

UMA REDE DE SENSORES PARA MONITORAÇÃO DA PROTEÇÃO CATÓDICA EM DUTOS

Alexandre J. T. S. Mello¹ (UTFPR), Ricardo Lüders² (UTFPR), Flávio Neves Jr.³ (UTFPR)

LASCA/CPGEI, Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Av. Sete de Setembro, 3165 – CEP 80230-901
Curitiba, Paraná, Brasil

¹ajmello@cpgei.cefetpr.br

²luders@utfpr.edu.br

³neves@cpgei.cefetpr.br

A proteção catódica é um dos métodos de proteção anticorrosão mais utilizados no mundo. Uma das aplicações mais importantes, e tema deste trabalho, se refere à indústria de petróleo e gás natural, especificamente em oleodutos, polidutos e gasodutos. Mas para que possa ser utilizado adequadamente, seu funcionamento deve ser monitorado constantemente. Este trabalho propõe um sistema para monitoração da proteção catódica em dutos utilizando uma rede de sensores sem fio. Para tanto, um estudo do comportamento da rede de sensores proposta é apresentado, focando aspectos de consumo de energia sob diferentes condições de operação e topologias da rede, a partir de um protótipo de hardware.

Instrumentação, Corrosão, Rede de Sensores Sem Fio, Dutos.

1. INTRODUÇÃO

A corrosão de estruturas metálicas ocorre de muitas formas, e é conhecida por vários nomes, tais como oxidação, ferrugem, ação química e bacteriológica. Qualquer que seja o agente, toda corrosão é resultado da movimentação de cargas elétricas. Vários métodos têm sido usados para prevenir a corrosão, como tratamento químico e revestimento. Um dos métodos mais eficazes consiste em tratar a causa da corrosão, ou seja, a movimentação de cargas elétricas. Este método é conhecido como proteção catódica. Uma corrente elétrica injetada corretamente no metal pode cessar a ação corrosiva numa superfície metálica. (Durham e Durham, 2005).

A proteção catódica é um meio consolidado na indústria de combate à corrosão. Mas no caso de tubulações muito longas e proteção de grandes estruturas metálicas a manutenção de um sistema de proteção catódica pode se tornar onerosa. F. J. Hoppe et al (1996) apontaram a necessidade de se construir um sistema de monitoração em tempo real da proteção anticorrosão.

Recentes avanços nas comunicações sem fio proporcionaram o desenvolvimento de uma rede de sensores sem fio multifuncional de baixo custo e baixa potência. Redes de sensores representam uma melhoria significativa nos sensores tradicionais (Akyildiz et al, 2002a).

Unir essa necessidade de monitoração à tecnologia de redes de sensores sem fio é a proposta do presente trabalho. O resultado esperado é projetar um sistema de monitoração em tempo real de baixo custo e que exija pouca manutenção. O estudo apresentado neste trabalho destaca as principais características do sistema proposto, sua viabilidade e eventuais deficiências.

Este artigo está organizado da seguinte forma: No capítulo 2 é apresentada uma introdução às redes de sensores sem fio e sobre a aplicação da proteção catódica em dutos, no capítulo 3 a proposta do sistema de monitoração da proteção catódica é apresentada, no capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos com o protótipo de hardware construído e finalmente o capítulo 5 traz as conclusões do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Redes de Sensores Sem Fio

Redes de sensores sem fio (RSSF) são constituídas por pequenos sensores de baixo custo espalhados por uma certa área e que se comunicam através de um link de rádio. Estas redes se diferem de redes de computadores tradicionais em vários aspectos. Normalmente, essas redes possuem um grande número de nós distribuídos, têm restrições de energia, e devem possuir mecanismos para autoconfiguração e adaptação, devido a problemas como falhas de comunicação e perda de nós. Uma RSSF tende a ser autônoma e requer um alto grau de cooperação para executar as tarefas definidas para a rede (Loureiro et al, 2003).

Os principais componentes de uma RSSF são os nós sensores, que são dispositivos autônomos equipados com capacidade de sensoramento, processamento e comunicação. Quando estes nós são dispostos em rede de modo *ad-hoc*, ou seja, distribuídos sem uma topologia pré-definida, formam as redes de sensores (Akyildiz et al, 2002a).

Os nós coletam dados via sensores, processam localmente ou coordenadamente entre vizinhos, podendo enviar a informação para o usuário ou, em geral, para um *gateway*. Um nó na rede tem essencialmente tarefas diferentes: sensoramento do ambiente, processamento da informação e tarefas associadas com o tráfego em um esquema de retransmissão *multi-hop* (Loureiro et al, 2003). Na transmissão *multi-hop*, uma mensagem é enviada para sensores distantes através de sensores intermediários. Este método, apesar de mais lento, proporciona maior economia de energia que a transmissão direta entre os nós envolvidos.

