



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Dissertação de Mestrado

Plataforma Para a Detecção de Incrustação Utilizando o Método do
Impacto do Martelo e a Tecnologia ZigBee

Autor: Luiz Carlos de Lemos Júnior

Campina Grande, Novembro de 2011.

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Dissertação de Mestrado

Plataforma Para a Detecção de Incrustação Utilizando o Método do
Impacto do Martelo e a Tecnologia ZigBee

Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre.

Aluno: Luiz Carlos de Lemos Júnior

Orientador: José Sérgio da Rocha Neto

Campina Grande, Novembro de 2011.



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

L557p Lemos Júnior, Luiz Carlos de.
Plataforma para a detecção de incrustação utilizando o método do impacto do martelo e a tecnologia ZigBee / Luiz Carlos de Lemos Júnior. – Campina Grande, 2012.
58 f.: il. col.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

Orientador: Prof. Dr. José Sérgio da Rocha Neto.
Referências.

1. Vibrações análise amplitude. 2. Martelo de impacto teste acelerômetro. 3. Sensores sem fio. I. Título.

CDU 621.3 (043)



PLATAFORMA PARA A DETECÇÃO DE INCRUSTAÇÃO UTILIZANDO O
MÉTODO DO IMPACTO DO MARTELO E A TECNOLOGIA ZIGBEE

LUIZ CARLOS DE LEMOS JÚNIOR

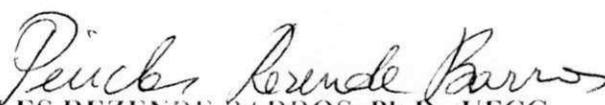
Dissertação Aprovada em 13.12.2011



JOSÉ SÉRGIO DA ROCHA NETO, D.SC., UFCG
Orientador



BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG
Componente da Banca



PÉRICLES REZENDE BARROS, Ph.D., UFCG
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
DEZEMBRO -2011

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, Luiz Carlos e Adjane, aos meus irmãos, João e Luiziane, a minha namorada Haysa e aos meus grandes amigos: Arthur, Antonio, Darlan, Diego, João André, José Maurício, Leonardo e Tiago. Dedico a essas pessoas maravilhosas que me suportaram e incentivaram nessa caminhada tortuosa, mas que acima de tudo, sempre acreditaram em mim. A todos eles dedico com amor.

Luiz Carlos de Lemos Júnior

Agradecimentos

Agradeço a Deus e Nossa Senhora por sempre terem me iluminado e protegido.

Aos meu pais, Luiz Carlos e Adjane, por minha vida, por todo amor, carinho, educação, suporte e apoio.

Aos meus irmãos, João e Luiziane, pelos momentos de alegria e descontração.

A minha namorada, Haysa, pelo incentivo, força, paciência e dedicação.

Aos professores José Sérgio e Jaidilson pela orientação e ajuda, sem as quais este trabalho não teria sido realizado.

Aos membros da banca, professores Benemar e Péricles pelas críticas e sugestões referentes ao trabalho realizado.

Aos amigos, de forma especial a Arthur, Antonio, Darlan, Diego, João André, José Maurício, Leonardo e Tiago pelo apoio incondicional.

Aos amigos de laboratório, Anderson, Jonas, Juan, Letícia, Simões, Tony e Walter pelo companheirismo e incentivo.

Ao pessoal do LIEC e aos funcionários da COPELE pelo apoio recebido.

A CAPES pela bolsa de pesquisa.

Enfim, a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para realização deste trabalho.

Agradeço a todos. Muito obrigado.

Luiz Carlos de Lemos Júnior

Resumo

Há um problema persistente que continua a ser uma demanda relevante para as indústrias química, de petróleo, alimentícias e farmacêuticas: a detecção de incrustação em sistemas de dutos. Neste trabalho é mostrado como desenvolver uma plataforma de testes para a detecção de incrustação das tubulações em locais específicos utilizando o teste do martelo de impacto com comunicação sem fio. A fim de minimizar os custos de manutenção das tubulações e tornar o sistema viável, esta plataforma é prática e portátil. Assim, com base em estudos anteriores e técnicas já desenvolvidas para a detecção de incrustações, existe agora uma sistema portátil que permite grande mobilidade para a plataforma de monitoramento.

Palavras-chave: Vibrações análise amplitude, martelo de impacto teste acelerômetro, sensores sem fio.

Abstract

There is a persistent problem that continues to be a relevant demand for the chemical, petroleum, food and pharmaceutical industries. This problem is the fouling detection in systems of ducts. This work shows how the previous tests to develop a platform for detecting fouling of pipes analyze specific locations using the impact hammer test with wireless communication. To minimize the costs of maintaining the pipes and make the system feasible, this platform is practical and portable. Thus, based on previous studies and techniques already developed for the detection of fouling, there is now a portable system allowing great mobility monitoring platform.

Key Words: Vibrations amplitude analysis, hammer impact test, accelerometer, wireless sensor.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Nomenclature

1	Introdução	p. 13
1.1	Motivação	p. 13
1.2	Objetivos	p. 14
1.3	Organização do Texto	p. 15
2	Processo de Incrustação	p. 16
2.1	Introdução	p. 16
2.2	Características do Processo de Incrustação	p. 16
2.3	Conclusões	p. 19
3	Técnicas de Detecção	p. 20
3.1	Cupom de Perda de Massa	p. 20
3.2	Sensor de Resistividade Elétrica	p. 20
3.3	Ultra-som	p. 21
3.4	Análise de Vibrações	p. 21
3.5	Teste de Impacto do Martelo	p. 23
3.6	Modelo do Martelo	p. 24
3.7	Conclusões	p. 25
4	Plataforma de Testes	p. 26

4.1	Introdução	p. 26
4.1.1	Tubulação	p. 26
4.1.2	Sistema de Excitação	p. 27
4.1.3	Sistema de Monitoramento	p. 27
4.1.3.1	Tecnologia ZigBee	p. 27
4.1.3.2	Transceptor XBee	p. 28
4.2	Princípio de Funcionamento	p. 30
4.3	Análise de Vibrações	p. 31
4.4	Conclusões	p. 32
5	Sistema Implementado e Análise de Resultados	p. 34
5.1	Introdução	p. 34
5.2	Sistema de Medição	p. 34
5.3	Incrustação Absoluta e Relativa	p. 37
5.4	Detecção de Incrustação	p. 38
5.4.1	Rede com um nó-sensor	p. 38
5.4.2	Rede com múltiplos nós-sensores	p. 41
5.5	Conclusões	p. 50
6	Considerações Finais	p. 52
	Referências	p. 53
	Anexos	p. 55
	Código utilizado para aquisição de dados	p. 55

Lista de Figuras

1	Foto ilustrativa das paredes internas de uma tubulação de petróleo. Fonte: Petrobrás	p. 18
2	Representação de uma vibração na estrutura de um corpo qualquer sob excitação de impacto.	p. 21
3	Representação de uma vibração na estrutura de uma tubulação.	p. 22
4	Representação da estrutura com o impacto do martelo.	p. 24
5	Representação interna do martelo de impacto.	p. 24
6	Diagrama equivalente do modelo de impacto do martelo.	p. 24
7	Diagrama esquemático da estrutura da plataforma de testes.	p. 26
8	Ilustração do módulo transceptor ZigBee.	p. 28
9	Diagrama de Blocos da Estrutura Interna do Módulo XBee.	p. 29
10	Diagrama elétrico do nó-sensor.	p. 29
11	Diagrama de blocos do sistema de medição utilizando análise de vibrações e transmissão via rede sem fio ZigBee.	p. 35
12	Diagrama de blocos da representação do sistema de excitação.	p. 35
13	Diagrama de blocos da representação do sistema de aquisição.	p. 35
14	Diagrama de blocos do sistema de medição utilizando análise de vibrações e transmissão via rede sem fio ZigBee apenas com um nó-sensor.	p. 36
15	Representação do sinal de excitação e a resposta do martelo de impacto. . . .	p. 36
16	Representação dos sinais de saída monitorados pelo acelerômetro para uma rede com um nó-sensor: (a) sem incrustação; (b) com camada de incrustação de 5 mm; (c) com camada de incrustação de 10 mm.	p. 39
17	Representação do valor médio dos sinais adquiridos em função da camada de resina.	p. 40

18	Representação dos sinais de saída monitorados pelos acelerômetros para uma rede com três nós-sensores.	p. 42
19	Sinal RSSI para rede de nós-sensores com sinal de excitação do martelo com período 1s: (a) 5 m de distância (b) 15 cm de distância.	p. 43
20	Representação dos sinais de saída monitorados pelos acelerômetros para uma rede com três nós-sensores e período 2,5 s.	p. 44
21	Representação dos sinais de saída monitorados pelos acelerômetros para uma rede com três nós-sensores e período 5 s.	p. 45
22	Sinal RSSI para rede de nós-sensores com sinal de excitação de período 2,5s: (a) 5 m de distância (b) 15 cm de distância.	p. 46
23	Sinal RSSI para rede de nós-sensores com sinal de excitação de período 5s: (a) 5 m de distância (b) 15 cm de distância.	p. 47
24	Representação do valor médio dos sinais adquiridos em função da camada de resina.	p. 48
25	Medições de incrustação mediante perturbação do meio.	p. 49
26	Comportamento do RSSI sob um meio perturbado.	p. 50

Lista de Tabelas

- 1 Relação da amplitude do sinal adquirido V_a pela força aplicada F_a aplicada pelo martelo. p. 30
- 2 Valores obtidos para tensão de entrada V_e de 6 V e o passo de 3 cm. p. 31
- 3 Valores obtidos para tensão de entrada V_e de 6 V e o passo de 5 cm. p. 31
- 4 Valores obtidos para tensão de entrada V_e de 5 V e o passo de 3 cm. p. 32
- 5 Valores obtidos para tensão de entrada V_e de 5 V e o passo de 5 cm. p. 32

Nomenclature

Δt_n	Duração do n-ésimo pulso
A_n	Amplitude do pulso da posição n-ésima
c_1	Coefficiente de amortecimento
F_a	Força de impacto aplicada pelo martelo
k_1	Consante de dureza da ponta do martelo
m_1	Massa do corpo do martelo
V_a	Tensão de saída do acelerômetro
V_e	Tensão de entrada do sistema excitação
x_1	Deslocamento de massa do martelo
X_{FILT}	Saída analógica do acelerômetro
AD623	Amplificador de instrumentação
B	Campo magnético
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple With Collision Detection (Identificação de transmissão a múltiplo acesso com detecção de colisão)
Duty cycle	Ciclo de trabalho do sinal
I	Corrente elétrica da bobina do martelo magnético
PWM	Pulse Width Modulation (Modulação em largura de pulso)
RF	Rádio Frequência
RSSI	Receive Signal Strength Indication (Indicação da força do sinal recebido)

1 *Introdução*

1.1 *Motivação*

É comum em indústrias que utilizam o transporte de fluidos em tubulações, tais como petrolíferas e alimentícias, encontrar incrustação nos tubos condutores. Esse processo de acúmulo de substâncias indesejadas no interior das tubulações acarreta numa série de problemas que atrapalham o processo de condução do fluido, gerando transtorno e despesas excessivas para as indústrias como manutenção corretiva e até perda na produção [2].

Os principal problema decorrente da formação da incrustação é a redução do diâmetro interno, que pode acarretar num aumento da pressão interna, levando à rachaduras ou rompimento da tubulação, além do aumento no consumo de energia para bombeamento do fluido. Todos esses fatores levam a empresa a ter gastos inesperados e excessivos com os custos de operação.

A fim de detectar a incrustação com antecedência e evitar transtornos futuros com reparos as estruturas condutoras de fluido, técnicas de detecção foram desenvolvidas, sendo classificadas em dois tipos: invasivas e não-invasivas. As técnicas invasivas necessitam interromper o processo para se introduzir elementos de monitoração dentro das tubulações para, após sua retirada, serem analisados e se obter um comportamento físico-químico do fluido. Já as técnicas não-invasivas caracterizam-se por detectar a incrustação sem ter seus elementos de monitoração inseridos na tubulação. Por essas características, as técnicas não-invasivas são mais atraentes para as indústrias, já que não é preciso interromper o processo produtivo para se realizar as medições que determinam a presença ou não da incrustação. Dentre os métodos não-invasivos, destacam-se o teste do ultra-som e o teste do martelo, ambos baseados na vibração das ondas sonoras e mecânicas da tubulação respectivamente.

Os testes de vibração são utilizados para detecção de falhas em estruturas, e tais testes podem ser realizados utilizando-se o método do impacto do martelo, que é uma técnica não-invasiva a qual consiste em gerar vibrações na estrutura pelo impacto deste, sem lhe causar danos [4, 20, 23].

Em muitas aplicações industriais contemporâneas, a incorporação de redes sem fio é uma

solução cada vez mais procurada. A principal motivação para a aplicação deste tipo de rede de comunicação vem da facilidade de sua implantação e redução dos custos oferecida por elas. As redes cabeadas requerem gasto com a estrutura decabeamento que, em alguns casos, pode ser muito dispendioso ou até impraticável. Por isso se faz necessário a necessidade de elaborar estratégias dedicadas ao tratamento de dados nas redes sem fio, em aplicações industriais [10].

A existência de uma plataforma sem fio de detecção de incrustação, pode ser realizada pela união de duas técnicas: o uso das tecnologias sem fio e dos métodos não-invasivos na detecção de falhas em estruturas, ambas com o mesmo intuito de otimizar a solução do sistema, reduzindo seus custos e realizando medições simultâneas sem a necessidade de repetição exaustiva de aferições ponto-a-ponto, com maior alcance e transmissão para uma estação base.

1.2 Objetivos

Neste trabalho, tem-se como objetivo aplicar o método do impacto do martelo para detecção de incrustação de forma não-invasiva, utilizando uma comunicação sem fio para envio de dados e formação de uma rede de monitoramento em diversos pontos distintos da tubulação. Desta forma, unindo-se a técnica de detecção de incrustação não-invasiva com a comunicação sem fio, deseja-se criar um sistema de detecção de incrustação de longo alcance para tubulações extensas, de modo que a rede de sensores sem fio possa monitorar toda ou grande parte da extensão da tubulação.

O sistema de detecção será composto de dois blocos fundamentais:

- Excitação: formado pelo martelo magnético que será o responsável por provocar vibrações mecânicas na tubulação sob teste;
- Monitoramento: formado por uma rede de nós sensores responsáveis por monitorar as ondas mecânicas vibracionais e enviar ao computador terminal os dados referentes ao comportamento dessas ondas monitoradas para seu tratamento.

A técnica de detecção de incrustação não-invasiva e o teste do impacto do martelo garantem precisão na determinação da presença da incrustação. A técnica proposta avalia variações nas amplitudes das vibrações mecânicas da tubulação, tomando como base tubulações limpas medidas previamente. Assim, qualquer diferença em relação ao valor referência, conhecido como assinatura do tubo, indica a presença de incrustação. O ZigBee permite transmissões entre nós, quase sem perdas de dados, com um alcance de até 100 m para locais abertos ou 30 m para locais fechados, garantindo assim uma comunicação menos suscetível a falha do nó-sensor com o computador terminal, ou ainda, uma comunicação entre nós, prolongando ainda mais o alcance da rede.

