modo de configuração e envia Carriage Re-
turn (retornar p/ nova linha)
        Threading.Thread.Sleep(200) 'aguarda 200 ms
        S1.Write("ATDA " & node & vbCr) 'configura destino da mensagem como nó
'node'
        Threading.Thread.Sleep(200)
        S1.Write("ATWR" & vbCr) 'grava a configuração
        Threading.Thread.Sleep(200)
        S1.Write("ATCN" & vbCr) 'sai do modo de configuração
        Threading.Thread.Sleep(200)
        S1.Close() 'fecha a porta de comunicação

    Else 'caso a porta de comunicação não esteja aberta, armazena a ocorrência de
erro

        erro_ocorrencia = 1

    End If 'sai da configuração da comunicação

End Sub 'fim da função de configuração da comunicação

```

A configuração da porta é necessária para que o programa identifique com qual porta do computador a comunicação é feita, além de determinar vazão de dados, *bits* de parada e de paridade.

```

Private Sub configura_porta() 'função de configuração da porta serial

    S1.PortName = Porta 'nome da porta
    S1.BaudRate = 19200 'vazão de dados em bits por segundo
    S1.StopBits = IO.Ports.StopBits.One 'configura um bit de parada
    S1.Parity = IO.Ports.Parity.None 'configura que não haverá bit de paridade
    S1.Close() 'fecha a porta serial

End Sub 'fim da função de configuração da porta serial

```

Após as configurações necessárias, ainda dentro do *loop*, a função de leitura da PV é chamada. Nessa função, é enviado um comando para a planta, para que essa responda com o valor da PV. O primeiro comando requisita o *byte* menos significativo (LSB), e o segundo comando requisita o *byte* mais significativo (MSB). Caso não sejam detectados erros nas requisições e respostas, os *bytes* são convertidos (nesse ponto funções específicas de conversão são chamadas) para valores percentuais e armazenados em uma matriz. Além do valor da PV, também é armazenado o instante em que o dado foi coletado. A função de controle, chamada ao final dessa função, não é utilizada no teste de monitoramento.

```

Private Sub Ler_PV() 'função de leitura das variáveis de processo, que é chamada
para cada nó, após configuração da comunicação

    'configuração de variáveis locais (uso somente nessa função)
    Dim LSB, MSB As Byte 'Least Significant Bit e Most Significant Bit
    Dim MSBhexa As String 'Valor do MSB convertido em hexadecimal
    Dim LeitCanal0_0() As Byte = {&H0, &H10, &H5, &H6} 'Calibração do conversor
A/D (característica das plantas) e envia requisição para LSB da PV
    Dim LeitCanal0_1() As Byte = {&H7} 'Envia requisição para MSB da PV

    'verifica se é possível abrir a porta serial, caso não seja armazena a ocorrên-
cia de erro
    Try
        S1.Open()
    Catch
        PV_list(node - 2, ciclo) = "Sem comunicação serial" 'armazena mensagem de
erro no valor da variável
        erro_ocorrenciã = 1
    End Try

    If S1.IsOpen Then 'verifica se a porta foi aberta com sucesso, para início da
requisição de dados

        S1.Write(LeitCanal0_0, 0, 4) 'Pede LSB
        Threading.Thread.Sleep(100) 'aguarda 100ms para receber o LSB

        'verifica se é possível ler o byte requisitado
        Try
            LSB = S1.ReadByte 'armazena o byte recebido como LSB
        Catch
            PV_list(node - 2, ciclo) = "Erro na comunicação - dado não acessível"
'armazena mensagem de erro no valor da variável
            erro_ocorrenciã = 1
        End Try
    End If

```

```

S1.Write(LeitCanal0_1, 0, 1) 'Pede MSB
Threading.Thread.Sleep(100) 'aguarda 100ms para receber o MSB

'verifica se é possível ler o byte requisitado
Try
    MSB = S1.ReadByte
Catch 'armazena o byte recebido como MSB
    PV_list(node - 2, ciclo) = "Erro na comunicação - dado não acessível"
'armazena mensagem de erro no valor da variável
    erro_ocorrencencia = 1
End Try

End If 'fim da condição de verificação de porta s1 aberta

If erro_ocorrencencia = 0 Then 'verifica se não ocorreram erros

    'Chamada de funções e equações para a conversão dos bytes armazenados para
o valor percentual da PV
    MSBhexa = Dec2Hex(MSB)
    If Mid(MSBhexa, 1, 1) = "E" Then
        PV = 1
    Else
        PV = 0
    End If
    MSB = Hex2Dec(Mid(MSBhexa, 2, 1))
    PV = (256 * MSB + LSB) * 100 / 4095
    PV_list(node - 2, ciclo) = Math.Round(PV, 2)

End If

tempo(node - 2, ciclo) = DateTime.Now.ToString() 'armazenamento do instante da
coleta do dado

'controle() 'chama a função de controle

S1.Close() 'fecha a porta serial

End Sub

```

As funções de conversão de *bytes* em inteiros foram importadas de um programa demonstrativo previamente desenvolvido para o Laboratório.

