



Universidade Federal de Itajubá
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Desenvolvimento de Procedimentos de Auto- Teste em Sensores de Vazão Eletromagnéticos

Rafael Vivarelli Molina

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Itajubá como
requisito parcial para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni

Itajubá, Fevereiro de 2008.

Dedicatória

*À minha família,
a razão de eu estar aqui,
sobretudo meus pais, José Luiz e Ana Paula
meus irmãos, Leandro, Ana Carolina e Ana Flávia
minha namorada, Luciane.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, Senhor de todas as coisas. Por ter me dado todas as forças necessárias para cumprir essa tarefa, e por me dar a certeza de que terei forças para cumprir a todas as tarefas que Ele me propuser.

Ao meu professor e amigo Professor Doutor Edson da Costa Bortoni, pela orientação e por me ensinar a resolver os problemas da forma mais simples possível, mesmo quando aparentemente insolúveis e pelas palavras de sabedoria que pôde compartilhar comigo.

À minha família, que sempre me ofereceu suporte e auxílio, mesmo sem entender a fundo o que eu estava me propondo a fazer.

Aos amigos Marco Antonio Conti Craveiro e Renato Takahashi, com quem tenho convivido nos últimos 2 anos diariamente, pela ajuda direta e indireta no trabalho e fora dele.

Aos amigos Denis de Carvalho Braga, e Liverson Batista da Cruz, pelas idéias e sugestão que certamente influenciaram no resultado deste trabalho.

Aos alunos da graduação e amigos Felipe Camocardi e Anderson Pereira Alves, que me ajudaram na confecção de placas de circuito impresso e do protótipo, e pela experiência de orientá-los.

Ao professor Augusto Nelson Carvalho Viana, pela boa vontade e disposição em me ajudar, emprestando um medidor eletromagnético pelo qual iniciei o trabalho, e sem o qual nada disso teria realizado.

Aos professores José Alberto Ferreira Filho, Carlos Alberto Murari Pinheiro, Paulo César Rosa, Ênio Roberto Ribeiro, por terem me emprestado materiais e equipamentos que me ajudaram na realização dos trabalhos.

Aos funcionários Osvaldo, Júlio, Luan, Adriano, Vandir, Luiz Antonio, Getúlio, Túlio e Graça, a quem muito incomodei nesses últimos 2 anos, em razão da realização deste trabalho.

Tudo posso Naquele que me fortalece.

Fp 4:13

Resumo

MOLINA, R. V. (2008), *Desenvolvimento de procedimentos de auto teste em sensores de vazão eletromagnéticos*, Itajubá. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto de Sistemas e Tecnologia da Informação, Universidade Federal de Itajubá.

Os medidores eletromagnéticos correspondem a grande parte dos medidores de vazão utilizados na indústria atualmente. Isso devido ao fato de não possuírem partes mecânicas e poderem ser utilizados para diversos tipos de líquidos, bastando para isso que o mesmo seja condutivo. Entretanto, como o usuário não tem possibilidade de verificar o funcionamento de suas partes internas quando instalado, esse tipo de medidor geralmente requer manutenção periódica, para garantir o seu correto funcionamento, uma vez que não há possibilidade de verificar o seu funcionamento apenas pela indicação de vazão. Tal necessidade de manutenção pode ser traduzida como custo para os usuários. Pensando nessa necessidade de manutenção, alguns fabricantes estudiosos realizaram propostas de auto-testes em medidores eletromagnéticos. O presente trabalho apresenta as propostas encontradas na literatura e outras propostas pelo autor, e desenvolve métodos e meios para a realização de tais testes em laboratório. Para tanto, foi desenvolvido um protótipo de medidor eletromagnético de vazão totalmente funcional, e também foram desenvolvidos circuitos eletrônicos para o condicionamento dos sinais. Os sinais foram adquiridos e avaliados através de softwares de aquisição de dados (LabView®) e manipulação matemática (Matlab®). Os resultados dos ensaios são apresentados e discutidos, juntamente com novas propostas de trabalhos.

Palavras-chave

Medidor eletromagnético, medidas de vazão, auto-teste, auto diagnóstico, manutenção.

Abstract

MOLINA, R. V. (2008), *Development of self test procedures applied to electromagnetic flowmeters*, Itajubá. MSc. Dissertation - Instituto de Sistemas e Tecnologia da Informação, Universidade Federal de Itajubá.

The electromagnetic flowmeter (EMF) is widely applied for measuring fluid flowrate in industry, mainly due to the absence of moving parts and its successful application to many types of fluids, provided that the fluid has a minimum conductivity. However, it is not possible for the user to check its internal parts conditions under operation. Thus, this kind of flowmeter generally requires periodic maintenance in order to guarantee its correct operation, since it is not possible to infer its parts operating conditions based on the flow reading displayed at the instrument. Such need for periodical maintenance can be translated into costs to the users. In order to minimize such costs, some EMF manufacturers and some independent authors have been proposing self test routines to be implemented in EMF. This work presents and proposes some self test routines, suggesting how these tests should be carried in practice as well. A fully functional EMF prototype was developed, along with signal conditioning circuits. The signal was acquired and manipulated using the LabView® and Matlab® softwares. The results of the tests are presented and discussed, along with further work proposals.

Keywords

Electromagnetic Flowmeter, EMF, flow metering, self test, self diagnostics, maintenance

Sumário

DEDICATÓRIA	II
AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	VI
SUMÁRIO	VIII
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XV
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 Contextualização do trabalho	1
1.1.1 Importância da medição de vazão	1
1.1.2 Inserção do medidor eletromagnético de vazão	2
1.1.3 Índices de confiabilidade e manutenibilidade	3
1.1.4 Auto-teste	8
1.2 Conteúdo da dissertação	8
CAPÍTULO 2	10
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1 Revisão bibliográfica	10
2.2 Teoria e Princípio de funcionamento	22
CAPÍTULO 3	26
PROCEDIMENTOS DE AUTO-TESTE EM MEDIDORES ELETROMAGNÉTICOS DE VAZÃO	26
3.1 Fontes de incertezas	26

3.2 Propostas de auto-teste-----	28
3.2.1 Detecção de bolhas de gás ou sólidos suspensos-----	28
3.2.2 Monitoração do potencial dos eletrodos-----	29
3.2.3 Limpeza dos eletrodos-----	30
3.2.4 Condutividade do líquido de processo-----	32
3.2.5 Tubo parcialmente cheio e deformação do revestimento interno-----	33
3.2.6 Temperatura das bobinas de campo-----	35
3.2.7 Linearidade do conversor de sinais e influência de campos magnéticos externos-----	36
3.3 Transmissão das informações-----	37
CAPÍTULO 4 _____	38
IMPLEMENTAÇÃO DE ROTINAS DE AUTO-TESTE _____	38
4.1 Metodologia de testes-----	38
4.2 Arranjo Experimental-----	43
4.2.1 Bancada de Testes-----	43
4.3 Construção do protótipo-----	45
4.3.1 Tubo de medição-----	45
4.3.2 Eletrodos-----	45
4.3.3 Bobinas-----	47
4.3.4 Anéis de aterramento-----	48
4.3.5 Conversor de sinais-----	49
4.4 Testes no protótipo-----	50
4.5 Implementação de rotinas de auto-teste-----	54
4.5.1 Detecção de bolhas de gás ou sólidos suspensos-----	54
4.5.2 Monitoração do potencial dos eletrodos-----	62
4.5.3 Deficiência de aterramento-----	68
4.5.4 Condutividade do líquido de processo-----	72
4.5.5 Tubo parcialmente cheio e deformação do revestimento interno-----	75
4.5.6 Temperatura das bobinas de campo-----	80
4.5.7 Linearidade do conversor de sinais e influência de campos magnéticos externos-----	83
CAPÍTULO 5 _____	97
CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS _____	97
5.1 Conclusões-----	97
5.2 Propostas de desenvolvimentos Futuros-----	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____	101

	x
APÊNDICE _____	104
EQUIPAMENTOS UTILIZADOS _____	104

Lista de Figuras

Figura 1 – Distribuição do uso de medidores de vazão segundo o princípio de medição (Bortoni, 2006).-----	2
Figura 2 - Onde as empresas gastam seus recursos em manutenção (Walker, 2001)-----	5
Figura 3 – Custos relativos de manutenção corretiva, preventiva e preditiva (Walker, 2001)--	5
Figura 4 – Medidor eletromagnético com defeito devido a instalação incorreta -----	6
Figura 5 – Medidor eletromagnético com defeito devido a instalação incorreta (corrosão do material de revestimento interno do tubo)-----	6
Figura 6 – Medidor eletromagnético com defeito devido a especificação incorreta (corrosão dos eletrodos) -----	7
Figura 7 – Eletrodos corroídos-----	7
Figura 8 - Medidor eletromagnético (Williams, 1962)-----	12
Figura 9 - Medidor eletromagnético Kolin (Shercliff, 1962).-----	13
Figura 10 - Medidor eletromagnético de fluxo radial (Shercliff, 1962).-----	14
Figura 11 – Diferentes divisões da seção transversal do tubo (Lim & Chung, 1998) -----	15
Figura 12 - Arranjo experimental com bobinas de Helmholtz (Polo et alii, 2002)-----	18
Figura 13 - Circuito para demodulação (Polo et alii, 2002) -----	19
Figura 14 – Diagrama de blocos de medidor (Görgényi el alii, 2005) -----	20
Figura 15 - Função peso de acordo com Shercliff (Hofmann, 2003)-----	23
Figura 16 - Medidor eletromagnético de vazão (Hofmann, 2003)-----	24
Figura 17 - Método para detecção de ruído (Incontri, 2005) -----	29
Figura 18 - Circuito de limpeza dos eletrodos (Walker, 2001)-----	31
Figura 19 – Medição de resistência de eletrodos/resistividade do líquido -----	33
Figura 20 - Inversão dos campos gerados pelas bobinas. -----	34
Figura 21 - Teste de linearidade do conversor de sinais (Incontri, 2005)-----	36
Figura 22 – Medidor comercial utilizado para aquisição de primeiros sinais -----	39

Figura 23 - Circuito de amplificação do sinal do eletrodo-----	40
Figura 24 – Circuitos pré-amplificadores montados-----	40
Figura 25 – Corrente na bobina x tensão amplificada dos eletrodos (1) -----	41
Figura 26 – Corrente na bobina x tensão amplificada dos eletrodos (2) -----	41
Figura 27 – Tensão nos eletrodos com vazão nula -----	42
Figura 28 – Dados a serem desconsiderados (hachurados) na análise dos sinais aquisitados -----	43
Figura 29 – Bancada utilizada nos ensaios -----	44
Figura 30 – Dimensões da bancada utilizada nos ensaios (em mm)-----	44
Figura 31 – Fluxo magnético sobre o circuito dos eletrodos -----	46
Figura 32 – Eletrodos do protótipo (destaque)-----	47
Figura 33 – Bobina confeccionada para o protótipo-----	48
Figura 34 – Detalhe de anel de aterramento-----	49
Figura 35 – Arquitetura utilizada para aquisição do sinal de tensão dos eletrodos -----	50
Figura 36 – Sinal amplificado dos eletrodos com excitação da bobina em 10Hz -----	51
Figura 37 – FFT do sinal coletado nos eletrodos com excitação da bobina em 10Hz -----	51
Figura 38 – Diferentes ligações dos fios de sinal ao sistema de aquisição (Michalski, 2006). 53	
Figura 39 – Relação Vazão X Sinal dos eletrodos-----	53
Figura 40 – Orifício para inserção de bolhas na tubulação (destaque) -----	55
Figura 41 - Tensão dos eletrodos (azul) e corrente nas bobinas (verde) durante teste de detecção de bolhas na tubulação-----	55
Figura 42 – Sinais das bobinas (azul escuro) e eletrodos (verde), juntamente com o sinal criado (vermelho) para verificação e o sinal resultante (azul claro). -----	56
Figura 43 – Soma dos valores em cada período do sinal resultante -----	57
Figura 44 – Valor RMS do sinal resultante em cada período -----	57
Figura 45 – FFT com os pontos de 1 a 20.000 do sinal dos eletrodos (antes da inserção de bolhas na tubulação).-----	59
Figura 46 – FFT com os pontos 30.000 a 50.000 da tensão dos eletrodos (bolhas de ar presentes na tubulação). -----	59
Figura 47 – Principais freqüências e diferenças para os sinais com e sem bolhas -----	61
Figura 48 – FFT com os pontos 220.000 a 230.000 da tensão dos eletrodos (interrupção do fluxo de bolhas na tubulação). -----	62
Figura 49 – Ligação para monitoramento do potencial dos eletrodos -----	63
Figura 50 – Vista do medidor, frontal em relação ao fluxo-----	63
Figura 51 – Tensão nos eletrodos para condição normal de funcionamento.-----	64

Figura 52 – Tensão nos eletrodos para falha de aterramento. -----	65
Figura 53 – FFT do sinal antes e após a desconexão do aterramento (Eletrodo 1) .-----	65
Figura 54 – (a)Tensão no eletrodo 1. (b) Tensão no eletrodo 2. -----	66
Figura 55 – (a)Tensão no eletrodo 1. (b) Tensão no eletrodo 2. -----	67
Figura 56 – Tensão nos eletrodos para curto circuito da bobina com o eletrodo 1.-----	67
Figura 57 – Aterramento do medidor eletromagnético de vazão para tubulações não metálicas.	69
Figura 58 – Tensão nos eletrodos (azul) e corrente nas bobinas (verde)-----	69
Figura 59- FFT da tensão nos eletrodos com os dados exibidos na figura 58 -----	70
Figura 60 – Tensão dos eletrodos com terra desconectado do medidor (azul) -----	70
Figura 61 – FFT da tensão dos eletrodos para terra desconectado, com destaque para as componentes em 60 e 180Hz-----	71
Figura 62 – Arranjo para teste de condutividade do líquido de processo/eletrodos.-----	72
Figura 63 – Diferentes condutividades do liquido de processo.-----	73
Figura 64 – Ensaio de resistência para condição normal e para eletrodo parcialmente recoberto	74
Figura 65 – Teste inicial sem obstáculos à vazão-----	77
Figura 66 – Estruturas utilizadas para distorcer o perfil de velocidades -----	78
Figura 67 – Diferentes configurações de obstáculos ensaiadas -----	78
Figura 68 – Sinal aquisitado para obstáculo em meia-lua na horizontal -----	79
Figura 69 – Sinal aquisitado para obstáculo em meia-lua na vertical -----	79
Figura 70 – Sinal aquisitado para obstáculo com orifício central-----	80
Figura 71 – Medição da resistência x temperatura -----	81
Figura 72 – Temperatura medida e temperatura calculada -----	83
Figura 73 – Tensão nos eletrodos (azul) e corrente nas bobinas (verde) para vazão constante e variação da corrente nas bobinas -----	85
Figura 74 – Vazão nos diferentes intervalos, corrigidas com o fator de correção (azul) e erros relativos em cada uma das seções (barras).-----	87
Figura 75 – Sinal aquisitado para referência nos ensaios de interferências de campos magnéticos externos. -----	88
Figura 76 – Interferência causada pelo campo magnético externo ao protótipo -----	89
Figura 77 – Interferência causada pelo campo magnético externo ao protótipo -----	90
Figura 78 – Bobina de interferência colocada sobre o protótipo-----	91
Figura 79 – Testes realizados com a bobina de interferência-----	92
Figura 80 – Destaque para momento em que a bobina de interferência (verde) é acionada em 100Hz-----	93

Figura 81 – Diferenças entre componentes do sinal dos eletrodos para os diferentes períodos94

Figura 82 – Ensaio de interferência realizado com as bobinas ligadas invertidas-----95

Figura 83 – Detalhe do sinal antes e após interferências-----95

Figura 84 – Comparação entre frequências componentes -----96

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Relação entre vazões e tensões nos eletrodos para o protótipo -----	52
Tabela 2 – Comparação entre principais frequências para sinal sem bolhas de ar e sinal com bolhas de ar -----	60
Tabela 3 – Resistências medidas durante os testes -----	73
Tabela 4 – Resistência antes e após deposição de camada isolante sobre um dos eletrodos---	75
Tabela 5 – Valores RMS da tensão dos eletrodos e corrente nas bobinas para as diferentes seções do ensaio, com vazão constante -----	86
Tabela 6 – Principais componentes da tensão dos eletrodos -----	93
Tabela 7 – Resumo de principais causas e resultados -----	99
Tabela 8 – Dados do medidor eletromagnético comercial -----	104
Tabela 9 – Dados do sistema de aquisição de dados -----	105
Tabela 10 – Dados do osciloscópio -----	105
Tabela 11 – Dados do gerador de funções-----	106
Tabela 12 – Dados do termômetro de contato-----	106
Tabela 13 – Dados do condutivímetro -----	106
Tabela 14 – Dados da balança -----	106
Tabela 15 – Dados do multímetro -----	107

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO

1.1.1 Importância da medição de vazão

De acordo com relatos históricos, as primeiras medições de vazão de água foram realizadas pelos egípcios e romanos em torno de 2000 a.C., cujas obras de adução de água ficaram famosas. Em 90 d.C., o governador e engenheiro romano Julius Frontinus (30 - 103 d.C.) faz referências precisas sobre o uso de medidores de vazão (Mecatrônica, 2005). Primariamente, a medição de vazão era utilizada como um parâmetro operacional, ou seja, um dado a ser utilizado na operação dos sistemas hidráulicos, para abastecimento em redes hidráulicas, e para dosagem de produtos químicos. A exatidão da medição de vazão não era fator determinante (em que exatidão é o grau de concordância entre o resultado de medição e o valor verdadeiro convencional da grandeza medida).

Com o surgimento e expansão de processos de produção em larga escala, houve também um aumento na importância da medição de vazão, até os dias de hoje, em que os medidores de vazão muitas vezes possuem papel fundamental sobre a receita e a produtividade da empresa, principalmente nos setores de papel e celulose, alimentício, químico, água e esgoto, entre

outros. Dessa forma, a medição de vazão tornou-se uma das tarefas mais importantes nesses e em outros processos.

1.1.2 Inserção do medidor eletromagnético de vazão

Os métodos de medição de vazão são os mais variados, cada qual com princípios de funcionamento específicos para as diversas aplicações. Escolheu-se tratar neste trabalho do medidor eletromagnético de vazão por ser largamente utilizado na indústria atualmente e com fortes tendências de crescimento de participação no mercado, pois seu princípio de funcionamento possibilita seu uso nos mais diversos fluidos (bastando que este seja condutivo). A

figura 1 mostra a distribuição do uso de medidores de vazão segundo seu princípio de medição.

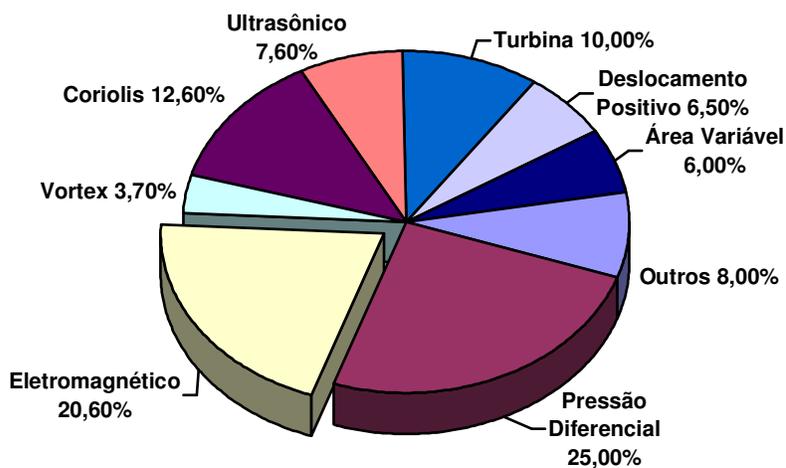


Figura 1 – Distribuição do uso de medidores de vazão segundo o princípio de medição (Bortoni, 2006).

De acordo com Yoder (2005), o mercado de medidores eletromagnéticos atingiu 710 milhões de dólares em 2004, e aponta uma tendência de que o mercado chegue a aproximadamente 910 milhões de dólares em 2009, com uma taxa de crescimento média de aproximadamente 5% ao ano. De acordo com o mesmo estudo, os medidores eletromagnéticos estão substituindo tecnologias tradicionais, como a de pressão diferencial, deslocamento positivo e turbina.

O medidor eletromagnético possui grandes vantagens com relação a outros medidores tradicionais, a saber:

- Boa precisão e exatidão;
- Perda de carga desprezível;
- Ausência de partes móveis em contato com o fluido de processo;
- Grande faixa de operação;

Entretanto, para que seja corretamente aplicado, é necessário se conhecer as limitações de aplicação desse medidor, a saber:

- Sensibilidade a distúrbios do escoamento (devem-se respeitar condições de instalação);
- Compatibilidade com o fluido de processo;
- Exige mão de obra especializada para manutenção;

Existem muitos fabricantes de medidores eletromagnéticos de vazão atualmente, e o mercado de consumidores desses equipamentos cresce a cada ano, comprovando sua utilidade e importância na indústria atual. Alguns fabricantes desenvolvem medidores especiais para aplicações com alto nível de sólidos em suspensão, baixa condutividade do líquido de processo, medidores de inserção, e outros. Todavia, uma parte do custo associado aos medidores de vazão eletromagnéticos é relativo à sua manutenção, assunto que será detalhado no item a seguir.

1.1.3 Índices de confiabilidade e manutenibilidade

Como visto anteriormente, os medidores eletromagnéticos de vazão são largamente utilizados na indústria. Sabe-se também que, além do custo de aquisição, um equipamento tem associado também um custo de manutenção, que pode ser decisivo na hora de optar por uma tecnologia ou outra. Apesar de não possuir partes móveis, os medidores eletromagnéticos possuem um custo de manutenção, sendo que tal manutenção geralmente deve ser realizada por mão de obra especializada.

Muitos medidores eletromagnéticos comerciais disponíveis atualmente apresentam diagnósticos funcionais, analisando monitorando funções básicas do transmissor e componentes eletrônicos. O usuário pode ser alertado sobre problemas operacionais, como os

que ocorrem em placas de circuito impresso, memória, e fiação. Entretanto, problemas relacionados ao processo, que podem influenciar no desempenho do sensor de vazão, aumentando a incerteza de medição, frequentemente passam despercebidos.

O usuário tradicional de medidores eletromagnéticos de vazão tem que realizar sua manutenção preventiva periodicamente, não importando o estado em que se encontra o mesmo. Não é necessário dizer que tal usuário vai gastar tempo e dinheiro indevidamente, uma vez que mesmo equipamentos em perfeitas condições deverão passar por esse procedimento, pois é muito difícil atestar sua condição visualmente.

Outro problema dos medidores tradicionais é com relação às paradas para corrigir eventuais problemas que ocorrem nos intervalos entre as manutenções preventivas. Tais defeitos podem surgir por falhas no uso ou instalação do equipamento, ou podem ser consequência das características do processo no qual o mesmo está inserido.

A falha dos instrumentos também pode levar à produção de produtos fora de especificação, causada pelo aumento da incerteza dos medidores, o que fatalmente é detectado de modo tardio, provocando paradas de produção e descarte de produtos. Muitas vezes, dependendo da complexidade do processo, se gasta muitos recursos atacando outras fontes de erros, enquanto a causa primária pode ser um medidor que apresenta problemas de precisão causados por variações no processo.

Os usuários gastam recursos valiosos em atividades de manutenção. A figura 2 mostra a distribuição dos recursos usados em manutenção. Nota-se claramente que é dada pouca atenção à manutenção preditiva. Estudos mostram que de todo o trabalho de manutenção realizado, 20% corresponde a medidas desnecessárias, que podem ser reduzidas usando-se as técnicas de diagnóstico avançado dos instrumentos de vazão. Além disso, mais de 60% do trabalho é feito de forma corretiva, ou seja, depois que o problema ocorre e, portanto, não planejado. Isso evidencia o custo excessivo de paradas no processo e produção fora dos padrões devido a falhas em instrumentos. Toda falha em potencial de instrumentos que possa ser detectada precocemente e evitada com a ajuda de diagnósticos avançados pode ser traduzida como um retorno de investimento (Walker, 2001).

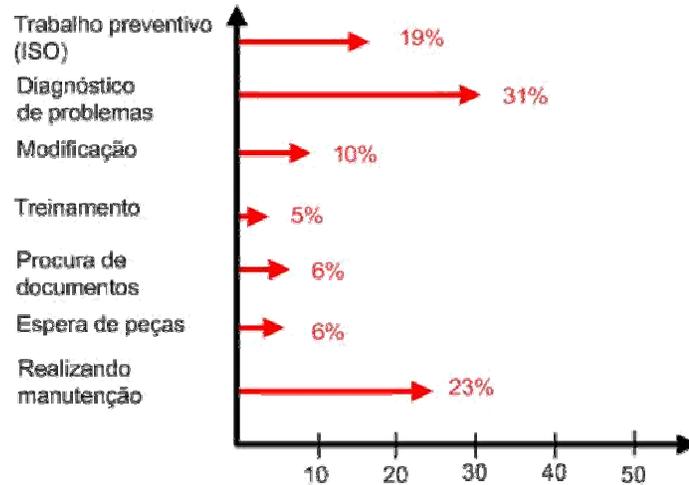


Figura 2 - Onde as empresas gastam seus recursos em manutenção (Walker, 2001)

A figura 3 mostra o custo relativo associado à manutenção preventiva, preditiva e corretiva. A maior parte do capital investido em manutenção é dedicada a ações corretivas e preventivas, evidenciando a necessidade da criação de mecanismos de manutenção preditiva.