1.3 Organização do Texto

Este trabalho é composto por sete capítulos, os quais são descritos a seguir:

- Neste capítulo é apresentada uma introdução do trabalho, destacando-se a motivação e os objetivos.
- No Capítulo 2 apresenta-se as características gerais do processo de incrustação, tais como: origem do processo, problemas decorrentes e fatores contribuintes para o surgimento da incrustação.
- No Capítulo 3 apresenta-se as técnicas de detecção de incrustação, abordando mais detalhadamente o método da análise de vibrações com o teste de impacto do martelo.
- No Capítulo 4 apresenta-se a descrição da plataforma de testes, o conjunto formado pelo sistema de medição (excitação e monitoramento) e as características da tubulação sob teste.
- No Capítulo 5 apresenta-se o procedimento realizado neste trabalho para detecção de incrustação e alguns resultados prévios e finais obtidos a partir de testes realizados.
- No Capítulo 6 apresenta-se as considerações finais em relação ao trabalho.

2 *Processo de Incrustação*

2.1 Introdução

Quando substâncias são transportadas em tubulações, materiais indesejados são acumulados na parede interna dessas tubulações com o passar do tempo, esses acúmulos indesejados são conhecidos como incrustação. Essa, por sua vez, pode ser proveniente da corrosão das paredes internas dos tubos por microorganismos vivos ou partículas orgânicas [22].

A fim de modelar e prever os problemas provocados pela incrustação em processos industriais, é necessário primeiro entender como ocorre e quais as causas do processo de incrustação. Para isto se faz necessário examinar cuidadosamente todos os dados e condições operacionais nos processos industriais para determinar quais variáveis são relevantes no processo. O objetivo do estudo prévio das características da tubulação é minimizar a limpeza total do tubo para reduzir a frequência de parada das plantas e reduzir o custo, já que se faz modificações mínimas nos processos [15].

Como as incrustações são formadas, predominantemente, devido a separação da parte condensada de um fluido (gás ou líquido), seus mecanismos são totalmente diferentes e muitas vezes únicos. Geralmente, os problemas de incrustação são consequência da combinação de vários movimentos e reações de fase. Para modelá-los é necessário entender claramente seus comportamentos e a natureza dos fenômenos envolvidos. Um ou mais dos efeitos ou mecanismos podem ser responsáveis pela incrustação nos processos industriais.

A dificuldade de modelar a incrustação se dá pelo fato deste processo não ocorrer de forma contínua, ou seja, sua ocorrência pode ocorrer em diferentes pontos da tubulação sem qualquer previsão de acontecimento e preferência de localidade.

2.2 Características do Processo de Incrustação

Geralmente, a incrustação ocorre ao mesmo tempo que a corrosão. Tal evento pode ser explicado a partir dos materiais resultantes da corrosão das paredes internas da tubulação que se acumulam em outros pontos da mesma estrutura, gerando assim a incrustação.

Dentre os fatores que originam a incrustação, pode-se destacar [21, 25]:

- Sedimentação: processo provocado pela ação da gravidade sobre as partículas suspensas no meio líquido.
- Cristalização: neste processo, os hidrocarbonetos de origem parafínica quando resfriados tendem a depositar cristais no interior da tubulação. Este processo também é conhecido como solidificação.
- Reações Químicas: processo que leva à incrustação decorrente da corrosão de outras partes da tubulação.
- Crescimento biológico: processo decorrente do crescimento de microorganismos (fungos, bactérias ou algas) na superfície interna da tubulação. Esses organismos tomam a superfície das paredes internas como fontes de nutrientes.

Dados inadequados e a falta de informação sobre o mecanismo de incrustação têm inibido o desenvolvimento de passos preventivos que precisam ser levados em conta na fase do projeto dos sistemas com fluxo de fluido.

Três fatores podem ser considerados para a redução ou prevenção da incrustação [15]:

- A resistência de fluxo devido a incrustação é um valor que varia com o tempo;
- A capacidade para caracterizar as condições do início do processo de incrustação;
- A monitoração do sistema baseado nas variáveis e mecanismos do processo de incrustação.

Compostos orgânicos denominados pesados, tais como: cera, resina, asfaltene, diamandóide e compostos organometálicos, podem existir num determinado tipo de óleo em quantidades e formas distintas. Tais compostos podem ainda se precipitar na mistura devido a várias forças que causam bloqueio no reservatório de óleo, no poço, no oleoduto, na produção e nas instalações de processamento [18].

Partículas sólidas suspensas no óleo podem aderir às paredes dos canais e reservatórios. Compostos orgânicos pesados e a deposição de sólidos durante a produção de óleo, transporte e processamento é um problema sério em muitas áreas. A precipitação de materiais orgânicos pesados percorrem desde o poço até a linha de produção, bombas, filtros e outros equipamentos de ajustes causando a formação de incrustação em todas as etapas do processo.

Os materiais de deposição propensos à incrustação podem ser controlados usando várias técnicas de tratamento químico e mecânico, tais como [15]:

- Mudanças no fluxo do fluido transportado;
- Eliminação de materiais incompatíveis com o fluxo;
- Variação da queda de pressão na instalação;
- Minimização da mistura de fluxos incompatíveis durante processos de transferência.

Geralmente, o processo de incrustação ocorre junto com o de corrosão como pode-se observar na Figura 1, na qual observa-se uma foto ilustrativa das paredes internas de uma tubulação de petróleo.



Figura 1: Foto ilustrativa das paredes internas de uma tubulação de petróleo. Fonte: Petrobrás

No caso específico do petróleo, os principais fatores são [21, 25]:

- Efeito da solubilidade: por apresentar uma mistura de vários componentes dispersos, o petróleo se torna estável se houver um equilíbrio de solubilidade entre todos os componentes. Do contrário, ocorre precipitação de um ou mais componentes desequilibrados.
- Agregação ou floculação: moléculas de asfaltene, presentes na composição do fluido, podem agregar-se as paredes internas uma vez que ocorra uma diminuição na polaridade no meio do óleo.
- Efeito coloidal: efeito decorrente da combinação de asfaltenes floculados com resinas presentes no petróleo.

A incrustação é um dos principais desafios da indústria petrolífera. A produção, transporte e processamento do petróleo e outros compostos pesados contendo hidrocarbonetos, são afetados significativamente pela incrustação, com sérias conseqüências econômicas.

Visto que a limpeza dos tubos incrustados é realizada com o fim de remover as incrustações acumuladas nas paredes internas da tubulação, o uso de agentes químicos levaria muito tempo, gerando um gasto ainda maior com a manutenção. Por isso, é necessário uma detecção rápida da incrustação para evitar a ocorrência de problemas maiores, e que as manutenções sejam preventivas, corretivas e pontuais, já que se sabe a localização da incrustação [13].

2.3 Conclusões

Neste capítulo apresentou-se as características gerais do processo de incrustação. Nota-se que é necessário conhecer as origens do problema para saber como solucioná-lo. Também é de suma importância o conhecimento da planta do sistema a ser analisado, ainda que seja difícil obter um modelo para o processo de incrustação já que este não apresenta regularidade e continuidade.

3 *Técnicas de Detecção*

Visando contornar os problemas causados pela incrustação e corrosão, já que ambas ocorrem simultaneamente, técnicas de detecção foram desenvolvidas. Dentre elas pode-se destacar: o cupom de perda de massa e o sensor de resistividade elétrica como técnicas invasivas, e as que utilizam ultra-som e análise de vibrações como técnicas não-invasivas.

3.1 Cupom de Perda de Massa

O cupom é uma placa feita do mesmo material que o da tubulação. Esta placa é instalada dentro da tubulação, e após um período de aproximadamente três meses, a placa é retirada, tratada e pesada. Como ela é do mesmo material da fabricação dos tubos, e esteve sob as mesmas condições, o cupom apresenta iguais oxidações que deterioram a tubulação. A diferença de massa obtida na pesagem da placa, após o tratamento químico para eliminação dos óxidos formados na sua superfície, permite calcular uma taxa de corrosão ligada à tubulação. Assim, considera-se que a taxa de corrosão do cupom é a mesma sofrida pelo duto, e o seu uso permite a detecção da corrosão na tubulação ao avaliar a variação de sua massa num determinado período de tempo [11]. O grau de corrosão existente depende do tipo de dutos envolvidos, de modo que deve-se usar o cupom no mesmo estado em que se encontra a tubulação, ou seja, utilizar um cupom novo numa tubulação antiga indicaria um medida errônea do grau de corrosão, pois a tubulação já estaria previamente desgastada.

3.2 Sensor de Resistividade Elétrica

O sensor de resistividade elétrica possui um valor de resistência padrão conhecido. Assim, quando implantado dentro da tubulação e submetido as mesmas ações químicas que o interior do tubo, o sensor apresenta um valor de resistência diferente da padrão, indicando a presença de corrosão, já que a resistência do material oxidado será diferente da original sob condições normais [17].

3.3 Ultra-som

As ondas guiadas ultra-sônicas podem se propagar por longas distâncias em tubos, apresentando uma alta sensibilidade para detecção de descontinuidades internas. A detecção de incrustação ou corrosão será indicada pela variação da amplitude do sinal ultra-sônico, por pulsos ou ruídos, ou ainda pela alteração na velocidade da onda guiada [13]. Todos os parâmetros que apresentam alterações são comparados com os valores de referência obtidos previamente para uma tubulação limpa. Esses valores padrões são chamados de característica ou assinatura do tubo. Quando o valor de um parâmetro difere da assinatura do tubo, então há uma descontinuidade (incrustação ou corrosão) na tubulação.

3.4 Análise de Vibrações

A técnica de análise de vibrações consiste em analisar as alterações nas amplitudes das ondas vibracionais mecânicas de um corpo sob excitação. Quando estes valores diferem dos valores padrões previamente medidos para uma tubulação limpa, constata-se a presença de incrustação.

Corpos submetidos a vibrações por ondas mecânicas, tendem a oscilar durante um período de tempo em função da excitação inicial, ou seja, quanto maior for o impulso inicial para o início do movimento harmônico, maior será o tempo de duração das oscilações periódicas. Essas oscilações continuarão até que toda energia fornecida inicialmente ao sistema para sua movimentação seja dissipada, o que acarreta num comportamento vibracional periódico na estrutura do corpo, porém de amplitudes suavemente amortecidas [5]. Esse comportamento pode ser observado pelo gráfico da Figura 2.

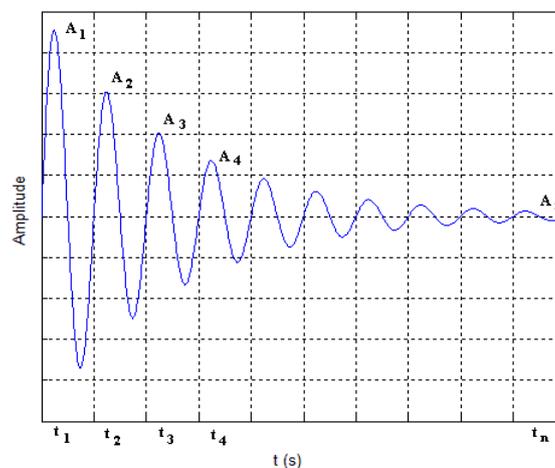


Figura 2: Representação de uma vibração na estrutura de um corpo qualquer sob excitação de impacto.

Pode-se observar que a amplitude da onda diminui ao longo do tempo, e para um tempo t_n , a amplitude do sinal em t_n é aproximadamente nula. Porém, este período de amortecimento não é interessante, pois pode demorar tempo demasiado, o que não se aplicaria a um sistema de sucessivas medições e resposta rápida. Todavia, considerando o peso do corpo, sua estrutura interna e a maneira como a energia é dispersa, pode-se estimar o comportamento da tubulação a ser estudada como uma senóide amortecida de atenuação rápida, de modo que a primeira amplitude, o impulso de excitação, seria a oscilação destacada [24]. Tal comportamento pode ser observado pelo gráfico da Figura 3.

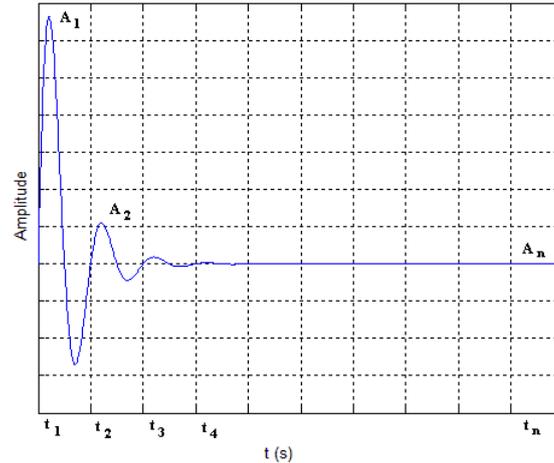


Figura 3: Representação de uma vibração na estrutura de uma tubulação.

Nota-se que $A_1 \gg A_2$, de forma tal que as amplitudes seguintes não influenciarão na medição do sistema, pois terão valores muito pequenos, desprezíveis ao sistema de medição. Além disso, A_n possui um tempo de atenuação muito pequeno, o que indica um sistema com resposta rápida pois não é necessário esperar um longo período até que o sistema estabilize. Tal comportamento das ondas vibracionais pode ser explicado devido ao peso da tubulação, já que seria necessário uma maior quantidade de energia fornecida pelo impacto inicial para que a vibração do tubo representado pela Figura 3 tivesse comportamento semelhante a vibração natural de um corpo bem mais leve representado pela Figura 2. Como A_1 é o valor de amplitude de destaque nas oscilações do corpo, o conjunto destes impulsos caracteriza um valor médio de amplitude para a tubulação limpa (assinatura do tubo), de forma tal que se houver atenuação significativa neste valor médio, indica a presença de incrustação naquele ponto.

As técnicas que utilizam vibrações têm sido usadas desde a década de 90 em diversas aplicações. Essas técnicas apresentam alta sensibilidade na detecção de pequenas discontinuidades internas, e não requerem planos especiais de segurança ou quaisquer acessórios para sua aplicação, como o caso de algumas técnicas que utilizam radiação. As técnicas com análise de vibrações são utilizadas, geralmente, para detectar falhas ou rachaduras em estruturas que podem ser de concreto (aplicação de engenharia civil) ou metálicas (aplicação de engenharia

mecânica)[3, 16].

3.5 Teste de Impacto do Martelo

É necessário utilizar ferramentas experimentais para medir os parâmetros de uma estrutura a fim de facilitar o controle e repetibilidade das medidas de vibrações. Normalmente, isto é feito usando o teste do impacto do martelo. Este teste tem sido usado em muitas áreas da engenharia para analisar funções de resposta em frequência devido a sua conveniência e simplicidade dos experimentos, bem como a validade dos procedimentos de análise [19].

Quando o sistema é excitado por um impacto de um martelo, o sistema vibra por um momento e reduz sua vibração até parar. De fato, o tempo de duração da vibração livre depende das características físicas do sistema, especificamente, do coeficiente de amortecimento [1].

