

Monitoramento Automático de Falha em Transformadores de Redes de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Tecnologia ZigBee

Tiago Saidelles*

UFSM – Universidade Federal de Santa Maria
tiago_saidelles@yahoo.com.br

Claiton Pereira Colvero

UFSM – Universidade Federal de Santa Maria
claiton@redes.ufsm.br

Resumo—Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de implementar um sistema de monitoramento e controle automático de falhas em transformadores de redes de distribuição de energia elétrica através de uma rede industrial de tempo real e adaptativa, montada em topologia *mesh*, utilizando dispositivos baseados na tecnologia *ZigBee*.

I. INTRODUÇÃO

As atuais redes de distribuição de energia elétrica tem se modernizado constantemente com o passar dos anos, aumentando a confiabilidade e segurança das operações de forma significativa, porém ainda assim é passível de falhas do sistema, seja por problemas próprios ou agentes externos, principalmente devido a sua grande capilaridade.

Embora os clientes das principais companhias distribuidoras de energia possuam diversos canais de comunicação com as mesmas, até por um motivo mais cultural, costumam fazer suas reclamações através do serviço de *Call Center* via telefone, gerando cerca da metade dos chamados totais somente por esta modalidade [1].

É sempre importante observar que os índices de satisfação dos clientes em geral não muito altos devido ao grande número de ligações para os *Call Centers* das operadoras. Desde as interrupções de energia por falhas do sistema até o atendimento são normalmente relatados pelos usuários grandes períodos de espera. Esta demora é decorrente do tempo desde a percepção da falha, o acionamento do *Call Center*, a localização do cadastro do reclamante, o encaminhamento da ordem de serviço à equipe de manutenção e o concerto da rede propriamente dito.

Diversas destas informações relevantes foram amplamente tratadas no Relatório de Sustentabilidade 2011 da empresa AES Sul [1]. Foi elaborada uma pesquisa referente às ligações recebidas na Central de Atendimento ao Cliente, sendo constatado que a maioria das mesmas eram exclusivamente reclamações referentes a interrupções de energia. A tabela abaixo apresenta estes dados.

Tabela I
EXCELÊNCIA NO ATENDIMENTO AES SUL [1]

| Motivo da Reclamação | 2009 | 2010 | 2011 |
|---|-----------|-----------|-----------|
| Total de ligações atendidas (<i>call center</i>) | 2.955.129 | 2.655.700 | 2.630.49 |
| Número de atendimentos nos escritórios regionais | 310.722 | 318.997 | 299.784 |
| Número de atendimentos por meio da internet | 571.270 | 643.732 | 1.272.617 |
| Reclamações em relação ao total de ligações atendidas (%) | 27,72 | 34,67 | 35,08 |
| Tempo médio de espera até o início do atendimento (minutos) | 0,58 | 1,32 | 0,41 |
| Tempo médio de atendimento (minutos) | 3,17 | 3,25 | 3,32 |

*Apresentador do trabalho no ERRC 2012

Motivados por esse processo descrito anteriormente, definido como ineficiente pela grande maioria dos consumidores que estão sem energia, e também para atender uma demanda crescente das companhias de distribuição de energia, desenvolveu-se um sistema completo de monitoramento, sensoriamento e atuação em tempo real para minimizar os prejuízos causados por falhas em transformadores de distribuição de energia elétrica.

Foi verificada a necessidade de prover uma conexão em tempo real entre os dispositivos de monitoramento da rede e uma Central de Controle e Monitoramento Automática, com capacidade de perceber a falha e imediatamente através de seu tomador de decisão gerar uma ordem de serviço específica para acionar as equipes de manutenção. A eliminação da necessidade do cliente entrar em contato com a Companhia para notificar a falha agiliza o processo e contribui de forma positiva para sua satisfação em relação ao atendimento, diminuindo o impacto da falha.

O sistema foi implementado experimentalmente utilizando a tecnologia de rede sem fio conhecida como *ZigBee*, que opera na frequência de 2,4 GHz, dentro da faixa *ISM* que não necessitando de licença especial do Órgão Regulador de Telecomunicações para implantação. As redes *ZigBee* oferecem uma excelente imunidade contra interferências, uma capacidade de hospedar mais de 65 mil dispositivos em uma única rede, e ainda possuem características de interconexão adaptativas (*mesh*), alcançando grandes distâncias de comunicação.

II. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

Este trabalho foi desenvolvido em etapas para melhor adequação do sistema com as reais demandas das companhias de distribuição de energia elétrica. Resumidamente ele foi dividido como uma análise de caso e referência bibliográfica, análise das necessidades e problemas de atendimento das companhias, montagem de um protótipo em escala para prova de conceito dos sensores e funcionalidades da rede, e o desenvolvimento do software de controle e monitoramento de falhas, desenvolvido em linguagem de programação *Python* [2].

Utilizando como premissa alguns requisitos básicos para o funcionamento do sistema juntamente com a viabilidade técnica e econômica do projeto, foi iniciada uma pesquisa detalhada sobre as tecnologias atuais disponíveis no mercado de sensoriamento e rede que suprissem as demandas do projeto. Dentre estas necessidades, foi observado o baixo consumo de energia, a possibilidade de comunicação entre dispositivos com alta confiabilidade, o grande alcance, a capacidade de suportar vários dispositivos

conectados na mesma rede e não menos importante, o custo de implementação e manutenção.

Após uma detalhada avaliação, optou-se pela utilização da tecnologia conhecida como *ZigBee*, que foi criada em 2002, quando algumas empresas, (*Honeywell*, *Invensys*, *Philips* e a *Mitsubishi Electric*), uniram seus esforços para criar um consórcio, a *ZigBee Alliance*, com o intuito de desenvolver um padrão que atendesse a diversos requisitos, entre eles [3]:

- Confiabilidade na entrega dos dados;
- Baixo consumo de energia;
- Baixo custo de produção;
- Baixa irradiação de espúrios;
- Padrão global aberto.

Observando as tendências de mercado das redes industriais sem fio, em 2003 a *IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)* estabeleceu o novo padrão 802.15.4, que serve como base para as camadas física (*PHY*) e de enlace (*MAC*) do *ZigBee*. Esta tecnologia é dotada ainda das camadas de rede e de aplicação (subdividida), o que faz dela uma categoria singular e com propósitos específicos de *WPAN (Wireless Personal Area Network)*. Diferente das redes de comunicação sem fio dos padrões 802.11 e 802.16, que também compartilham faixas de frequências *ISM*, o padrão 802.15.4 foi especialmente desenvolvido para comunicações de longo alcance com consumo reduzido, [4] utilizando baixa potência de transmissão e sem a necessidade de altas taxas de transmissão de dados no enlace. Para utilização deste padrão de rede industrial de tempo real foi necessária a configuração dos dispositivos conforme descrito a seguir.

A. Configuração da Rede ZigBee como Sensor de Falha

Para iniciar a configuração dos dispositivos de comunicação *ZigBee* foi definida a topologia de rede e as funcionalidades específicas de cada um dos módulos de rede configuráveis. Optou-se assim pela implantação de uma rede adaptativa do tipo *mesh*, com a configuração de maior economia de energia para os dispositivos definidos como sensores através da programação da função *RFD (Reduced Function Device)* e os demais coordenadores e roteadores como *FFD (Full Function Device)*.

Na prova de conceito realizada através de um modelo em escala reduzida, foram utilizados dispositivos de rede *ZigBee*, relés de corrente, chaves de operação binárias (*On-Off*), LEDs e demais componentes eletrônicos de interfaceamento. Foi simulada a situação real de uma rede elétrica com dois transformadores operando em regime constante, sendo que cada um possuía um dispositivo *ZigBee* de sensoriamento atuando configurado como *End Device* (dispositivo final) na função *RFD*, para economia de energia. As chaves de operação binária simulavam uma situação de falha por desarme de fusível de um determinado transformador escolhido. Quando o sensor instalado em cada transformador percebia esta queda de energia elétrica da rede de distribuição, o dispositivo final enviava imediatamente uma requisição de verificação e manutenção para a central de monitoramento e controle. Automaticamente também informava os seus endereços

de 16 bits e 64 bits e o nome de rede em *ASCII*, chamado de *NI*, que contém além de uma chave de banco de dados, as informações de endereço do transformador e do ponto de falha. Esta configuração do módulo *ZigBee* operando como sensor pode ser visualizado na Figura 1.

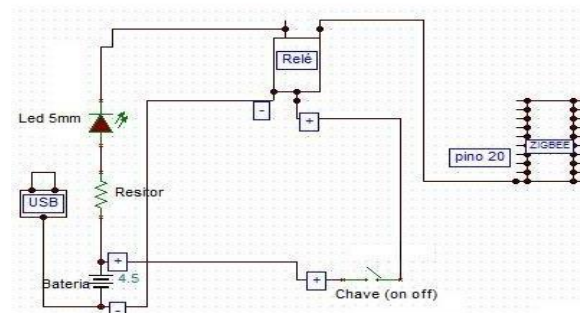


Figura 1. Diagrama do circuito de acionamento do modelo em escala.