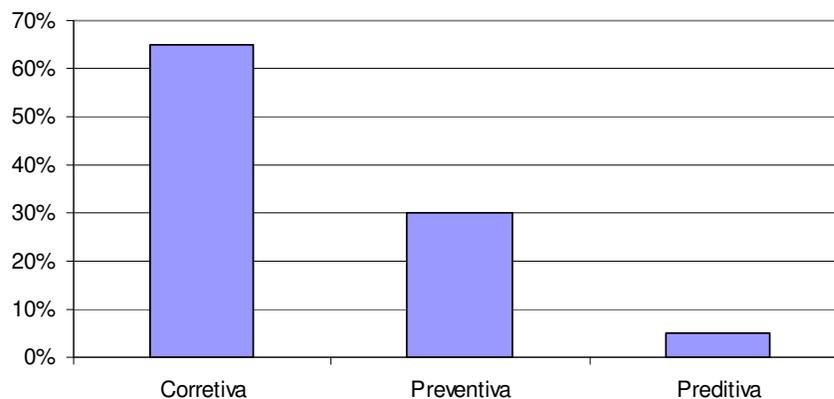


Figura 3 – Custos relativos de manutenção corretiva, preventiva e preditiva (Walker, 2001)

A seguir são apresentadas algumas fotos de medidores eletromagnéticos de vazão que apresentaram problemas em campo. A figura 4 mostra um medidor eletromagnético com defeitos ocasionados por instalação incorreta do mesmo. A figura 5 mostra um exemplo de especificação incorreta, em que o líquido de processo corroeu parte do revestimento interno do tubo. A figura 6 mostra um caso em que os eletrodos foram corroídos pelo líquido de processo, adentrando na cavidade do medidor e inutilizando-se. A figura 7 mostra os eletrodos corroídos pelo líquido de processo.



Figura 4 – Medidor eletromagnético com defeito devido a instalação incorreta



Figura 5 – Medidor eletromagnético com defeito devido a instalação incorreta (corrosão do material de revestimento interno do tubo)



Figura 6 – Medidor eletromagnético com defeito devido a especificação incorreta (corrosão dos eletrodos)



Figura 7 – Eletrodos corroídos

1.1.4 Auto-teste

Desenvolvimentos recentes na tecnologia de processamento de sinais podem possibilitar ao usuário observar não somente a variável de processo, mas também outros parâmetros que resultam em uma maior quantidade de informações relevantes, como a condição dos eletrodos ou das bobinas, armazenando valores de pico e observando tendências.

Tais funcionalidades permitem a implementação de rotinas de auto-teste e diagnóstico avançado. Dessa forma, através da análise das diversas variáveis e suas tendências, o medidor é capaz de indicar possíveis defeitos e ações corretivas. Busca-se com isso diminuir a necessidade de manutenção preventiva nos equipamentos instalados, bem como detectar a ocorrência de falhas precocemente, minimizando os custos relativos à manutenção propriamente dita e perdas com produtos fora de especificação.

Como exemplo, algumas variáveis que podem ser observadas para indicar variações no funcionamento do sensor são os potenciais elétricos dos eletrodos, a temperatura das bobinas, nível de ruído nos eletrodos, deformação do revestimento, entre outras.

1.2 CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO

No Capítulo 1 apresenta-se uma contextualização do trabalho, com alguns dados relativos ao uso dos medidores eletromagnéticos de vazão na indústria e algumas tendências com relação à aplicação e necessidade de auto-teste.

No Capítulo 2 faz-se um estudo bibliográfico sobre os medidores eletromagnéticos de vazão, desde as suas primeiras aplicações científicas e comerciais, até trabalhos mais recentes, em que se busca informações adicionais dos medidores, além de apenas o valor da vazão. Nesse capítulo são apresentados também alguns conceitos teóricos e a modelagem de medidores eletromagnéticos de vazão.

No Capítulo 3 são expostas algumas propostas de auto-teste, de acordo com estudos previamente realizados por outros autores, a fim de dar um embasamento à seção de testes práticos.

No Capítulo 4 são implementadas algumas rotinas de auto-teste apresentadas no capítulo anterior, em protótipo desenvolvido para este fim. Pretende-se nesse capítulo avaliar a possibilidade técnica da aplicação de tais métodos.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões, contribuições e propostas de trabalhos futuros no assunto.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em 1831 Faraday publica a lei que leva seu nome, que trata da indução magnética, que contempla os conceitos do princípio básico de funcionamento dos medidores eletromagnéticos. Entretanto, independentemente e praticamente na mesma época, o americano Joseph Henry também chegou aos mesmos resultados, não tendo, entretanto, publicado seus resultados antes que Faraday o fizesse (Cheremisinoff, 1979).

No ano seguinte Faraday reporta à Royal Society of London como ele havia tentado medir a tensão elétrica induzida através do Rio Tamisa pelo movimento da água na componente vertical do campo magnético na terra. A medição foi feita com eletrodos de grandes dimensões, colocados na Ponte de Waterloo. Os sinais detectados eram esparsos devido a efeitos termoeletrônicos e eletroquímicos. Esses dois fatores foram identificados como sendo os causadores dos problemas da medição da velocidade ou vazão do rio. Entretanto, segundo Shercliff (1962), o experimento de Faraday falhou principalmente devido aos curtos-circuitos provocados pelo leito do rio, anulando os sinais legítimos.

Em 1851 Wollaston mede, aparentemente com sucesso, as tensões elétricas induzidas pelo movimento da água em um canal Inglês (Shercliff, 1962).

Em 1881 o mesmo Wollaston reporta ao *Journal of Societ Telegraph Engineers* o sucesso de um experimento similar ao de Faraday (Baker, 1989).

Smith e Sleptian (1917) obtêm a patente de um esquema eletrônico para determinação da velocidade de navios relativa ao mar, a partir da medição da tensão elétrica induzida entre dois eletrodos fixados no casco do navio, na presença de um campo magnético gerado. Neste esquema era utilizada para excitação das bobinas a corrente alternada, evitando deste modo o efeito da polarização dos eletrodos, que pode ocorrer na utilização da corrente contínua (Shercliff, 1962) e (Linford, 1961).

Young et alii (1920) estuda o movimento dos mares pelo efeito das marés, e relata que os sinais induzidos entre dois eletrodos (inseridos na água) eram perfeitamente correlacionados com o movimento da água (Shercliff, 1962) e (Linford, 1961).

Williams (1930), aparentemente sem nenhum interesse acadêmico, relatou que mediu a vazão de uma solução de sulfato de cobre escoando em uma tubulação de seção circular, transversal a um campo magnético uniforme, como observado na figura 8. Uma tensão elétrica de corrente contínua foi medida entre os eletrodos EE, o valor medido era proporcional à vazão escoada. Ele percebeu que a distribuição da velocidade não era uniforme devido aos efeitos de aderência das paredes do tubo, e que a força eletro motriz (f.e.m.) induzida também não era uniforme, gerando uma diferença de potencial periférica dentro do tubo, o que daria origem a uma corrente elétrica circular. Este efeito provoca uma redução na tensão elétrica medida nos eletrodos, que passa a assumir um valor menor do que a simples soma das f.e.m. ao longo da linha entre os eletrodos. Essa queda é ocasionada pela resistência ôhmica. Williams apresenta ainda em seu trabalho que se o campo magnético for suficientemente forte e se o fluido for muito mais condutor que o eletrólito utilizado, as correntes de circulação geradas podem ser tão intensas que forças significativas podem ser exercidas no fluido pela interação destas correntes com o campo magnético (Shercliff, 1962).

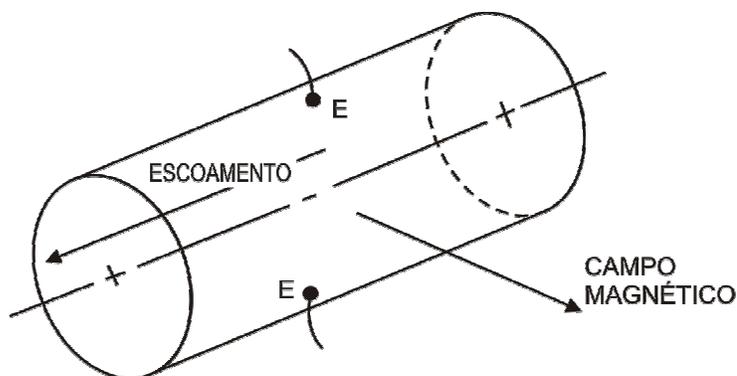


Figura 8 - Medidor eletromagnético (Williams, 1962)

Fabre (1932) utilizou, no ramo da fisiologia e medicina, medidores de vazão eletromagnéticos como instrumento de medição para fluxo sanguíneo. Ele apresentou duas grandes vantagens dos medidores eletromagnéticos para o fluxo de sangue nas artérias: sinal de resposta instantâneo, capaz de indicar com detalhes as pulsações do fluxo; e a medição livre do contato do fluido com partes móveis ou mecanismos do medidor e consequentemente livre de contaminação (Shercliff, 1962).

Kolin (1939) faz a primeira tentativa para medir escoamentos em tubulações, sendo que o foco do seu estudo era a medição de vazão de sangue em sistemas circulatórios, a patente do equipamento para este fim foi requerida neste mesmo ano (Linford, 1961).

Thurlemann (1941) chegou à primeira evidência geral de que para uma dada vazão e para qualquer perfil de velocidade simétrico, a tensão elétrica induzida através de um tubo circular com paredes não condutivas, é a mesma se a velocidade do fluido for uniforme. A simplicidade deste estudo levou à idéia de que o medidor eletromagnético é absoluto, não sofrendo com deformações do perfil de velocidades, esta é, porém, uma visão errônea do real comportamento do medidor (Shercliff, 1962).

Em 1952 os medidores de vazão eletromagnéticos são introduzidos no mercado pela companhia Foxboro Corporation e passam a ser comercializados (Cheremisinoff, 1979).

Em 1954, Shercliff realiza pela primeira vez um estudo analítico do medidor eletromagnético de vazão (Shercliff, 1954). Ele analisou o medidor eletromagnético com dois eletrodos pontuais para a medição de um escoamento sob um campo magnético uniforme, e propôs um método por soma ponderada (*Weight Function Method – WFM*) para estimar o

sinal nos eletrodos, e tal método tem sido bastante utilizado para analisar os medidores eletromagnéticos.

Denison (1955) apresenta uma alternativa para a excitação das bobinas do medidor eletromagnético, com utilização de onda retangular, e não senoidal como era feito até então. Ainda em 1955, Thurlemann faz uma importante análise teórica da medição de velocidade por meios eletromagnéticos (Baker, 1989).

Kolin (1956) idealiza uma variação do medidor proposto por Williams, e apresenta um medidor com campo magnético circular concêntrico ao eixo do tubo, resultante de uma corrente de excitação de um condutor sólido central ao tubo, e de dois eletrodos, um na parede do tubo e outro no centro do tubo, isto pode ser visto na figura 9. Na figura 10 pode-se observar um outro tipo de medidor, também sugerido por Kolin, que é composto de dois eletrodos formados por placas paralelas com fluxo radial entre as placas, na presença de um campo magnético circular (Shercliff, 1962).

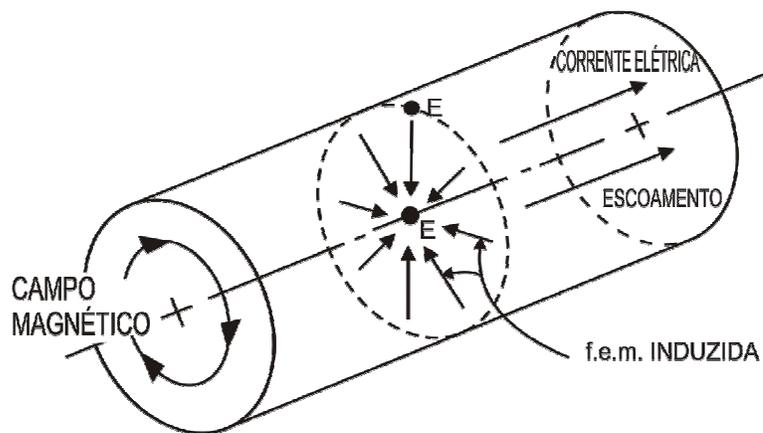


Figura 9 - Medidor eletromagnético Kolin (Shercliff, 1962).

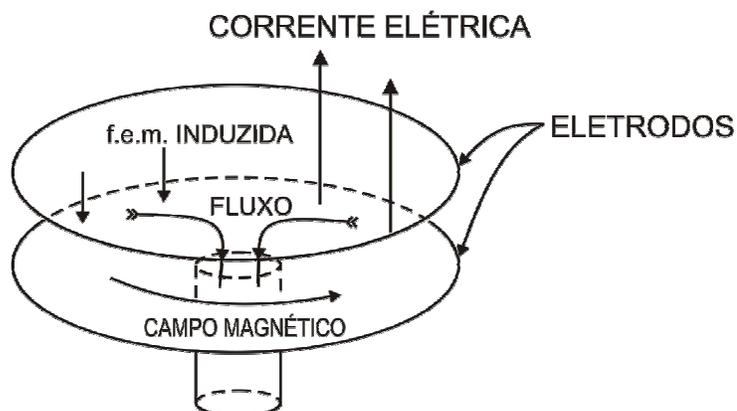


Figura 10 - Medidor eletromagnético de fluxo radial (Shercliff, 1962).

Yanof e Salz (1960) apresentam uma alternativa para a excitação das bobinas do medidor eletromagnético, com utilização de onda trapezoidal (Baker, 1989). Wyatt (1961) faz um levantamento dos principais problemas da medição do fluxo sanguíneo com medidores eletromagnéticos (Baker, 1989).

Em 1962, Shercliff publica um livro discutindo amplamente a teoria dos medidores eletromagnéticos. Segundo Shercliff, o desenvolvimento dos medidores de vazão eletromagnéticos deu um grande salto com o início da utilização dos reatores nucleares para a geração de energia, após a Segunda Grande Guerra. Nestes reatores o líquido usado como refrigerante pode, muitas vezes, estar em altas temperaturas, e pode possuir partículas de metais radioativos de poder corrosivo. Desta maneira o medidor utilizado para esse fim deverá ser resistente a essas características e permitir a manutenção e indicação remota da vazão, sem contato direto com o fluido. Neste sentido os medidores eletromagnéticos (bem como medidores ultra-sônicos) são ideais, pois não apresentam partes móveis e não possuem fontes de vazamento, por se tratar internamente de apenas um tubo, livre de obstáculos. Outra aplicação prática, que contribuiu com o avanço dos medidores eletromagnéticos, é a tecnologia hidro-dinâmica-magnética aplicada ao plasma, dos programas aeroespaciais.

Em 1988, Strangas & Scott apresentam um estudo para projeto de medidores eletromagnéticos de vazão, onde o método dos elementos finitos é empregado para analisar a influência da geometria e das características do material do tubo na precisão e sensibilidade do medidor.

Lim & Chung (1998) realizaram um estudo a respeito dos erros relativos no sinal de medidores eletromagnéticos de vazão quando simulados utilizando o método ponderado (*WFM – Weight Function Method*) ou o método de volumes finitos (*FVM – Finite Volume Method*). O estudo foi feito utilizando-se diversas configurações de células para o cálculo, para escoamento laminar e turbulento. Para isso, dividiu-se a seção transversal do tubo de 4 formas diferentes, em espaços fixos e variáveis, nos sentidos radial e longitudinal, como mostrado nas figuras a seguir:

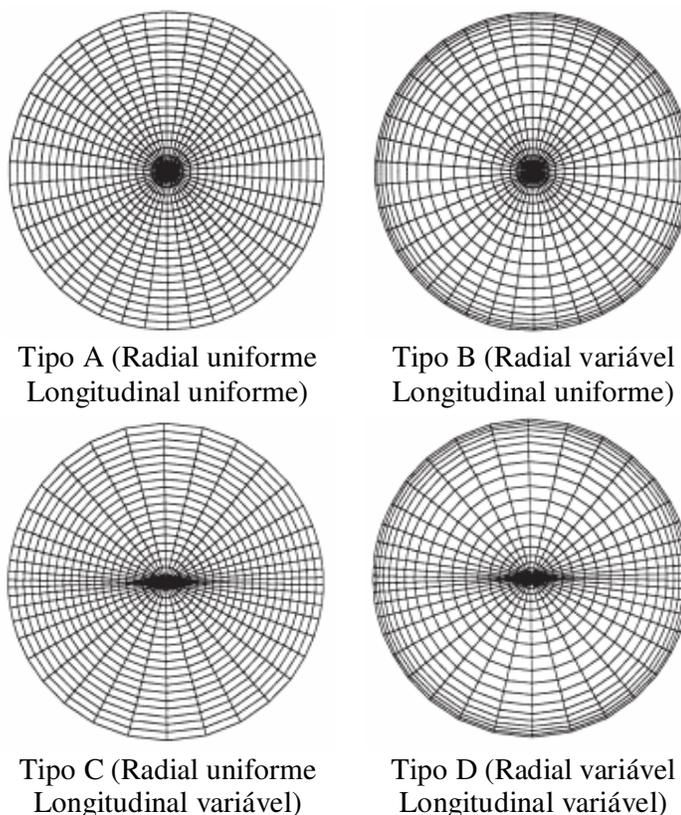


Figura 11 – Diferentes divisões da seção transversal do tubo (Lim & Chung, 1998)

Com base neste estudo, os autores chegaram à conclusão que a configuração das células (tamanho, quantidade, formato e distribuição) influi decisivamente na precisão do resultado final, principalmente quando o escoamento é turbulento e utilizando-se o *WFM*, pois a velocidade varia bruscamente próximo à parede do tubo (camada limite).

Horner (1998) apresenta um medidor eletromagnético de vazão multi-eletrodos a partir de um medidor comercial (Endress+Hauser ProMag 33F). Quatro eletrodos foram adicionados com uma distância angular de 45° com relação aos previamente existentes. Para

obter o sinal relativo à vazão, o autor realizou uma soma ponderada dos potenciais, de acordo com a sua posição em relação ao campo magnético. Dessa forma, pode-se minimizar a influência de fluxos assimétricos nos erros sistemáticos de medição do medidor em questão.

Gao et alii (2000) fazem um estudo de técnicas de filtragem de sinal com redes neurais associadas a wavelets em medidores eletromagnéticos de vazão. Segundo os autores, as técnicas tradicionais de filtragem geralmente não são suficientemente eficientes em situações com níveis de ruídos elevados, uma vez que as redes neurais têm eficiência comprovada para tratamento de dados em situações altamente ruidosas.

Utilizando-se a transformada wavelet, o sinal foi separado do ruído de forma mais eficiente, pois o sinal e o ruído têm distribuições de frequências distintas. Após a decomposição por wavelets, o sinal é aplicado a uma rede neural com um neurônio na camada de entrada, dois na camada oculta e um na camada de saída.

Os resultados finais obtidos foram altamente satisfatórios, em termos de linearidade, tempo de resposta e precisão, que são requisitos desejáveis em sistemas de instrumentação, principalmente levando-se em consideração que o sistema foi testado em situações altamente ruidosas, apresentando uma excelente e promissora solução para o problema.

Liang (2002) apresenta uma simulação digital de um medidor eletromagnético de vazão que pode ser usada para líquidos condutivos, pouco condutivos e isolantes. O autor utiliza um sinal ruidoso adquirido de óleo de transformador BP180 associado a um sinal de vazão simulado (300Hz, 4mV pico), resultando em uma relação sinal-ruído aproximadamente 1:50. Os resultados da simulação digital mostram que o sinal de vazão pode ser recuperado mesmo com altos níveis de ruído causados pela baixa condutividade de alguns fluidos ao se aplicar uma frequência dual de excitação das bobinas, associada a filtros passa faixa digitais e detectores de fase.

Perovic & Higham (2002) estudam a possibilidade de se obter informações de diagnóstico analisando o sinal aquisitado em um sensor eletromagnético de vazão. A maioria dos medidores eletromagnéticos atuais é projetada para dar uma resposta estável e serem usados em malhas de controle. Nesse contexto, pequenas flutuações no sinal são consideradas como ruído e são filtrados pelo sistema de condicionamento de sinais do medidor. Neste

trabalho, o autor está preocupado em estudar essa parcela de “ruído” dos eletrodos. Para tanto, é necessário que o medidor tenha uma larga resposta em frequência para que o sinal não filtrado seja analisado.

Entretanto, por causa dos sinais indesejados gerados nos eletrodos, o sinal de interesse tem que ser obtido através de modulação do campo magnético e, simultaneamente, demodulação do sinal dos eletrodos. Isso elimina, virtualmente, todas as componentes de “ruído” do sinal original. Neste artigo, essa dificuldade foi contornada mudando-se a excitação das bobinas e mantendo-a constante por um curto período enquanto o sinal do eletrodo foi amostrado. A componente de “ruído” no sinal foi então separada das outras componentes através de um filtro passa-alta e analisada para fornecer informações sobre o estado da vazão e também o estado operacional dos equipamentos de processo associados.

Porém, o modo de operação com alimentação constante das bobinas impossibilita a medição da vazão propriamente dita, fato pelo qual a alimentação das bobinas é mantida constante apenas por um curto período, em que os sinais são adquiridos para posterior análise. O medidor, então retorna a seu estado normal de funcionamento, que é a alimentação da bobina com tensão alternada

Polo et alii (2002) propõem um circuito para amplificar e demodular o sinal dos eletrodos em um medidor eletromagnético de corrente alternada. Tipicamente, o sinal nos eletrodos é abaixo de 1mV e sofre uma intensa interferência das bobinas que criam o campo magnético.

O arranjo experimental é composto por um canal de 25 cm x 25 cm, de seção retangular, e para a geração do campo magnético foi utilizado um par de bobinas Helmholtz, que dão origem a um campo magnético bastante uniforme. Os eletrodos foram colocados a aproximadamente 10 cm do fundo do canal. Os resultados das medições obtidas pelo medidor experimental foram comparadas com um medidor do tipo turbina com exatidão 1%. A Figura 12 ilustra a disposição das bobinas no canal.

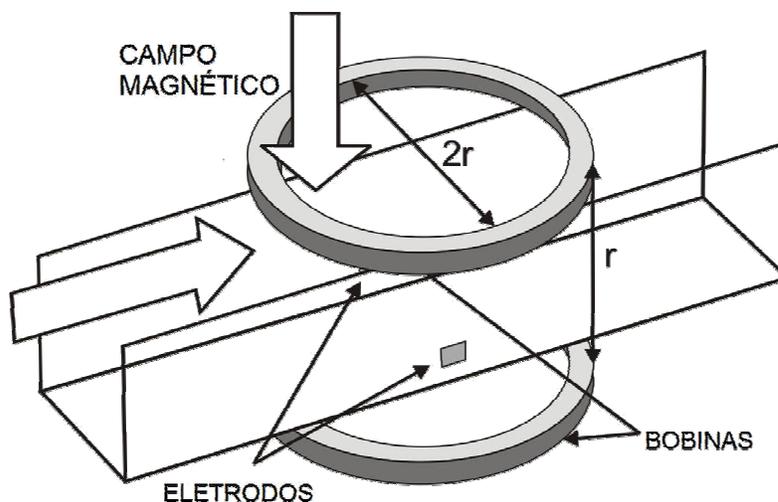


Figura 12 - Arranjo experimental com bobinas de Helmholtz (Polo et alii, 2002)

A forma de onda da excitação da bobina foi ajustada de forma a se obter uma corrente trapezoidal, com frequência de 6,25 Hz. Com a magnitude do campo magnético gerado em torno de 2 mT, para vazões inferiores a 1m/s, obtêm-se tensões inferiores a 1mV nos eletrodos, sinal muito menor que os ruídos inerentes ao sistema. Entretanto, sabe-se que a tensão de interesse (que representa a velocidade do fluido) está em fase com o campo magnético e, por conseguinte com a corrente de excitação das bobinas, podendo, assim, ser recuperada através de demodulação.

Os autores deste artigo utilizam um estágio de pré-amplificação com ganho 95 e outro estágio com amplificador de instrumentação com ganho 100, levando a um ganho final de amplificação de 9500. A tensão de contato nos eletrodos é rejeitada por um filtro passa - alta, com a frequência de corte escolhida em 0,14 Hz, garantindo um erro de menos de 0,1% em 6,25 Hz. A tensão de offset do sinal amplificado é rejeitada por um filtro passa-alta de primeira ordem antes da demodulação.

A figura 13 ilustra o circuito utilizado para amplificação e demodulação do sinal, sendo implementado em dois estágios. Primeiramente o sinal é amplificado por um amplificador com ganho ± 1 , chaveado (através da chave S_1) na frequência da corrente de excitação da bobina. A seguir, a amplitude é aquiritada em cada um dos dois segmentos planos da tensão detectada. Um capacitor (C_4) rapidamente se carrega na tensão correspondente e permanece carregado até o próximo semi ciclo. Um outro capacitor (C_5)

mantêm a tensão do segmento anterior para que C_4 possa ser chaveado para amostrar o próximo segmento. Sendo assim, S_2 trabalha numa frequência que é o dobro de S_1 .

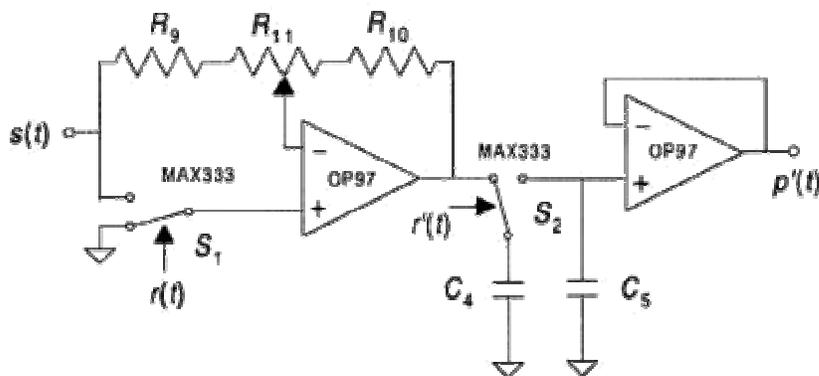


Figura 13 - Circuito para demodulação (Polo et alii, 2002)

A retificação do sinal anteriormente à aquisição elimina o efeito de flutuações residuais no nível DC, as quais poderiam resultar em uma diferença na magnitude de cada segmento diferente. A amostragem do sinal nos segmentos planos elimina as interferências induzidas pelas bobinas.