A excitação por impulso é uma técnica usada em testes convencionais com vibração para determinar o comportamento dinâmico das estruturas. O impacto de um martelo é usado para gerar a excitação por um impulso após golpear a estrutura. O impulso com uma amplitude específica A_n e com uma duração Δt_n pode excitar todos os modos de vibração da estrutura dentro de uma certa faixa de frequência. Para uma carga constante, a faixa de frequência efetiva é inversamente proporcional à duração de Δt_n . É necessário induzir um pulso com um Δt_n menor para aumentar a faixa de frequência do teste [12].

Em muitas situações a carga atuando sobre a estrutura é dinâmica. Como a resposta do sistema não depende apenas dos parâmetros do sistema como massa, dureza e umidade, mas também da duração do impulso e do ponto de aplicação da carga, vários estudos têm sido desenvolvidos para investigar a influência destes parâmetros na detecção de falhas em estruturas [19].

A ocorrência de falhas em estruturas produz mudanças em suas características dinâmicas como frequências naturais, modos de forma, amortecimento modal, resposta ao impulso e funções de resposta em frequência. Um entendimento dessas modificações pode levar a detecção, localização e caracterização do tamanho da falha. O princípio fundamental é comparar o comportamento das estruturas num estado sem falhas e com falhas. O problema de detecção de falhas tem sido discutido como um problema de reconhecimento de padrões estatísticos e utiliza a análise de múltiplas assinaturas do sistema [14, 24].

3.6 Modelo do Martelo

O impacto do martelo pode ser modelado pela análise da interação mecânica entre a estrutura sob teste e o martelo. Na Figura 4 está ilustrada uma representação da estrutura usada para provocar as vibrações utilizando o impacto do martelo. A força aplicada com o impacto provoca as vibrações que são detectadas pelo sistema de detecção.

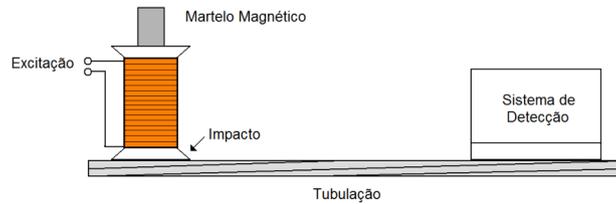


Figura 4: Representação da estrutura com o impacto do martelo.

Na Figura 5 é possível observar a representação interna do comportamento do martelo durante o impacto. Após excitada com uma tensão V_e no valor de 5 V, a bobina gera um campo magnético B que deslocará o núcleo de ferro, aplicando uma força de impacto F_a da ordem de 0,8 N (valor medido com dinamômetro digital) na tubulação.

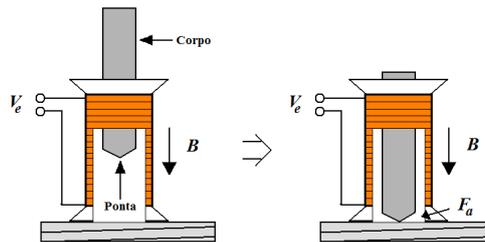


Figura 5: Representação interna do martelo de impacto.

Um modelo reduzido, com um grau de liberdade, pode ser usado para descrever o comportamento da vibração com o impacto do martelo, como pode ser visto na Figura 6. A ponta do martelo é representada por um elemento com constante de dureza k_1 e uma viscosidade com um coeficiente de amortecimento c_1 . As massas da ponta do martelo e do corpo são representadas pela mesma massa m_1 . O deslocamento da massa é x_1 [5].

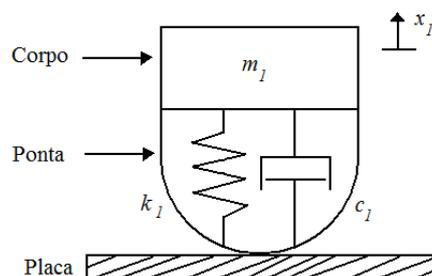


Figura 6: Diagrama equivalente do modelo de impacto do martelo.

Os valores apropriados para k_1 , c_1 e m_1 são determinados através de curvas com informações da amplitude da força de impacto em função do tempo. A força aplicada sobre a placa é encontrada de acordo com a equação 3.1:

$$F_a = k_1 x_1 + c_1 \frac{dx}{dt} \quad (3.1)$$

Onde: F_a é a força aplicada, k_1 é a constante de dureza do material, c_1 é o coeficiente de amortecimento do martelo e x_1 é o deslocamento.

As condições iniciais, em $t = 0$, são $x_1(0) = 0$ e $\frac{dx(0)}{dt} = v_0$, onde v_0 é a velocidade de impacto. Uma vez que a força é nula no início do impacto, obtém-se a equação 3.2:

$$F_a(0) = c_1 v_0 \cong 0 \quad (3.2)$$

a qual conduz para um pequeno valor do parâmetro de amortecimento c_1 .

Durante a fase de impacto, o sistema é tratado como um acoplamento único entre o martelo e a estrutura. No fim do impacto, o martelo perde o contato com a estrutura e esta vibra livremente de acordo com suas frequências naturais [5]. A constante de dureza k_1 e o coeficiente de amortecimento c_1 influenciam diretamente na amplitude e no tempo de decaimento das vibrações [23].

3.7 Conclusões

Diante dos problemas causados pelo processo de incrustação, algumas técnicas foram desenvolvidas para sua detecção. Dentre essas técnicas pode-se destacar o método da análise das vibrações, uma técnica eficiente por comprovar a ocorrência da falha, além de ser uma técnica não-invasiva. O teste de impacto do martelo, caracterizado por gerar vibrações mecânicas na estrutura, as quais serão analisadas posteriormente para verificar o comportamento da tubulação e confirmar a presença ou não da incrustação. O teste de impacto do martelo possui uma resposta que se aplica bem a estrutura da tubulação, pois em conjunto com a estrutura analisada não profere muitas vibrações secundárias que atrapalhem o sistema de medição, sendo assim satisfatório no quesito de fonte geradora de vibrações.

4 Plataforma de Testes

4.1 Introdução

Para se aplicar o sistema de medição proposto, é preciso realizar ensaios que corroborem as suposições propostas, por isso, utiliza-se uma plataforma de testes similar a uma situação real. A plataforma de teste é formada por três blocos:

1. Tubulação;
2. Sistema de excitação;
3. Sistema de monitoramento.

O diagrama esquemático da plataforma de testes pode ser observado na Figura 7.

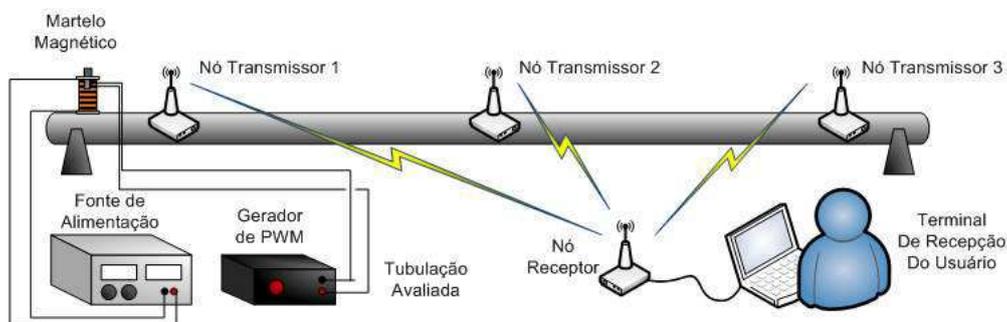


Figura 7: Diagrama esquemático da estrutura da plataforma de testes.

4.1.1 Tubulação

Uma tubulação cilíndrica, feita de ferro galvanizado com espessura de $2,5\text{ mm}$ e um diâmetro de $63,5\text{ mm}$. É composta por dois tubos: um limpo, sem nenhuma incrustação e um com três camadas de parafina no interior, simulando a incrustação com diferentes espessuras 0 mm , 5 mm e 10 mm respectivamente.

A tubulação limpa é utilizada para obter a assinatura do tubo, ou seja, o valor da amplitude do sinal quando não há incrustação no tubo. Já o segundo tipo de tubo é utilizado para obter o nível de tensão correspondente para cada espessura de camada de incrustação.

4.1.2 Sistema de Excitação

Formado pelo martelo magnético, uma fonte de tensão contínua e um gerador de PWM (responsável por controlar a frequência das batidas do martelo e a largura do pulso). Esse sistema é responsável por excitar a tubulação através de golpes periódicos. O comportamento do sinal de entrada é observado pelo sistema de monitoramento.

4.1.3 Sistema de Monitoramento

São os nós-sensores, compostos por acelerômetros, módulos transceptores ZigBee [6] e um computador terminal executando uma rotina de aquisição e tratamento de dados.

4.1.3.1 Tecnologia ZigBee

O ZigBee é uma das tecnologias mais recentes dentro do grupo de redes para aplicações pessoais e industriais, que permite o gerenciamento e controle desses dispositivos. Foi desenvolvida para se tornar uma alternativa de comunicação em redes que não necessitem de soluções mais complexas para seu controle, barateando assim os custos com a aquisição, instalação de equipamentos, manutenção e mão de obra.

Trata-se de uma tecnologia relativamente simples, que utiliza um protocolo de pacotes de dados com características específicas, sendo projetado para oferecer flexibilidade quanto aos tipos de dispositivos que pode controlar. Tendo como uma de suas principais características o baixo consumo de energia em seu modo *sleep* e sua baixa taxa de transmissão (o limite superior da taxa de transmissão dele é de 250 Kbps)[7].

Os dispositivos baseados na tecnologia ZigBee operam na faixa ISM (Industrial, Scientific and Medical) que não requer licença para funcionamento, incluindo as faixas de 2,4 GHz (Global), 915 MHz (América do norte) e 868 MHz (Europa) e com taxas de transferência de dados de 250 kbps em 2,4 GHz, 40 kbps em 915 MHz e 20 kbps em 868 MHz. O padrão oferece atualmente interfaces com velocidades de conexão compreendidas entre 10 Kbps e 115 Kbps e com um alcance de transmissão entre 10 m e 100 m, dependendo diretamente da potência dos equipamentos e de características ambientais (obstáculos físicos, interferência eletromagnética, etc). Alguns módulos mais novos conseguem um alcance de até 1 km em campo aberto [8].

Uma Malha ZigBee dispõe de vários caminhos possíveis entre cada nó da rede para a passagem da informação, assim, é possível eliminar falhas se um nó estiver inoperante, simplesmente mudando o percurso da informação.

Devido a suas características, o ZigBee é uma tecnologia bastante utilizada por apresentar baixo consumo de energia, longo alcance para transmissão de dados e uma malha de rede

bastante flexível, permitindo rotas alternativas na transferência de informações para que sempre haja tráfego na informação sem queda da rede.

4.1.3.2 Transceptor XBee

Os módulos transceptores utilizados operam na banda de 2,4 GHz, para integração em sistemas que pretendam transmitir informação por RF. Suportando o protocolo ZigBee, ou apenas o padrão 802.15.4, e diferentes topologias, os módulos caracterizam-se por ausência de configuração externa (“programação” por software próprio) quando utilizados com suas configurações de fábrica, sendo possível realizar as operações pretendidas através de comandos AT (comandos enviados ao modem localmente precedidos da sigla AT que indica atenção aos comandos seguintes os quais definirão as ações do módulo) e de operações específicas de controle, ou realizando as modificações necessárias diretamente sobre o padrão IEEE 802.15.4, o qual permite uma maior interação com o *hardware* do dispositivo, minimizando os custos com outros componentes envolvidos no processo de aquisição de dados e processamento da informação [6]. Em contrapartida, existe a necessidade de um conhecimento mais aprimorado do padrão visto que as modificações necessárias a implementação de uma aplicação customizada são realizadas através de primitivas, diretamente na pilha do padrão. Assim, destinam-se a interagir com dispositivos por meio de uma interface RS-232, encarregando-se da transmissão e recepção dos dados pretendidos.

Apresentam dimensões reduzidas (inferiores a 3 cm por 3 cm) existentes em duas versões distintas: XBee (Figura 8) e XBee Pro. Esses modelos por sua vez, diferem no alcance da transmissão, e por consequência, na potência exigida para a mesma. Ao XBee estão associados uma potência de 1 mW e um alcance de 100 m, em campo aberto, ou 30 m para locais fechados.



Figura 8: Ilustração do módulo transceptor ZigBee.

Enquanto que o XBee Pro opera com uma potência de 60 mW, permitindo-lhe alcançar um raio de transmissão até 1,6 km, campos abertos, ou 100 m em locais fechados. Em termos de consumo, são dispositivos que apresentam um consumo muito reduzido (inferior a 100 mA) quando em estado *sleep*, o qual pode aumentar dependendo da necessidade de alimentação quando estiver em estado de operação (recepção ou transmissão). Uma vez em modo

de operação, o XBee apresenta menor consumo energético quando comparado ao XBee PRO - corrente de aproximadamente 50 mA para uma tensão de alimentação de 3,3 V. Por cumprir os requisitos necessários, o transceptor XBee da MaxStream/Digi/FreeScale foi a solução inicialmente elegida para o trabalho, uma vez que o mesmo apresenta um consumo reduzido e simples configuração. Internamente o módulo XBee/XBee-PRO pode ser resumido de acordo com a Figura 9.

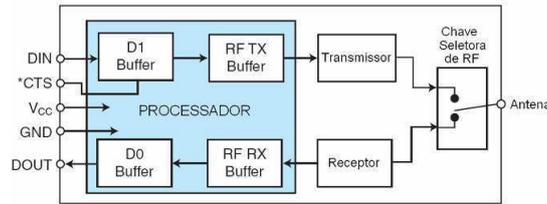


Figura 9: Diagrama de Blocos da Estrutura Interna do Módulo XBee.

É basicamente dividido em dois blocos principais: o processador e o transceptor, propriamente dito. O processador usado neste módulo é o M9S08GT60 e o transceptor é o MC13193 ambos da Freescale.

Na Figura 10 observa-se o esquema elétrico do nó-sensor: acelerômetro, circuito de condicionamento e XBee.