Para que os nós possam se comunicar entre si, é essencial que possuam diversas informações sobre a rede. Cada nó precisa conhecer a identidade e localização de seus vizinhos para executar processamento e colaboração. Em redes planejadas, a topologia da rede é usualmente conhecida *a priori*. Para redes *ad-hoc* a topologia da rede tem que ser construída em tempo real, e atualizada periodicamente à medida que sensores falham ou novos sensores são adicionados.

Sensores numa RSSF podem se tornar inoperantes devido à sua destruição física ou esgotamento da bateria. Sensores também podem ficar incomunicáveis devido a problemas no canal de comunicação sem fio ou por decisão de um algoritmo de gerenciamento da rede. Isso pode acontecer por diversas razões como, por exemplo, para economizar energia, ou devido à presença de outro sensor na mesma região que já coleta o dado desejado. Por isso, uma RSSF precisa possuir a capacidade de se adaptar a mudanças, modificando sua organização.

Para que a RSSF possa se comunicar com outras redes como, por exemplo, um sistema de supervisão, é necessário um nó especial chamado *gateway*. A mensagem percorre a rede de sensores até chegar a um *gateway* que irá encaminhar esta mensagem, por uma rede como a Internet, até o computador do operador. A figura 1 ilustra genericamente uma RSSF e um detalhe de um nó *gateway* (ou *data sink*).

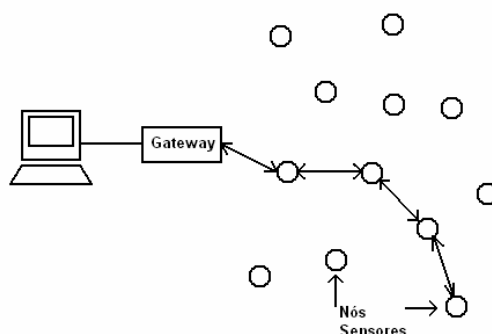


Figura 1. Topologia de uma rede de sensores sem fio

Seja qual for a aplicação final, o estabelecimento de uma rede de sensores envolve atividades de disposição dos nós e formação da rede. Os nós sensores são geralmente lançados sobre a área monitorada, caem de forma aleatória e despertam para a formação da rede. Antes de iniciarem as atividades de sensoramento, os nós podem realizar atividades de descoberta de localização e/ou formação de *clusters*. (Loureiro et al, 2003).

Um dos padrões de comunicação sem fio disponíveis no mercado para a implementação de uma rede sem fio é o padrão IEEE 802.15.4 Enquanto a maioria dos padrões de comunicação sem fio foram criados para aumentar a velocidade de transmissão e a relação sinal/ruído, o padrão IEEE 802.15.4 possui outros objetivos. O foco está no baixo consumo de energia, baixo custo e baixa velocidade de transmissão para uma rede dinâmica. Este padrão foi escolhido como o mais apropriado para a implementação do sistema de monitoração descrito neste artigo.

2.2. Proteção Catódica em Dutos

A corrosão metálica é simplesmente a perda de material resultante de uma corrente elétrica deixando um metal, atravessando algum meio e retornando ao metal em um ponto diferente. Essa corrente causa uma transformação química no metal, causando a sua oxidação.

A corrosão é um efeito semelhante ao que ocorre em uma bateria, sendo que existem três componentes em um sistema de corrosão (Durham e Durham, 2005):

- a) um anodo de sacrifício em um circuito de corrosão atuando como o eletrodo positivo de uma bateria;
- b) um catodo que recebe a corrente no circuito de corrosão e é equivalente ao terminal negativo de uma bateria;
- c) um eletrólito que é um material não metálico, por onde a corrente elétrica circula.

Para existir corrosão, deve existir uma diferença de potencial entre dois metais ou entre duas partes do mesmo metal (formando o catodo e o anodo). Isto forma a célula da bateria de corrosão.

Três possíveis configurações criam a diferença de potencial: dois metais diferentes no mesmo eletrólito, o mesmo metal em dois eletrólitos diferentes e alguma interferência externa. Num duto enterrado, dois tipos de solos diferentes agem como eletrólitos diferentes.

A corrosão de um equipamento metálico em contato com a terra é um fenômeno natural. Para controlar essa corrosão, os mesmos elementos que causam a corrosão podem ser usados para controlá-la ou para proteger um material diferente (Durham e Durham, 2005).