Görgényi et alii (2005) propõem o projeto de um medidor eletromagnético de vazão com excitação senoidal, baseado em processador digital de sinais (*DSP – Digital Signal Processor*). O sistema desenvolvido consiste de um medidor eletromagnético de vazão com quatro pares de eletrodos, um sensor de pressão localizado no fundo (para determinação do nível do líquido dentro do tubo) e um eletrodo adicional na parte superior para indicação de tubo cheio. Sendo assim, o instrumento é capaz de medir vazões em tubos parcialmente cheios. A figura 14 mostra o diagrama de blocos do medidor proposto.

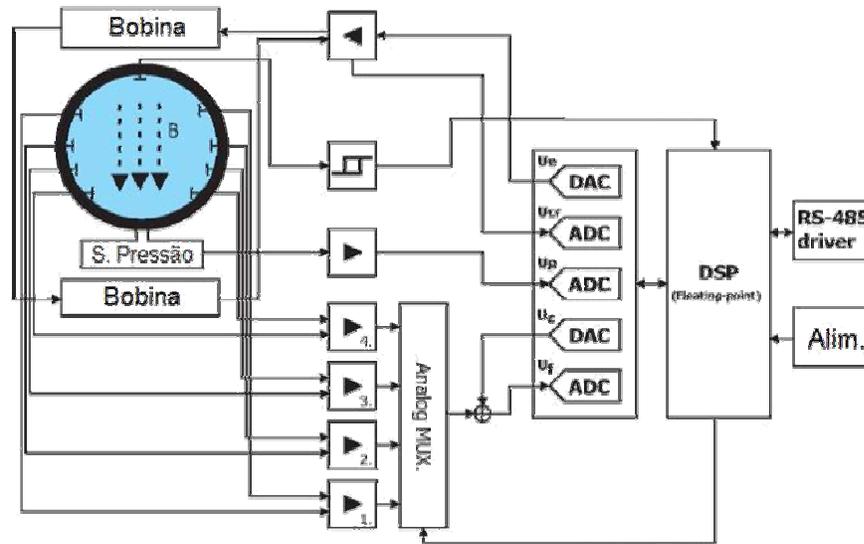


Figura 14 – Diagrama de blocos de medidor (Görgényi et alii, 2005)

Grande parte dos medidores eletromagnéticos utiliza uma forma de onda alternada quadrada ou trapezoidal para a excitação das bobinas. Porém, o efeito transitório causado pelas bobinas gera altas interferências no sinal dos eletrodos. Dessa forma, torna-se necessário aguardar para que o sinal se torne estável para fazer a amostragem, o que pode levar alguns milissegundos. Baseado nisso, Görgényi et alii afirmam que a excitação senoidal apresenta-se como uma boa alternativa. Entretanto, o campo magnético senoidal pode induzir tensões parasitas no circuito dos eletrodos, influenciando na medida, sendo necessário realizar uma compensação. Tal compensação, bem como a geração da onda de excitação, é feita pelo *DSP*.

Ao *DSP* cabe também receber os sinais digitalizados dos eletrodos, do sensor de pressão e do sensor de tubo cheio, fazer os devidos cálculos para o sinal de vazão poder ser depois acessado por um PC através de um barramento RS-485.

Xu et alii (2005) apresentam o projeto de um medidor eletromagnético de vazão multi-eletrodos. Os fatores determinantes para o projeto de um medidor multi-eletrodos são a quantidade e o tamanho dos eletrodos, e são dependentes basicamente do diâmetro do tubo medidor, da impedância de entrada do transmissor e da precisão desejada. Utilizando o método dos elementos finitos, as equações que governam o funcionamento do medidor foram resolvidas para 4, 8, 12, 16 e 32 eletrodos, para escoamento axialmente simétrico, axialmente assimétrico e axialmente assimétrico com refluxo.

Notou-se que o erro para o escoamento simétrico não varia com o número de eletrodos, o que era de se esperar. Já com relação aos escoamentos axialmente assimétricos, o erro de medição diminui sensivelmente com o aumento do número de pares de eletrodos, até estabilizar em um valor. Atribui-se esse erro residual à própria resolução da grade utilizada para realizar os cálculos. Pode-se afirmar que o erro diminui com o aumento do número de eletrodos, porém esse número é limitado pelo próprio tamanho do medidor e por limitações construtivas. Para o caso estudado, 8 eletrodos foi considerado um número ótimo, que diminui o erro significativamente sem comprometimento da parte construtiva.

É importante lembrar que tal estudo foi realizado considerando-se os eletrodos como pontuais. Entretanto, o tamanho dos eletrodos também influencia nos resultados. Em geral o eletrodo não pode ser muito grande devido ao efeito de curto-circuito na superfície do eletrodo em contato com o líquido, que além de diminuir a relação sinal-ruído da medida, distorce o campo elétrico nas bordas da seção do tubo, introduzindo não-linearidades na medição. Baseado na especificação da precisão da medida e do raio do tubo medidor, um limite superior pode ser determinado. Outro fator é a resistência de contato do eletrodo, que é inversamente proporcional à sua área. Se o diâmetro do eletrodo é muito pequeno, a resistência do eletrodo pode ser muito grande, limitando o transmissor a ser utilizado. Sendo assim, o limite inferior para o tamanho do eletrodo também pode ser determinado, de acordo com a impedância de entrada do transmissor (Xu et alii, 2005).

Maalouf (2006) realiza uma derivação das equações práticas do funcionamento do medidor eletromagnético de vazão para o caso de uma tubulação circular com um fluido condutor fluindo internamente. A autora assume também que o campo magnético gerado pelos eletrodos é uniforme e o perfil de velocidades é simétrico com relação ao eixo da tubulação, e assumem-se também paredes não condutivas.

Embora a dedução tenha sido realizada anteriormente por muitos autores, a abordagem de Maalouf é mais simples e compreensível. Além disso, a solução para a equação de funcionamento do medidor eletromagnético de vazão ilustrada no trabalho é nova e apresentada usando conceitos matemáticos muito simples, eliminando a complexidade de soluções demonstradas anteriormente por outros autores. Finalmente, as equações são validadas usando uma abordagem baseada na análise de elementos finitos e do método de fluxo para estimar o erro resultante do uso dessas equações, admitindo-se um campo

magnético uniforme e um perfil de velocidades simétrico, os quais são difíceis de serem conseguidos na prática. Este erro pode ser usado em uma calibração a seco para estimar o erro causado por fluidos com características de vazão variáveis.

2.2 TEORIA E PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Faraday propôs sua lei da indução em 1832. Esta lei descreve a tensão U_I induzida em um corpo eletricamente condutivo que atravessa um campo magnético:

$$\vec{U}_I = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot L \quad (1)$$

Onde:

\vec{U}_I - tensão induzida

\vec{B} - indução

L - comprimento do condutor que atravessa o campo magnético

\vec{v} - velocidade;

Faraday tentou determinar a vazão do rio Tamisa em 1832, medindo a tensão induzida em água corrente utilizando o campo magnético da Terra. Contudo, não obteve sucesso, pois a instrumentação utilizada não era apropriada (Maalouf, 2006), e o leito do rio também causava um efeito de curto circuito, por se tratar de material condutivo.

Thürlemann (1941) e Shercliff (1954) investigaram as propriedades dos medidores de vazão eletromagnéticos. Para um modelo teórico com um campo magnético homogêneo infinitamente longo e eletrodos pontuais, foi estabelecido que a tensão medida é independente do perfil de fluxo no tubo de medição contanto que o perfil de fluxo seja radialmente simétrico.

Shercliff reconheceu que a contribuição dos elementos finitos do fluxo no tubo medidor em relação ao sinal total de tensão é ponderado, de acordo com sua localização no tubo. A partir das equações de Maxwell, ele mostrou que o seguinte se aplica ao sinal de tensão U do eletrodo:

$$U_I = \iiint_{x,y,z} (\vec{W} \times \vec{B}) \cdot \vec{v} \, dx \, dy \, dz \quad (2)$$

O vetor W (função peso) determina a contribuição dos elementos finitos do fluxo à tensão nos eletrodos como função de sua localização no tubo de medição. A figura a seguir mostra as componentes da função peso na direção do eixo dos eletrodos.

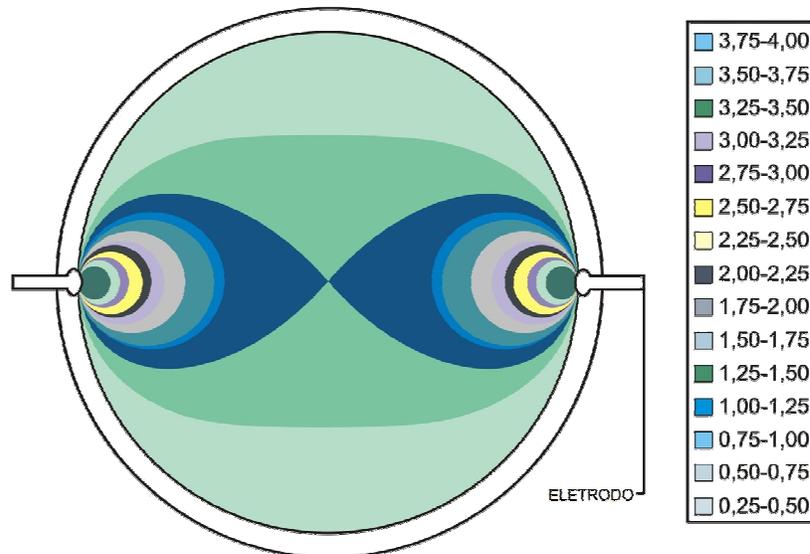


Figura 15 - Função peso de acordo com Shercliff (Hofmann, 2003)

Pode-se verificar, através desse modelo teórico, uma maior sensibilidade nos locais próximos aos eletrodos. Existem estudos com relação à utilização de campos magnéticos não uniformes para minimizar a influência de perfis de fluxo radialmente assimétricos.

O medidor eletromagnético de vazão consiste de um tubo medidor com uma superfície interna eletricamente não condutiva, e bobinas magnéticas e eletrodos que estão dispostos diametralmente opostos no tubo. Os eletrodos estão em contato com o líquido de processo através da parede do tubo. As bobinas de campo geram um fluxo de campo magnético com indução perpendicular ao eixo longitudinal do tubo na direção do eixo dos eletrodos.

Este campo magnético penetra o tubo medidor e o líquido de processo que flui por ele, o qual deverá apresentar condutividade elétrica mínima. O material do tubo deve ser não-ferromagnético. De acordo com a lei de indução uma tensão U_I , proporcional à velocidade de

vazão \bar{v} , à indução B e ao diâmetro interno do tubo D , será, então, induzida no líquido de processo. De forma simplificada, a seguinte expressão pode ser aplicada:

$$U_l = K \cdot B \cdot D \cdot \bar{v} \quad (3)$$

Este sinal de tensão U_l é captado pelos eletrodos que estão em contato com o líquido de processo e isolados da parede do tubo. A figura 16 mostra uma configuração típica de um medidor eletromagnético de vazão:

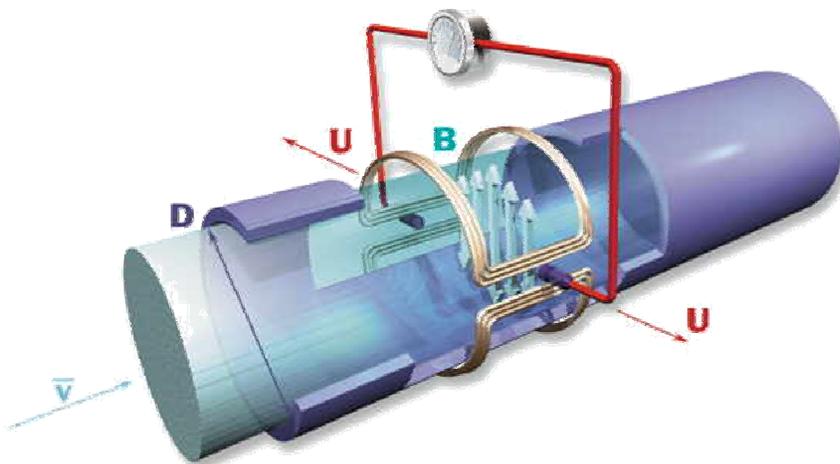


Figura 16 - Medidor eletromagnético de vazão (Hofmann, 2003)

A vazão instantânea do líquido de processo se relaciona com a velocidade do fluido através da equação a seguir:

$$Q = \frac{\bar{v} \cdot \pi \cdot D^2}{4} \quad (4)$$

O sinal de tensão U_l é então processado por um conversor de sinal em uma indicação da vazão:

$$Q_l = U_l \cdot \frac{\pi \cdot D}{4 \cdot k \cdot B} \quad (5)$$

E então convertido padrão de sinal apropriado para o processo, de acordo com as unidades definidas pelo usuário.

Capítulo 3

PROCEDIMENTOS DE AUTO-TESTE EM MEDIDORES ELETROMAGNÉTICOS DE VAZÃO

3.1 FONTES DE INCERTEZAS

Para um melhor entendimento sobre as propostas de auto-testes e diagnósticos avançados, é interessante tecer comentários a respeito de algumas das fontes de incertezas relacionadas aos medidores em questão.

Um dos problemas que mais acomete o funcionamento de medidores eletromagnéticos de vazão está relacionado à deposição nos eletrodos de uma camada isolante ou condutiva. Em casos onde o medidor é aplicado em processos quimicamente agressivos, pode acontecer a corrosão dos mesmos, bem como a deformação do revestimento interno do tubo, ou até mesmo sua abrasão, que podem levar à danificação do circuito das bobinas. Atualmente os departamentos de manutenção realizam manutenção preventiva periodicamente em seus medidores eletromagnéticos, tentando minimizar problemas de processo relacionados à falha ou incerteza de instrumentos.

A condutividade do líquido também é uma variável de processo importante, visto que o fluido de processo deve ter uma condutividade mínima para o correto funcionamento do medidor.

O diagnóstico do estado do instrumento depende também das condições do processo no qual o mesmo está inserido. É importante saber se as mudanças identificadas no monitoramento de variáveis do medidor são devidas a variações nas características do medidor ou do processo, para então realizar o diagnóstico correto. Sendo assim, há duas possibilidades a serem consideradas: processo com condições constantes e processo com condições variáveis.

Em processos com condições constantes, as variações dos parâmetros podem ser relacionadas a problemas no medidor. Geralmente tais alterações ocorrem a médio ou longo prazo e, dessa forma, torna-se impraticável ao usuário detectar tais variações apenas pelo monitoramento da variável de processo. A formação de uma camada de cobertura sobre os eletrodos, ou a corrosão dos mesmos, por exemplo, é mais facilmente identificada se o processo possui reconhecidamente condições constantes de funcionamento.

Já em processos onde ocorrem bruscas variações de suas características, o sensor pode detectar tais variações, fornecendo dados relativos ao processo, além da vazão. Em alguns casos, a aplicação de tais sensores pode minimizar os testes em laboratório, ou até mesmo substituir equipamentos de análise on-line. Esse tipo de aplicação, entretanto, é muito específico e demanda alto conhecimento de detalhes de funcionamento do processo onde o medidor está inserido, fato que dificulta a sua aplicação. Dessa forma, o diagnóstico avançado seria aplicado ao processo e não somente ao medidor. Situações que podem ser estudadas são mudanças de concentração, condutividade e também entrada de ar na tubulação. Embora seja uma possibilidade interessante e extremamente atrativa para usuários em geral, ainda necessita muito estudo e desenvolvimento para poder ser aplicada em larga escala.

3.2 PROPOSTAS DE AUTO-TESTE

Existem poucos trabalhos na literatura relativos a auto-teste em medidores eletromagnéticos de vazão. Entretanto, a seguir serão apresentadas algumas propostas, feitas principalmente por fabricantes de medidores, a fim de serem testadas e avaliadas nos capítulos relativos aos testes práticos e conclusões.

3.2.1 Detecção de bolhas de gás ou sólidos suspensos

As fontes mais comuns de ruídos em aplicações com o medidor eletromagnético de vazão são problemas de aterramento, altos níveis de ruídos de processo, incluindo bolhas de gases na tubulação, e falha intermitente dos eletrodos. Infelizmente, através somente do sinal de vazão é impossível um usuário distinguir o ruído proveniente entre essas três causas.

Em medidores eletromagnéticos, o objetivo é maximizar o sinal de vazão e minimizar os ruídos. A presença de bolhas de gás ou sólidos em suspensão no líquido é uma condição relacionada ao processo que pode influenciar nas leituras da vazão pelo medidor. Sua influência pode ocorrer na forma de geração de altos níveis de ruído, deteriorando a resposta do sensor e influenciando no valor de vazão inferido.

Uma vez que o medidor eletromagnético é um medidor volumétrico, o espaço ocupado pelas bolhas de ar (ou qualquer outro material em suspensão) é considerado como sendo líquido de processo, fornecendo um valor de leitura maior que o real. Assim, a detecção da ocorrência de tais situações é de grande importância para assegurar a exatidão da medida.

As bolhas de gás e partículas sólidas, quando em contato com os eletrodos, geram altos níveis de ruídos no sinal adquirido. Um método proposto por Incontri (2005) para determinar o nível de ruído consiste em multiplicar o sinal do eletrodo por uma onda como a da figura 17 e depois somar o resultado de tal multiplicação, obtendo-se o sinal para análise.

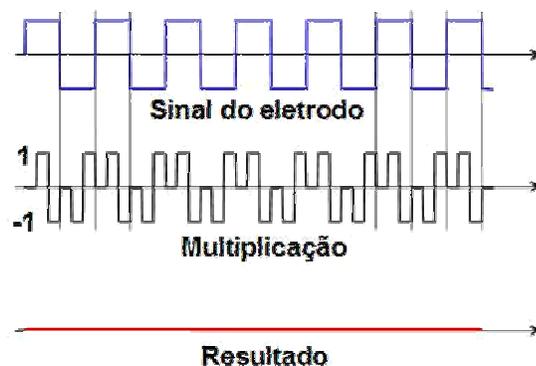


Figura 17 - Método para detecção de ruído (Incontri, 2005)

Como mostrado na figura 17, o sinal do eletrodo é multiplicado por um sinal alternado defasado com o dobro da frequência das bobinas, defasado de 90° em relação ao primeiro. Para um sinal sem ruído, o resultado da multiplicação deve ser zero. Para um sinal ruidoso, o resultado é diferente de zero. A análise do nível de ruídos no sinal pode fornecer a informação de que o nível de bolhas ou sólidos em contato com os eletrodos está acima do aceitável para o funcionamento correto do medidor.

3.2.2 Monitoração do potencial dos eletrodos

Outra variável que pode ser monitorada é o potencial dos eletrodos. Este procedimento pode ser utilizado para analisar a condição dos eletrodos, podendo indicar a danificação do eletrodo devido à corrosão ou por meios mecânicos (erosão).

Uma vez que o potencial do eletrodo depende das condições do processo, e conseqüentemente do fluido, torna-se necessário adotar referências para cada processo ou fluido. Isso é feito geralmente nos primeiros valores medidos para cada processo ou fluido.

Para essa monitoração, é interessante a armazenagem do histórico das medições, bem como valores máximos e mínimos. Isso porque o valor absoluto dos potenciais dos eletrodos não traz nenhuma informação significativa em termos de diagnóstico. O que se deve analisar aqui é a tendência de tais potenciais (Walker, 2001).

O aumento desproporcional de um dos potenciais em relação ao outro pode indicar falha em um eletrodo em particular. Uma variação similar nos dois eletrodos, juntamente com um aumento no nível de ruído, pode indicar falha no eletrodo de aterramento.

Como descrito anteriormente, os medidores eletromagnéticos usam a lei de Faraday, medindo o campo elétrico gerado por um fluido condutivo em movimento sob atuação de um campo magnético. Para assegurar que qualquer potencial elétrico seja somente devido ao efeito Faraday, deve-se aterrar o fluido para assegurar um potencial elétrico nulo na entrada do medidor. Isso pode ser feito através de anéis e fitas de aterramento ou um eletrodo dedicado de aterramento. Entretanto, é comum que o aterramento se danifique ao longo do tempo – um fio pode se partir, uma conexão pode ser corroída ou criar depósitos. Daí a necessidade de monitoramento do potencial dos eletrodos, tanto para detectar falha em qualquer dos eletrodos, quanto para detectar problemas de aterramento.

Esse tipo de procedimento pode ser utilizado também para detectar precocemente alguma incompatibilidade com o processo, evitando danos ao medidor. A corrosão dos eletrodos, quando moderada, influi na precisão do medidor, enquanto a corrosão acentuada pode levar à inutilização do mesmo, pois o líquido de processo pode entrar em contato com as bobinas geradoras do campo magnético. Contudo, se a corrosão for identificada antecipadamente, o usuário poderá tomar as medidas cabíveis para solucionar o problema, minimizando seus prejuízos.

3.2.3 Limpeza dos eletrodos

Muitos fabricantes de medidores eletromagnéticos de vazão fornecem opcionalmente a função de limpeza dos eletrodos como uma solução para problemas comuns de deposição de material nos mesmos. Essa função foi desenvolvida para prevenir a formação de deposição condutiva nos eletrodos e no tubo medidor.

Durante um ciclo de limpeza, um pulso de tensão (U) é aplicado entre os eletrodos de medição e os eletrodos de aterramento, como ilustrado na figura 18, que remove ou previne a formação de deposições condutivas nos eletrodos. A duração do pulso é determinada empiricamente pelo usuário tendo relação direta com a camada que deve ser retirada, o que pode ser feito empiricamente pelo usuário, ou então por medições da característica dos

eletrodos, como o tempo de relaxação. Apesar das vantagens significativas dessa função e seu uso com sucesso em muitas aplicações, este tipo de limpeza tem algumas desvantagens. Não pode ser usado para todos os tipos de deposições (somente funciona com coberturas condutivas) e é usado de maneira preventiva, ou seja, o ciclo é executado mesmo quando é absolutamente desnecessário (Walker, 2001).

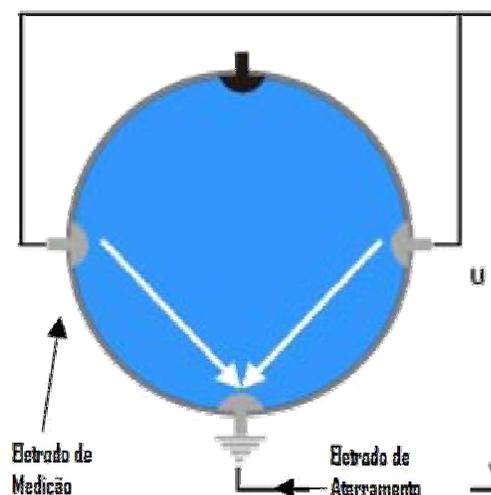


Figura 18 - Circuito de limpeza dos eletrodos (Walker, 2001)

A limpeza preventiva dos eletrodos tem também outras desvantagens para o usuário. A medição da vazão é desabilitada durante o ciclo de limpeza, uma vez que é necessário que um equilíbrio eletroquímico seja atingido nos eletrodos antes da tensão nos eletrodos se estabilizar (Walker, 2001). Além disso, a frequência da limpeza tem que ser determinada pelo usuário com base na tentativa e erro, resultando freqüentemente em limpeza inadequada. Para remover esta fonte de incerteza, a manutenção direta dos medidores no local é freqüentemente requisitada, resultando em interrupções do processo. Contudo, este procedimento consome tempo e é caro. Dessa forma, torna-se necessário aliar a limpeza dos eletrodos a mecanismos de detecção de deposição de material sobre os eletrodos.

Em caso de deposição de material isolante, os problemas são ainda mais sérios pois a deposição de material isolante tem um efeito mais grave, chegando a impossibilitar a leitura de qualquer sinal quando o eletrodo fica completamente coberto, e a remoção de tais camadas na maioria das vezes somente pode ser feita mecanicamente, sendo necessária a remoção do instrumento do local onde está instalado, causando tempos de parada significativamente longos, resultando em custos ainda mais altos.

3.2.4 Condutividade do líquido de processo

Sabe-se que para o funcionamento correto do medidor eletromagnético, o líquido de processo deve ter uma condutividade mínima, cujo valor pode variar de medidor para medidor. Isso ocorre devido à intensidade do campo gerado e a diferentes técnicas de filtragem empregadas pelos fabricantes. Entretanto, a condutividade mínima do líquido para funcionamento do medidor varia entre $5\mu\text{S}/\text{cm}$ para os medidores comuns até $1\mu\text{S}/\text{cm}$ para medidores especiais.

Para medir a condutividade do líquido, utiliza-se o teste de resistência dos eletrodos. Assim, aplica-se uma tensão entre os eletrodos, a qual deverá fazer circular uma corrente entre os mesmos. Essa corrente sofre a influência da resistência dos eletrodos e do líquido de processo, como mostra a expressão a seguir:

$$I = \frac{V}{R_{e1} + R_{e2} + R_L} \quad (6)$$

Onde,

I = corrente medida

V = tensão aplicada aos eletrodos

R_{e1} = resistência do eletrodo 1

R_{e2} = resistência do eletrodo 2

R_L = resistência do líquido

Como as características dos eletrodos são previamente conhecidas, é possível inferir sobre a condutividade do líquido. Entretanto, mudanças nas características dos eletrodos (como corrosão, deposição) podem influir no resultado da resistividade do líquido. A figura 19 mostra as ligações feitas ao medidor para a obtenção dos dados.

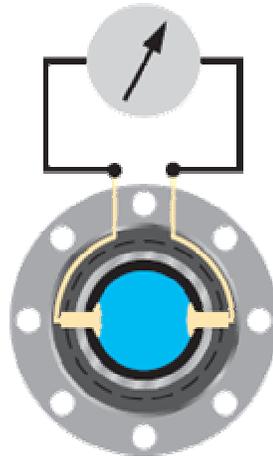


Figura 19 – Medição de resistência de eletrodos/resistividade do líquido

Dessa forma, valores fora dos limites de operação, tanto por influência de mudanças nos eletrodos ou na condutividade do líquido, podem ser detectados e informados ao usuário. Por outro lado, a aplicação de uma tensão contínua, como foi feito nesse trabalho, prejudica a medição de vazão, pois a tensão aplicada pode mascarar o sinal de interesse, que é da ordem de alguns milivolts. Uma proposta para tentar realizar a medição de vazão e a medição da condutividade seria aplicar tensões com frequências diferentes, e então separar o sinal da vazão do sinal do teste de condutividade.