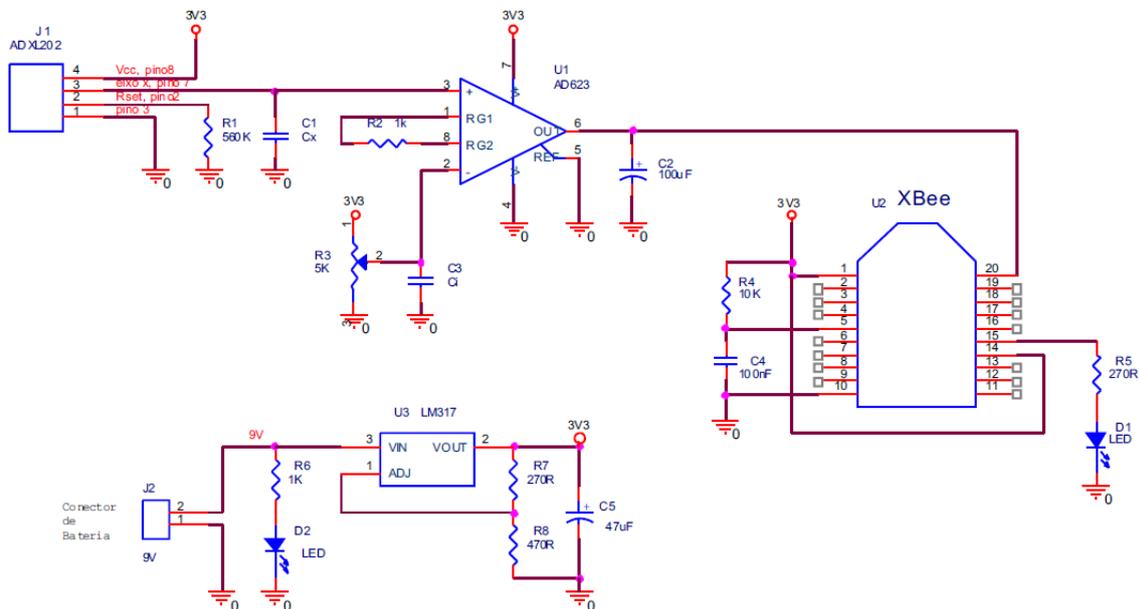


Figura 10: Diagrama elétrico do nó-sensor.

É possível observar pela diagrama elétrico do circuito que a saída analógica do acelerômetro (X_{FILT}) é a entrada do amplificador de instrumentação, o AD623, enquanto a saída deste último citado, por sua vez, é entrada do módulo transceptor XBee pelo pino 20, representando o

canal 0 do conversor analógico-digital. Led's foram utilizados como indicadores para nó-sensor: quando estiver ligado e associando e transmitindo.

4.2 Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento da plataforma de testes é simples. O martelo magnético é alimentado por uma tensão de entrada V_e fornecida pela fonte de tensão contínua, gerando uma corrente elétrica I e por conseguinte um campo magnético B , o qual deslocará o eixo do martelo, causando um impacto no tubo com uma força F_a . A força aplicada à tubulação fará com que esta vibre. As vibrações da tubulação são captadas pelo acelerômetro e representadas como saída de tensão V_a , que serão digitalizadas pelo conversor A/D do módulo transceptor e enviadas por um canal de comunicação sem fio, no caso a tecnologia ZigBee, para o computador terminal. Neste ponto, os dados serão processados e convertidos em valores passíveis de leitura bem como a plotagem dos gráficos do comportamento vibracional da tubulação.

Para a rede com múltiplos nós, cada um enviará um valor distinto de tensão, e a interpretação dos respectivos valores, assim como a correspondência dos mesmos aos nós transmissores é feita pela rotina que está sendo executada no computador terminal. Não haverá perda de pacotes, pois os módulos são implementados com CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*), ou seja, em caso de colisão de pacotes ou o canal de comunicação estar ocupado, o nó transmissor reenviará o dado, evitando assim a perda do sinal adquirido.

A amplitude do sinal V_a adquirido pelo acelerômetro no nó-sensor é diretamente proporcional a força aplicada pelo martelo de impacto F_a . Quanto maior for F_a , maior será a quantidade de energia envolvida no sistema e transmitida a tubulação, gerando vibrações de grande intensidade com um pico de amplitude A elevado, de modo que se $F_a > F'_a$, então $V_a > V'_a$.

Na Tabela 1 são apresentados valores do sinal V_a para distintos valores de F_a .

Tabela 1: Relação da amplitude do sinal adquirido V_a pela força aplicada F_a aplicada pelo martelo.

F_a (N)	V_a (mV)
0,4	200
0,6	500
0,8	800
1,0	1200

Esses valores foram obtidos medindo-se a intensidade da força F_a aplicada pelo martelo com um dinamômetro e comparando o valor do sinal V_a adquirido pelo nó sensor através da

vibração da tubulação. O conjunto de valores da força são obtidos pela variação do sinal de excitação do martelo, a tensão de entrada V_e . Assim, quanto maior for a tensão de excitação, maior será o campo magnético B e conseqüentemente, maior será a força aplicada F_a .

4.3 Análise de Vibrações

Foram realizados quatro séries de experimentos para garantir que o nível de tensão obtido pelo acelerômetro seja o mesmo ao longo de toda a tubulação. Esse ensaio consiste em fornecer uma tensão de entrada V_e fixa ao martelo de impacto e variar paulatinamente a posição do nó sensor em relação a origem, onde se encontra o gerador de impactos. Primeiramente, alimentou-se o martelo com uma tensão de entrada V_e no valor de 6 V e variou-se o nó-sensor com o passo de 3 cm, em seguida repetiu-se o teste com o passo de 5 cm. Num segundo momento, fixou-se o valor de tensão de entrada em 5 V, e novamente obteve-se o conjunto de medidas para cada um dos ensaios de passos distintos. Todos os testes de assinatura do tubo foram realizados numa tubulação lisa, similar a utilizada no transporte de fluidos em processos industriais, com um comprimento de 100 cm. Os resultados obtidos podem ser observados nas Tabelas 2, 3, 4 e 5 seguintes:

Tabela 2: Valores obtidos para tensão de entrada V_e de 6 V e o passo de 3 cm.

Posição (cm)	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33
Amplitude (mV)	1375	1332	1375	1344	1288	1238	1225	1325	1382	1113	1182
Posição (cm)	36	39	42	45	48	51	54	57	60	63	66
Amplitude (mV)	1382	1363	1163	1163	1300	1288	1257	1338	1269	1200	1238
Posição (cm)	69	72	75	78	81	84	87	90	93	96	99
Amplitude (mV)	1225	1288	1275	1370	1300	1275	1320	1294	1107	1019	1032

Nota-se, para estas condições, um valor médio em torno de 1300 mV, com uma atenuação acentuada a partir de 90 cm.

Tabela 3: Valores obtidos para tensão de entrada V_e de 6 V e o passo de 5 cm.

Posição (cm)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Amplitude (mV)	1333	1270	1269	1282	1269	1382	1225	1313	1219	1250
Posição (cm)	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Amplitude (mV)	1325	1200	1238	1232	1282	1307	1263	1225	1025	1057

Novamente, observa-se um valor médio tendendo a 1300 mV com uma queda acentuada na

amplitude do sinal a partir de 90 cm.

Agora, observa-se o comportamento da tubulação para uma tensão de alimentação menor.

Tabela 4: Valores obtidos para tensão de entrada V_e de 5 V e o passo de 3 cm.

Posição (cm)	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33
Amplitude (mV)	855	801	832	795	783	820	817	800	814	803	798
Posição (cm)	36	39	42	45	48	51	54	57	60	63	66
Amplitude (mV)	793	780	807	814	814	803	778	789	792	810	811
Posição (cm)	69	72	75	78	81	84	87	90	93	96	99
Amplitude (mV)	790	815	813	796	803	802	812	801	772	732	704

Nota-se, para estas condições, um valor médio em torno de 800 mV, novamente com uma atenuação acentuada a partir de 90 cm.

Tabela 5: Valores obtidos para tensão de entrada V_e de 5 V e o passo de 5 cm.

Posição (cm)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Amplitude (mV)	823	791	792	805	793	807	797	799	803	804
Posição (cm)	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Amplitude (mV)	785	813	806	823	832	822	791	752	707	724

Analogamente a Tabela 5, nota-se, um valor médio em torno de 800 mV, novamente com uma atenuação acentuada a partir de 90 cm.

Deve-se observar que o comportamento da amplitude do sinal é praticamente o mesmo ao longo do tubo para todos os ensaios realizados até uma distância de 90 cm aproximadamente. Isso se deve ao fato que a partir deste ponto, a amplitude da onda mecânica vibracional começa a diminuir consideravelmente devido a dissipação de energia, de modo tal que poderá acarretar numa leitura errada de uma falsa presença de incrustação. Assim, para se ter segurança nas leituras, deve-se trabalhar com uma margem de confiabilidade de no máximo 85 cm, para garantir a funcionabilidade do sistema de medição.

4.4 Conclusões

Neste capítulo apresentou-se a plataforma de teste, que simula as condições reais de uma tubulação conduzindo fluido, por possuir mesmas dimensões de uma tubulação real, além das incrustações artificiais que são do mesmo material que as naturais. Os equipamentos utilizados

na montagem do sistema de medição (monitoramento e transmissão), como acelerômetro e módulos transceptores, atuam em conjunto formando o nó-sensor para detectar as vibrações mecânicas do tubo e enviá-las, em forma de dados, ao computador terminal para tratamento de dados e geração do comportamento gráfico instantâneo. No capítulo seguinte será apresentado o sistema de medição proposto.

5 *Sistema Implementado e Análise de Resultados*

5.1 Introdução

Realizou-se as medições com um acelerômetro para aquisição das amplitudes dos sinais monitorados. Os sinais adquiridos são convertidos pelo conversor A/D do módulo transceptor e os dados digitalizados são enviados via rede sem fio para um computador, o qual, através de um *software* matemático específico, fará o tratamento dos dados recebidos para em seguida plotar em tela os gráficos correspondentes ao comportamento dos sinais obtidos. A detecção da incrustação será dada de forma direta, apenas observando o valor da amplitude do sinal coletado.

A técnica apresentada propõe a utilização do teste com o impacto do martelo para detectar incrustação em tubulações, com isso avalia-se as modificações nos sinais monitorados e verifica-se as modificações quando ocorrer a incrustação. A transmissão sem fio é feita via ZigBee, o que permite uma simples configuração para alcançar distâncias longas e com baixo consumo de energia. Os sinais podem ser enviados com segurança e confiabilidade.

5.2 Sistema de Medição

Nesta técnica, um detector de incrustação é baseado em um sistema de excitação, utilizando o teste do martelo para provocar vibrações mecânicas na tubulação sob teste, em um sistema com um acelerômetro para capturar a assinatura de ressonância da estrutura [22]. Pode-se observar na Figura 11 o sistema final proposto para esse trabalho, uma rede de sensores monitorando a tubulação sob teste do impacto do martelo.

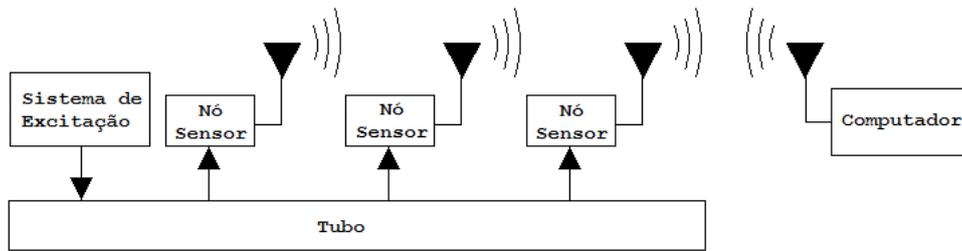


Figura 11: Diagrama de blocos do sistema de medição utilizando análise de vibrações e transmissão via rede sem fio ZigBee.

A representação do sistema de excitação, composto por uma fonte de alimentação, um gerador de PWM e o martelo magnético, e do nó-sensor, formado pelo acelerômetro, circuito de condicionamento e transceptor ZigBee, pode ser observado nas Figuras 12 e 13 respectivamente.

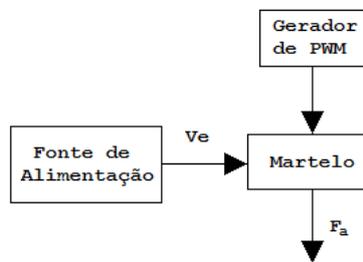


Figura 12: Diagrama de blocos da representação do sistema de excitação.

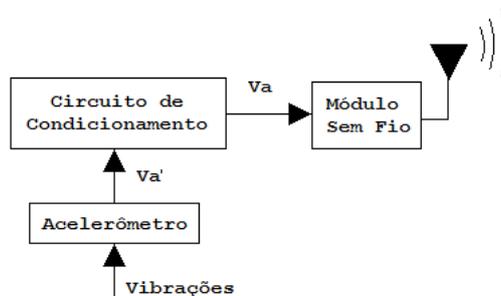


Figura 13: Diagrama de blocos da representação do sistema de aquisição.

Na Figura 14 apresenta-se um diagrama da topologia utilizada com esta técnica. Um sistema de excitação é utilizado para gerar as vibrações na tubulação e um sistema de detecção com uma rede de nós-sensores para condicionamento do sinal é utilizado para capturar os parâmetros da vibração. Os sinais obtidos são digitalizados e enviados via comunicação sem fio pelos módulos ao computador o qual os processa e exibe em tela o comportamento das vibrações.

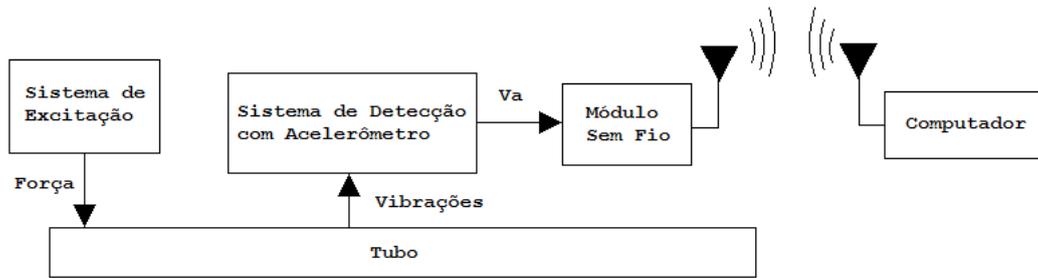


Figura 14: Diagrama de blocos do sistema de medição utilizando análise de vibrações e transmissão via rede sem fio ZigBee apenas com um nó-sensor.

Para excitação do martelo, é aplicado um sinal PWM com um *duty cycle* de 20%, ajustado para uma frequência de 1 Hz e amplitude de 5 V, a representação deste sinal pode ser observada na Figura 15.

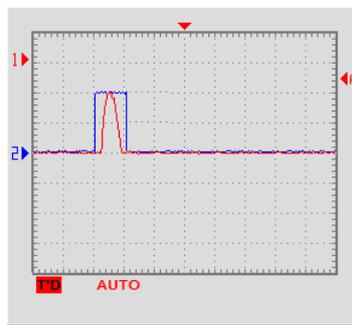


Figura 15: Representação do sinal de excitação e a resposta do martelo de impacto.

Essas características do sinal de excitação são assim definidas a fim de evitar que haja sobreposição das ondas vibracionais, acarretando numa medição errônea da vibração do tubo. Por isso, o sinal de excitação deve possuir pulsos igualmente espaçados de modo que a vibração $n+1$ não seja influenciada pela vibração da onda n ; o ciclo de trabalho deve possuir uma largura satisfatória que garanta o tempo mínimo de excitação do martelo sem consumir muita energia; e a amplitude garanta a passagem de uma corrente elétrica que gere um campo magnético B tal que o impacto seja forte o suficiente para produzir vibrações no tubo. Os sinais da saída monitoradas com o acelerômetro são enviados ao computador pelos transceptores ZigBee para processamento de dados no MatLab, permitindo uma análise da presença ou não de incrustação.