Para incrementar a dinâmica da rede, foram adicionados módulos *ZigBee* configuradores como roteadores autônomos entre os dispositivos finais que atuavam como sensores de falhas, atuando somente como nós alternativos da rede *mesh* para garantir a entrega do quadro de dados gerado pelo sensor, aumentando a confiabilidade da rede pela redundância de caminhos de entrega e roteamento.

Na central de monitoramento e controle foi instalado um dispositivo *ZigBee* configurado como coordenador na função *FFD*, com o objetivo de receber todas as informações de falhas enviadas pelos dispositivos finais e passar as mesmas diretamente ao software de gerenciamento. Este coordenador converte o quadro enviado em modo *API* para um formato de melhor visualização no terminal e emissão de uma ordem de serviço automática para as equipes de manutenção.

Os módulos sensores *ZigBee* configurados como dispositivos finais devem ser instalados diretamente nos postes de transformadores de distribuição de energia elétrica, de baixas e médias tensões de corrente alternada, embora eles operem com tensões de corrente contínua de no máximo 3,4V. Como solução mais segura e eficiente do ponto de vista da fonte de alimentação do sensor, foram utilizados nestes dispositivos baterias internas. Para aumentar a vida útil da bateria para pelo menos 5 anos de operação, os dispositivos *ZigBee* atuam configurados como dispositivos finais com funções reduzidas (*RFD*), sendo condicionados a permanecerem no modo *sleep* (dormindo) até que algum problema seja detectado no transformador. Se houver um evento, o sensor *ZigBee* acorda (*wake-up*) imediatamente de forma automática e envia um quadro de dados ao coordenador da rede, que está instalado na central de controle e monitoramento. Este coordenador recebe a informação de qual transformador falhou e gera uma ordem de serviço para a equipe de manutenção mais próxima, conforme pode ser visto no fluxograma da Figura 2.

Caso um destes dispositivos finais configurados como sensores não conseguir fazer a conexão direta com o coordenador por qualquer que seja o motivo, os demais dispositivos configurados como *Router* da rede terão a finalidade de encaminhar este quadro de requisição de

atendimento através de seus nós, caracterizando uma rede *mesh*. Na central de controle e monitoramento o dispositivo configurado como coordenador está encarregado de receber as informações sobre o problema detectado e proceder o encaminhamento da tomada de decisão.

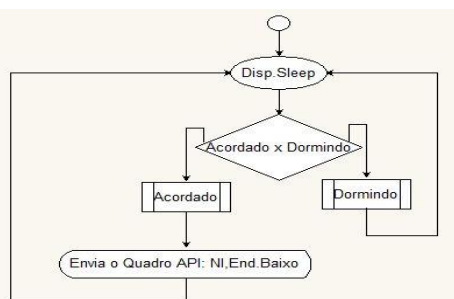


Figura 2. Fluxograma resumido do funcionamento do ZigBee configurado como Dispositivo Final da rede – Sensor de falha.

Para a configuração dos dispositivos ZigBee foi utilizando o software da Digi chamado *X-CTU* [5], permitindo programar os módulos para a formação da rede. Dispositivos finais se comunicam apenas diretamente com o coordenador ou através de seus nós roteadores. Na configuração dos dispositivos finais utilizados como sensores foi atribuído um nome de identificação em *ASCII* no campo *NI*, com o intuito de facilitar a identificação no terminal da central de controle e monitoramento mesmo antes do acesso ao banco de dados.

O coordenador da rede foi programado para atuar em modo *broadcast*, no intuito de escutar todos os dispositivos sensores que estejam no mesmo *channel* e *Pan ID*. Foi também definida a utilização do modo *API* conforme pode ser o visto na Figura 3 [6] para todos os dispositivos ZigBee. Notadamente era imperativo que o coordenador identificasse o endereço baixo, o endereço alto e o *NI* do dispositivo final sensor quando este fosse acionado, sem a necessidade dele enviar uma requisição de identificação em *broadcast* e aguardar a resposta, poupando energia e principalmente não sobrecarregando a banda da rede, que tem capacidade de operar com até 65.535 sensores.