3.2.5 Tubo parcialmente cheio e deformação do revestimento interno

A medição de vazão de um medidor eletromagnético comum baseia-se na tensão gerada pelo escoamento do líquido condutivo sob a ação de um campo magnético perpendicular ao escoamento. Assim, a tensão nos eletrodos é proporcional à velocidade média do fluido. Para se obter a vazão, que é a variável de interesse, multiplica-se a velocidade média pela área da seção transversal do tubo medidor.

Em casos onde o tubo não está completamente cheio, a leitura de vazão será comprometida, pois a tensão gerada refere-se somente a uma parte da área da seção (área molhada). Assim, se for realizado o cálculo da velocidade média encontrada pela área total do tubo, a vazão obtida será maior que a real.

Dessa forma, em processos onde não é possível garantir que o tubo esteja sempre completamente cheio, é interessante que essa não conformidade seja indicada pelo sensor. Isso é feito acionando-se as bobinas geradoras de campo magnético em sentidos inversos. Essa inversão é ilustrada na figura 20.

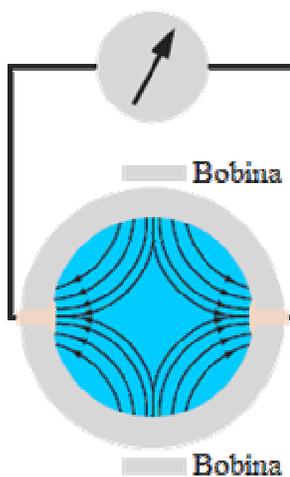


Figura 20 - Inversão dos campos gerados pelas bobinas.

Quando o tubo está completamente cheio e em condições normais de funcionamento, a tensão lida nos eletrodos com a aplicação do campo inverso deverá ser zero. Se o tubo não estiver completamente cheio, uma tensão diferente de zero será lida nos eletrodos, devido à diferença nos caminhos percorridos pelos campos gerados por ambas as bobinas.

Em outros casos, devido a limitações de instalação, ou incompatibilidade do tubo medidor com o fluido de processo, pode ocorrer o desgaste do material de revestimento interno do tubo, principalmente quando se trata de líquidos altamente abrasivos. A corrosão do revestimento interno do tubo pode levar à destruição do medidor, pois o líquido de processo pode entrar em contato com o circuito das bobinas. A inversão dos campos das bobinas também pode detectar tal ocorrência, pois um revestimento interno deformado dá origem a uma tensão diferente de zero nos eletrodos.

3.2.6 Temperatura das bobinas de campo

As bobinas de campo constituem parte vital para o funcionamento do medidor eletromagnético de vazão. A verificação de seu estado, portanto, é de igual importância. Uma das possibilidades é a medição da resistência das bobinas R_s . Uma vez que a resistência da bobina depende da temperatura, tal parâmetro dá ao usuário a informação da temperatura da bobina e, portanto, indiretamente da carga térmica do instrumento.

A tensão de controle da bobina é dada paralelamente e também pode ser monitorada. Com condições ambientes constantes e mudanças lentas de processo, uma análise de tendência da condição térmica do instrumento pode ser realizada, por exemplo, como um indicador de sobrecarga.

A variação das bobinas representa um valor diretamente proporcional à carga térmica do instrumento. Dessa informação, o medidor eletromagnético de vazão calcula um fator de carga térmica, que também pode ser usado para prever a expectativa de vida útil do sensor. Estes valores podem ser disponibilizados localmente e/ou remotamente, através de protocolos de comunicação e centralizadores de dados. A equação a seguir mostra como é possível obter a temperatura de operação do medidor a partir da resistência das bobinas:

$$T = \frac{R - R_{20}}{\alpha \cdot R_{20}} + 293 \quad (7)$$

Onde:

T = temperatura atual (K)

R_{20} = resistência do enrolamento à temperatura de referência (20°C) (Ω)

R = resistência medida (Ω)

α = coeficiente de temperatura

3.2.7 Linearidade do conversor de sinais e influência de campos magnéticos externos

O conversor de sinais, como mencionado previamente, é responsável pela conversão do sinal dos eletrodos em um valor que representa a vazão no tubo medidor. Uma variação no sinal do eletrodo deve corresponder a uma variação no sinal de vazão de mesma magnitude.

O teste de linearidade do conversor de sinais pode ser realizado variando-se a corrente de excitação das bobinas de campo periodicamente. Como consequência, o sinal dos eletrodos deve refletir a mesma variação, e o conversor ajusta o fator de conversão para que o sinal de vazão continue constante. A figura 21 mostra o procedimento para o teste de linearidade do conversor de sinais e influência de campos magnéticos externos.

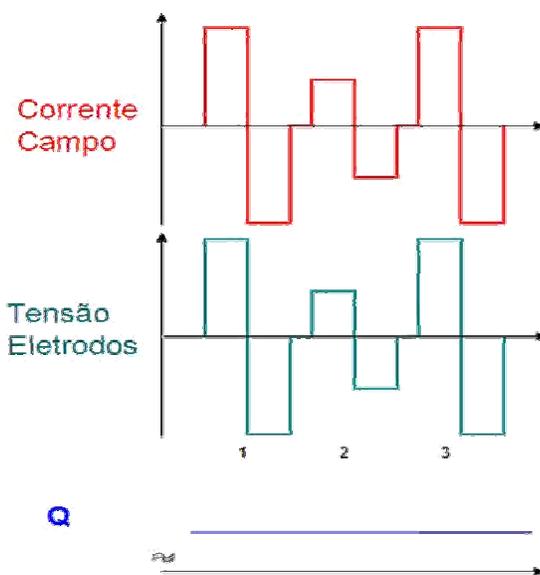


Figura 21 - Teste de linearidade do conversor de sinais (Incontri, 2005)

Caso a linearidade esteja fora dos valores especificados, podem-se inferir duas possíveis causas do erro: Problemas no conversor de sinais ou influência de campos magnéticos externos. Com isso, um alarme pode ser gerado, para que o usuário verifique as condições corretas de instalação.

Como o teste é feito durante o funcionamento do medidor, ele é transparente ao usuário, pois não há variação no sinal de vazão para o caso do conversor estar funcionando corretamente.

3.3 TRANSMISSÃO DAS INFORMAÇÕES

Os avanços nas técnicas de processamento de sinais são particularmente úteis quando associados a algum tipo de transmissão digital de tais informações. Dessa forma, um medidor que possui funções de diagnóstico, porém com os dados sendo exibidos somente de forma local, tem sua funcionalidade reduzida.

Os protocolos digitais permitem a transmissão de informações adicionais, incluindo informações de diagnóstico, no mesmo par de fios que transporta as informações de variáveis de processos. Dentre os vários protocolos industriais existentes, alguns são abertos, como o FOUNDATION *Fieldbus* e HART (Menezes, 2005), o que aumenta a possibilidade de integração de diversos sistemas, como o sistema de gerenciamento e supervisão de produção e o sistema de gerenciamento de equipamentos (*Asset Management System*). Além de aumentar a funcionalidade do sistema, a aplicação de tais protocolos digitais diminui custos de instalação, manutenção e treinamento.

A integração dos diagnósticos no nível de sensores com o sistema de gerenciamento de equipamentos maximiza os benefícios da utilização de sensores inteligentes. Dessa forma, o usuário pode centralizar as informações de diagnóstico em um único sistema, onde também pode ter acesso a manuais e guias de práticas recomendáveis para a solução de eventuais problemas.

Capítulo 4

IMPLEMENTAÇÃO DE ROTINAS DE AUTO-TESTE

Neste capítulo são exibidos os passos tomados nos testes práticos de funcionamento do medidor eletromagnético de vazão e os componentes do protótipo onde foram realizados os ensaios e implementadas as rotinas de auto-teste propostas. Em seguida são apresentados os arranjos utilizados para a validação dos auto-testes propostos.

4.1 METODOLOGIA DE TESTES

Após a conclusão dos estudos teóricos preliminares, iniciou-se a parte experimental do trabalho. O início dessa fase demonstrou-se extremamente difícil, com várias barreiras, tanto em termos de disponibilidade de equipamentos quanto na elaboração de circuitos que possibilitassem a aquisição dos sinais de interesse.

Iniciou-se o estudo prático verificando o funcionamento de um medidor eletromagnético comercial à disposição no laboratório LHPCH da UNIFEI. O medidor em questão é composto do tubo medidor e conversor de sinais separados. Dessa forma, os terminais da bobina e eletrodos foram facilmente acessados. A figura 22 mostra o conversor de sinais (esquerda) e tubo medidor instalados.

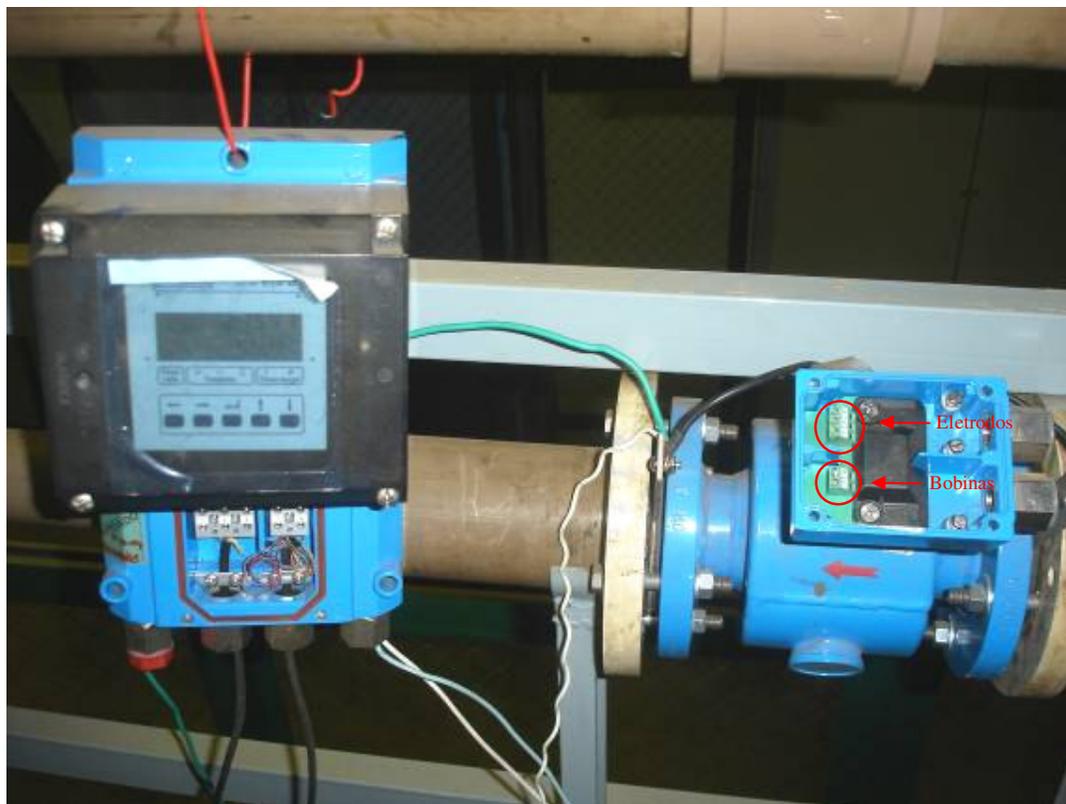


Figura 22 – Medidor comercial utilizado para aquisição de primeiros sinais

O primeiro procedimento realizado foi ligar o medidor em seu funcionamento normal e conectar em paralelo com os terminais das bobinas e do eletrodo um sistema de aquisição de dados.

Com a aplicação do sistema de aquisição de dados na bobina foi medida uma tensão com forma de onda aproximadamente quadrada de frequência 10 Hz. Ao se conectar o sistema de aquisição diretamente nos eletrodos, o sinal totalmente atenuado, impossibilitando qualquer medição do sinal de vazão. Dessa forma, confirmou-se a necessidade de criação de um pré-amplificador, cujo circuito é mostrado na figura 23:

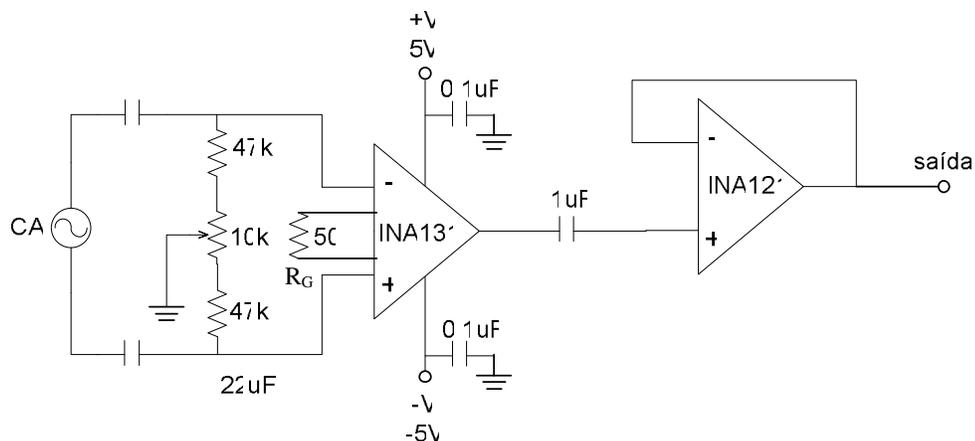


Figura 23 - Circuito de amplificação do sinal do eletrodo

A figura 24 mostra os circuitos pré-amplificadores montados.

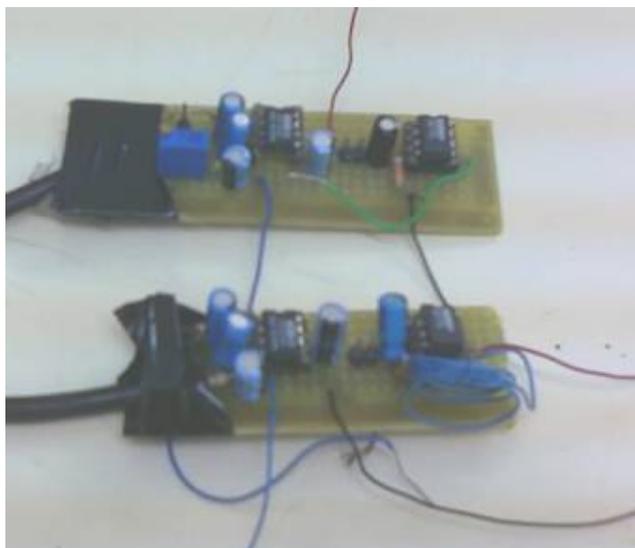


Figura 24 – Circuitos pré-amplificadores montados

O circuito da figura 23 tem duas opções de seleção de ganho: fixo = 100, ou ganho variável, através da inserção de uma resistência de ajuste de ganho. O ganho varia de acordo com o valor do potenciômetro pela seguinte equação:

$$G = 100 + \frac{250k}{R_G} \quad (8)$$

Onde:

R_G = valor do da resistência de ajuste de ganho

$R = 250k\Omega$

O valor de ganho do amplificador foi ajustado empiricamente de forma a amplificar o máximo possível, porém sem permitir a saturação do amplificador. Para os testes práticos, utilizou-se uma resistência de 50Ω , resultando um ganho de aproximadamente 5100 vezes.

Para esse ensaio não houve nenhuma preocupação com o valor exato da vazão, sendo o intuito principal apenas verificar a dependência do sinal do eletrodo quando há uma variação na vazão. Para uma vazão baixa, os sinais da bobina e do eletrodo são:

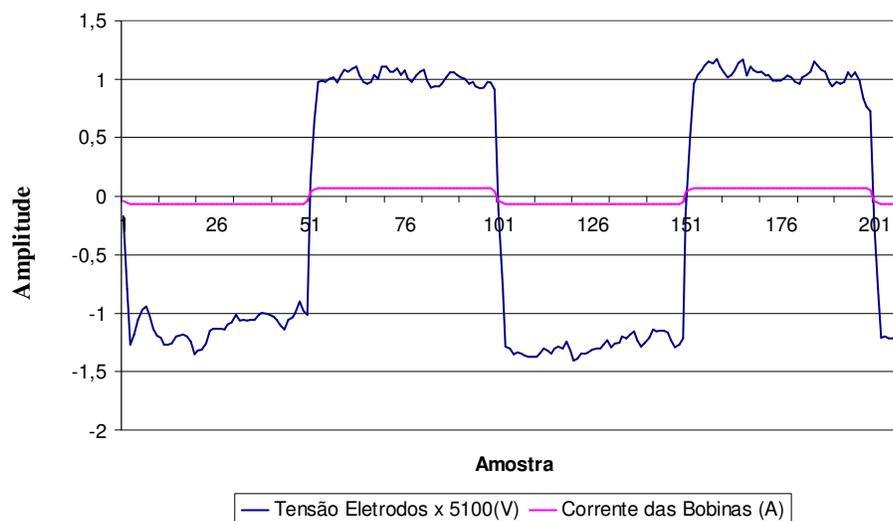


Figura 25 – Corrente na bobina x tensão amplificada dos eletrodos (1)

A figura 26 mostra o sinal medido para um aumento arbitrário da vazão.

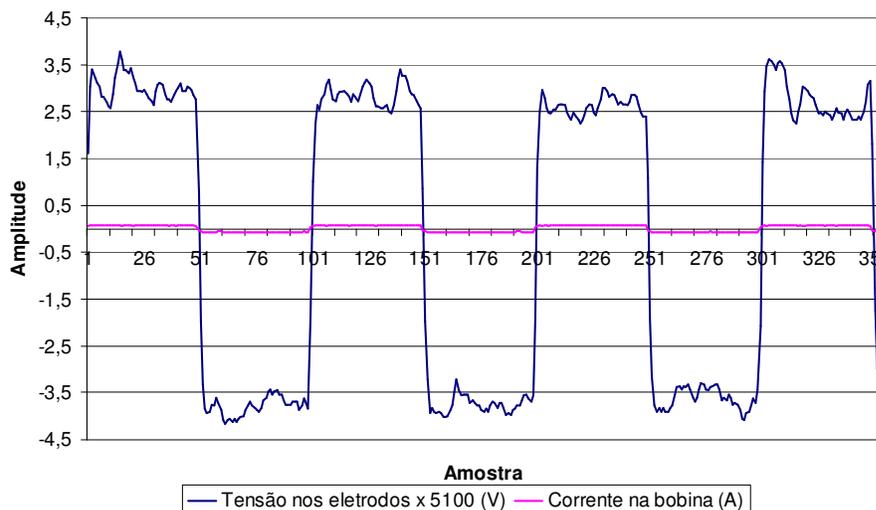


Figura 26 – Corrente na bobina x tensão amplificada dos eletrodos (2)

Um fato reportado na literatura e observado nos testes tem relação com o transitório causado na bobina quando há a inversão do sentido de alimentação da mesma. A figura 27 ilustra esse fato, onde foi feita a aquisição da tensão dos eletrodos, porém sem vazão no tubo. Teoricamente o sinal dos eletrodos deveria ser nulo, porém a interferência causada pelas bobinas é detectada nessa situação.

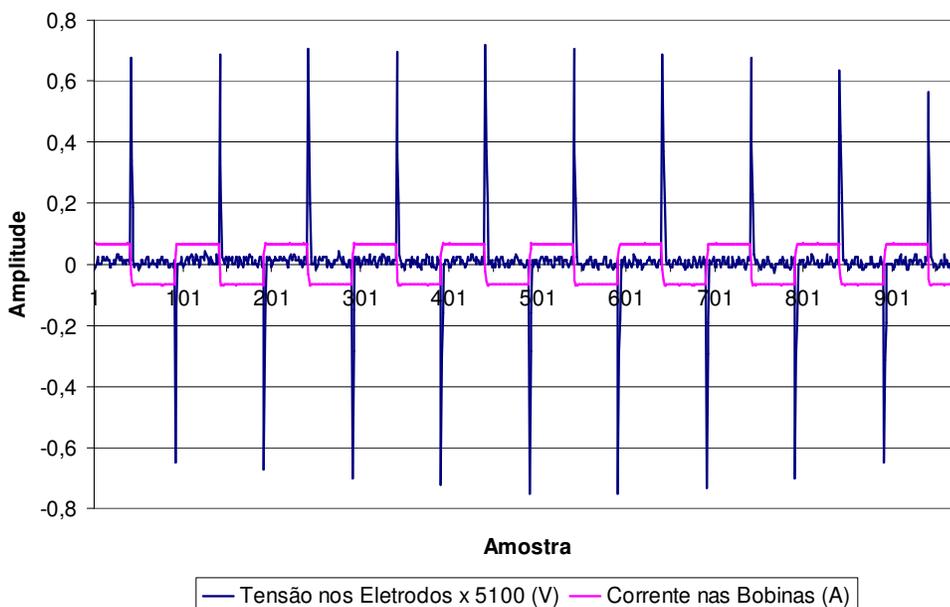


Figura 27 – Tensão nos eletrodos com vazão nula

Sendo assim, é interessante desprezar a parcela do sinal que apresenta essa característica transitória. Através de uma rotina computacional é possível desprezar a parcela do sinal que representa transitório. Nesse trabalho escolheu-se eliminar 10 amostras antes do ponto de inversão de alimentação das bobinas e 10 amostras após. Dessa forma, de um total de 100 pontos em cada período, 40 eram eliminados, restando 60 para proceder com a análise do sinal, conforme ilustra a figura 28.

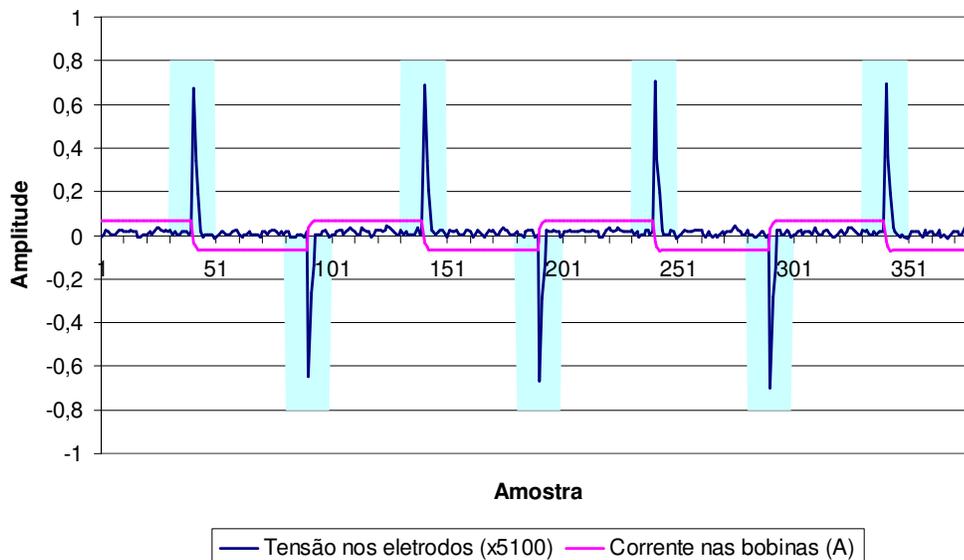


Figura 28 – Dados a serem desconsiderados (hachurados) na análise dos sinais adquiridos

Dessa forma, as amostras hachuradas na figura 28 podem ser desconsideradas no cálculo de vazão, pois não têm relação com a vazão.

4.2 ARRANJO EXPERIMENTAL

4.2.1 Bancada de Testes

Os ensaios foram realizados no laboratório LHPCH da UNIFEI, em uma bancada didática composta por uma bomba hidráulica, um reservatório principal, um reservatório para calibração, um partidor de vazão e diversas válvulas, que podem ser atuadas manualmente para se atingir a condição de operação desejada. A figura 29 mostra fotos da bancada utilizada:



Figura 29 – Bancada utilizada nos ensaios

Apesar de a bancada possibilitar o uso de tubos/medidores de diversos diâmetros, foi utilizado o diâmetro de 2", posto que havia a disponibilidade de um medidor eletromagnético de vazão comercial deste tamanho para ser usado na bancada. A figura 30 mostra um desenho com cotas da parte da bancada utilizada nos ensaios:

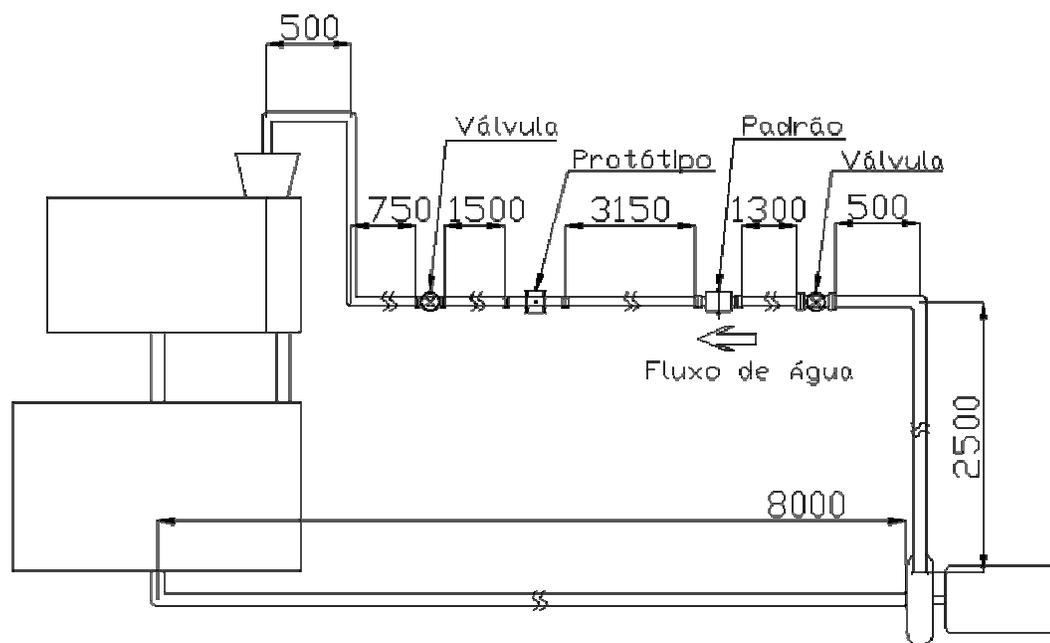


Figura 30 – Dimensões da bancada utilizada nos ensaios (em mm)

Os instrumentos utilizados durante os testes são apresentados no Anexo I.