Com o auxílio do osciloscópio, observa-se o comportamento do martelo após aplicado o pulso, e verifica-se que esta largura é suficiente e satisfatória para obtenção do golpe do martelo. Na Figura 15, pode-se observar o pulso quadrado representando o sinal de excitação do martelo, bem como a sua resposta, a qual representa o sinal de saída V_a do acelerômetro. Cada impulso do sinal de excitação, implicará numa força F_a , aplicada pelo martelo à tubulação, com o valor aproximadamente de 0,8 N. Essa força será responsável pela vibração na tubulação, e de acordo com o nível da amplitude do sinal de tensão adquirido pelo acelerômetro nó-sensor, saber-se-á

se há incrustação.

5.3 Incrustação Absoluta e Relativa

Antes de iniciar os testes para detecção de incrustação, é preciso destacar dois termos: incrustação absoluta e incrustação relativa.

Para a incrustação absoluta é preciso obter a assinatura do tubo. Essa característica consiste em garantir a confiabilidade do sistema de medição, sem que haja confusão nos resultados, tratando-se de obter o nível de tensão da onda vibracional sem incrustação. Assim, esses testes devem ser realizados visando o alcance das vibrações e seus valores de amplitude para que não seja erroneamente confundido uma atenuação no valor da amplitude do sinal medido pela presença da incrustação com uma diminuição na amplitude do sinal medido oriunda da longa distância da fonte geradora de implusos e o sistema de medição.

Já para a incrustação relativa, não precisamos da assinatura do tubo. Esse novo sistema de medição, é baseado na medição simultânea em múltiplos pontos distintos na tubulação. Assim, os valores de amplitudes obtidos simultaneamente são comparados e observados se há atenuação entre eles, ou seja, um sinal será atenuado em relação ao outro, o que acarretaria a presença de incrustação. Vale destacar que para este caso, é possível obter valores de mesma amplitude em toda extensão do tubo o que levaria a concluir que não há incrustação na tubulação ou que a mesma se apresenta em toda a tubulação. Essa segunda alternativa pode ser descartada, salvo que o processo de incrustação não é contínuo e nem uniforme, descartando a possibilidade de haver uma amplitude constante do sinal adquirido devido a uma incrustação padrão em todo o tubo.

Vale ressaltar que a configuração de rede sem fio, para uma rede de nós-sensores no monitoramento, é para uma única região de medição, ou seja, dentro da margem confiável dos 85 cm de distância da origem da excitação. Para aumentar o alcance da rede, não basta apenas introduzir novos nós-sensores, é preciso também caracterizar as regiões de atuação desses novos nós, ou seja, colher a assinatura do tubo para esta nova região posicionamento dos sensores, no caso da detecção de incrustação absoluta, ou manter os nós dentro da região de confiança para comparação de seus valores adquiridos, no caso da detecção relativa. Assim, um tubo apresentará diversas assinaturas, cada qual variando em função das distâncias dos nós-sensores a origem das vibrações. Este fator é fácil de ser observado, já que a medida que a distância aumenta em relação a fonte vibracional, as amplitudes das ondas tendem a diminuir, devido a dispersão de energia da onda ao longo da tubulação. Portanto, quanto mais longe da origem, menor será a amplitude da vibração.

5.4 Detecção de Incrustação

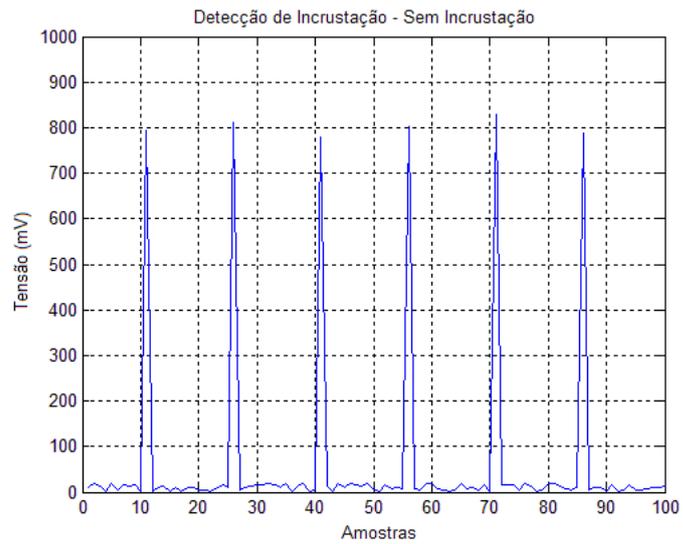
Os resultados foram obtidos em dois momentos: a rede de nó-sensor com apenas um nó, o qual foi o sistema inicial para testes e comprovação da teoria apresentada, e finalmente, a rede com três nós-sensores, os quais realizam aquisição simultânea em pontos distintos do tubo. Para a rede de múltiplos nós-sensores, a rotina de aquisição foi aperfeiçoada, exibindo os sinais em função do tempo e não mais do números de amostras como inicialmente.

5.4.1 Rede com um nó-sensor

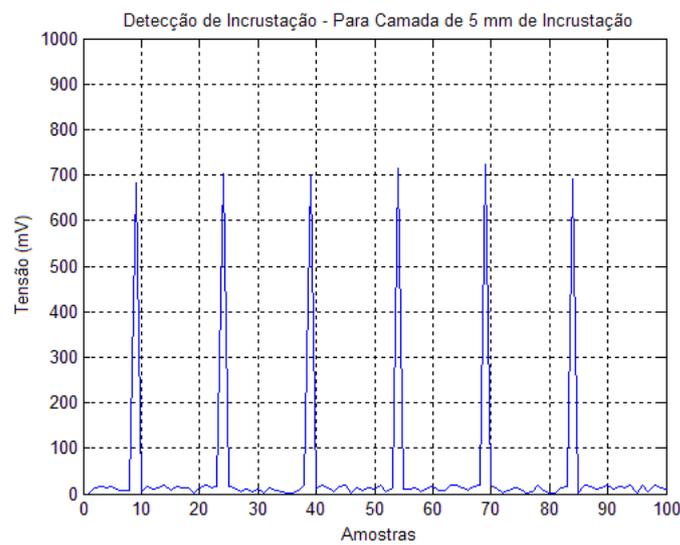
Esta configuração de rede permite, apenas, que se trabalhe com a detecção de incrustação absoluta, pois não há como comparar valores simultâneos, já que existe apenas um único nó-sensor.

A seguir, apresenta-se os resultados dos testes realizados para uma tubulação de 60 cm de comprimento que apresenta três níveis de incrustação: tubulação sem incrustação; com 5 mm de camada de incrustação; com 10 mm de camada de incrustação, uma vez que garantiu-se que a amplitude do sinal lido não será afetada pela distância do nó-sensor até a origem desde que esteja a menos de 85 cm.

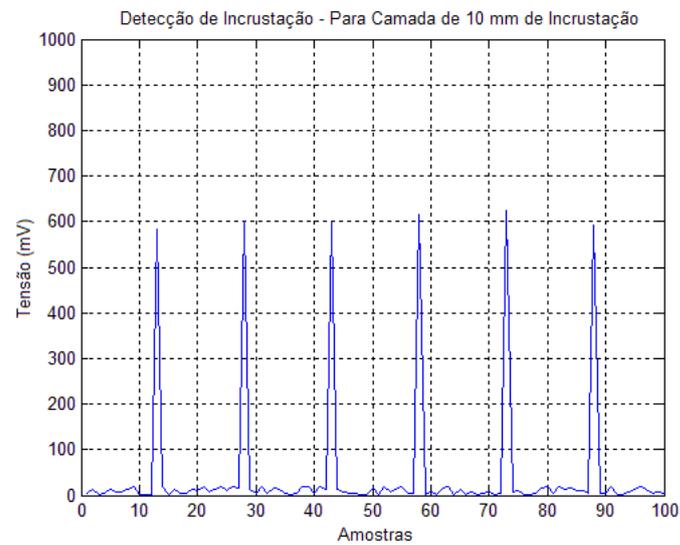
A medição foi realizada fixando-se no início da tubulação o martelo de impacto para gerar a vibração na tubulação, e as medições foram realizadas variando-se a posição do nó-sensor a cada 5 cm, de modo que a medição realizada pelo dispositivo cobre toda a tubulação de teste e passa pelas três camadas distintas do tubo: sem incrustação, com uma camada de 5 mm de incrustação e com uma camada de 10 mm de incrustação. O comportamento desses sinais é ilustrado nas Figuras 16a (na ausência de incrustação), 16b (espessura da camada de incrustação de 5 mm) e 16c (espessura da camada de incrustação de 10 mm).



(a)



(b)



(c)

Figura 16: Representação dos sinais de saída monitorados pelo acelerômetro para uma rede com um nó-sensor: (a) sem incrustação; (b) com camada de incrustação de 5 mm; (c) com camada de incrustação de 10 mm.

Normalmente, o sinal de resposta do acelerômetro apresenta 800 mV de pico, ou seja, essa é a amplitude máxima obtida para a tubulação sem incrustação através da excitação do martelo. Essa característica é chamada de assinatura do tubo, e o indício de sua diminuição representa a presença de uma camada de incrustação. Como a amplitude é afetada pela presença da camada de incrustação, com o aumento da espessura desta camada, a amplitude do sinal torna-se a característica mais importante, decaindo para, aproximadamente, um valor de 700 e 600 mV de pico para 5 mm e 10 mm de espessura de incrustações, respectivamente.

Os sinais representados na Figura 16, são amostras das leituras obtidas na tela do computador. O comportamento dessas leituras foram validados com o auxílio de um osciloscópio devido a ambas leituras apresentarem mesmo comportamento e valores bastante próximos. Na Figura 17, pode-se observar o valor médio do conjunto de 1000 amostras do comportamento das amplitudes dos sinais coletados em função da espessura da camada de resina [9].

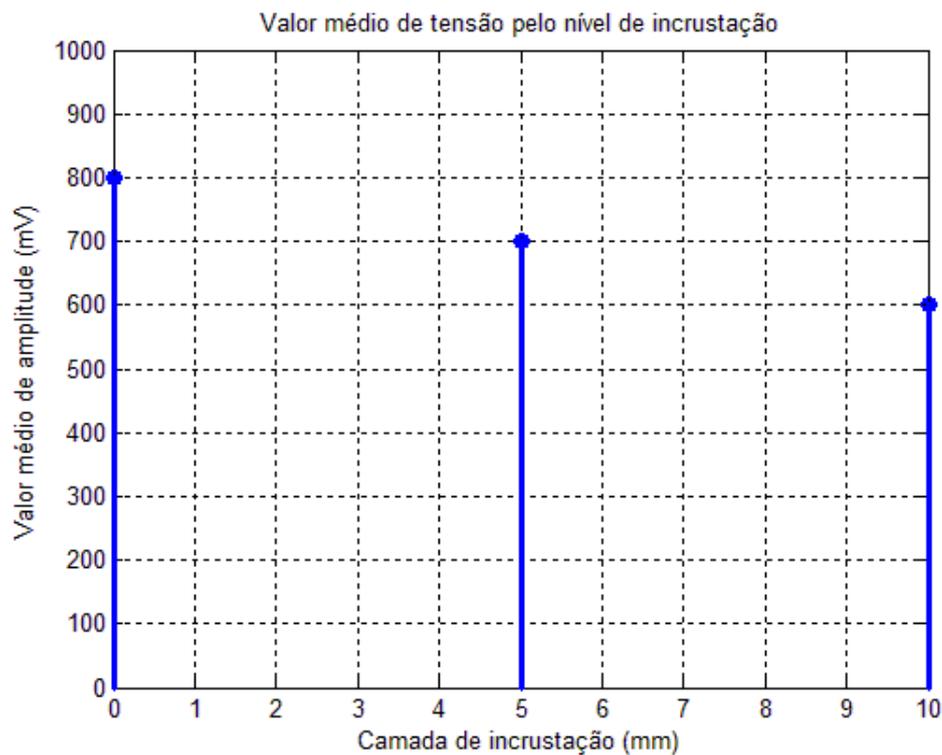


Figura 17: Representação do valor médio dos sinais adquiridos em função da camada de resina.

Do gráfico representado pela Figura 17, pode-se tirar uma equação da reta que passa pelos valores dos pontos médios, a Equação 5.1:

$$V_a(e) = -20e + 800 \quad (5.1)$$

Em que V_a é a amplitude da vibração adquirida pelo circuito de condicionamento com o acelerômetro e e representa a espessura da incrustação. Assim, pode-se determinar o valor de incrustação em função da amplitude obtida. Chega-se, então, a Equação 5.2:

$$e = -\frac{V_a(e)}{20} + 40 \quad (5.2)$$

Vale destacar que para que essa relação seja válida, o sistema deve atuar dentro da região de operação, uma faixa segura que garanta a validade dos testes. E também que esta equação é específica para a tubulação em questão, ou seja, a plataforma de testes utilizada e varia com a espessura e material do tubo utilizado. Lembra-se também que cada tubulação teria sua relação distinta, bem como sua assinatura. Assim, pode-se afirmar que para cada assinatura, ter-se-á uma relação diferente.

5.4.2 Rede com múltiplos nós-sensores

Os testes foram realizados na mesma tubulação e sob as mesmas condições que a rede anterior, porém, diferem quanto a aquisição. Por apresentar três nós-sensores que realizam aquisição simultânea, esta configuração de rede permite que se obtenha a incrustação absoluta ou relativa.

Entretanto, como agora se trata de uma rede com vários nós, é interessante introduzir um novo parâmetro de medição: o RSSI (*Receive Signal Strength Indication*). Como este parâmetro representa o nível de sinal de cada pacote recebido, é possível verificar a qualidade do canal de comunicação e a confiabilidade da transmissão do pacote.

Os módulos XBee enviam um *Byte* com o valor de RSSI em torno de -35 dBm, decaindo com o aumento da distância. Pode-se interpretar esse parâmetro de duas formas: o nível do sinal adquirido, ou a atenuação sofrida pelo mesmo. A seguir, é observado, não somente, os dados adquiridos, mas também o nível do sinal transmitido, possibilitando descartar os dados medidos e realizar novas aferições se necessário.