A proteção catódica é o processo de forçar um metal a ser mais negativo (catódico) que seu estado natural. Se o metal for suficientemente forçado negativamente, a corrosão cessará (Dutra e Nunes, 1999).

Isso é obtido utilizando-se um material menos eletronegativo como material de sacrifício, ou através de uma densidade de corrente impressa no equipamento protegido tornando o material negativo. Para que esse sistema funcione, é necessário que exista um caminho completo para a energia elétrica da fonte negativa, à estrutura, através do eletrólito até o lado positivo da fonte (Dutra e Nunes, 1999). A corrente de um sistema de proteção catódica deve ser projetada para proteger a tubulação metálica, possuindo o menor *ripple* possível (Mishra et al, 2000), ou seja, a menor variação possível. Problemas surgem quando um sistema catódico não está mais trabalhando como o esperado. Por exemplo, uma superfície metálica pode ser protegida, mas ao custo de causar corrosão em outro metal nas redondezas.

A figura 2 representa um sistema de proteção catódica básico, conforme descrito acima.

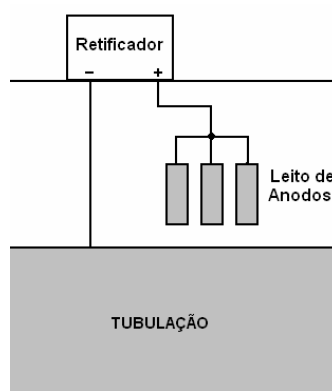


Figura 2. Sistema de proteção catódica

2.3. Monitoração do Sistema de Proteção Catódica

Numa situação ideal, a proteção catódica deve controlar uma corrente para anular condições corrosivas. Além disso, a corrente distribuída através da tubulação deve ser uniforme. Mas na prática, a corrente nunca é uniforme. Sob algumas condições ruins de manutenção, condições do solo, e proximidade com outras estruturas metálicas, a corrente não percorre o caminho desejado. Quando a proteção catódica falha pode ocorrer corrosão não intencional do metal. Isso pode levar a reparos custosos.

A manutenção e monitoração de sistemas de proteção catódica são feitos tradicionalmente de forma manual. Os retificadores do sistema de proteção catódica são inspecionados semanalmente ou mensalmente, no máximo. Medições do potencial do solo e da tubulação são feitas com frequência ainda menor, tipicamente especificadas para uma vez ao ano. Inspeções anuais, se executadas, são efetivas na identificação de grandes problemas no sistema de proteção catódica. Entretanto, essas inspeções não são capazes de identificar tendências leves (Hoppe et al, 1996). Além disso, já que a inspeção é feita manualmente, o perfil da tensão através da tubulação não é preciso, já que cada medição é feita em instantes diversos. Isso também significa que dado o tempo necessário para completar a inspeção manual, é difícil que uma mudança localizada e transiente numa seção do duto seja identificada (causada, por exemplo, por correntes perdidas).

O resultado é que correntes localizadas e estragos mecânicos podem passar despercebidos por um extenso período de tempo (pelo menos até a próxima inspeção anual), e a existência de correntes perdidas pode nem chegar a ser identificada (Hoppe et al, 1996).

Um aspecto relevante para desenvolver um sistema de proteção catódica confiável é a capacidade de monitorar sua eficácia, assegurando que o sistema é adequado sob todas as circunstâncias.

Um sistema de monitoração constante básico, apesar de aumentar os custos iniciais de instalação, oferece as seguintes vantagens: detecção imediata de perdas nos retificadores; uma base de dados contínua sobre a tensão e corrente nos retificadores; imediata identificação da seção do tubo onde um dano significativo no revestimento ocorreu (ou seja, perda de tensão catódica em uma seção) e identificação de problemas de correntes perdidas,

incluindo a identificação das seções mais afetadas através da verificação de regiões onde variações no potencial catódico ocorreram.

3. Monitoração por Rede de Sensores

Hoppe et al (1996) especificam um sistema de monitoração básico, monitorando apenas as extremidades do duto. O que é proposto no presente trabalho é uma evolução disso, ou seja, propõe-se desenvolver um sistema de monitoração de proteção catódica, utilizando uma rede de sensores sem fio, capaz de determinar pontos de sensibilidade à corrosão em toda a extensão do duto, e não apenas nas extremidades.

Como pode-se ver na figura 3, o sistema deve monitorar a corrente e a tensão gerada pelo retificador, a fim de identificar falhas. Deve também, através do uso de uma meia-célula como eletrodo de referência, monitorar o potencial do duto.