4.3 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

Os componentes básicos de um medidor eletromagnético de vazão comum são o tubo de medição, eletrodos, bobinas e conversor de sinais. Esses componentes são apresentados na seqüência.

4.3.1 Tubo de medição

O tubo de medição é instalado na tubulação onde se quer medir a vazão. Este deve permitir a penetração do campo magnético gerado pelas bobinas de campo, e, portanto, não deve ter propriedades ferromagnéticas.

A tensão induzida pela vazão do fluido não deve ser curto-circuitada pelas paredes do tubo, devendo este ser construído com materiais isolantes, tais como cerâmicos ou plásticos, ou mesmo materiais metálicos não ferromagnéticos com um revestimento interno isolante em contato com o fluido. Além disso, por estar em contato constante com o fluido de processo, o material deve também ter boa resistência à abrasão (Hofmann, 2003). Existem tubos confeccionados de diversos materiais, específicos para as mais variadas aplicações.

O protótipo foi construído com tubo de PVC para esgoto, de 2,5 polegadas de diâmetro e 35 cm de comprimento.

4.3.2 Eletrodos

Os eletrodos estão em contato direto com o líquido. Seu material deve ser adequadamente resistente à corrosão e deve prover um bom contato elétrico com o líquido de processo. Os materiais mais comumente utilizados são aços inoxidáveis, ligas de CrNi, platina, tântalo, titânio e zircônio. É necessário cuidado especial na escolha dos eletrodos, pois deve-se buscar uma relação que otimize a relação entre resistência química e uma boa condutividade elétrica.

Desenvolvimentos recentes permitiram o uso de eletrodos do tipo capacitivo, que não têm contato direto com o líquido. Os medidores que empregam esse tipo de eletrodos fazem

parte de uma nova classe de medidores eletromagnéticos com captação de sinais por eletrodos capacitivos, e são usados principalmente para aplicações com severas limitações com relação à condutibilidade ou corrosividade do fluido de processo. Os eletrodos nesse caso são placas de capacitores, colocadas externamente ao tubo medidor (Hofmann, 2003).

Os eletrodos escolhidos para a confecção do protótipo são de aço inoxidável, escolha essa feita simplesmente pela facilidade de se encontrar o material frente às outras opções, e também devido ao fato de não se oxidar. Assim, os resultados de testes realizados em datas afastadas podem ser comparados sem maiores problemas.

Um detalhe muito importante com relação aos eletrodos é seu posicionamento e ligação ao circuito de amplificação. Buscou-se posicionar os eletrodos de forma mais equidistante possível, isto é, diametralmente opostos. Os fios de conexão entre os eletrodos e o amplificador foram soldados, eliminando ruídos provenientes de maus-contatos na ligação fios-eletrodos.

O posicionamento dos fios em relação ao campo magnético é igualmente importante. A área formada pelos fios e eletrodos na direção perpendicular ao fluxo magnético deve ser minimizada, pois estes formam uma espira, como mostrado na figura 31.

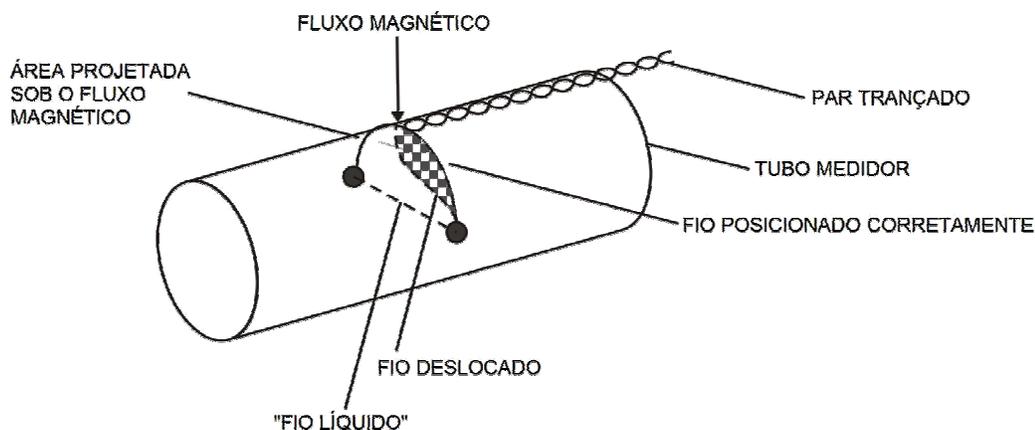


Figura 31 – Fluxo magnético sobre o circuito dos eletrodos

O protótipo possui três eletrodos, como mostrado na figura 32. Apesar de serem necessários apenas dois eletrodos para a aquisição do sinal, um terceiro foi instalado para alguns dos testes propostos, tais como limpeza dos eletrodos e monitoração dos potencial dos eletrodos.

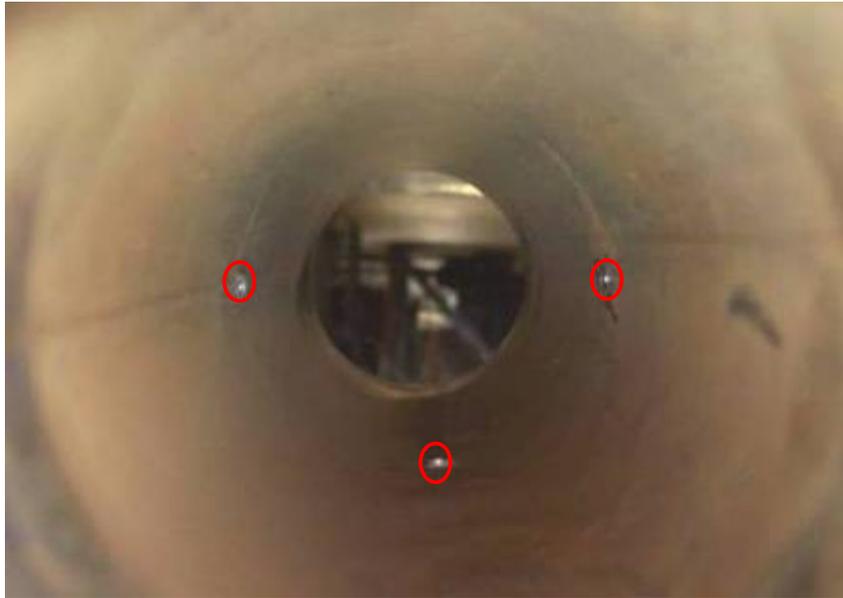


Figura 32 – Eletrodos do protótipo (destaque)

4.3.3 Bobinas

As bobinas são responsáveis pelo campo magnético que, em interação com o fluido em movimento, gera o potencial nos eletrodos. Dessa forma, as bobinas são dispostas diametralmente opostas no tubo, de modo que o campo seja perpendicular ao eixo dos eletrodos. O campo gerado pelas bobinas influi diretamente na precisão, linearidade e dependência do perfil de velocidades do medidor.

As bobinas do protótipo foram confeccionadas enrolando-se mil voltas de fio de cobre esmaltado, bitola 25 mm^2 , sobre um pedaço de cano de 3 polegadas, e aparadas nos extremos por CDs, colados ao cano formando um carretel. Dessa forma, as bobinas ficaram maiores que o diâmetro do tubo a ser medido, de 2 polegadas. Isso contribui para que o campo magnético dentro do tubo seja mais uniforme. A figura 33 mostra uma foto de uma das duas bobinas construídas.

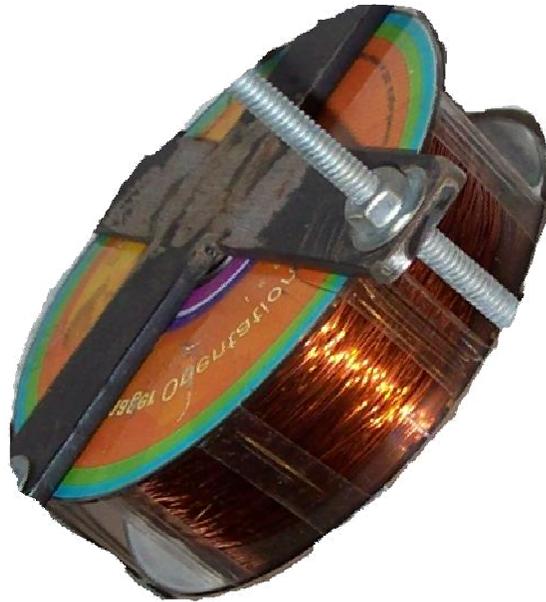


Figura 33 – Bobina confeccionada para o protótipo

É possível melhorar o desempenho das bobinas através de simulações e adição de núcleos de diversos formatos à bobina. Testes preliminares mostraram que isso não era necessário para as necessidades em questão.

4.3.4 Anéis de aterramento

Devido ao fato de o medidor eletromagnético basear-se na geração de um potencial elétrico por um líquido condutivo em movimento sob a ação de um campo magnético, é importante ter certeza de que o potencial do líquido na entrada e na saída do tubo do medidor seja zero.

Sendo assim, em tubulações não condutivas, como PVC ou tubulações metálicas com revestimento interno, é necessário o uso de anéis de aterramento de forma a aterrar o líquido na entrada e na saída do medidor. Em tubos metálicos não há essa necessidade, uma vez que o fluido dentro do tubo metálico já está aterrado.

Como os ensaios foram feitos em uma bancada composta de tubos de pvc, foi necessária a implementação de anéis de aterramento no medidor. Tais anéis foram confeccionados com seções de tubos metálicos, e fixados à parede interna do medidor por

parafusos, estes conectados ao terra do sistema. A figura 34 exhibe uma imagem do anel de aterramento, interno ao protótipo:



Figura 34 – Detalhe de anel de aterramento

4.3.5 Conversor de sinais

A função do conversor de sinais é adquirir o sinal dos eletrodos, geralmente da ordem de μV ou mV , realizar a filtragem e apresentar o resultado, na forma de indicação local e/ou transmitindo eletricamente por meios analógicos ou um padrão de comunicação digital.

Para isso, o conversor de sinais amplifica a tensão dos eletrodos, converte para valores digitais, realiza a filtragem utilizando geralmente técnicas de processamento digital de sinais, e então converte para as unidades definidas pelo usuário em sua configuração. O conversor de sinais é também responsável pela precisa alimentação das bobinas que geram o campo magnético. A arquitetura adotada para esse trabalho é mostrada na figura 35.

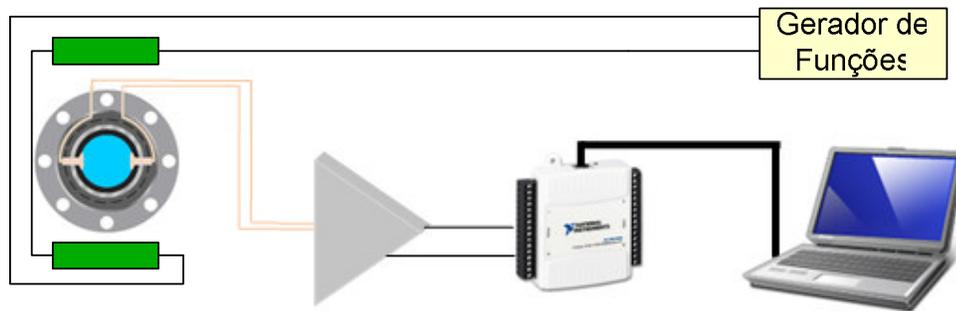


Figura 35 – Arquitetura utilizada para aquisição do sinal de tensão dos eletrodos

Os sinais dos eletrodos são levados para o amplificador de instrumentação, onde são amplificados e passam por um seguidor de tensão (*buffer*). Em seguida são levados a uma entrada analógica diferencial da placa de aquisição de dados NI USB-6008, que é então ligada a um computador portátil por meio da porta USB. O gerenciamento da placa de aquisição de dados, visualização dos dados instantâneos e gravação de dados para análises posteriores é realizada pelo software LabView®, que permite grande flexibilidade quanto ao tipo de aquisição e pré-processamento de dados. A alimentação das bobinas, neste trabalho, é feita por um gerador de funções.

O sistema de aquisição de dados permite um ganho substancial de produtividade nos ensaios, pois é possível testar diferentes configurações e rotinas através de modificações em software.

De posse dos sinais adquiridos e gravados em arquivos pelo LabView®, é possível realizar as análises *off-line*, utilizando para isso rotinas criadas no programa MatLab®.

4.4 TESTES NO PROTÓTIPO

Antes de se aplicar os testes no protótipo, foi feita uma validação de seu funcionamento, a fim de se certificar de que o protótipo elaborado atendia às necessidades do trabalho. A figura 36 ilustra o sinal obtido em um dos testes de validação, enquanto a figura 37

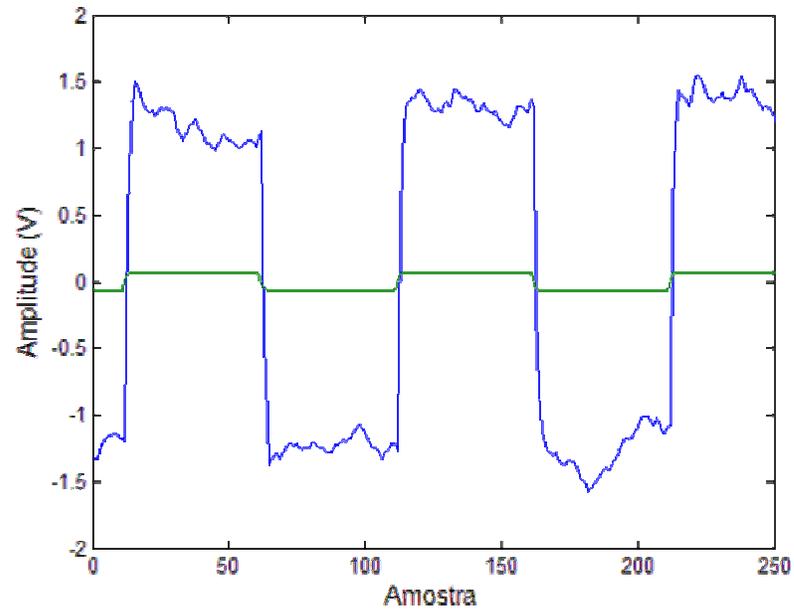


Figura 36 – Sinal amplificado dos eletrodos com excitação da bobina em 10Hz

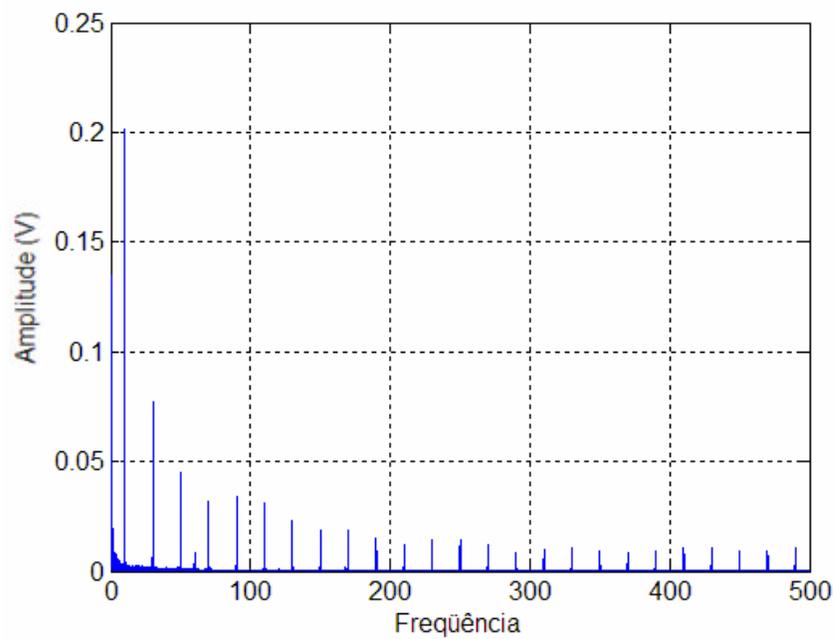


Figura 37 – FFT do sinal coletado nos eletrodos com excitação da bobina em 10Hz

Como pode ser observado na figura 37, são evidentes picos nas frequências 10 Hz, 30 Hz, 50 Hz, 70 Hz, etc, que representam os múltiplos ímpares da frequência principal, fato esse devido ao formato de onda da excitação ser quadrado.

Para confirmar o funcionamento do protótipo, também foi feita uma calibração do mesmo. Para tanto foi utilizado o medidor comercial como padrão. O procedimento para realizar o cálculo da relação vazão x sinal foi descrito a seguir:

Inicialmente aplicou-se um filtro ao sinal dos eletrodos, a fim de ser retirada a componente DC. A etapa seguinte foi eliminar os pontos iniciais de cada ciclo de onda, eliminando as interferências causadas pelo chaveamento das bobinas. Posteriormente foram calculados os valores RMS da tensão nos eletrodos e também da corrente das bobinas para diversas vazões, uma vez que a corrente nas bobinas também influencia o sinal captado nos eletrodos. A tabela a seguir mostra os resultados usados para o cálculo da curva de calibração do protótipo, tendo como referência a vazão medida pelo medidor eletromagnético padrão, também usado nos testes práticos:

Tabela 1 – Relação entre vazões e tensões nos eletrodos para o protótipo

Vazão (m ³ /h)	U _{eletrodos} (V _{RMS})
0	0,0176
6,15	0,1484
7,9	0,1824
10,11	0,2201
11,9	0,2522
13,95	0,2922

A primeira coluna indica a vazão, medida pelo medidor de vazão comercial, que foi considerado como padrão nesse caso. A segunda coluna exibe os valores RMS do sinal dos eletrodos, já desconsiderados o valor DC e os picos gerados pelo chaveamento das bobinas, multiplicado pelo ganho do amplificador de instrumentação desenvolvido.

Nota-se que, para uma vazão de zero há uma tensão residual nos eletrodos. Esse fato ainda não foi completamente explicado (Maalouf, 2006), podendo ser resultado de tensões originadas por reações entre os eletrodos e o líquido de processo, ruídos da rede, ou até mesmo interferências causadas no sistema de aquisição de dados pelo campo magnético das bobinas.

Outro fator muito importante com relação à deriva de zero nesses sensores tem relação com o posicionamento dos cabos que ligam os eletrodos ao sistema de aquisição. Arranjos diferentes podem originar sinais diferentes para uma mesma condição de excitação das bobinas, mesmo com a vazão zero, como mostrado por Michalski (2006), e na figura a seguir:

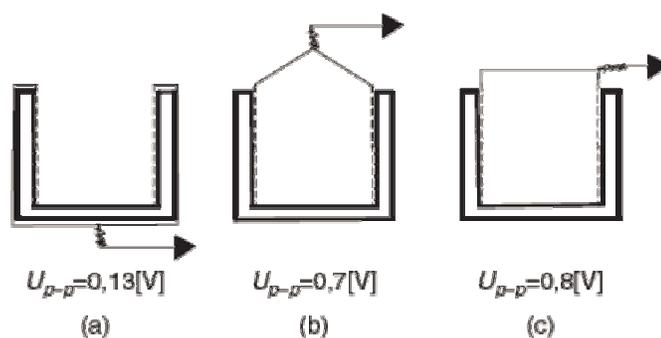


Figura 38 – Diferentes ligações dos fios de sinal ao sistema de aquisição (Michalski, 2006).

Tendo em mente tais fatos, e dentro das limitações encontradas para a sua implementação, a ligação dos eletrodos ao sistema de aquisição de dados do protótipo foi feita da melhor maneira possível, minimizando a deriva de zero.

Para calcular a relação entre os valores de tensão e vazão, o primeiro par de pontos foi eliminado, por representar a vazão nula, devido aos fatos expostos acima. O resultado da regressão linear dos demais pontos é exibido na figura 39

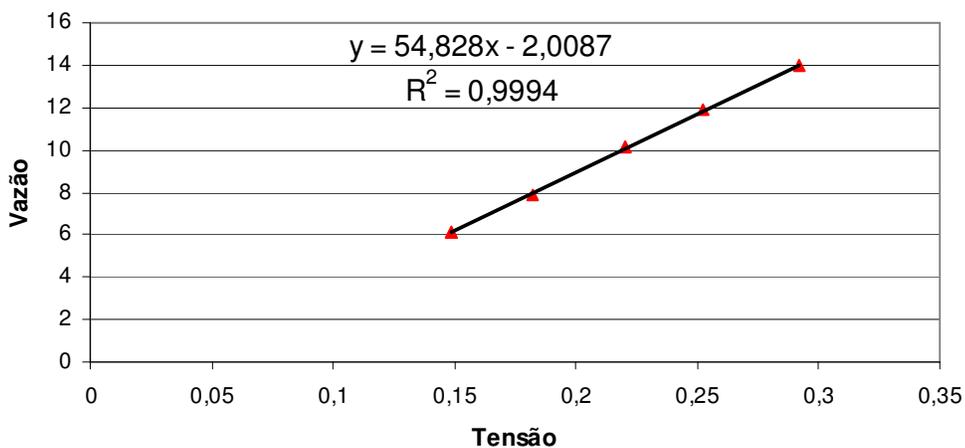


Figura 39 – Relação Vazão X Sinal dos eletrodos

A equação da reta que liga os pontos na figura 39 é:

$$Q = 54,828.U - 2,0087$$

Onde:

Q = vazão instantânea (m³/h)

U = valor RMS da tensão nos eletrodos (V) x 5100

A reta em questão tem um coeficiente de relação (R^2) igual a 0,9994, indicando uma excelente aderência do modelo adotado para representar o medidor na faixa de vazão experimentada, em relação ao medidor comercial considerado como padrão.

Como citado anteriormente, a vazão relaciona-se com a tensão através de uma constante de proporcionalidade, sendo essa relação do tipo $y = b.x$. Entretanto, nota-se que a equação é do tipo $y = a + b.x$. O intercepto poderá ser excluindo aplicando-se um ajuste de zero.

4.5 IMPLEMENTAÇÃO DE ROTINAS DE AUTO-TESTE

4.5.1 Detecção de bolhas de gás ou sólidos suspensos

Para a detecção de bolhas de gás ou sólidos, o circuito de teste foi ligado e a bomba colocada em uma vazão de 7,5 m³/h, sendo essa a metade do fundo de escala do medidor de referência. Assume-se que o comportamento do sinal com bolhas ou sólidos suspensos é análogo, sendo que ambos devem causar um alto nível de ruídos. Outra reação esperada também é que o medidor apresente leituras instáveis e acima do valor real da vazão do líquido, pois a presença de sólidos ou bolhas de ar é considerada como líquido pelo medidor, devido a seu princípio de funcionamento, o que leva a tais medidas errôneas. Não é necessário dizer o quanto isso pode se traduzir em prejuízos para o usuário do equipamento. Outro fato também é que a detecção da presença de bolhas na tubulação pode alertar o usuário para a possibilidade de cavitação nas bombas do processo.

O teste foi realizado mantendo-se a vazão do líquido constante, e aplicando-se ar comprimido na tubulação através de um orifício adaptado na bomba, conforme mostra a

figura 40. Na figura 41 é possível visualizar o sinal dos eletrodos em um dos ensaios realizados:



Figura 40 – Orifício para inserção de bolhas na tubulação (destaque)

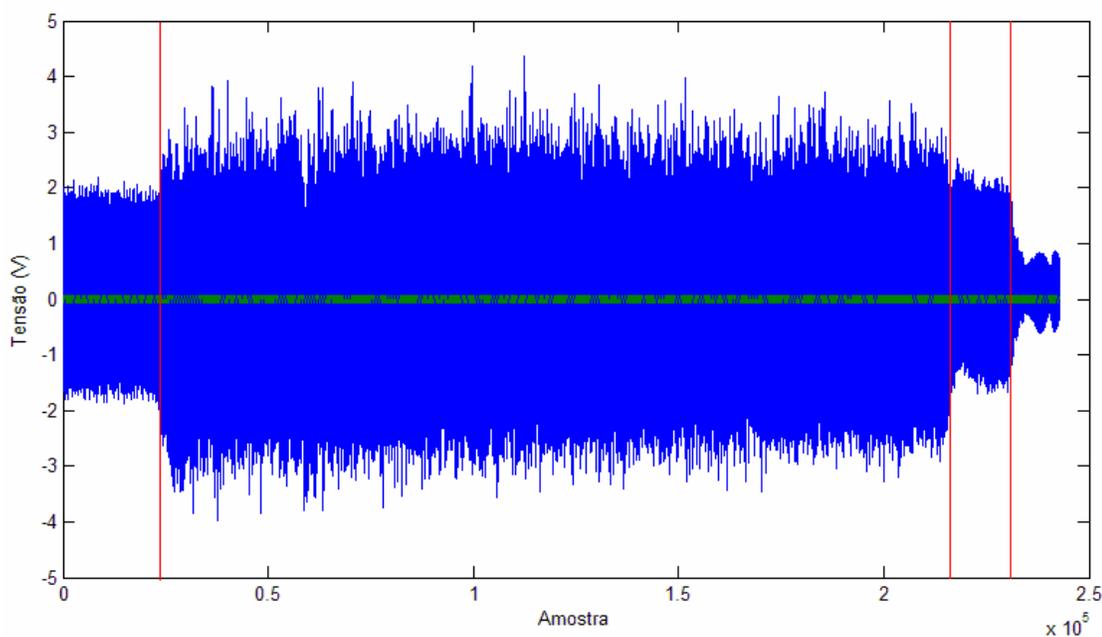


Figura 41 - Tensão dos eletrodos (azul) e corrente nas bobinas (verde) durante teste de detecção de bolhas na tubulação

Na figura 41, a tensão dos eletrodos é representada em azul, e a corrente na bobina em verde. Nota-se que não há variação alguma no sinal das bobinas. O primeiro traço vertical, na cor vermelha, indica o momento em que o ar comprimido começou a ser injetado na tubulação. O segundo traço vertical indica o momento em que o fluxo de ar foi interrompido. O terceiro mostra o momento em que a válvula do circuito começou a ser fechada.