Todos os dados foram adquiridos durante um período de 60 s, esse parâmetro é ajustado na rotina de aquisição de dados e pode assumir qualquer valor múltiplo de 1 s. O comportamento dos sinais adquiridos pode ser observado na Figura 18:

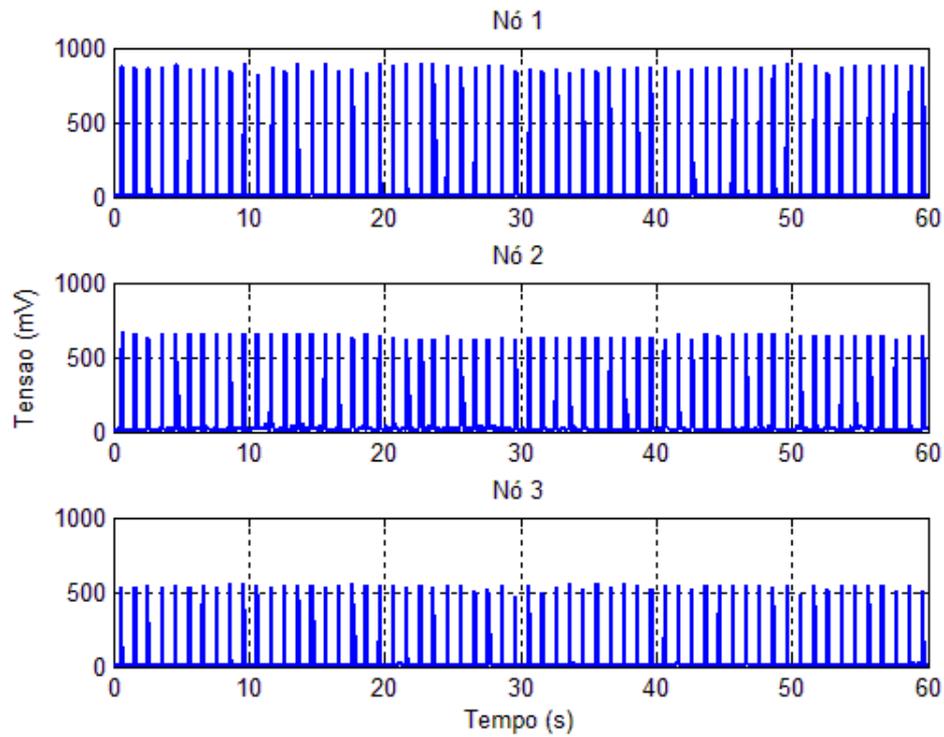
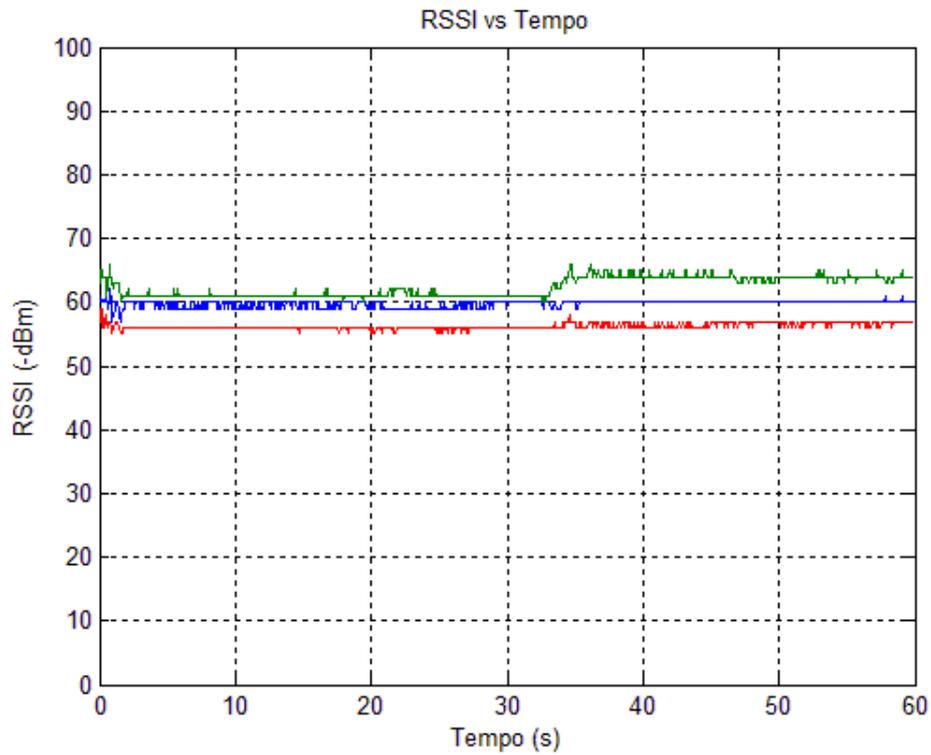


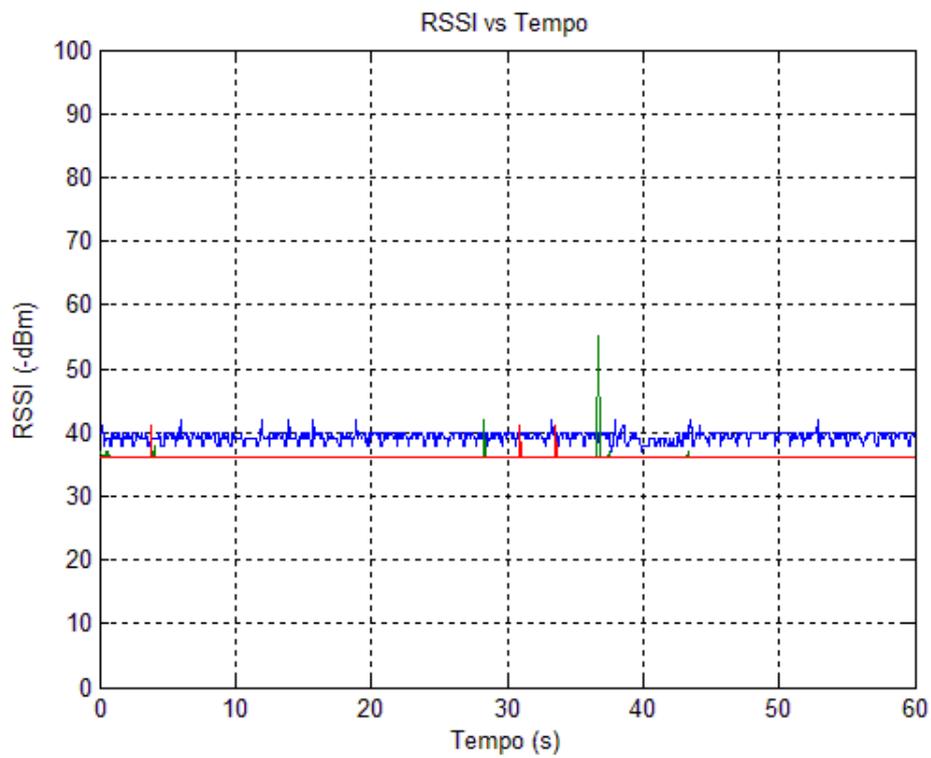
Figura 18: Representação dos sinais de saída monitorados pelos acelerômetros para uma rede com três nós-sensores.

Neste caso, o sinal de resposta do acelerômetro está em torno de 800 mV, ou seja, essa é a assinatura para a tubulação através da excitação do martelo. Como a amplitude é afetada pela presença da camada de incrustação, com o aumento da espessura desta camada, a amplitude do sinal torna-se a característica mais importante, decaindo para, aproximadamente, um valor de 700 mV e 500 mV de pico para 5 mm e 10 mm de espessura de incrustações, respectivamente.

Para os sinais adquiridos anteriormente, o nível do sinal RSSI obtido para duas distâncias distintas, longe (5 m) e perto (15 cm), pode ser visto na Figura 19.



(a)



(b)

Figura 19: Sinal RSSI para rede de nós-sensores com sinal de excitação do martelo com período 1s: (a) 5 m de distância (b) 15 cm de distância.

Nota-se que, de acordo com a Figura 19, quanto mais perto estiver o nó transmissor do receptor, menor será a atenuação como era de se esperar, já que ter-se-á menos perdas na transmissão do sinal. Porém, esses valores de atenuação não afetam na recepção do sinal, tão pouco em sua qualidade e confiabilidade.

Observa-se que os valores de pico observados na Figura 18 são aproximados, e que cada medição oscila em torno de um valor central para cada camada de incrustação. Esse comportamento pode ser atribuído as vibrações mecânicas do tubo, as quais afetam a medição seguinte de acordo com o fenômeno das sobreposições de ondas. Portanto, a fim de contornar esta situação, diminui-se frequência dos golpes do martelo na estrutura para que se permita uma recomposição vibracional da tubulação, evitando que oscilações secundárias afetem as próximas medições.

Os mesmos testes foram repetidos para frequências menores dos golpes do martelo. A seguir nas Figuras 20 e 21, tem-se ensaios para excitações com 2,5 s e 5 s o que corresponde as frequências de 400 mHz e 200 mHz respectivamente.

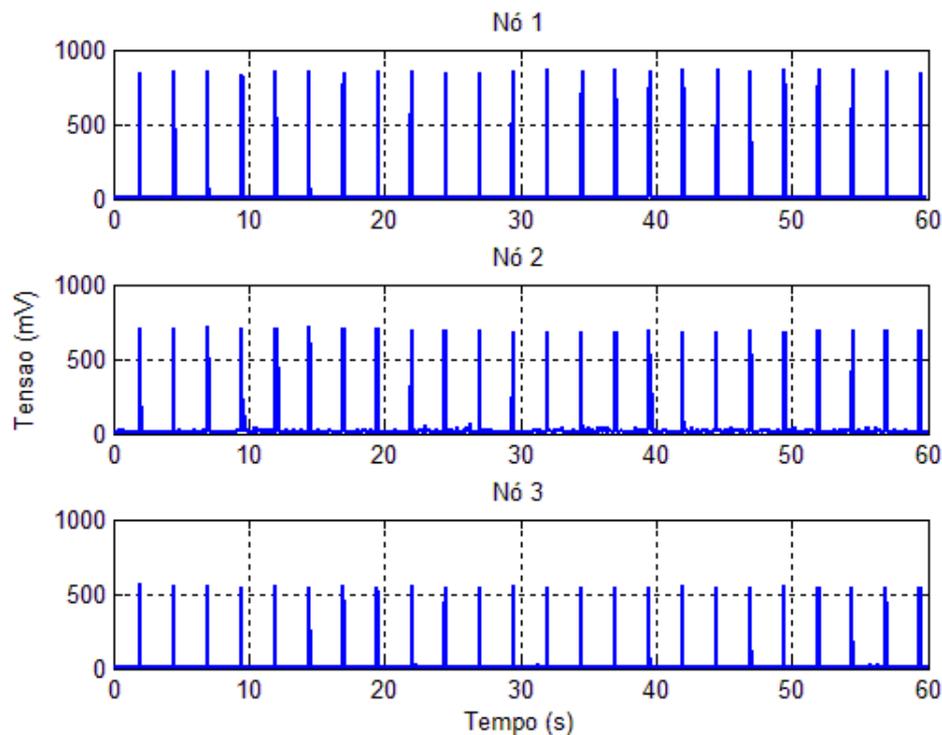


Figura 20: Representação dos sinais de saída monitorados pelos acelerômetros para uma rede com três nós-sensores e período 2,5 s.

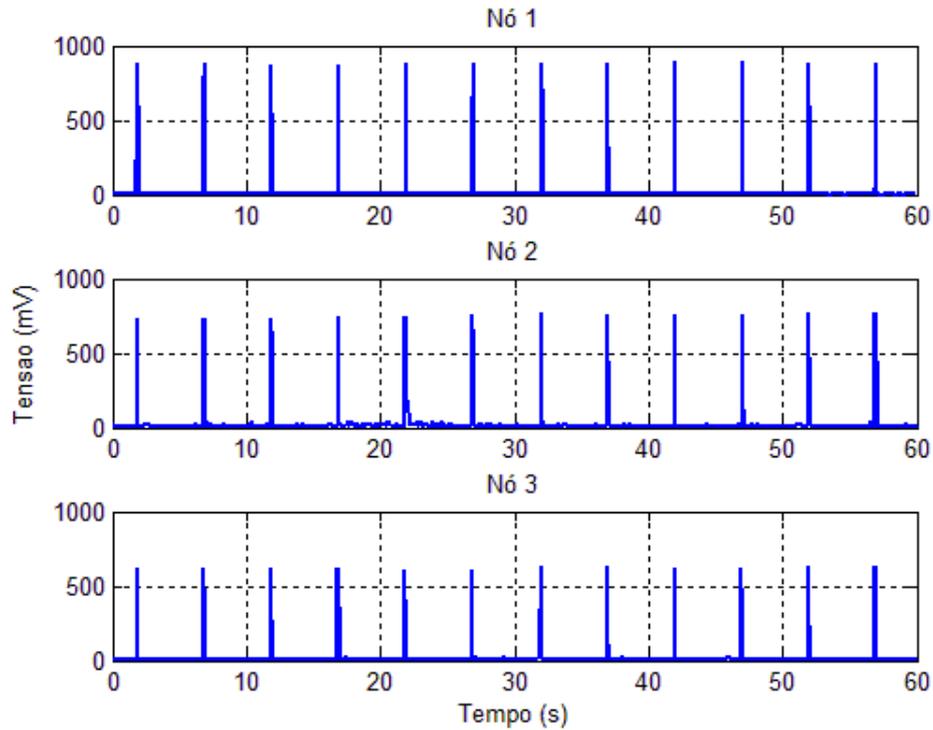
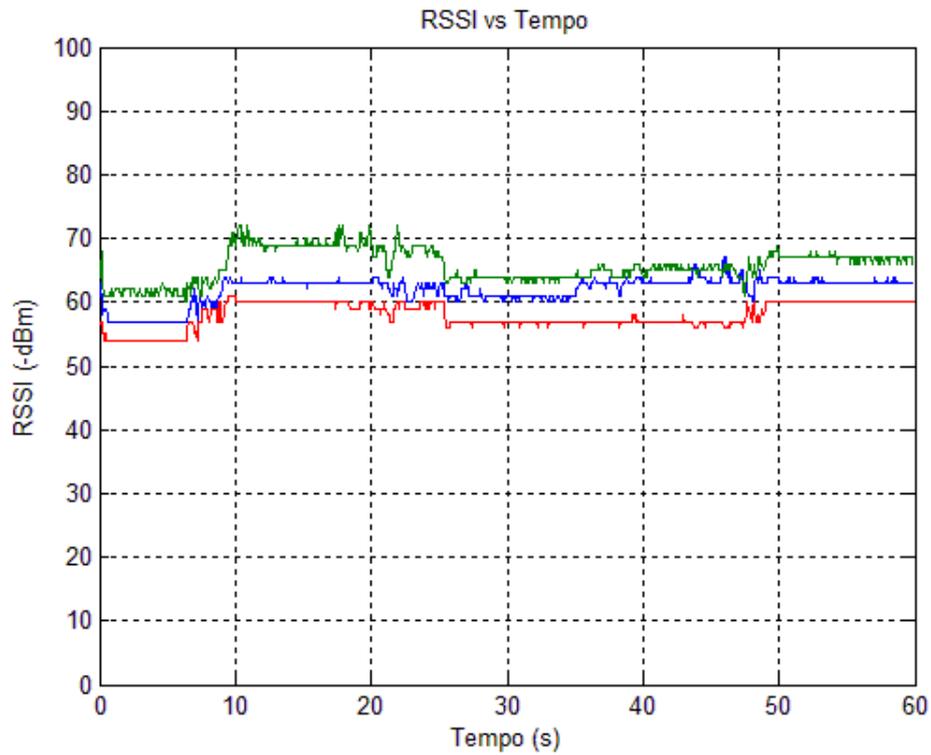


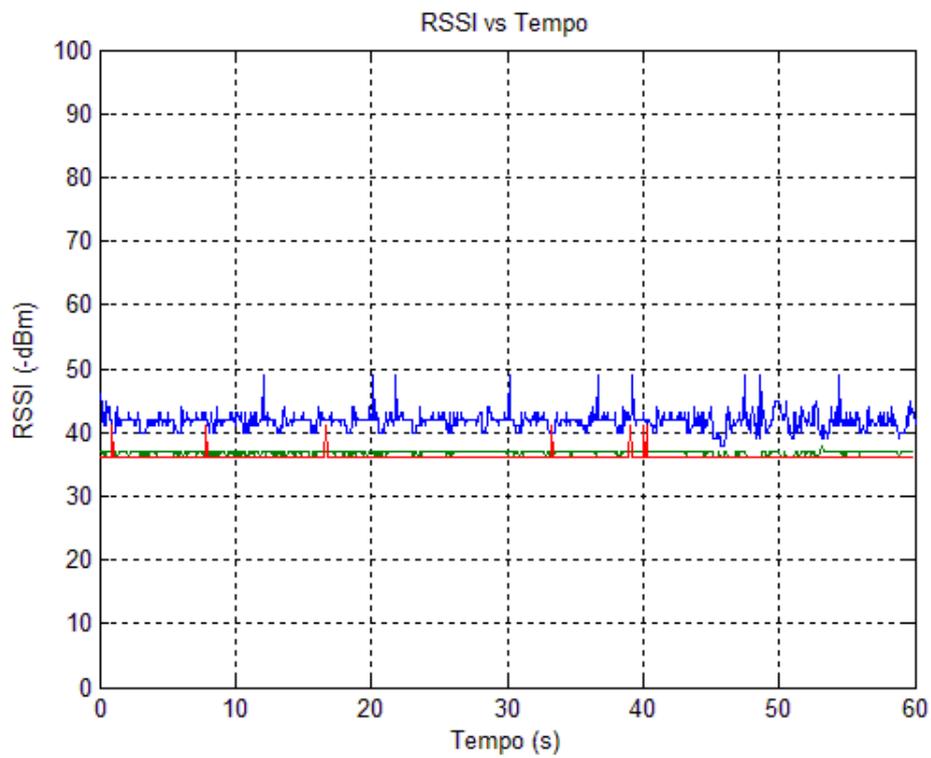
Figura 21: Representação dos sinais de saída monitorados pelos acelerômetros para uma rede com três nós-sensores e período 5 s.