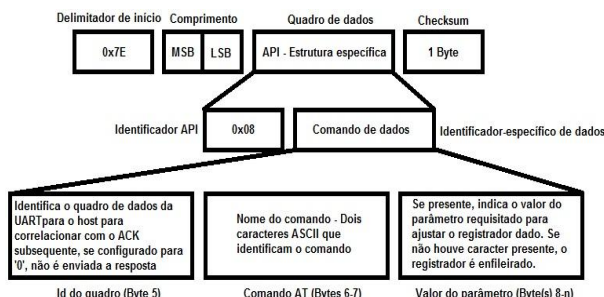


Figura 3. Estrutura do frame (quadro) API dos dispositivos ZigBee.

O modo *API* (*Application Programming Interface*) dos dispositivos ZigBee é um modo mais complexo de realizar a transmissão. Ao invés de enviar comandos diretamente através da interface serial, os comandos são colocados em uma em uma interface estruturada, ou seja, é feita a comunicação de dados em uma ordenação dos quadros pré-definida. O modo *API* permite ao programador definir

como comandos, respostas e status serão enviados e recebidos através da interface de quadros da *UART*.

O acionamento do sensor em caso de falha é sinalizado ao dispositivo ZigBee através do desligamento do relé de corrente, e este por sua vez aterra o nível do sinal na porta de entrada do conversor *AD* do dispositivo final (pino 20). Imediatamente após, o ZigBee acorda do modo *sleep* e envia sua identificação completa ao coordenador através de um quadro em modo *API*, economizando a bateria do sensor quando o mesmo não está acionado por falha.

Uma vez resolvida a implementação do *hardware* dos sensores, foi desenvolvida a interface de controle e monitoramento, conforme descrito a seguir.

B. Software de Controle e Monitoramento em Python

O software de controle e monitoramento está sendo desenvolvido em linguagem de programação *Python*. Ele possui basicamente a finalidade de converter o quadro enviado para o coordenador, proveniente de um dispositivo final que atua como sensor, em uma linguagem em que o operador possa identificar facilmente onde ocorreu o problema. Também é responsável por fazer uma interação do software com um banco de dados onde serão armazenadas informações de localização de cada ponto de rede que tiver um dispositivo final acionado, preenchendo uma ordem de serviço de forma automatizada para que uma equipe de manutenção.

Na Figura 4 pode-se observar o fluxograma de tratamento do quadro *API* recebido pelo coordenador quando ocorre uma falha na rede elétrica.

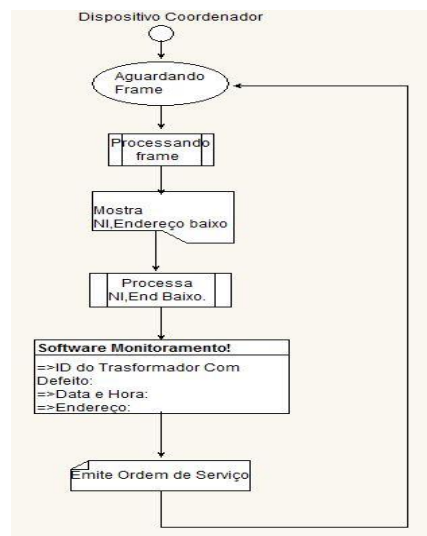


Figura 4. Fluxograma de processamento do quadro recebido pelo dispositivo ZigBee coordenador da rede.

III. RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos neste projeto objetivam avaliar a viabilidade de detecção automática de falhas por problemas técnicos em transformadores de distribuição de energia elétrica. Para os ensaios iniciais foi utilizado um modelo em escala reduzida, onde a mudança de estado de uma chave

binária simula a falha em um sistema real, que aciona imediatamente o sensor incorporado a um módulo *ZigBee* configurado como dispositivo final. Como este sensor permanece em estado normal de *sleep*, ele percebe o aterramento da entrada I/O chamada de *DIO*. A partir deste momento o *ZigBee* acorda e envia um quadro de dados que contém os endereços alto, baixo e sua identificação em forma caracteres *ASCII*, chamado de parâmetro *NI*.

Para monitorar o envio do quadro foi utilizado um terminal com capacidade de verificar o tráfego na interface *UART* do módulo. Foi obtido sucesso total no envio dos pacotes de dados em diferentes tempos e configurações de acionamento das chaves, entregando as informações relevantes em no máximo 10 ms após o momento do acionamento do sensor, característico de uma rede industrial que trabalha em tempo real.