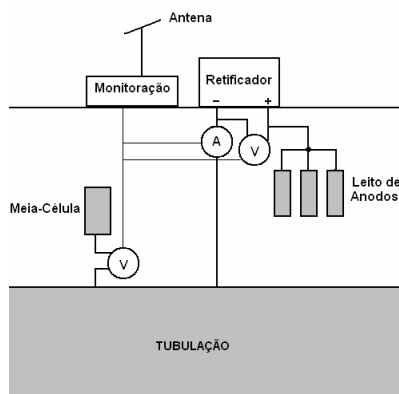


Figura 3. Sistema de monitoramento da proteção catódica

O sistema mostrado na figura 3 deve ser utilizado nos pontos de aplicação da corrente pelo sistema de proteção catódica. Nesses pontos, a alimentação do sistema pode compartilhar a alimentação do retificador.

Através do duto, devem ser instaladas pequenas células sensoras. Essas células monitoram o potencial através do duto, e servem para estabelecer o *link* de comunicação sem fio ao longo do duto. Devem ter custo reduzido e ter um baixo consumo de energia.

Essas células sensoras dependem da energia de baterias. Portanto, o foco em sua construção deve ser a economia de energia. Para conseguir essa economia, utiliza-se um sistema de comunicação econômico, aliado a um *hardware* de baixo consumo, além de reduzir ao mínimo as transmissões de mensagens entre os nós.

Na figura 4 podemos ver o sistema completo. Em cada ponto da proteção catódica existe um circuito monitor, entre eles estão as células sensoras de potencial, e na extremidade do duto existe um *gateway* para conectar o sistema a um sistema de supervisão.

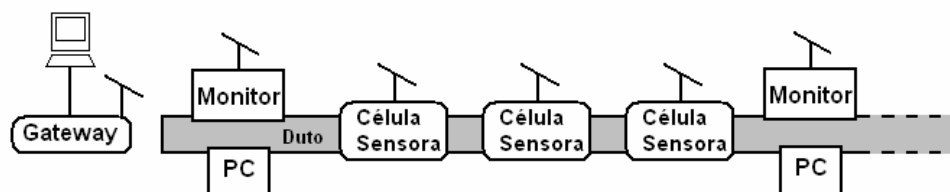


Figura 4 Sistema de monitoração da proteção catódica (PC)

3.1. Protótipo

Dentre os poucos protocolos construídos especificamente para redes de sensores, destacam-se o padrão ZigBee e o Directed Diffusion. Infelizmente, o protocolo Directed Diffusion não especifica uma camada física para a comunicação, apenas a camada de rede, ficando a cargo do usuário escolher a camada física. Já o ZigBee utiliza a camada física especificada pelo padrão 802.15.4. Este padrão foi construído especificamente para ser utilizado para comunicações com baixíssima velocidade, mas elevada economia de energia.

O padrão 802.15.4 foi escolhido para o protótipo, pois é o padrão para redes de sensores mais aceito no mercado, principalmente por estar ligado ao padrão ZigBee, possuindo muitos fabricantes oferecendo circuitos integrados compatíveis com este padrão. Entre eles pode-se citar a Freescale, a Texas Instruments e a Microchip.

Kits de desenvolvimento para o padrão 802.15.4 foram obtidos para o circuito integrado transdutor MC13192 da Freescale, e para o CC2431 da Texas Instruments. O desempenho dos dois dispositivos foi comparado, com ambos os dispositivos atuando na potência máxima. O transdutor MC13192 da Freescale apresentou melhores resultados. Mais especificamente, o transdutor da Texas Instrument funcionou a uma distância de aproximadamente 100 metros, e o da Freescale chegou a 300 metros. Foi então escolhido o transdutor da Freescale para o projeto, pois como a rede utilizada se estenderá através de um duto longo, será melhor utilizar o transdutor que possua alcance maior.

O diagrama em blocos exibido na figura 9 mostra o protótipo de *hardware* utilizando o transdutor escolhido, referenciado como RF *transceiver*, juntamente com outros componentes necessários ao funcionamento. O protótipo possui ainda dez entradas analógicas. Uma para medir o potencial do duto, uma para o potencial do retificador e outra para a corrente do retificador. As outras entradas analógicas foram projetadas para atender necessidades futuras.