Observa-se que a medida que se aumentou o espaçamento entre os pulsos, as oscilações das amplitudes dos sinais adquiridos diminuiu, concluindo-se que de fato as vibrações mecânicas oriundas de um golpe do martelo estavam influenciando nas vibrações resultantes do golpe seguinte, alterando o sinal medido por construção ou destruição da onda.

E para os ensaios passados com períodos de 2,5 s e 5 s, tem-se o comportamento do parâmetro RSSI que pode ser visto nas Figuras 22 e 23 respectivamente:

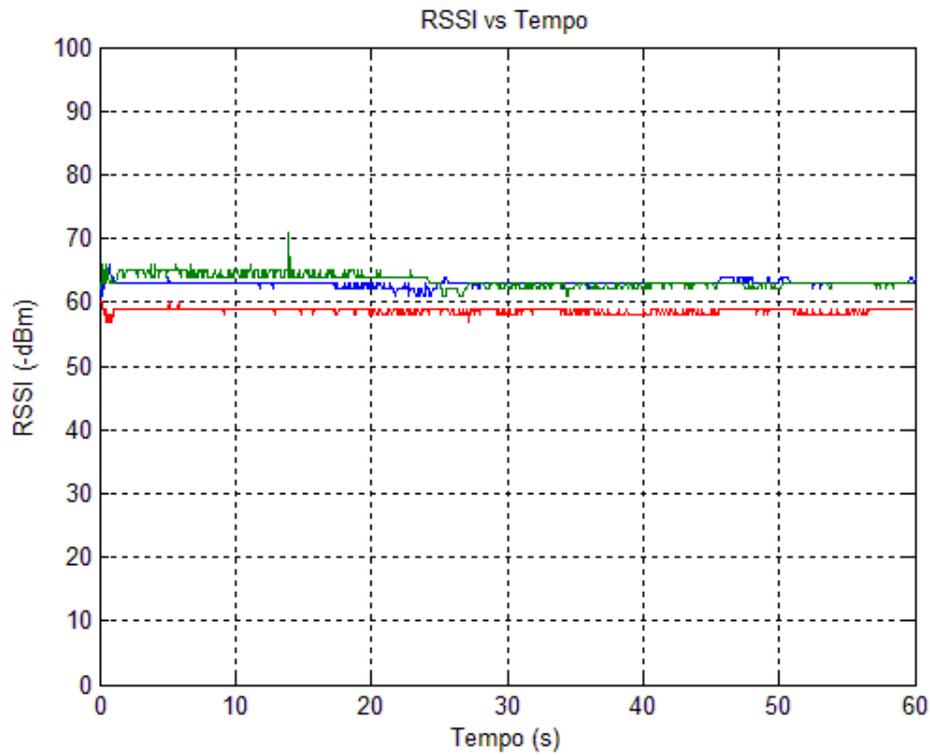


(a)

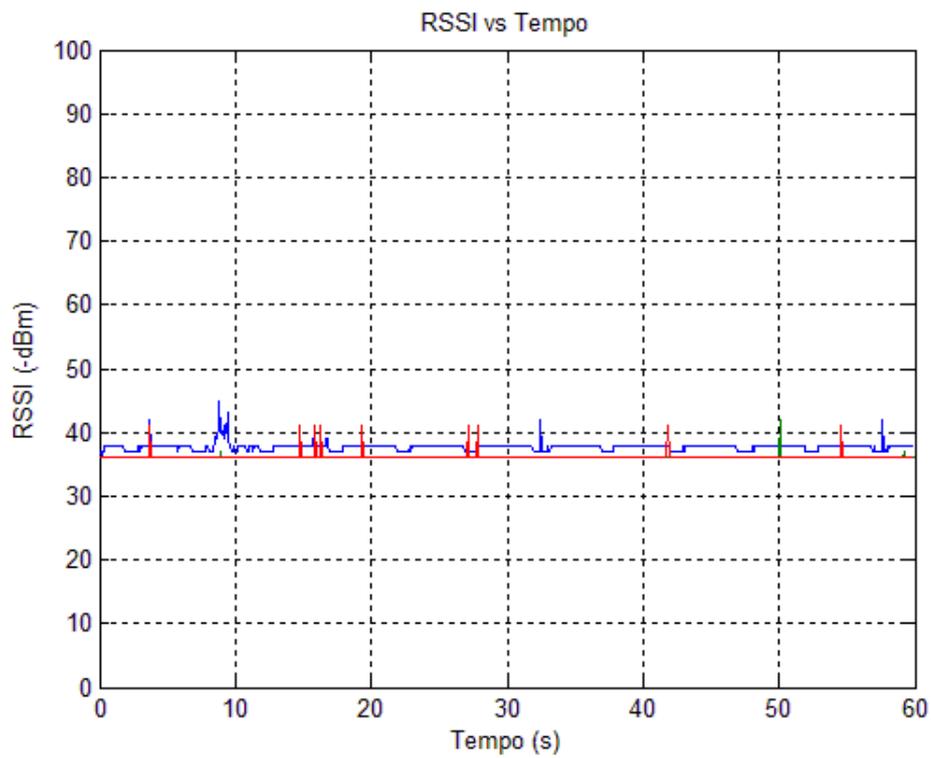


(b)

Figura 22: Sinal RSSI para rede de nós-sensores com sinal de excitação de período 2,5s: (a) 5 m de distância (b) 15 cm de distância.



(a)



(b)

Figura 23: Sinal RSSI para rede de nós-sensores com sinal de excitação de período 5s: (a) 5 m de distância (b) 15 cm de distância.

Observa-se que na Figura 22 (a), há uma pequena perturbação no meio, mas que não interfere no resultado final da aquisição dos dados.

Para todos os ensaios anteriores, obteve-se o mesmo comportamento do nível de tensão médio para a camada de incrustação. Esse comportamento pode ser observado na Figura 24 que segue:

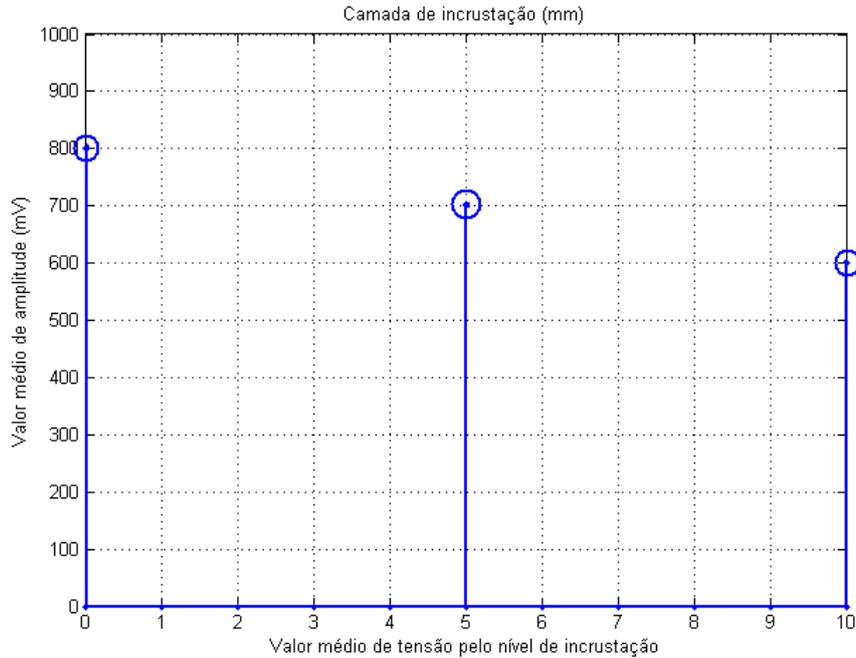


Figura 24: Representação do valor médio dos sinais adquiridos em função da camda de resina.

Sendo a média dos valores adquiridos em torno de 800 mV para a assinatura do tudo, determina-se a expressão do valor da espessura da incrustação e em função da resposta do acelerômetro $V_a(e)$, porém estes resultados variam em 5% do valor central resultando na Equação 5.3:

$$V_a(e) = -20e + 800 \pm 0,05.(-20e + 800) \quad (5.3)$$

O que leva a expressão da espessura dada pela Equação 5.4:

$$e = -\frac{V_a(e)}{20} + 40 \pm 0,05. \left(-\frac{V_a(e)}{20} + 40 \right) \quad (5.4)$$

Assim, corroboramos a nossa teoria e mostramos que as equações 5.3 e 5.4 são aproximações sensatas para os resultados anteriores dos ensaios prévios descritos pelas equações 5.1 e 5.2 respectivamente.

Neste caso, observa-se que o comportamento da incrustação relativa é o mesmo da absoluta.

Tal fato é dado porque os pontos utilizados para obtenção da incrustação relativa coincidem com o ponto referente a assinatura do tubo. Assim, ainda que não se conheça a assinatura da tubulação, é possível obter a incrustação absoluta, caso um dos pontos de comparação seja de uma localidade sem o material incrustante. Deve-se destacar que, independente de se utilizar a detecção de incrustação absoluta ou relativa, a expressão obtida será a mesma, desde que se mantenha o comportamento linear. Porém, esse comportamento linear se dá devido a uniformidade da incrustação produzida pela resina dentro dos tubos de testes. Na prática, a incrustação apresentará um comportamento irregular.

No entanto, medidas errôneas podem ocorrer mediante alterações no meio de transmissão. Seja pela perda de potência do sinal transmitido pelo nó-sensor ou pela presença de obstáculos de corpos extensos que absorvam energia do sinal transmitido, o sinal pode chegar bastante atenuado e comprometer a aferição realizada. Na Figura 25 pode ser visto uma medição realizada sob perturbação do meio. Neste caso, esta perturbação foi realizada isolando o nó-receptor por interferência humana, tentando bloquear o máximo possível a área de recepção da antena.

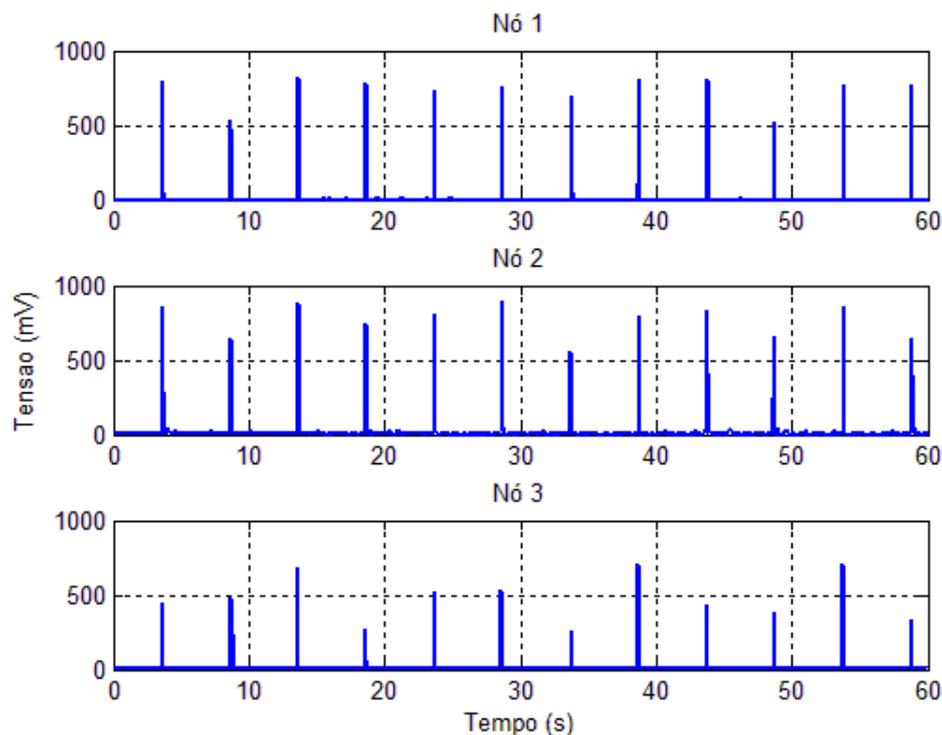


Figura 25: Medições de incrustação mediante perturbação do meio.