Como segunda etapa dos experimentos, foi realizada uma análise detalhada para desenvolver o software de interfaceamento. Ele deve ter a capacidade de converter as informações enviadas pelo sensor em informações legíveis no terminal para um operador, e também uma base de dados com informações georeferenciadas da localização de cada transformador monitorado. Como opção do projeto, foi escolhido utilizar os módulos *ZigBee* no modo *API*, que transmite um quadro em hexadecimal.

Naturalmente a escolha deste tipo de quadro *API* necessita um maior esforço por parte do programador para desenvolver a interface da central de controle e monitoramento. Por esse motivo foi definido que a linguagem mais adequada para essa função é o *Python*, que é uma linguagem de alto nível, interpretada e orientada a objeto. Com o auxílio desta ferramenta foi possível desenvolver uma interface completa com capacidade de interpretar e separar os endereços alto (*SH*), baixo (*SL*) e o nome do sensor em *ASCII* (*NI*).

Figura 5. Exemplo da tela de interface com o operador na central de controle e monitoramento.

Na Figura 5 pode-se observar uma tela que demonstra a interface preliminar desenvolvida para a central de controle e monitoramento dos sensores instalados, onde um operador pode acompanhar o *status* dos dispositivos da rede e o encaminhamento das ordens de serviços com seus respectivos atendimentos, de forma imediata e simples.

Concluindo os experimentos foi realizado paralelamente um ensaio para estabelecer a máxima distância direta entre um dispositivo final e o seu coordenador, obtendo no máximo 1.110 metros de enlace direto utilizando dispositivos *ZigBee* PRO. Posteriormente foi refeito o mesmo experimento utilizando adicionalmente dispositivos *ZigBee* na função de roteadores e as funcionalidades da rede *mesh*, criando caminhos alternativos através dos novos nós da rede. A distância do enlace foi incrementada *n*-vezes de acordo com o número de roteadores que foram adicionados linearmente no percurso estabelecido.

IV. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema de monitoramento automático de falhas para redes de distribuição de energia elétrica baseado em redes de comunicação sem fio, utilizando a tecnologia e as facilidades dos dispositivos no padrão *ZigBee*.

Um sistema de monitoramento foi desenvolvido com intuito de aumentar o índice de satisfação dos clientes das Companhias de distribuição de energia elétrica, fornecendo uma importante ferramenta de agilização na detecção e correção de falhas, eliminando a necessidade de o cliente entrar em contato com a Companhia para registrar o problema. De forma automática, ele é capaz de identificar o local e gerar uma ordem de serviço para a equipe de manutenção responsável pelos reparos.

Através dos resultados obtidos nos ensaios avaliamos a viabilidade de implementação do sistema em enlaces longos através do uso de roteadores adicionais aos sensores instalados, como por exemplo, em postes da rede sem transformadores. Se for necessário aumentar a dinâmica do enlace, tanto por distância como por interferências, pode-se instalar um novo dispositivo *ZigBee* com funções de roteador sem agregar novos problemas adicionais na rede.

Como trabalho futuro será implementado um algoritmo para calcular a rota mais eficiente para que as equipes de manutenção possam chegar à área que foi constatada o problema, além de uma integração com interfaces de geoposicionamento, como o *Google Maps*.

REFERÊNCIAS

- [1] P. C. V. Penna e M. Magno, "Relatório de Sustentabilidade 2011 – AES Sul", III Ciclo de Diálogos com Públicos de Relacionamento AES: *Aesbrasilsustentabilidade.com.br*, pp. 40-43, abril 2012.
- [2] Python Programming Language - Python Software Foundation – Official Website: www.python.org, Copyright 1990 - 2012.
- [3] Campos, F. P. S. C. Estudo e especialização de um sistema de instrumentação para unidades de elevação de petróleo utilizando tecnologia sem fio. 2006. pp. 77, Dissertação de Mestrado na Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.
- [4] Santos, S. A. Sintetizador de frequências de 2.4 GHz em cmos, 0,35µm para aplicações em ZigBee. 2008. Pp. 72, Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- [5] XBEE®/XBEE PRO® ZB RF MODULES, ZigBee RF Modules by Digi International. Disponível em: <<http://www.digi.com>>. Acesso em: 2012.
- [6] Rubens's Blog. Exemple of XBee API frames. 12 mar. 2009. Disponível em: <<http://rubenlaguna.com/wp/2009/03/12/example-of-xbee-api-frames/index.html>>. Acesso em: 2012.