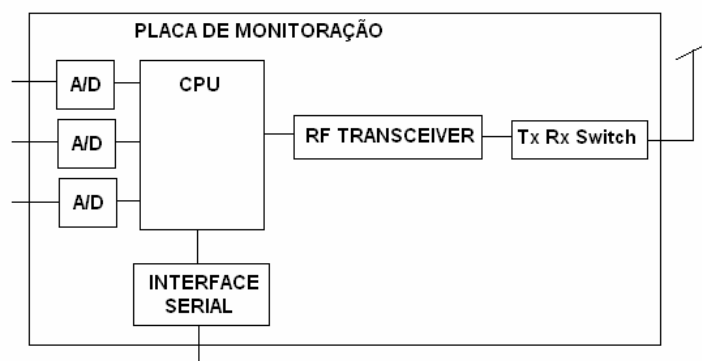


Figura 9 Diagrama esquemático do protótipo de *hardware*

O microcontrolador escolhido, referenciado na figura como CPU, foi o MC9S08, também da Freescale, pois este componente foi construído para ser utilizado com o MC13192, ou seja, existe também preocupação com economia de energia, e ainda com a vantagem de ser diretamente compatível com o MC13192.

A interface serial é necessária para permitir a interação entre o *gateway*, que é o nó responsável por recolher as informações vindas dos outros nós da rede, e um computador. É através dessa interface que os dados coletados da rede serão enviados para serem visualizados pelo operador. Para esta interface foi utilizado o transdutor ST3232.

A conexão com a antena poderia ser feita de duas maneiras: usando duas antenas, ou uma antena com um *switch* para chavear entre os modos de transmissão e recepção. O esquema com *switch* foi escolhido, pois o esquema com duas antenas causa interferência entre elas.

4. RESULTADOS

4.1 Consumo de Energia do Protótipo

Para uma rede de sensores sem fio, é essencial que os nós consumam a menor quantidade de energia possível durante os intervalos de tempo em que a unidade não estiver trabalhando.

Os componentes utilizados no protótipo, especificamente o MCU e o transdutor de RF, podem trabalhar em modos de economia de energia, possibilitando essa economia nos tempos sem transmissões. A energia consumida pelo protótipo nos vários modos de funcionamento pode ser vista na tabela 2.

Tabela 2 Consumo de Energia do Protótipo de Hardware

Componente	Part Number	Transmissão	Recepção	Normal	Baixo Consumo
Microcontrolador	MC9S08GB60CFU	6,5 mA	6,5 mA	6,5 mA	850 nA
Transceptor RF	MC13192FCR2	30 mA	37 mA	500 uA	0,2 uA
Tx Rx Switch	uPG2012TK	54uA	54uA	54uA	0
	TOTAL	36,554 mA	43,554 mA	7,054 mA	1,05 uA

A tabela mostra o consumo nos modos de transmissão, de recepção, no modo normal e no modo de baixo consumo para os principais componentes: o microcontrolador, o *transceptor* de RF, e o *switch*, que é responsável por ligar a antena no circuito de transmissão ou de recepção, dependendo do modo sendo utilizado. Estes dados foram obtidos do *datasheet* dos fabricantes.

Pode-se notar pela tabela 2, que o consumo do protótipo é muito próximo tanto para recepção quanto para transmissão. Isso pode ser explicado pelo modo de funcionamento do padrão IEEE 802.15.4 utilizado no

protótipo. O microcontrolador se comunica com o *transceptor* de RF a uma velocidade máxima de 250 kbps, mas o *transceptor* transmite seus dados a uma velocidade de 1 Mbps. Esta diferença faz com que o *transceptor* fique aguardando o microcontrolador entre transmissões. Durante este tempo de espera, o transmissor permanece desligado, mas o receptor permanece ligado, pois a transmissão pode ser iniciada a qualquer momento dentro do frame de transmissão (devido à transmissão aleatória utilizada para evitar colisões). Como os pacotes utilizados pelo IEEE 802.15.4 são muito pequenos, esse tempo de espera pode se repetir várias vezes durante uma transmissão.

Mas não são apenas os componentes utilizados no protótipo que afetam o seu consumo de energia, o protocolo de rede empregado também é importante. Como visto na tabela 2, os modos de transmissão e recepção dos componentes consomem muito mais energia que o modo normal, e este também consome muito mais que o modo de baixo consumo. Portanto, um protocolo aceitável precisa passar pouco tempo nos modos de transmissão e recepção e deve transmitir muita informação em poucas mensagens.

Por não se ter acesso a protocolos de rede comerciais, foi construído um protocolo de rede simples para a avaliação do protótipo. Esse protocolo não implementa as funções mais avançadas de um protocolo comercial, como o ZigBee, mas baseou-se nas principais características do protocolo Directed Diffusion, possibilitando a avaliação do comportamento do hardware em uma situação de uso real.