```

Private Function Dec2Hex(ByVal Valor As Integer) As String
    Dec2Hex = Valor.ToString("X2")
End Function

Private Function Hex2Dec(ByVal Valor As String) As Integer
    Hex2Dec = System.Convert.ToInt16(Valor, 16)
End Function

```

Após o término do *loop*, os dados são exportados para uma planilha com o auxílio do Microsoft Office Excel®. A função responsável abre o Excel®, adiciona a planilha em branco, cria cabeçalhos e preenche as colunas com os valores da PV de cada nó e o instante em

que foram coletados, de acordo com as matrizes obtidas durante a execução do *loop*. Ao terminar, a planilha é salva e a aplicação fechada.

```

Private Sub Exportar()
    'comandos iniciais para exportação da planilha
    oExcel = CreateObject("Excel.Application")
    oBook = oExcel.Workbooks.add
    oSheet = oBook.worksheets(1)

    'cabecinhos da planilha
    oSheet.range("A1").value = "Amostra Nó 2"
    oSheet.range("B1").value = "Instante"
    oSheet.range("C1").value = "Valores"

    oSheet.range("E1").value = "Amostra Nó 3"
    oSheet.range("F1").value = "Instante"
    oSheet.range("G1").value = "Valores"

    oSheet.range("I1").value = "Amostra Nó 4"
    oSheet.range("J1").value = "Instante"
    oSheet.range("K1").value = "Valores"

    'valores nó 2 (coluna 0 da matriz)
    For i0 = 0 To amostras - 1
        oSheet.range("A" & i0 + 2).value = i0 + 1 'ordem da amostra
        oSheet.range("B" & i0 + 2).value = tempo(0, i0) 'instante da amostra
        oSheet.range("C" & i0 + 2).value = PV_list(0, i0) 'valor da amostra
    Next i0

    'valores nó 3 (coluna 1 da matriz)
    For i1 = 0 To amostras - 1
        oSheet.range("E" & i1 + 2).value = i1 + 1
        oSheet.range("F" & i1 + 2).value = tempo(1, i1)
        oSheet.range("G" & i1 + 2).value = PV_list(1, i1)
    Next i1

    oBo-
ok.SaveAs("C:\Users\Frederico\Dropbox\UFU\M2M\Desenvolvimento\M2M_2_monitoramento.xlsx")
    oExcel.quit()
End Sub

```

Existe uma função que ocorre sempre que o comando de parada, na tela, é pressionado. Ela altera o valor da variável verificada no início do *loop*, encerrando-o.

```

Private Sub Button_Parar_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button_Parar.Click
    Comando_parada = True
    Label_Aguarde.Visible = True
End Sub

```

Para o sistema de controle, são realizadas pequenas alterações no programa apresentado até agora. As alterações são a diminuição de nós, com a simples eliminação, no *loop*, das

linhas referentes à configuração do nó 2, a adição da chamada da função de controle, ao final da leitura da PV e a função em si. Além disso, foi criada uma função auxiliar para converter o comando em *bytes* e enviá-los para comunicação.

A função de controle estabelece a lógica descrita na seção 5.2 Rede de comunicação, onde é verificada a temperatura da planta CRT e, de acordo com ela, são enviados comandos para a planta de vazão CRF.

```
Public Sub controle()

    If ciclo > 0 Then 'verifica se não é o ciclo inicial
        If node = 4 Then 'comando será enviado ao nó 4, vazão CRF
            If PV_list(1, ciclo - 1) = 30 Then 'se a temperatura for 30%
                AlteraMV(80) 'comando para alterar MV da CRF para 80%
            End If
            If PV_list(1, ciclo - 1) = 35 Then 'se a temperatura for 35%
                AlteraMV(60) 'comando para alterar MV da CRF para 60%
            End If
        End If
    End If

End Sub
```

A função auxiliar tem objetivo inverso a de leitura de PV. Na leitura de PV, são recebidos *bytes* e os mesmos são convertidos para valores percentuais. Na função auxiliar para alterar a MV, os valores em percentuais obtidos na função de controle devem ser convertidos em *bytes* para que sejam transmitidos. Aqui, como já ocorreu anteriormente, as funções de conversão foram importadas do mesmo programa demonstrativo previamente desenvolvido para o Laboratório.

```
Private Sub AlteraMV(ByVal Porcentagem As Double)

    'Porcentagem = Porcentagem / 2.33 + 57           'Ajuste de garramento da val-
    vula (começa a ter vazão após os MV=57%)

    If Porcentagem > 100 Then Porcentagem = 100
    If Porcentagem < 0 Then Porcentagem = 0
    If node = 2 Then
        MV(0) = Porcentagem
    End If
    If node = 3 Then
        MV(1) = Porcentagem
    End If
    'MV = Porcentagem

    Dim Hexa As String = Dec2Hex(FormatNumber((Porcentagem / 100 * 4095), 0))
    'Converte PV para HEX
    Dim strA As String 'LSB
    Dim strB As String
    Dim strC As String 'MSB
```


Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

F156c Fagundes, Frederico Duarte, 1988-
2015 Comunicação M2M aplicada em plantas didáticas de controle de processos / Frederico Duarte Fagundes. - 2015.
60 f. : il.

Orientador: Fábio Vincenzi Romualdo da Silva.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Controle de processo - Teses.
3. Sistemas de comunicação sem fio - Teses. 4. Sistemas de transmissão
de dados - Teses. I. Silva, Fábio Vincenzi Romualdo da, 1974-.
II. Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3