Como proposto por Incontri (2005), foi criada uma rotina em Matlab para realizar a multiplicação do sinal do eletrodo (vide pág 29). O sinal do eletrodo foi então multiplicado por um sinal alternado, com o dobro da frequência principal, sendo que nesse sinal criado os primeiros e os últimos 10 pontos de cada semi-ciclo têm valor zero. Sendo assim, quando a multiplicação do sinal teste (vermelho) pelo sinal dos eletrodos (verde) é realizada, os pontos relativos ao transiente causado pela inversão da tensão nas bobinas são eliminados. O sinal resultante (azul claro) é utilizado para se analisar os ruídos, pela proposta de Incontri (2005).

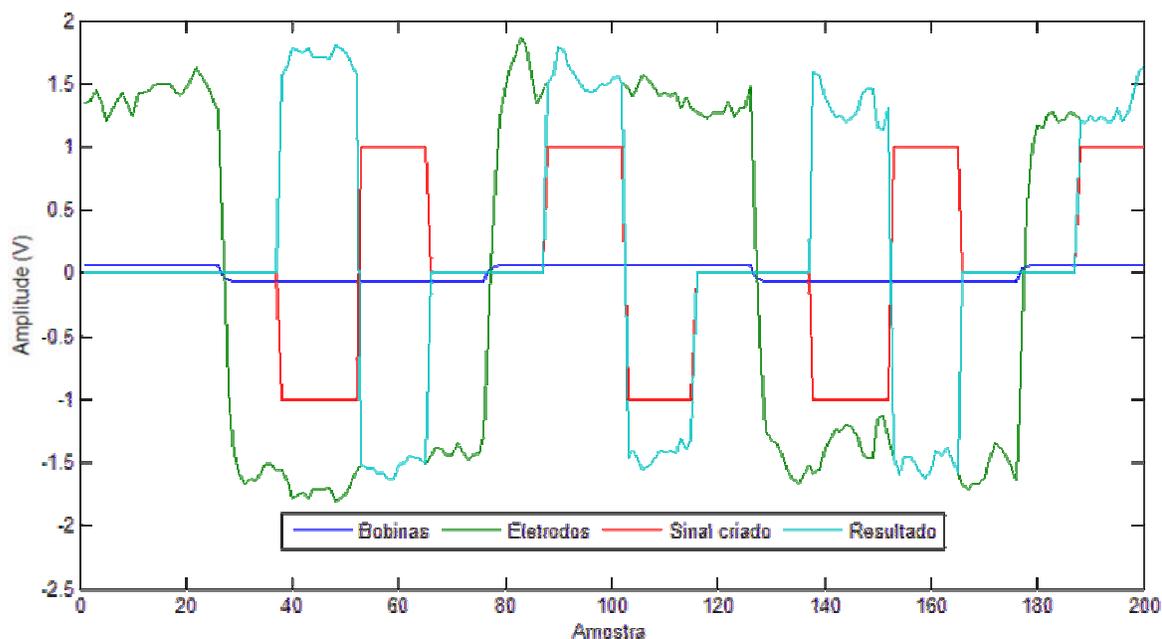


Figura 42 – Sinais das bobinas (azul escuro) e eletrodos (verde), juntamente com o sinal criado (vermelho) para verificação e o sinal resultante (azul claro).

Para se analisar os sinais do teste com bolhas, primeiramente foram feitas análises estatísticas dos sinais do eletrodo e do sinal resultante. As figuras 43 e 44 a seguir mostram, respectivamente, os gráficos da soma dos valores em cada período e valor RMS em cada período.

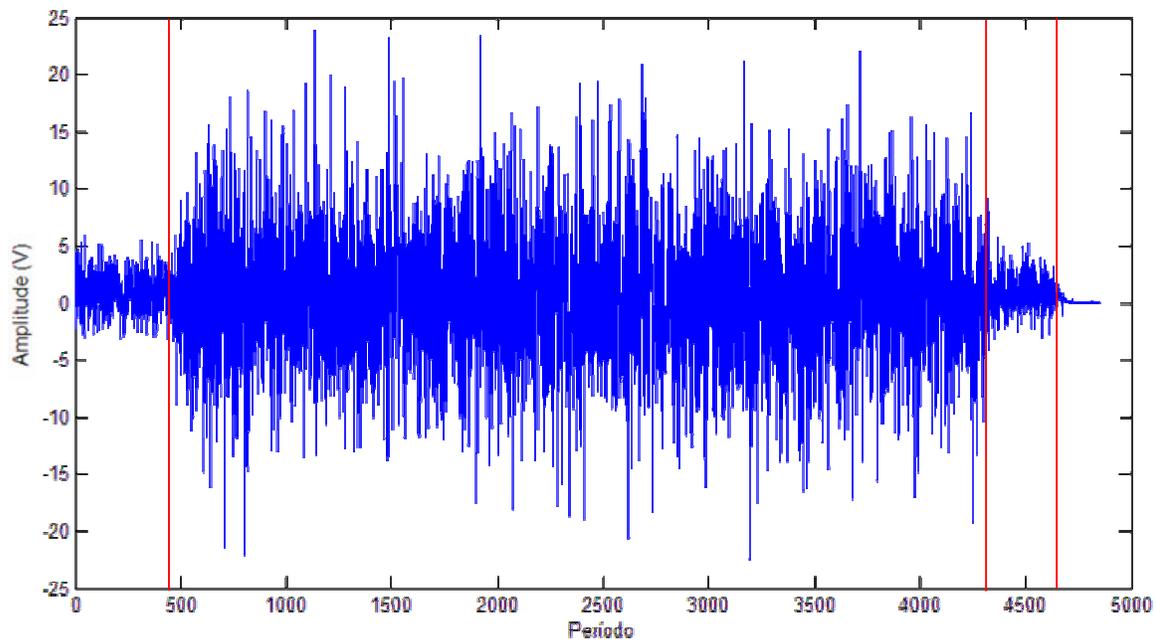


Figura 43 – Soma dos valores em cada período do sinal resultante

Nota-se, na figura 43, que a soma dos valores em cada período também sofre uma grande perturbação quando da presença de bolhas na tubulação. É possível portanto estabelecer um limite (*threshold*) acima do qual o medidor indicará o erro ao usuário.

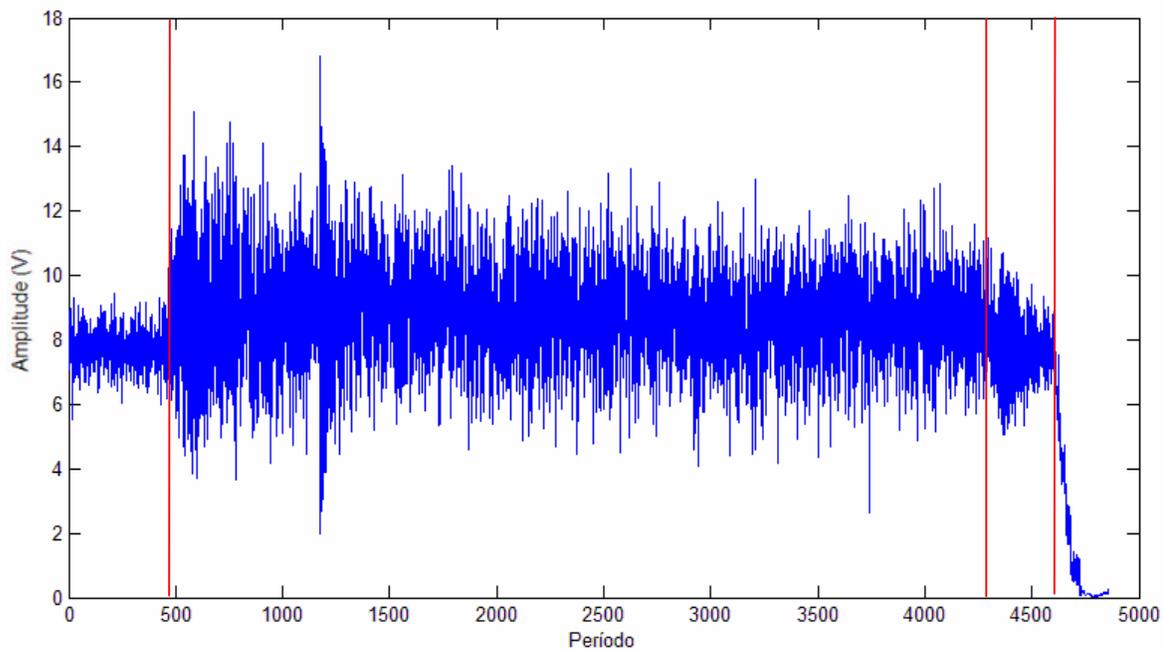


Figura 44 – Valor RMS do sinal resultante em cada período

No gráfico de valor RMS por ciclo nota-se também uma grande variação do sinal dos eletrodos quando da inserção de bolhas na tubulação. Por volta do período 4300 as bolhas cessam, diminuindo a amplitude do sinal, e por volta do período 4500 é possível perceber o fechamento da válvula, diminuindo a vazão de água e por consequência o valor RMS da tensão nos eletrodos. Sendo assim, pode-se afirmar que é possível obter informações do nível de ruído do sinal pelo método proposto por Incontri (2005).

Como o problema de ruídos nos medidores eletromagnéticos é um dos mais graves, decidiu-se nesse trabalho por aprofundar na análise das frequências contidas no sinal, com o intuito de investigar a composição do sinal para situações com condições normais de operações e com presença de ruídos.

Para efeito de comparação, será usado o mesmo sinal da figura 41 para análise de suas componentes de frequência extraídas pela transformada rápida de Fourier, ou FFT. Para tal, foi criada uma rotina em MatLab que possibilita a divisão do sinal em partes pré-determinadas e realiza a FFT para cada parte. A figura 45 mostra um sinal típico para um medidor eletromagnético com excitação em onda quadrada de 10 Hz. Observam-se claros picos nas frequências de 10 Hz e seus múltiplos ímpares.

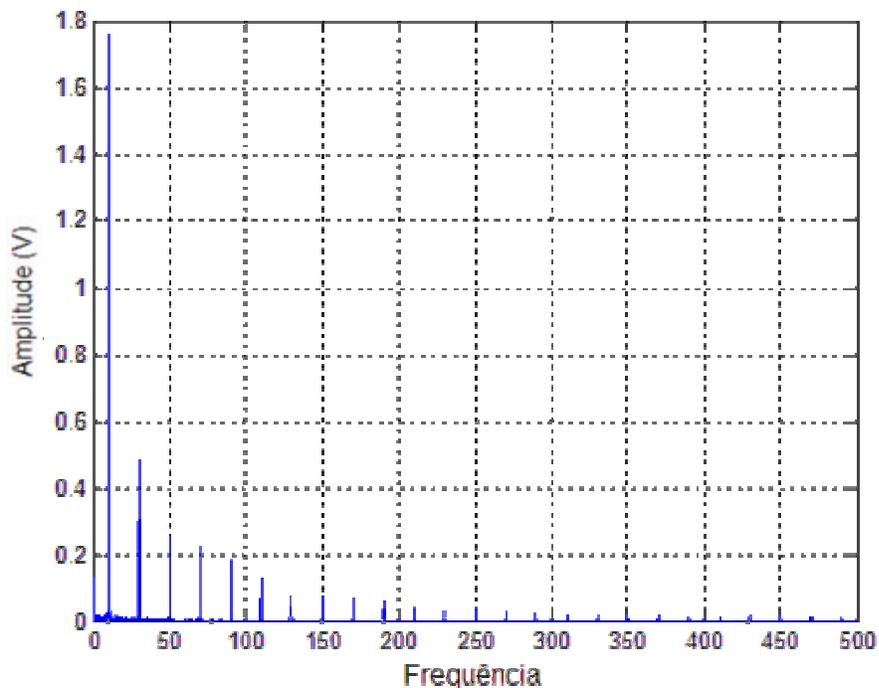


Figura 45 – FFT com os pontos de 1 a 20.000 do sinal dos eletrodos (antes da inserção de bolhas na tubulação).

Já a figura 46 mostra as componentes para o sinal medido com a presença de bolhas na tubulação através do cálculo da FFT do mesmo.

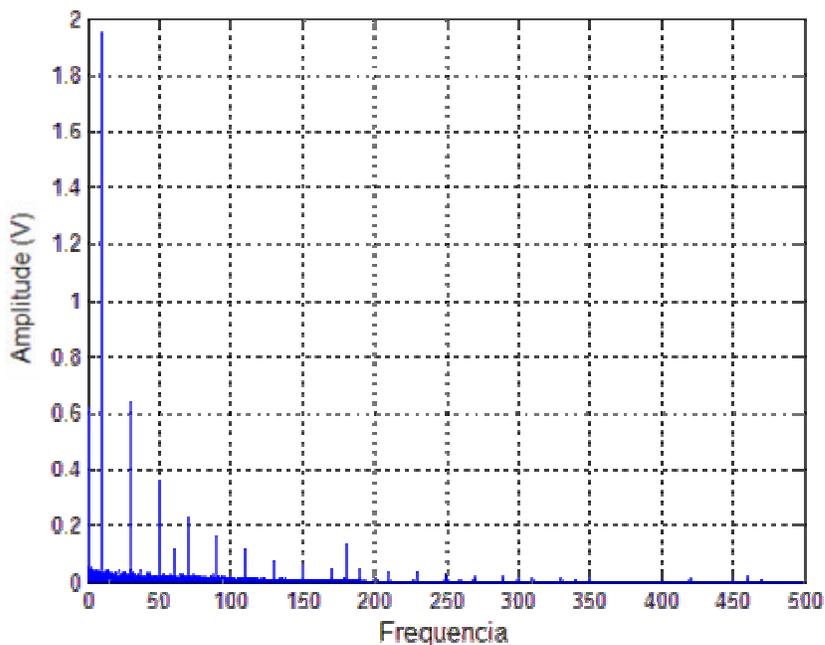


Figura 46 – FFT com os pontos 30.000 a 50.000 da tensão dos eletrodos (bolhas de ar presentes na tubulação).

Comparando-se as duas FFTs apresentadas nas figuras 45 e 46, é possível concluir que a presença de bolhas na tubulação aumenta significativamente o nível de ruído de 0 Hz até 100 Hz. Nota-se também a presença de ruídos em 60 Hz e seus múltiplos ímpares.

A tabela 2 apresenta a diferença causada pela inserção de bolhas de ar na tubulação, considerando as principais frequências do sinal:

Tabela 2 – Comparação entre principais frequências para sinal sem bolhas de ar e sinal com bolhas de ar

Frequência (Hz)	Amplitude 1 (sem bolhas)	Amplitude 2 (com bolhas)	Diferença
0	0,1286	0,6498	0,5212
10	1,7573	1,9470	0,1897
30	0,4836	0,6326	0,149
50	0,2513	0,3466	0,0953
60	0	0,1084	0,1084
70	0,2245	0,2226	-0,0019
90	0,1821	0,1549	-0,0272
110	0,1269	0,1008	-0,0261
130	0,07699	0,0915	0,01451
150	0,0784	0,07408	-0,00432
170	0,07363	0,0692	-0,00443
180	0	0,1784	0,1784

A figura 47 ilustra os dados da tabela 2 e reforça o fato de que a presença de bolhas influi diferentemente nas variadas frequências.

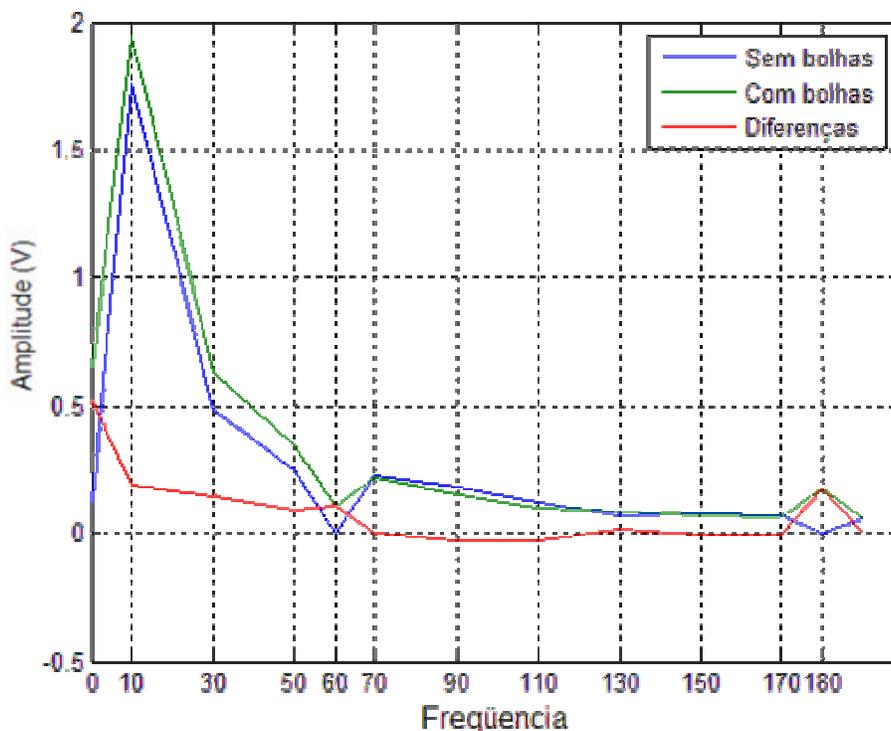


Figura 47 – Principais frequências e diferenças para os sinais com e sem bolhas

A tabela 2 e figura 47 explicitam tais diferenças para o sinal exemplo. O sinal tem sua amplitude aumentada nas frequências de 10, 30 e 50 Hz, enquanto nas demais frequências ímpares o sinal sofre alterações quase nulas. Uma das consequências diretas deste fato é a ocorrência de um erro de leitura no medidor, pois este não está preparado para diferenciar o sinal proveniente da vazão do fluido.

Como a influência é diferente nas diferentes frequências, pode-se considerar a possibilidade de inferir sobre a quantidade de bolhas na tubulação analisando as diferentes componentes. Dessa forma, um medidor inteligente poderia minimizar os efeitos das bolhas na tubulação. Contudo, tais ensaios não foram realizados nesse trabalho, pois não havia condições de medir a proporção água/ar no momento dos ensaios. Isso poderia ser realizado como uma extensão do presente trabalho, determinando a influência de bolhas de ar em termos quantitativos, através da avaliação das componentes do sinal nas diferentes frequências.

Ainda utilizando o mesmo sinal, foi aplicada a FFT da parcela em que o ar foi retirado da tubulação, sendo este o intervalo entre os pontos 220.000 e 230.000, e o gráfico é exibido na figura 48.

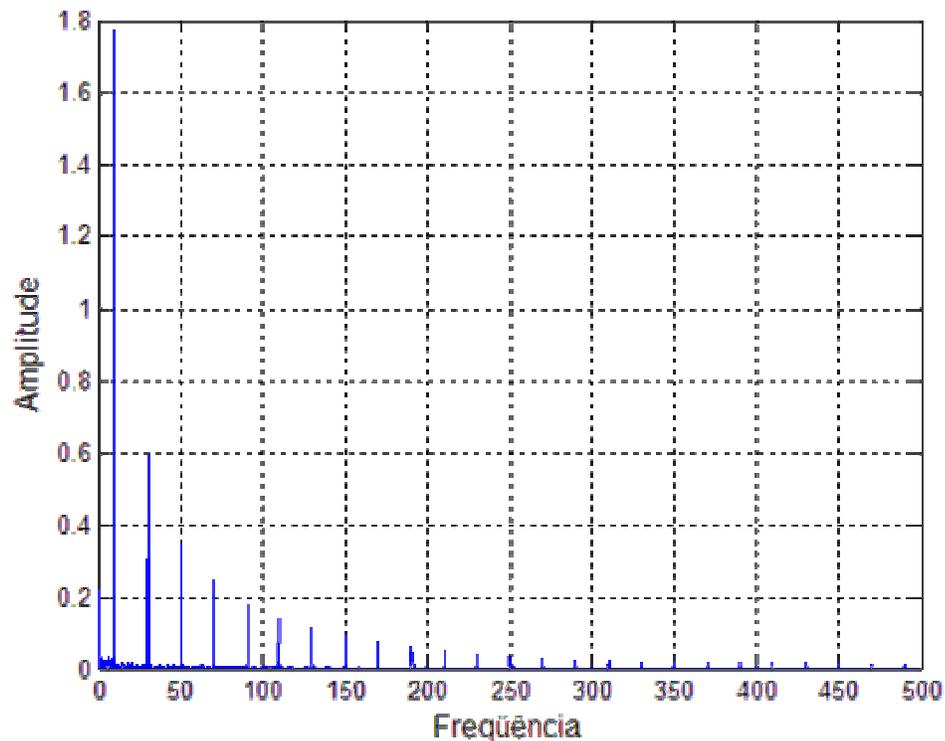


Figura 48 – FFT com os pontos 220.000 a 230.000 da tensão dos eletrodos (interrupção do fluxo de bolhas na tubulação).

A figura 48 evidencia que, na ausência das bolhas anteriormente aplicadas, o sinal volta à sua composição original.

4.5.2 Monitoração do potencial dos eletrodos

Nesse tópico foram realizadas investigações do potencial dos eletrodos em relação ao terra. Para tanto, não foi necessário nenhum circuito de amplificação, sendo os eletrodos ligados diretamente ao sistema de aquisição de dados, como mostra a figura 49:

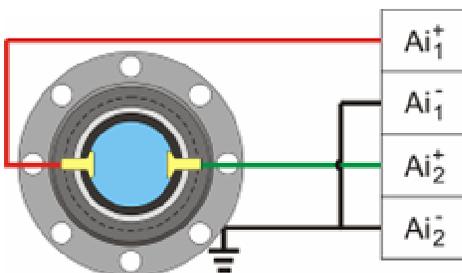


Figura 49 – Ligação para monitoramento do potencial dos eletrodos

Os eventos investigados nesse caso foram:

- Condição normal de funcionamento;
- Falhas de aterramento;
- Desconexão de eletrodos;
- Curto-circuito entre eletrodos e bobinas;

O primeiro ensaio realizado foi feito em condição normal de funcionamento. O circuito hidráulico apresentava vazão no momento dos ensaios ($8 \text{ m}^3/\text{h}$), e as bobinas do medidor foram alimentadas normalmente. Para facilitar o entendimento, decidiu-se nomear os eletrodos como sendo eletrodo 1 (à direita na figura 50) e eletrodo 2 (à esquerda na figura 50).

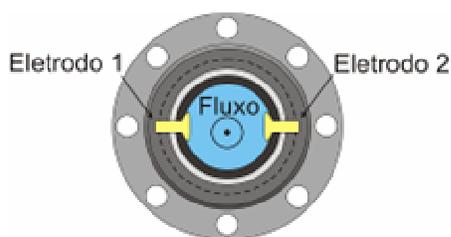


Figura 50 – Vista do medidor, frontal em relação ao fluxo

Primeiramente a tensão em ambos os eletrodos foi medida, de acordo com as ligações na figura 49. O sinal adquirido é exibido na figura 51.

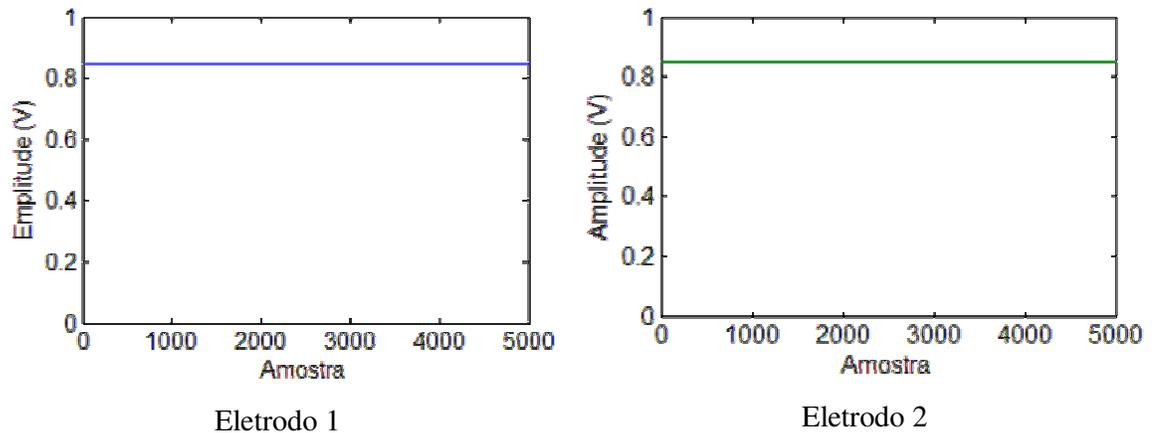


Figura 51 – Tensão nos eletrodos para condição normal de funcionamento.

A tensão média medida do eletrodo 1 foi de 0,8492 V, e a tensão média do eletrodo 2 foi 0,8501 V. Nota-se que os valores são bastante próximos, porém isso nem sempre acontece (Walker, 2001). Prosseguindo nos testes de monitoramento do potencial dos eletrodos, o próximo passo foi causar uma falha, para então verificar a sua influência no sinal.

A primeira falha causada foi a desconexão do terra. Essa é uma ocorrência bastante comum, seja por meios mecânicos (fio danificado) ou por problemas de corrosão no aterramento (Walker, 2001).

O sistema foi inicializado, e, após 12 segundos o terra foi desconectado do medidor. O sinal resultante pode ser visualizado na figura 52.