É desejável que, para fins de economia de energia, seja restringida ao máximo a transmissão, realizando todo o processamento o mais próximo possível do nó que recolheu os dados. Isso mostra que pode ser melhor cada nó saber qual deve ser o valor da tensão monitorada e enviar um valor apenas em caso de violação. Os valores limite podem ser atualizados, numa mensagem que se difundiria por toda a rede.

4.2 Avaliação da Comunicação Entre os Nós

A seguir, foi feita uma avaliação da comunicação entre os nós. Inicialmente, a capacidade de comunicação ponto a ponto entre os nós é avaliada, com o objetivo de determinar qual é a distância que os nós podem ter entre si na disposição da rede. A seguir, a capacidade de entrega de mensagens do protocolo desenvolvido é avaliada para o protótipo, com o objetivo de avaliar a sua aplicabilidade.

Para a avaliação da comunicação ponto a ponto foi criado um programa simples. Ao pressionar um botão, o nó envia uma mensagem. Se o outro nó receber esta mensagem ele enviará uma resposta de confirmação. Com isso, é possível perceber quando uma mensagem não é entregue, pois ela não recebe resposta, e avaliar quais condições afetam a comunicação do módulo. Em campo aberto, conseguiu-se 95% de entrega de mensagens até aproximadamente 250 metros de distância entre os módulos. Já a partir dos 300 metros, conseguiu-se menos de 10%, e esta taxa cai drasticamente depois disso. A 350 metros mais nenhuma mensagem é transmitida.

Os elementos que diminuíram as distâncias máximas conseguidas foram barreiras entre os módulos, e proximidade de um dos módulos com grandes estruturas metálicas. Para avaliação da capacidade de comunicação com barreira, foi realizado um teste no qual os módulos tentaram se comunicar em um ambiente fechado, com uma parede de alvenaria entre eles. Neste caso, os módulos mantiveram uma boa capacidade de comunicação (70% de mensagens bem sucedidas) até aproximadamente 100 metros.

Esses resultados indicam que uma rede de sensores poderia ser utilizada se os nós estivessem a 250 metros entre si num ambiente aberto, e a 100 metros em caso de uma barreira.

O segundo teste realizado teve como objetivo averiguar a perda de pacotes na rede de sensores quando utilizando o protocolo de rede discutido no capítulo 4.

Inicialmente, foi realizado um teste simples com apenas um nó de *gateway* conectado a um computador para a coleta de informações, e um nó remoto. Estes testes foram realizados com uma barreira entre os módulos, e uma distância aproximada entre eles de 50 metros. Para que fosse possível verificar eficiência do protocolo implementado, foi utilizado o seguinte recurso: os módulos foram equipados com contadores para verificar cada tentativa de transmissão, com esses contadores é possível identificar se o módulo teve que realizar uma retransmissão por causa de uma tentativa de transmissão frustrada, já que seriam obtidas mais transmissões do que o esperado.

O primeiro teste realizado foi o da tentativa de transmissão de uma mensagem simples de apenas um byte. Essa mensagem foi enviada 100 vezes, e ao final as efetivas transmissões foram comparadas com este valor. O valor excedente significa o número de retransmissões. O módulo transmissor realizou 136 transmissões, isso indica que das mensagens enviadas, 36 % tiveram de ser retransmitidas.

Para avaliar a comunicação dos nós numa situação real, construiu-se uma pequena rede de sensores, simulando o funcionamento em um duto. Foi então medida a quantidade de mensagens circulando na rede para redes de vários tamanhos e também para dois casos: o caso onde todos os nós possuem mensagens a transmitir, e o caso onde apenas o último nó transmite uma mensagem, que é apenas repassada pelos outros nós.

Esta análise é mostrada na figura 19, onde no eixo dos nós, o nó 1 é o nó *gateway*. O gráfico 1 (figura 19) ilustra o a média de mensagens transmitidas por cada nó para uma rede com 7 nós e todos transmitindo novas mensagens. O gráfico 2 também exibe os valores sobre a média de mensagens transmitidas por cada nó no caso

onde todos os nós possuem mensagens, mas para 5 nós. O gráfico 3 são os valores da média de mensagens transmitidas por cada nó, mas quando apenas o nó 7 possui mensagens a transmitir.