Para este sinal adquirido, o comportamento do RSSI pode ser visto na Figura 26:

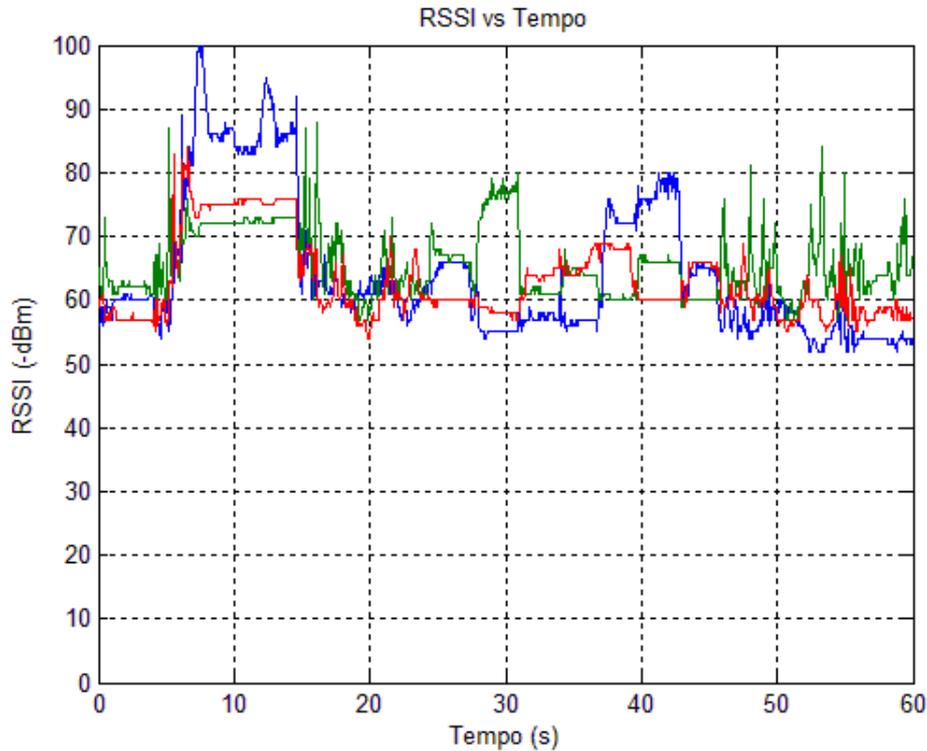


Figura 26: Comportamento do RSSI sob um meio perturbado.

Nota-se que devido ao alto valor de atenuação, o sinal no nó receptor está comprometido, tornando o canal de comunicação não confiável. Grandes perdas no meio de comunicação indicam que naquele instante a transmissão não está em boa qualidade, que há obstáculos refletindo, refratando ou absorvendo energia do sinal. Tal fato leva a suposição de que, em determinado momento, o sinal recebido está tão atenuado que pode não ser captado pelo nó-receptor, o que acarretaria em perda do pacote de dados. De fato, como pode ser observado em 25, os valores recebidos não são condizentes com os valores esperados e medidos anteriormente sob um meio em condições normais.

5.5 Conclusões

Neste capítulo apresentou-se a técnica utilizada para detecção de incrustação, o teste de impacto do martelo, mostrando ser uma técnica eficaz por detectar, até no máximo 85 cm de distância do nó-sensor a origem do impacto, através das vibrações mecânicas, a presença ou não da incrustação dentro da tubulação. Foram analisados os resultados obtidos através de ensaios dos testes com o impacto do martelo para dois tipos de rede: a inicial com apenas um nó sensor, e a final com três nós-sensores, ratificando a fundamentação teórica da possibilidade de detecção da incrustação, bem como o comportamento do sinal adquirido para cada nível de camada de incrustação. Observa-se que a amplitude do sinal obtido pela vibração mecânica é

função direta da força do impacto do martelo, e inversa com a distância do nó-sensor a origem das vibrações e presença da incrustação. É preciso ter cuidado ao analisar os valores obtidos para saber se uma atenuação na amplitude do sinal significa a presença de incrustação ou apenas uma longa distância da origem. Por isso, define-se regiões de operação segura, ou seja, regiões de operação do nó-sensor que garantam que os dados lidos não serão afetados pela distância e sim pela presença da falha. Essas regiões são obtidas através de ensaios prévios em tubulações limpas, de modo que garanta a assinatura do tubo para diversas distâncias a partir da origem.

6 *Considerações Finais*

O teste do impacto do martelo foi utilizado para detecção de incrustação em tubulações, avaliando a variação de amplitude dos sinais monitorados. Trata-se de uma técnica não-invasiva, que apresenta vantagem sobre as invasivas por não ter de interromper o processo de condução do fluido. Essa técnica permite avaliar o comportamento das vibrações no tubo utilizando um acelerômetro para aquisição de dados.

Observando a redução nas amplitudes dos sinais adquiridos, pode-se detectar a presença da incrustação, desde que se tome como referência a assinatura do tubo, ou seja, o valor máximo da amplitude do sinal de vibração na tubulação sem a incrustação. De tal forma, uma atenuação no valor do sinal, indicará a presença de uma camada de incrustação, que quanto maior for, menor será o valor máximo do sinal adquirido.

Introduziu-se o conceito de incrustação relativa, no qual baseia-se na detecção da incrustação sem a necessidade de saber previamente a assinatura da tubulação. Baseando-se apenas na comparação das amplitudes dos sinais adquiridos ao longo do tubo, tomando como base um dos próprios sinais (aquele de maior amplitude), esse conceito permite detectar a presença do material incrustante com um único ensaio dentro da região de operação.

A nova rede sem fio, composta por vários nós-sensores, atua simultaneamente na captação das vibrações mecânicas da tubulação em pontos distintos de regiões de atuação diferentes. O computador central trata cada nó de maneira diferenciada para que se saiba a que valor corresponde cada nó-sensor, pois os sinais enviados ao terminal possuem fases diferentes, não havendo colisão de informações. Assim, o sistema de medição implementado é portátil e apropriado para uma aplicação em campo.

Apesar do sistema de monitoramento ser portátil e de longo alcance, ainda se faz necessário um melhor tratamento e controle para o que martelo magnético tenha eficácia este permita em poucas repetições, ou numa única repetição, na varredura da tubulação completa.

Referências

- [1] S. J. Ahn and W. B. Jeong. *Improvement of Impulse Response Spectrum and its Application*. *Journal of Sound and Vibration*, 288:1223–1239, 2005.
- [2] E. Cam, M. Lei, I. Kicaarslan, and C. Taplamacioglu. *Defect Detection in a Cantilever Beam from Vibration Data*. Report, Kirikkale University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics., Kirikkale, 2002.
- [3] N. J. Carino. *The Impact-Echo Method: An Overview*. In *Proceedings of the 2001 Structures Congress and Exposition*, Washington, USA, May 2001.
- [4] P. Castelline, G. M. Revel, and L. Scalise. Measurement of vibrational modal parameters using laser pulse excitation techniques, volume 35. Elsevier - Measurement, 2004. pp.163-175.
- [5] Y. Champoux, V. Cotoni, B. Paillard, and O. Beslin. *Moment Excitation os Structures Using Two Synchronized Impact Hammers*. *Journal of Sound and Vibration*, 263, 2003. pp.515-533.
- [6] Digi. XBee/XBee-Pro ZB RF Modules. Digi International Inc., Minnetonka, MN 55343, 2010.
- [7] Halit Eren. *Wireless Sensors and Instruments Networks, Design, and Applications*. Taylor and Francis, Novembro 2005.
- [8] Thienne M. Johnson. *Redes de Sensores Sem Fio (RSSF): Uso de Comunicação sem fio*. http://www.wirelessbrasil.org/wirelessbr/colaboradores/thienne_johnson/rssf-intro.htm, Abril 2008.
- [9] L. C. Lemos Junior, J. M. R. Souza Neto, J. J. Silva, and J. S. Rocha Neto. *Fouling Detection using Hammer Impact Test and Wireless Communication*. In *IMTC 2011 - International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Binjiang, Hangzhou, China, May 2011.
- [10] L. C. Lemos Junior and J. S. Rocha Neto. *Sistema de Monitoramento de Temperatura Utilizando Redes de Sensores Sem Fio Com Tecnologia Bluetooth*. In *XXXVII Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia - COBENGE 2009*, Recife, Brasil, Setembro 2009. ABENGE - Associação Brasileira de Educação em Engenharia.
- [11] A. S. Krisher. *Technical Information Regarding Coupon Testing*. Technical report, ASK Associates, St. Louis, Missouri, 2003.
- [12] W. P. Lai and W. Fang. *Novel Bulk Acoustic Wave Hammer to Determinate the Dynamic Response of Microstructure Using Pulsed Broad Bandwidth Ultrasonic Transducers*. *Elsevier - Sensors and Actuators*, 96:43–52, 2002.
- [13] K. R. Lohr and J. L. Rose. *Ultrasonic Guided Wave and Acoustic Impact Methods for Pipe Fouling Detection*. *Journal of food engineering*, March 2002.

- [14] L. Majunder and C. S. Manohar. *A Time-Domain Approach for Damage Detection in Beam Structures Using Vibration Data With a Moving Oscillator as an Excitation Source*. *Journal of Sound and Vibration*, 268:699–717, 2004.
- [15] G. A. Mansoori. *Deposition and Fouling of Heavy Organic Oils and Other Compounds*. In *9th International Conference on Properties and Phase Equilibrium for Product and Process Design - PPEPPD 2001*, Kurashiki, Okayama, Japan, May 20-25 2001.
- [16] K. Mori, A. Spagnoli, Y. Murakami, G. Kondo, and I. Torigoe. *A New Non-Contacting Nondestructive Testing Method for Defect Detection in Concrete*. Elsevier Science, 2002.
- [17] C. B. Panchal. *Fouling Mitigation of Industrial Heat Exchange Equipment*. Technical report, Bengell House, New York, 1997.
- [18] S. Priyanto, G. A. Mansoori, and A. Suwono. *Structure and Properties of Micelles and Micelle Coacervates of Asphaltene Macromolecule*. In *Proceedings of AIChE Annual Meeting, Session 90*, 2001.
- [19] P. K. Roy and N. Canesan. *Transient Response of a Cantilever Beam Subject to an Impulse Load*. *Journal of Sound and Vibration*, 183:873–890, 1995.
- [20] M. H. H. Shen and C. Pierre. *Free vibrations of beams with a single-edge crack*. *Journal of Sound and Vibration*, 170, 1994. pp.237-259.
- [21] R. A. Sigwalt, C. O. R. Negrão, and P. C. Tonin. *Influência do Escoramento no Processo de Incrustação*. Seminário, Departamento de Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, PR, 2002.
- [22] J. J. Silva. *Desenvolvimento de Técnicas de Detecção de Incrustação Utilizando Métodos Não-Invasivos*. PhD thesis, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande, Paraíba, Brasil, Dezembro 2008.
- [23] J. J. Silva, A. M. N. Lima, F. H. Neff, and J. S. Rocha Neto. *Fouling Detection based on Vibration Analysis with the Hammer Impact Test*. In *IMTC 2007 - Instrumentation and Measurement Technology Conference Warsaw*, Poland, 2007.
- [24] J. K. Sinha, M. I. Friswell, and S. Edwards. *Simplified Models for the Location of Cracks in Beam Structures Using Measured Vibration Data*. *Journal of Sound and Vibration*, 251:13–38, 2002.
- [25] P. C. Tonin and C. O. R. Negrão. *Estudos Preliminares do Processo de Incrustação em Trocadores de Calor*. In *I Encontro dos Programas de Recursos Humanos em Petróleo e Gás Natural do Paraná*, Curitiba, PR, 2001. CEFET-PR and UFPR.

Aneros

Código utilizado para aquisição de dados

```

%Programa de Aquisicao de Dados

close all;

clear all;

clc;

s = serial('COM8','BaudRate',9600,'InputBufferSize', 1024); % Definição dos Prametros da
Porta serial

fopen(s);

TempoAmostragem = 60; %tempo em segundos

Cont1 = 1;

Cont2 = 1;

Cont3 = 1;

Tempo1(Cont1) = 0;

Tempo2(Cont2) = 0;

Tempo3(Cont3) = 0;

Tensao_1(Cont1) = 0.04;

Tensao_2(Cont2) = 0.04;

Tensao_3(Cont3) = 0.04;

Grafico = figure('Visible','off');

subplot(3,1,1);

Plot_Tensao_1 = plot(Tempo1,Tensao_1,'LineWidth',1.5,'Color',[0 0.78 1]);

grid on; axis([0 TempoAmostragem 0 1.5])

% ylim([min(0) max(3.5)]); % xlim([min(0) max(TempoAmostragem)]);

```

```

xlabel('Tempo (s)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 14, 'Color', 'black');
ylabel('Tensao (V)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 14, 'Color', 'black');
subplot(3,1,2);
Plot_Tensao_2 = plot(Tempo2, Tensao_2, 'LineWidth', 1.5, 'Color', [0 0.78 1]);
grid on;
axis([0 TempoAmostragem 0 1.5])
% ylim([min(0) max(3.5)]);
% xlim([min(0) max(TempoAmostragem)]);
xlabel('Tempo (s)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 14, 'Color', 'black');
ylabel('Tensao (V)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 14, 'Color', 'black');
subplot(3,1,3);
Plot_Tensao_3 = plot(Tempo3, Tensao_3, 'LineWidth', 1.5, 'Color', [0 0.78 1]);
grid on;
axis([0 TempoAmostragem 0 1.5])
% ylim([min(0) max(3.5)]);
% xlim([min(0) max(TempoAmostragem)]);
xlabel('Tempo (s)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 14, 'Color', 'black');
ylabel('Tensao (V)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 14, 'Color', 'black');
set(Grafico, 'Visible', 'on');
Time1 = clock;
Time2 = Time1;
while etime(Time2, Time1) <= TempoAmostragem
Time2 = clock;
dados = fread(s, 1);
if (dados == 126) %verificador do cabeçalho 7E do pacote de dados
dados = fread(s, 19); %captura do restante do pacote
valor = bitshift(dados(17), 8) + dados(18);

```

```

Tensao = 1000*(valor*3.3)/1024; % calculo da tensao em Volt
if (dados(11) == 163 && dados(3) == 130)
Tempo1(Cont1) = etime(Time2,Time1);
Tensao_1(Cont1) = Tensao;
rssi_1(Cont1) = dados(12);
fprintf('Valor de Tensao Lido no A/D0 = %.4f do No 1\n\n', Tensao_1(Cont1))
Cont1 = Cont1 + 1;
set(Plot_Tensao_1,'YData',Tensao_1,'XData',Tempo1);
drawnow;
elseif (dados(11) == 56 && dados(3) == 130)
Tempo2(Cont2) = etime(Time2,Time1);
Tensao_2(Cont2) = Tensao;
rssi_2(Cont2) = dados(12);
fprintf('Valor de Tensao Lido no A/D0 = %.4f do No 2\n\n', Tensao_2(Cont2))
Cont2 = Cont2 + 1;
set(Plot_Tensao_2,'YData',Tensao_2,'XData',Tempo2);
drawnow;
elseif (dados(11) == 67 && dados(3) == 130)
Tempo3(Cont3) = etime(Time2,Time1);
Tensao_3(Cont3) = Tensao;
rssi_3(Cont3) = dados(12);
fprintf('Valor de Tensao Lido no A/D0 = %.4f do No 3\n\n', Tensao_3(Cont3))
Cont3 = Cont3 + 1;
set(Plot_Tensao_3,'YData',Tensao_3,'XData',Tempo3);
drawnow;
end
end

```

```
end  
  
figure;  
  
plot(Tempo1, rssi_1, Tempo2, rssi_2, Tempo3, rssi_3); axis([0 TempoAmostragem 0 100])  
xlabel('Tempo (s)'); ylabel('RSSI (-dBm)'); title('RSSI vs Tempo');  
  
fclose(s);  
  
delete(s);  
  
clear s;
```