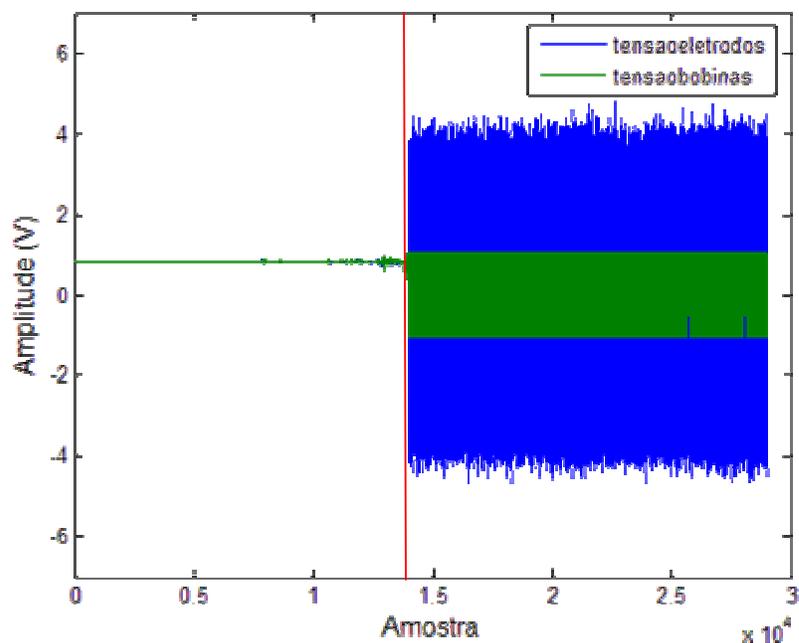


Figura 52 – Tensão nos eletrodos para falha de aterramento.

Nota-se claramente a mudança no sinal após a desconexão do aterramento (linha vertical vermelha). figura 53 mostra as diferentes componentes do sinal antes e após a desconexão do aterramento.

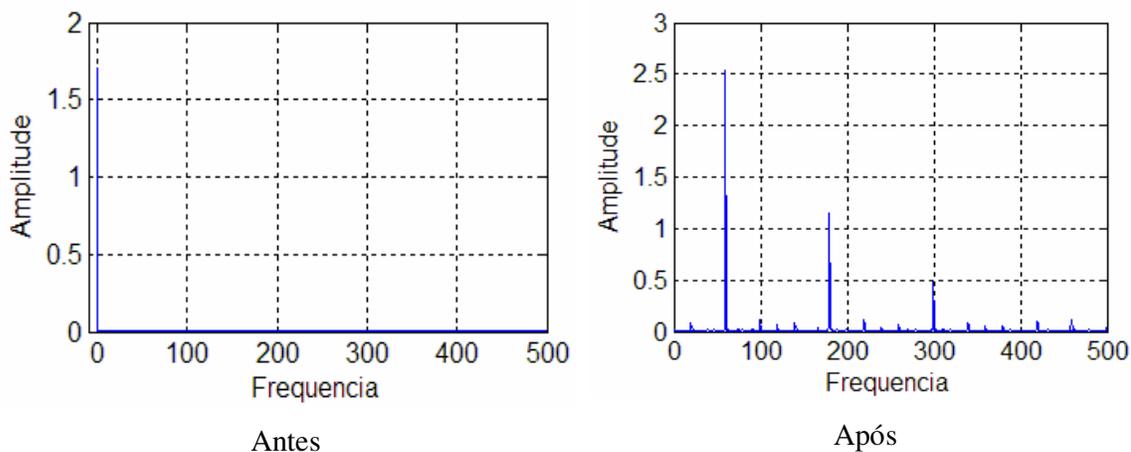


Figura 53 – FFT do sinal antes e após a desconexão do aterramento (Eletrodo 1) .

Observa-se na figura 53 que a tensão no eletrodo, quando em condição normal de funcionamento, é predominantemente contínua ($f=0$ Hz). Após a desconexão do aterramento a tensão passa a ter componentes em 60 Hz e seus múltiplos ímpares. O comportamento se

repete também para o eletrodo 2, fato pelo qual não há necessidade de discorrer sobre ele também.

O próximo procedimento realizado consiste em desconectar os eletrodos do sistema de aquisição, simulando um problema de conexão entre o eletrodo e o sistema de aquisição de dados. Tal fato é bastante raro de acontecer, principalmente em medidores conjugados, em que o conversor de sinais é integrado ao tubo medidor. Já nos medidores com conversor remoto, a possibilidade de interrupção da conexão dos eletrodos com o conversor de sinais é maior. Outro fator que pode levar à interrupção dessas ligações é se o líquido de processo entrar no compartimento dos eletrodos e danificar as conexões.

A figura 54(a) mostra o sinal dos eletrodos em condição normal de funcionamento e após a desconexão do eletrodo 1 do sistema de aquisição de dados e re-conexão do mesmo. A figura 54(b) mostra o mesmo procedimento, realizado com o eletrodo 2.

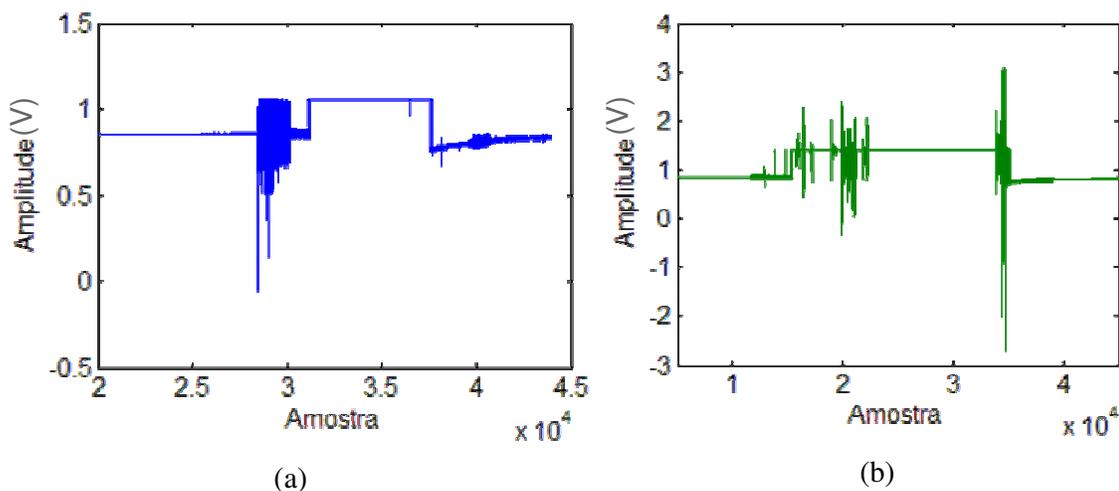


Figura 54 – (a) Tensão no eletrodo 1. (b) Tensão no eletrodo 2.

Nota-se na figura anterior que o comportamento do sinal é semelhante para ambos os eletrodos. A desconexão de um dos eletrodos causa a variação da tensão nos eletrodo desconectado. Outra situação que pode ocorrer é um curto entre o eletrodo e o terra. A figura 55 mostra o resultado do sinal para o eletrodo 1 (a) e para o eletrodo 2 (b). No caso (a), o eletrodo foi curto-circuitado ao terra aos 12 segundos de ensaio, enquanto no caso (b) foi curto-circuitado aos 21 segundos.

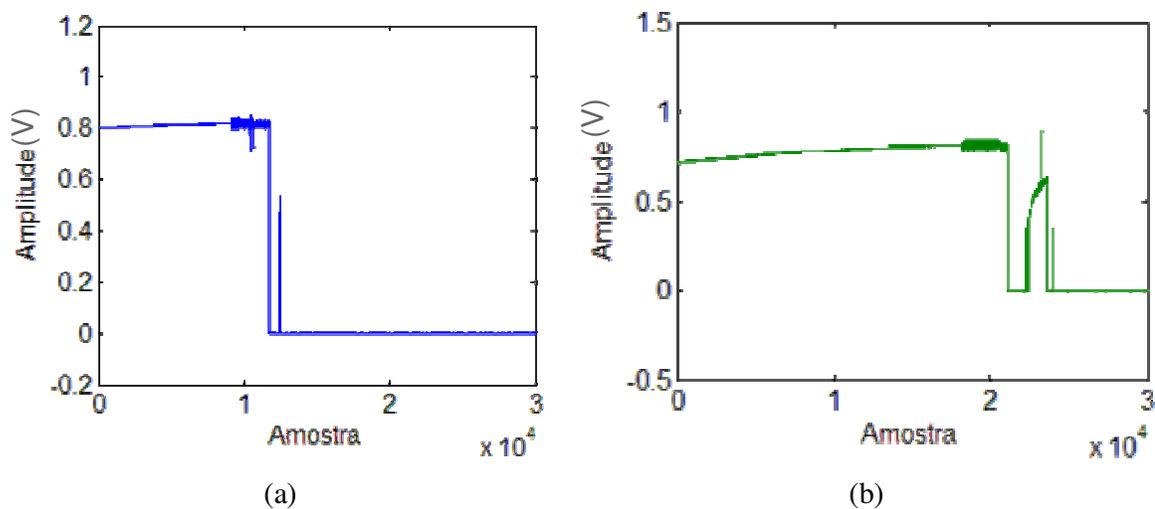


Figura 55 – (a) Tensão no eletrodo 1. (b) Tensão no eletrodo 2.

O próximo ensaio destina-se a simular um curto circuito entre uma das bobinas e os terminais do conversor de sinais, que nesse caso é o sistema de aquisição de dados. Dessa forma, o sistema foi colocado em funcionamento normal, e em certo momento um dos fios que alimenta a bobina foi curto-circuitado ao eletrodo 1. A figura 56 mostra o sinal adquirido para o procedimento descrito acima.

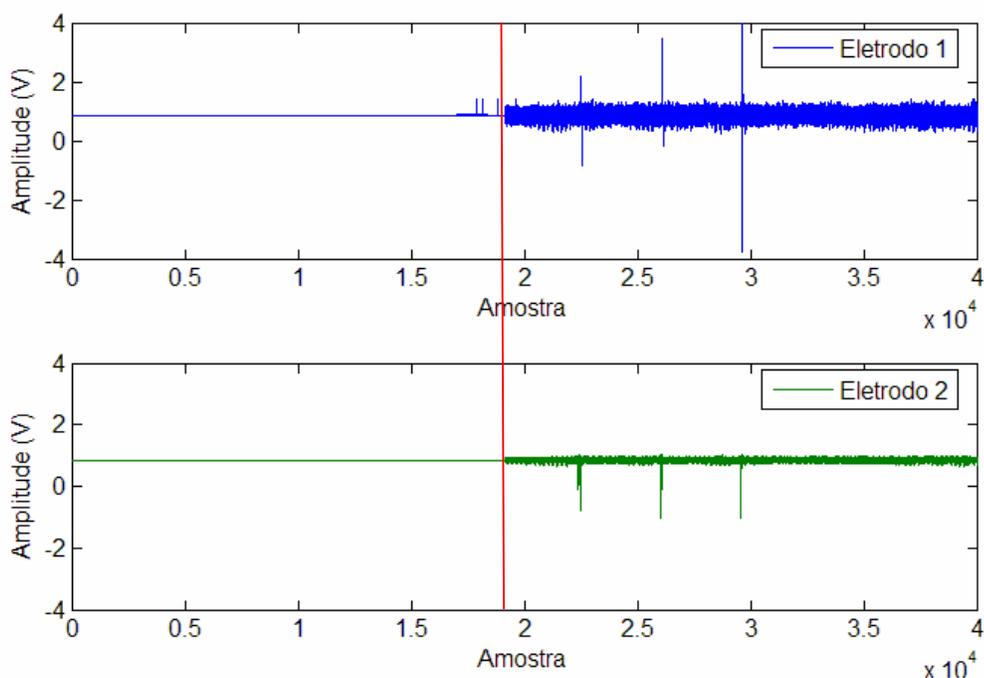


Figura 56 – Tensão nos eletrodos para curto circuito da bobina com o eletrodo 1.

O mesmo procedimento foi realizado com relação ao eletrodo 2, e o comportamento observado foi análogo, com o sinal do eletrodo 2 sendo mais afetado que o sinal do eletrodo 1. Dessa forma, ao se monitorar os dois eletrodos simultaneamente, uma variação assimétrica aponta para uma falha em um dos eletrodos, enquanto uma variação similar em ambos aponta para uma falha no aterramento.

O aumento de ruído em ambos eletrodos, porém em assimetria, pode também indicar um curto entre as bobinas e os eletrodos, o que pode ser consequência de penetração do fluido de processo nos compartimentos dos eletrodos e das bobinas, entre outras razões.

Como descrito anteriormente, o monitoramento dos eletrodos é feito sem a necessidade de se amplificar o sinal dos mesmos. Isso porque o que é lido é a tensão dos eletrodos em relação ao terra, e não a tensão diferencial entre os eletrodos. Como também citado anteriormente, a tensão diferencial nos eletrodos é a utilizada para se ter a informação da vazão em determinado momento.

Assim, todos esses testes são feitos de forma a garantir uma tensão diferencial nos eletrodos o mais livre de ruídos possível. O monitoramento por ruídos também pode ser feito tomando-se como base a tensão diferencial dos eletrodos. O item a seguir trata de um assunto de suma importância, e sobre o qual defeitos frequentes são reportados, razão pela qual será tratado em um item em separado.

4.5.3 Deficiência de aterramento

Durante os testes notou-se que um bom aterramento do medidor é essencial para a obtenção de medidas confiáveis. Sendo assim, decidiu-se realizar testes com várias situações de aterramento, utilizando-se o sensor comercial por facilidade de aplicação.

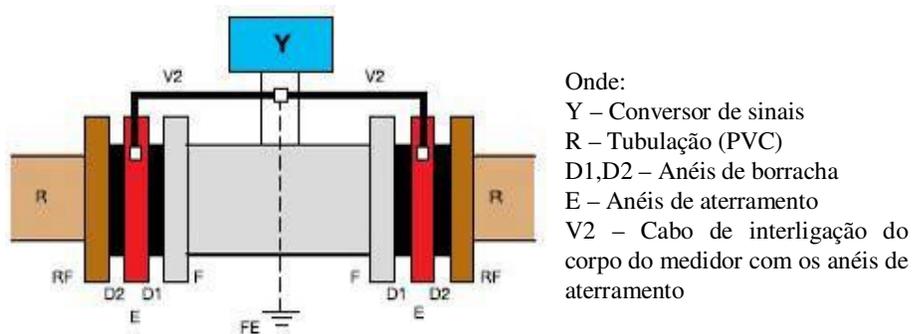


Figura 57 – Aterramento do medidor eletromagnético de vazão para tubulações não metálicas.

Foram realizados testes para diversas situações de aterramento, com vazão constante. Como referência, a seguir são apresentados os sinais para uma condição normal de funcionamento, ou seja, com o aterramento corretamente conectado ao medidor:

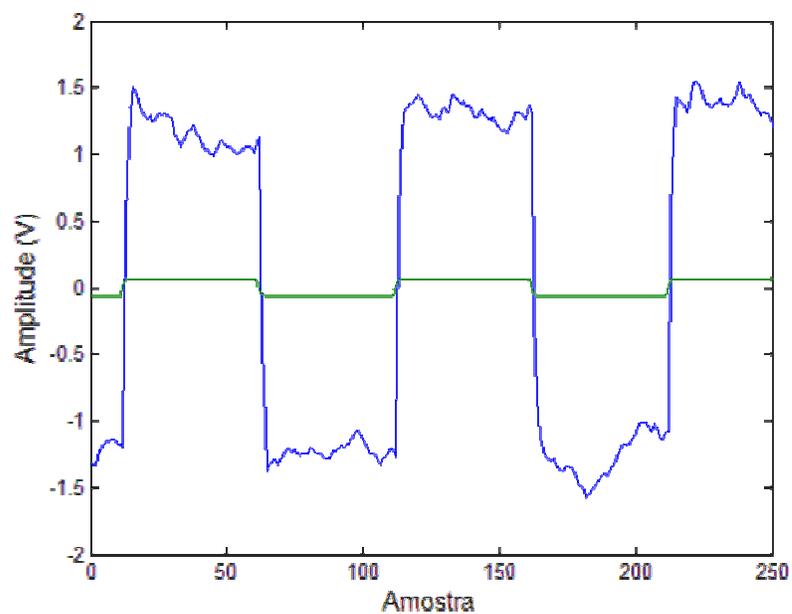


Figura 58 – Tensão nos eletrodos (azul) e corrente nas bobinas (verde)

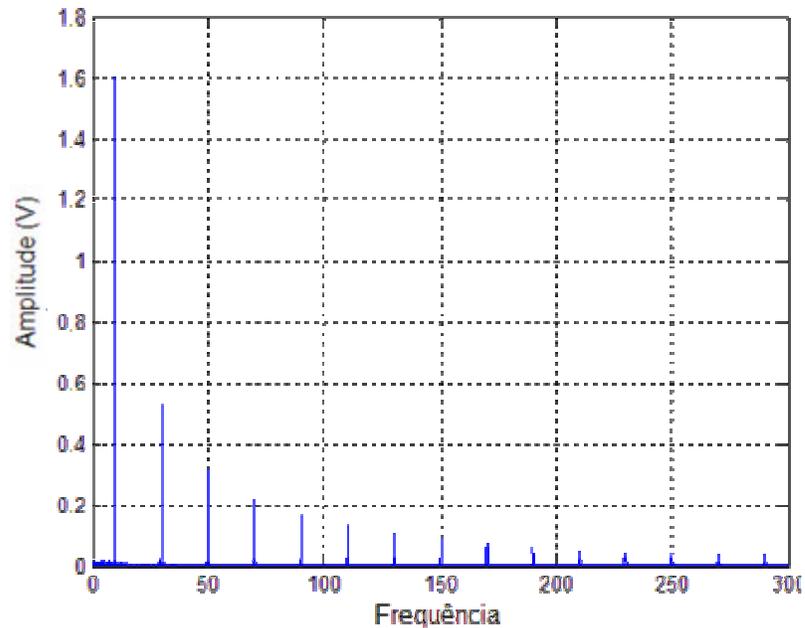


Figura 59- FFT da tensão nos eletrodos com os dados exibidos na figura 58

Nota-se nas figuras anteriores que a FFT do sinal dos eletrodos da figura 58 tem componentes nas frequências de 10Hz e seus múltiplos ímpares. A seguir o medidor foi desconectado do aterramento, e o sinal dos eletrodos foi novamente medido, dando origem ao sinal da figura a seguir:

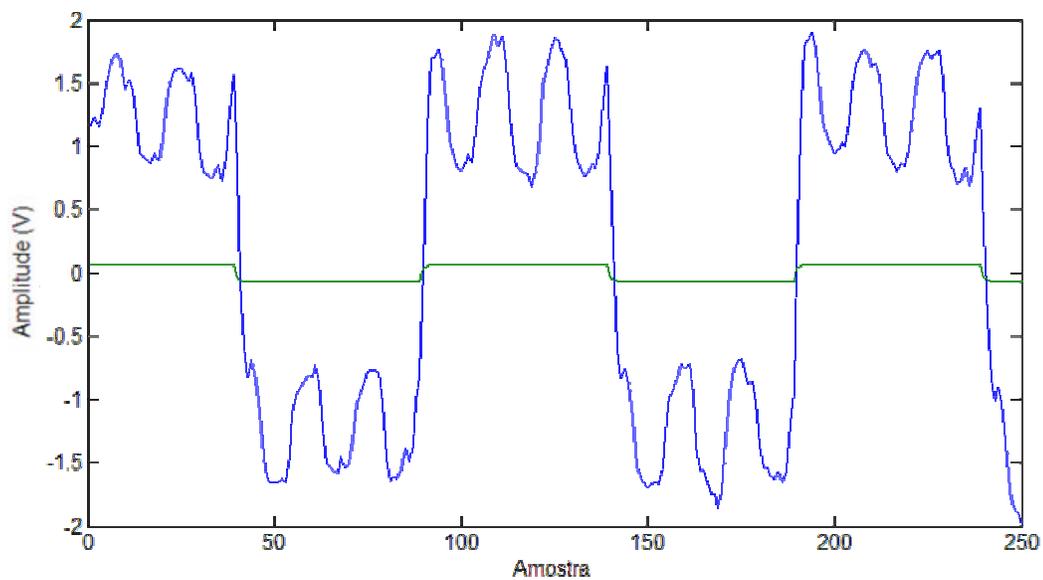


Figura 60 – Tensão dos eletrodos com terra desconectado do medidor (azul)

Nota-se que a distorção causada no sinal dos eletrodos tem característica senoidal, e com frequência maior que o sinal dos eletrodos. Para se ter uma idéia mais precisa da composição do sinal, foram calculadas as componentes principais do sinal através de FFT. A figura 61 evidencia tais ocorrências, e um destaque é feito para as componentes em 60Hz e 180Hz.

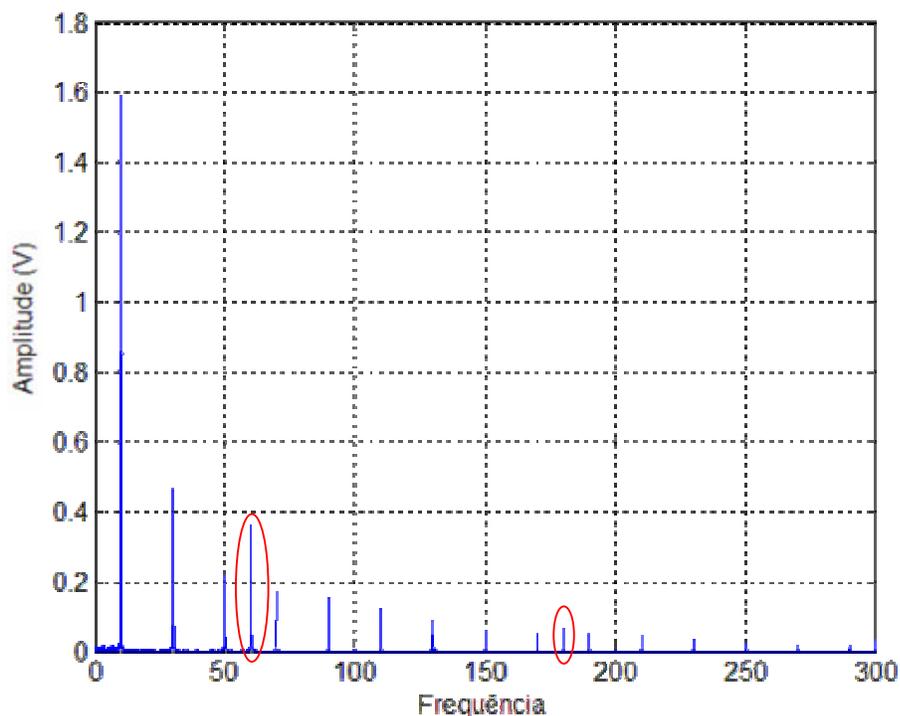


Figura 61 – FFT da tensão dos eletrodos para terra desconectado, com destaque para as componentes em 60 e 180Hz

Dessa forma, pode-se dizer que a presença de ruídos em 60Hz e seus múltiplos indica deficiência de aterramento do medidor. As componentes nas demais frequências, como as múltiplas ímpares de 10Hz não sofrem modificações significativas. O mesmo é observado quando o corpo do medidor é aterrado porém os anéis de aterramento não são conectados ao terra. Ou seja, é essencial que os anéis de aterramento sejam conectados ao terra para o funcionamento satisfatório do equipamento.

4.5.4 Condutividade do líquido de processo

Sabe-se que para o funcionamento correto de um medidor eletromagnético, é necessário que o líquido possua uma condutividade mínima, para que seja gerada uma diferença de potencial nos eletrodos do medidor.

O ensaio de condutividade do líquido de processo, nesse caso a água, foi realizado utilizando-se diversas concentrações de sais. Para se obter água com diferentes níveis de condutividade foram adicionadas quantidades medidas de barrilha (Na_2CO_3), resultando em diferentes condutividades.

A medição da condutividade foi feita de forma indireta, ou seja, foram aplicados diversos níveis de tensão aos eletrodos, através de uma fonte variável, medindo-se a corrente resultante no circuito, de acordo com o arranjo mostrado na figura 62.

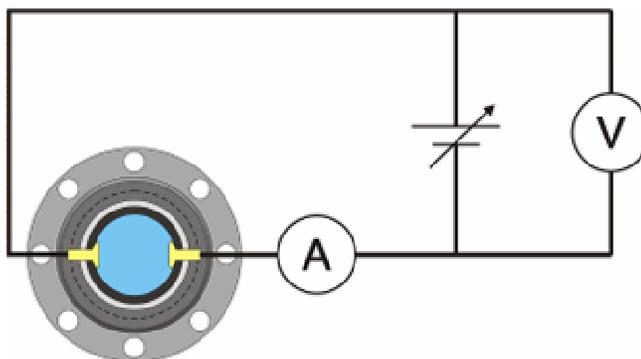


Figura 62 – Arranjo para teste de condutividade do líquido de processo/eletrodos.

O primeiro ensaio foi realizado com a água em sua condição natural, sem adição de barrilha. Em seguida, foram adicionados 400g de barrilha ao circuito, e foram feitas novas medidas de valores de tensão e corrente. Na terceira etapa, foram adicionados mais 150g de barrilha, fazendo-se novas medições de corrente e tensão. Por último, foram adicionados mais 150g de barrilha ao circuito, e novas medições foram feitas. Em cada um dos passos descritos acima foram anotados 35 pares de pontos, correspondentes à tensão aplicada e corrente no circuito.

Os dados referentes a esses ensaios, bem como as regressões que melhor se adaptam a cada conjunto de dados, podem ser visualizados na figura 63.