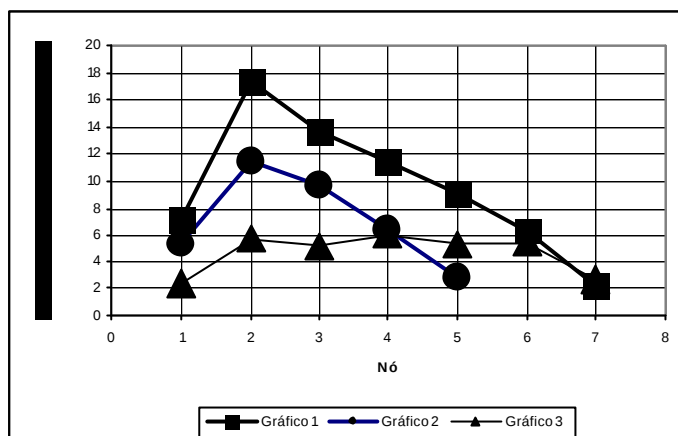


Figura 19 Mensagens por nó

No gráfico 1, que representa sete nós transmitindo dados, tem-se que o número médio de mensagens transmitidas em direção ao *gateway* é crescente. Esse mesmo efeito também ocorre no gráfico 2, que representa cinco nós transmitindo dados.

No gráfico 3, que reflete o caso onde apenas o nó 7 possui dados a transmitir, o número médio de mensagens transmitidas por nó não é crescente. Existe apenas uma variação aleatória nos valores, provavelmente causada por retransmissões.

Com isso, pode-se concluir que para os nós mais próximos ao *gateway*, a média de mensagens transmitidas será aproximadamente proporcional ao número de nós transmitindo dados. À medida que a rede aumente, isso poderia tornar o gasto de energia proibitivo, mas deve-se lembrar que este não é o modo normal de operação. Normalmente nenhum nó terá dados, apenas em caso de violação é que um dado será gerado, o que deve ocorrer em poucos nós, caso no qual todos os nós gastam a mesma energia, como visto no caso de sete nós onde apenas um possuía dados.

Para o cálculo de consumo de energia de uma rede a longo prazo, primeiro é avaliado o consumo de energia constante, ou seja, o que é gasto quando o módulo não está em operação. Nesse caso, o módulo deve estar no modo de economia de energia. Uma pilha alcalina do tipo AA, possui uma capacidade de 2700 mAh. Isso quer dizer, que um circuito que gasta 50 μ A (valor medido do protótipo no modo de economia) duraria 54000 horas, ou 2250 dias ou 6,16 anos.

Um nó em modo de recepção contínua, gastando portanto 42,6 mA, teria um tempo de vida de 63,38 horas, ou 2,64 dias. Ou seja, quanto menor for a proporção de tempo que o nó está trocando mensagens em relação ao tempo que está em modo econômico, maior será o tempo de vida da pilha. Para um sistema de monitoramento da proteção catódica como o proposto, os nós acordarem e trocarem mensagens apenas uma vez por dia é plausível, já que este sistema não requer um tempo de reação a falhas muito maior.

Com os nós transmitindo e recebendo mensagens por apenas 5 minutos por dia, passando o resto do tempo em modo econômico, os nós gastariam 3,55 mAh nestes cinco minutos, e 1,2 mAh no resto do dia. Isso totaliza 4,75 mAh por dia. Com uma pilha AA, o sistema funcionaria por 568 dias, ou um ano e meio. Com duas destas pilhas o sistema teria um tempo de vida de três anos. Utilizando-se baterias, que podem chegar a 12 Ah, pode-se ampliar em muito esse tempo. Além disso, seria possível também a utilização de um sistema solar de recarga das baterias, prolongando o tempo de vida das baterias indefinidamente.

Uma possibilidade de aumentar o tempo de duração da bateria é diminuir a distância entre os nós, aumentando o número de nós. Sabendo que a potência para transmissão é proporcional ao quadrado da distância (LEWIS, F. L. 2004), e que o consumo é aproximadamente proporcional à potência requerida, podemos obter valores de tempo de duração da bateria com relação à distância entre os nós utilizando-se uma pilha AA, que podem ser observados na tabela 3.

Tabela 3 Consumo de energia pela distância entre os nós

Distância (m)	Consumo por dia (mAh)	Tempo (dias)
300	4,75	568,42
250	4,16	649,30
200	3,57	757,01
150	2,98	907,56
100	2,38	1132,87
50	1,79	1506,98

5. CONCLUSÕES

O sistema proposto neste artigo possui como vantagens a rápida detecção de um problema na proteção e a possibilidade de criação de um banco de dados com o perfil de potencial ao longo do duto, sendo capaz de identificar tendências e principais áreas sujeitas à corrosão. Assim, o duto pode ser escavado apenas onde é necessário. Além disso, elimina-se a necessidade de verificação da proteção de modo manual, reduzindo assim os custos de manutenção. Utilizando uma rede de sensores, é possível perder nós sensores e mesmo assim manter o sistema funcionando, já que a rede se reconfigura automaticamente.

Para os testes com o protótipo foi implementado um mecanismo de comunicação, que gerencia a comunicação entre os nós. Este mecanismo foi baseado num protocolo de comunicação para redes sem fio, o *Directed Diffusion*, apesar de não implementar todas as suas funcionalidades. Os testes com o protótipo demonstraram que o consumo resultante do mesmo é baixo, permitindo que o sistema opere com baterias por anos, estendendo este período se um sistema de recarga fosse implementado.

Quando a rede está operando em modo normal, sem detectar falhas no duto, o consumo dos nós remotos não aumenta com o aumento do tamanho da rede, todos os nós possuem um consumo aproximadamente igual. Quando um nó possui um novo dado a ser transmitido, a carga de mensagens da rede aumenta. A carga total de mensagens sendo transmitidas na rede depende do número de nós com dados a transmitir, sendo que os nós mais próximos ao *gateway* são os mais afetados. O aumento da carga de mensagens é diretamente proporcional ao número de nós transmitindo dados.

Para uma rede grande isso poderia se tornar uma grande sobrecarga para os nós mais próximos ao *gateway*. Porém, com o *software* implementado, os nós só geram novas mensagens em caso de falha, o que reduz em muito o número de mensagens. Uma ocorrência como essa só poderia significar uma falha total na proteção catódica, o que requer ação corretiva imediata.

Simulações também foram criadas para se avaliar a utilização do protocolo *Directed Diffusion* no sistema de monitoração proposto. Este protocolo foi avaliado como aceitável para a aplicação, mas a principal vantagem seria a utilização de um protocolo pronto, barateando os custos de projeto.

Trabalhos futuros envolvem a implementação de melhorias no protocolo desenvolvido para o protótipo, capacitar a rede construída com o protótipo para substituição automática de nós em falhas e a implementação de *soft sensors*. *Soft sensors* são nós que não realizam monitoramento, mas recebem dados dos nós vizinhos e fazem o trabalho de interpolação de valores. Como isto envolve trocas de dados apenas entre nós vizinhos, não acarreta em sobrecarga de mensagens transitando na rede.

6. AGRADECIMENTOS

Apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo - ANP - e da Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP - por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás - PRH-ANP/MCT (PRH10-UTFPR).

7. REFERÊNCIAS

- AKYILDIZ, I.F., SU, W., SANKARASUBRAMANIAM, Y., CYIRCI, E. A survey on sensor networks. **IEEE Communications Magazine** 40, p. 102-114, 2002.
- DURHAM, M.O., DURHAM, R.A. Cathodic protection: consequences and standards from using CP systems to prevent corrosion. **IEEE Industry Applications Magazine**, p. 41-47, Janeiro – Fevereiro 2005.
- DUTRA, A.C., NUNES, L.P. (1999). **Proteção catódica: técnica de combate à corrosão**. - 3.ed. - Rio de Janeiro – Interciência, 1999.
- HOPPE, F.J., BASU, S.P., ROGERS, G.E. Design, installation and field experience with real-time cathodic protection monitoring of pipe-type cable systems. **Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference**. Los Angeles, CA, USA pp. 615-619, september, 1996.
- LEWIS, F.L. Wireless sensor networks. **Smart Environments: Technologies, Protocols, and Applications**. p. 1-18, november 2004

LOUREIRO, A.A.F., NOGUEIRA, J.M.S., RUIZ, L.B., MINI, R.A.F., NAKAMURA, E.F. FIGUEIREDO, C.M.S. Redes de sensores sem fio. **Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores**. Natal -RN. 2003

MISHRA, P.R., JOSHI J.C., ROY, B. (2000) Design of a solar photovoltaic-powered mini cathodic protection system. **Solar Energy Materials & Solar Cells** 61, pp 383-391

A SENSOR NETWORK FOR MONITORING THE CATHODIC PROTECTION OF PIPELINES

The cathodic protection is one of the most used methods of anticorrosion protection in the world. One of the most important applications, and theme of this paper, refers to the oil and gas industry, more specifically in pipelines. However, for such a system to be adequately used, its functioning must be constantly monitored. This paper proposes a system for monitoring the anticorrosion protection systems in pipes, using a wireless sensor network. To accomplish that, a study of the behavior of the sensor network is presented, focusing in the energy consumption under different operational and network topology aspects. The results were obtained from a hardware prototype.

Instrumentation, Corrosion, Wireless Sensor Networks, Pipeline.

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste artigo.