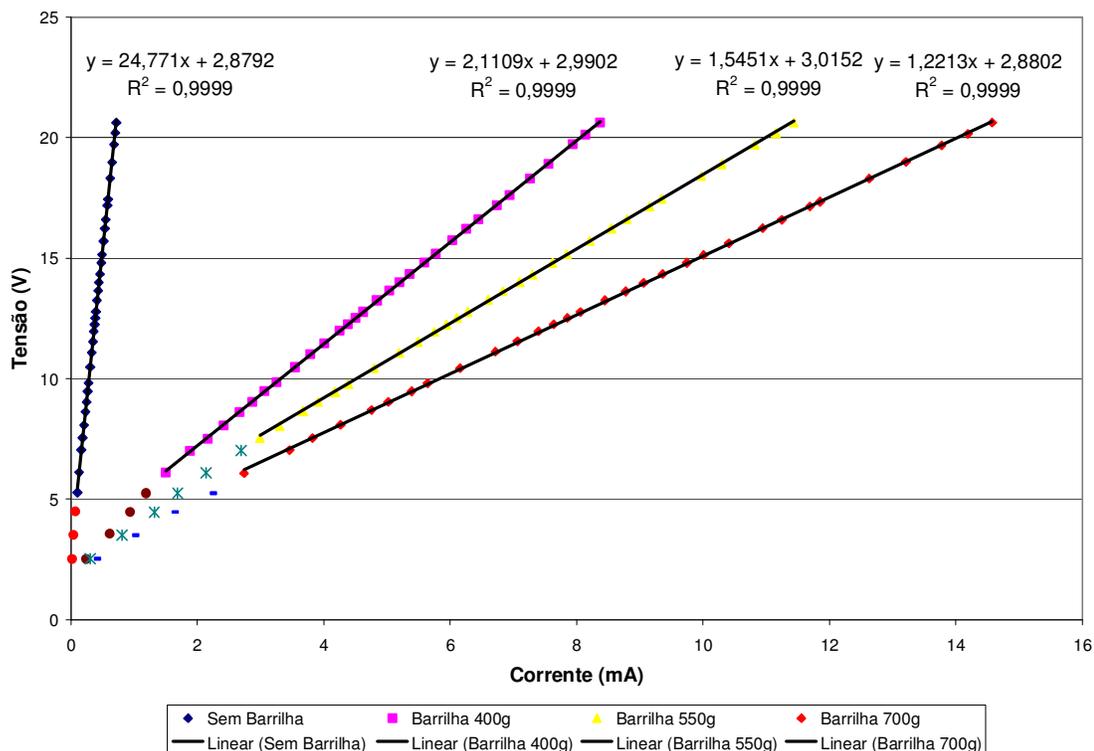


Figura 63 – Diferentes condutividades do liquido de processo.

Nota-se na figura 63 que as relações entre as tensões aplicadas aos eletrodos e as respectivas correntes são lineares. Outro fato interessante é que as equações dessas retas não são do tipo $y = b \cdot x$, fato que seria esperado por se assemelhar à equação $U = R \cdot I$, a qual relaciona tensão, corrente e resistência, mas do tipo $y = a + bx$.

Não foram encontradas na literatura estudada referências a esse fato. Entretanto, neste trabalho considerou-se somente o coeficiente angular das retas, que representam a resistência do circuito. A tabela 3 mostra os valores de resistência encontrados a partir das regressões lineares da figura 63.

Tabela 3 – Resistências medidas durante os testes

Sem adição de barrilha	Com 400g	Com 550g	Com 700g
R= 24.771 Ω	R= 2.110 Ω	R= 1.545 Ω	R= 1.221 Ω

O ensaio anterior visou demonstrar como a condutividade do líquido de processo pode ser medida através de aplicação de tensão nos eletrodos e medição da corrente circulante. Entretanto, o valor de resistência encontrado nesse procedimento também pode variar em função da característica do eletrodo, ou seja, um eletrodo recoberto por uma camada isolante provocará a leitura de resistências mais elevadas.

Para evidenciar tal ocorrência, foi realizado um novo teste de resistência, aplicando-se vários níveis de tensão aos eletrodos, anotando-se os valores de corrente para cada tensão. Posteriormente, um dos eletrodos foi parcialmente recoberto com uma cola para canos PVC, de forma a simular a formação de uma camada não condutiva sobre o eletrodo.

O ensaio de medição de resistência foi realizado para a nova condição, e o resultado das duas medições pode ser visualizado na figura 64.

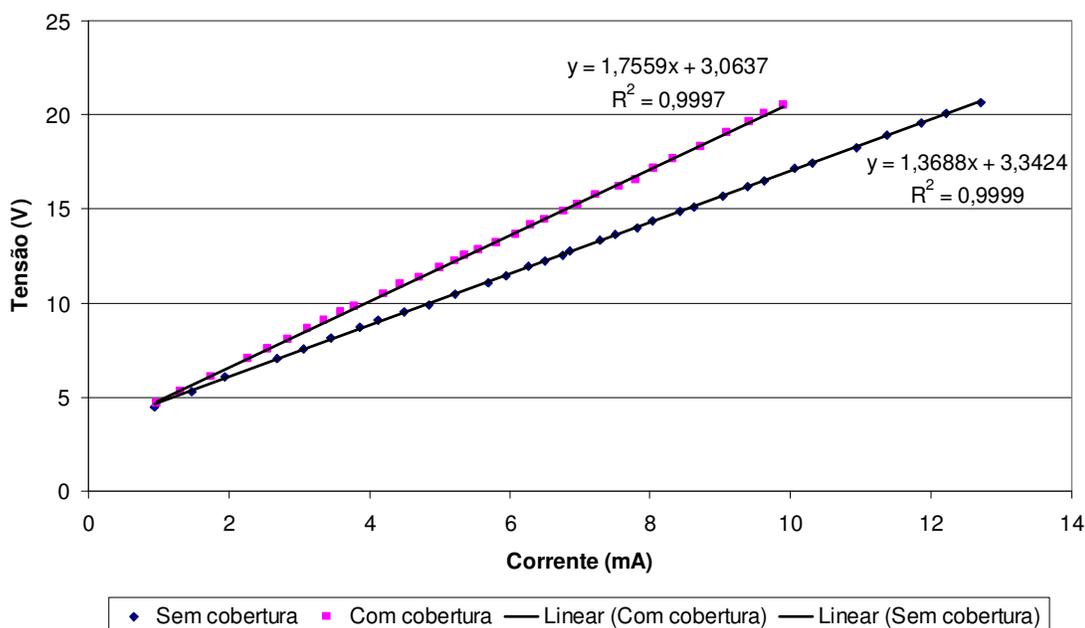


Figura 64 – Ensaio de resistência para condição normal e para eletrodo parcialmente recoberto

A resistência nos dois experimentos é obtida através da regressão linear dos pontos relativos aos dois experimentos, e é mostrada na tabela 4.

Tabela 4 – Resistência antes e após deposição de camada isolante sobre um dos eletrodos

Antes da deposição	Após a deposição
R= 1.369 Ω	R= 1.756 Ω

Sendo assim, a adesão de uma camada isolante sobre parte de um dos eletrodos fez com que a resistência entre eletrodos aumentasse 387 Ω , ou 22% do valor inicial.

Esse teste pode ser realizado, por exemplo, no momento em que o medidor é instalado, desde que garantidas as especificações de condutividade mínima do líquido de processo. O valor de resistência obtido nesse momento pode ser armazenado, e comparado com valores futuros, à medida da operação do medidor. Dessa forma, além de se ter um histórico mostrando as resistências obtidas no circuito, é possível determinar se um valor está fora da faixa de operação mínima do instrumento.

4.5.5 Tubo parcialmente cheio e deformação do revestimento interno

O objetivo deste teste é detectar condições de vazão anormais, que poderiam prejudicar a precisão da medida. O primeiro caso é quando o tubo medidor encontra-se parcialmente cheio. Nessa situação, a tensão gerada nos eletrodos corresponde somente à velocidade do fluido em parte do tubo, e para se ter uma medida da vazão é necessário ter a informação da área molhada do medidor, ou seja, a seção que efetivamente apresenta vazão, e não a seção completa do tubo. Devido às limitações práticas e de laboratório para esse tipo de teste, o teste para tubo parcialmente cheio não foi realizado neste trabalho.

Entretanto, outras situações que envolvem perfis de velocidade não simétricos axialmente puderam ser observadas e estudadas, podendo os resultados ser estendidos para aquelas condições.

A deformação no revestimento interno do tubo medidor, presença de obstáculos à vazão ou até mesmo singularidades, como válvulas e curvas, quando situadas próximas ao medidor, podem causar erros de medição na vazão, pois uma vez que as velocidades contribuem de

acordo com uma função peso dependente da posição radial, diferentes distribuições radiais para uma mesma vazão podem levar a leituras diferentes.

Não há nesse trabalho a intenção de determinar o erro causado por eventuais ocorrências, e sim detectá-las e emitir um aviso ao usuário quando a medição estiver sofrendo influência de tais fatores.

Uma forma de se realizar esse teste é inverter o sentido de alimentação de uma das bobinas, e dessa maneira os campos gerados pelas bobinas irão se opor, de acordo com a figura 20. Se a vazão no momento dessa medição for axialmente uniforme, a tensão diferencial entre os eletrodos deve tender a um valor nulo, salvo tensões ocasionadas por reações químicas, turbulências locais e deformidades das bobinas.

No primeiro teste realizado com essa finalidade, as bobinas foram alimentadas de forma a produzirem campos magnéticos opostos. O protótipo está colocado a uma distância suficientemente grande para garantir que o escoamento naquele local é plenamente desenvolvido e axialmente simétrico. O ensaio foi iniciado com a válvula do circuito fechada, ou seja, sem vazão no tubo do medidor. Após alguns instantes, a válvula foi aberta, dando origem ao sinal da figura 65:

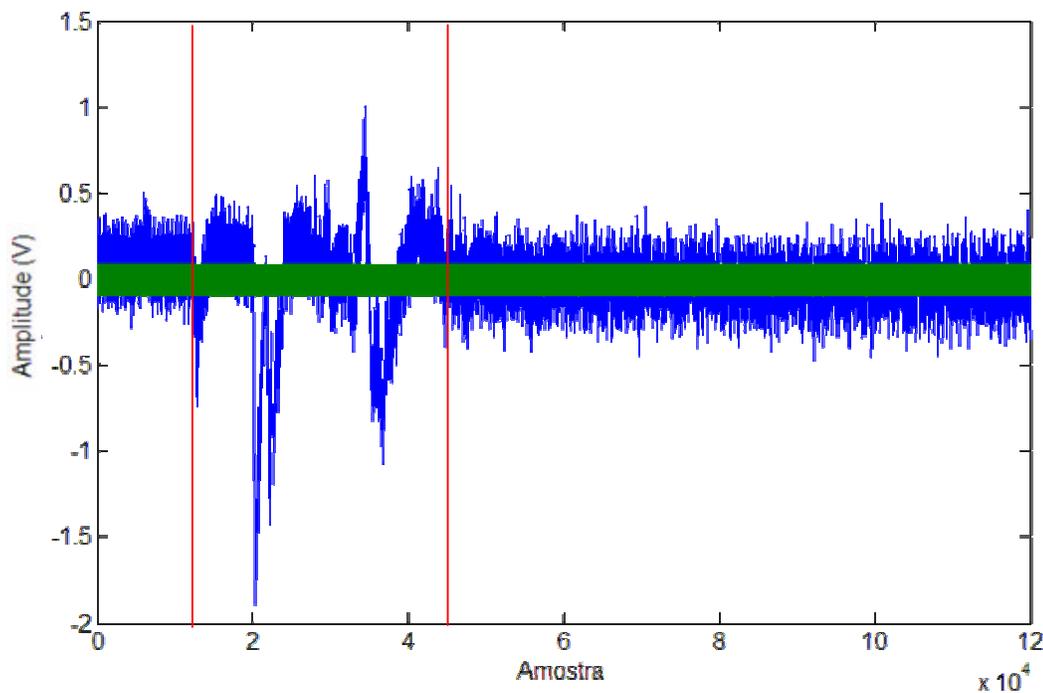


Figura 65 – Teste inicial sem obstáculos à vazão

Nota-se uma perturbação no sinal compreendido entre as linhas verticais vermelhas da figura 65. Essa perturbação foi causada pela abertura da válvula e liberação do fluxo de água. Tal fato era esperado, pois é necessário um tempo para que a vazão se estabilize dentro do tubo. Nota-se também que após esse período de distúrbio o sinal retorna ao seu formato original.

Para provocar uma mudança no perfil de velocidades, foram confeccionadas duas peças em metal de 1 mm de espessura e colocadas na parte interna do tubo de medição, a fim de distorcer o escoamento. Com tais peças foi possível o ensaio de três diferentes tipos de escoamento, de acordo com a simetria axial, adicionalmente ao ensaio prévio com o tubo sem nenhuma obstrução. A figura 66 mostra desenhos e fotos das peças criadas para esse ensaio.



Figura 66 – Estruturas utilizadas para distorcer o perfil de velocidades

Primeiramente a peça em formato de semi-círculo foi inserida no tubo do protótipo conforme mostra a figura 67. A peça foi inserida a montante dos eletrodos, e dessa forma garante-se que o fluxo será afetado pela mesma.



Figura 67 – Diferentes configurações de obstáculos ensaiadas

Após a colocação do obstáculo na parte interna do protótipo, o mesmo foi recolocado no circuito e foram realizados ensaios com diversas vazões, a fim de investigar a influência de obstáculos no sinal dos eletrodos. As figuras a seguir apresentam sinais adquiridos para o obstáculo em meia-lua na horizontal, na vertical e para o obstáculo com orifício central, respectivamente

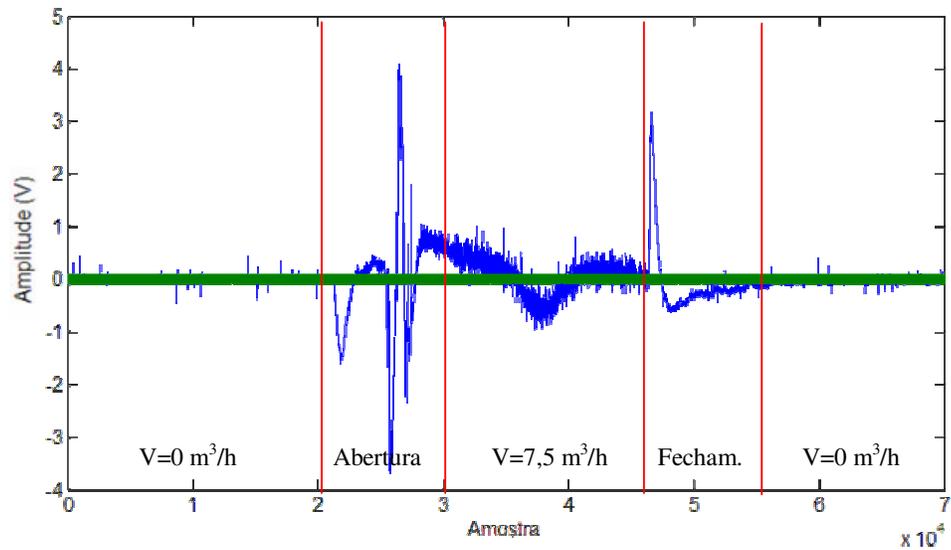


Figura 68 – Sinal adquirido para obstáculo em meia-lua na horizontal

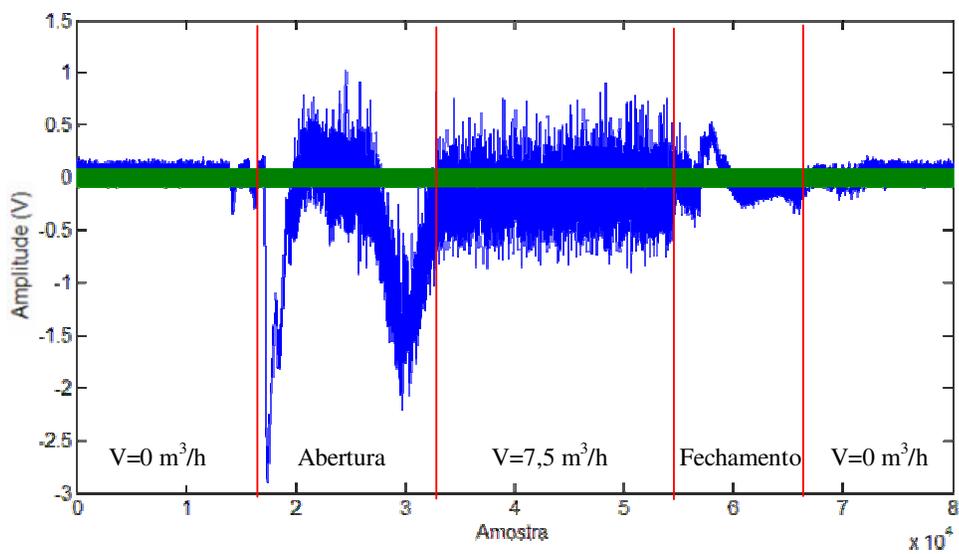


Figura 69 – Sinal adquirido para obstáculo em meia-lua na vertical

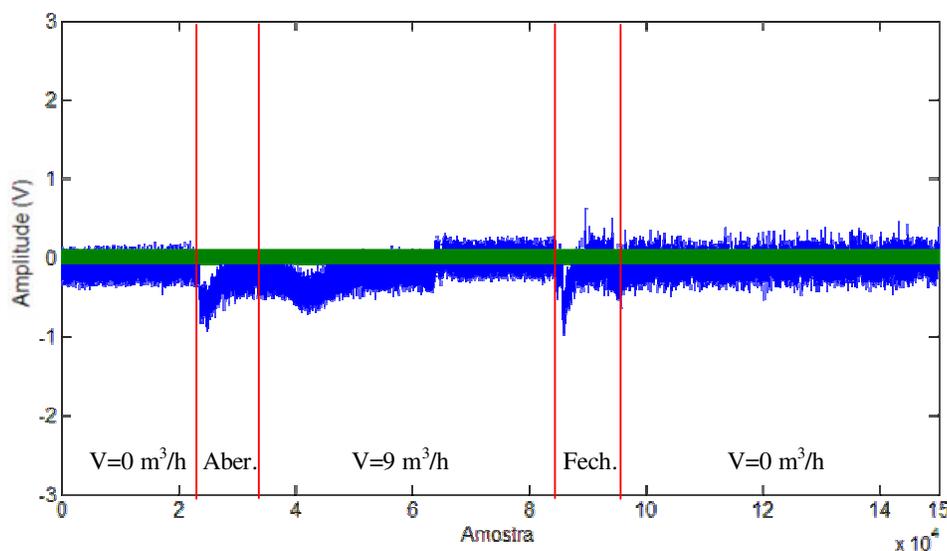


Figura 70 – Sinal adquirido para obstáculo com orifício central

A análise das figuras 69, 69 e 70, obtidas para condições de vazão com fluxo axialmente assimétrico, mostra que é possível detectar a ocorrência de assimetrias no perfil de velocidades atuando-se nas bobinas de campo de forma que as mesmas gerem campos magnéticos opostos.

Nota-se que o sinal é proporcional ao tipo de assimetria, fato que torna os sinais relativos aos obstáculos em meia lua mais distorcidos. O sinal relativo ao obstáculo com orifício central apresenta uma distorção modesta, o que constitui uma deficiência deste método.

4.5.6 Temperatura das bobinas de campo

Como citado anteriormente, o funcionamento do medidor também depende da condição das bobinas de campo. Testes recomendados pelos fabricantes nesse sentido são geralmente a medição da resistência das bobinas, sendo que essa resistência deve se situar numa faixa pré-determinada. Não foram encontrados medidores comerciais que possuem essa funcionalidade automática, sendo que essa medição de resistência deve ser realizada pelo usuário, durante operações de manutenção. Uma resistência menor que a faixa estipulada pode indicar que ocorreu curto-circuito em algum ponto da bobina, e uma resistência maior pode indicar problemas de conexão entre o circuito de alimentação e as bobinas.

A medição da resistência das bobinas é um dado direto, ou seja, a partir da própria resistência é possível inferir se a mesma está dentro de uma faixa considerada normal. Nos testes realizados no protótipo, a resistência das bobinas estava em torno de 30Ω . Dessa forma, qualquer valor muito diferente pode ser informado ao usuário, para que este tome as providências necessárias para o retorno ao funcionamento normal.

A informação de resistência das bobinas também é útil para se inferir a temperatura das mesmas. Isso porque a resistência das bobinas representa um valor diretamente proporcional à temperatura. Pela temperatura o medidor eletromagnético de vazão calcula o fator de carga térmica, que também pode ser usado para prever a expectativa de vida útil do sensor.

Foram realizados testes colocando-se as bobinas imersas em um banho de água quente, com a temperatura controlada, e vários pontos de resistência x temperatura foram coletados, os quais podem ser vistos na figura seguir:

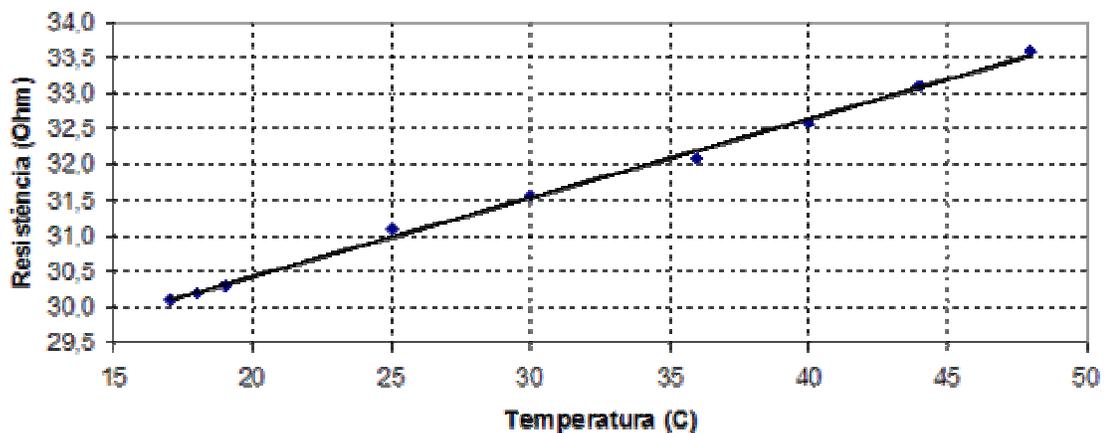


Figura 71 – Medição da resistência x temperatura

Aplicando-se a regressão linear, obtém-se a seguinte reta, com coeficiente de correlação 0,9975:

$$R = 0,1106.T + 28,224 \quad (9)$$

onde:

R= resistência da bobina (Ω)

T= temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

De posse da equação acima, é possível encontrar o coeficiente de temperatura para a bobina em questão, dado que:

$$T = \frac{R - R_{20}}{\alpha \cdot R_{20}} + 20 \quad (10)$$

$$R = 0,1106.T + 28,224$$

Operando convenientemente, vem:

$$\alpha = 0.00363579 \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$$

e

$$R_{20} = 30.4198 \text{ } \Omega$$

De posse dos valores de α e R_{20} calculados, é possível aplicar os pontos de resistência coletados e verificar a temperatura calculada, comparando com a temperatura medida. O gráfico a seguir mostra as temperaturas medidas no ensaio e as temperaturas calculadas pela relação acima.

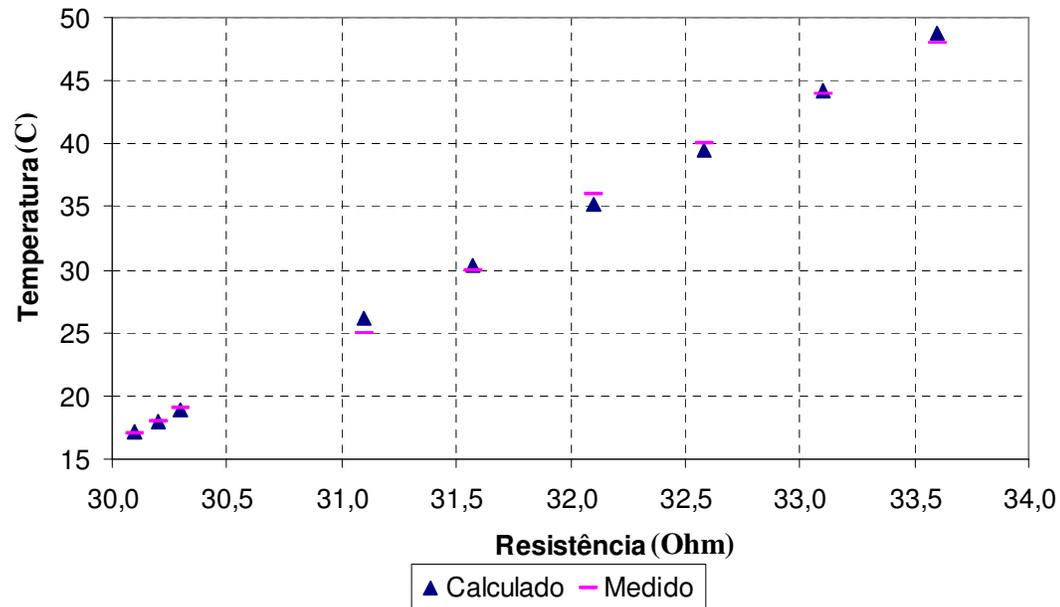


Figura 72 – Temperatura medida e temperatura calculada

Nota-se, pelo gráfico da figura 72, que a relação matemática entre temperatura e resistência calculada pela expressão (10) reproduz fielmente o que foi observado na prática, e dessa forma pode-se dizer que a relação entre temperatura e resistência explicitada pela equação é válida e pode ser utilizada para verificar a temperatura das bobinas durante o funcionamento do medidor, bastando para isso medir a resistência das bobinas de campo.

Temperaturas fora da faixa de operação do medidor reduzem a vida útil do mesmo. Dessa forma temperaturas fora dessa faixa podem ser detectadas e um alarme pode ser dado ao usuário. Adicionalmente, o valor da temperatura pode ser mais uma variável interessante do processo ao usuário.

4.5.7 Linearidade do conversor de sinais e influência de campos magnéticos externos

Deseja-se nesse teste verificar a linearidade do conversor de sinais e posteriormente avaliar a influência de campos magnéticos externos sobre o tubo medidor.

O teste de linearidade do conversor de sinais pode ser realizado diminuindo-se a excitação das bobinas em uma quantidade conhecida, por um curto espaço de tempo. O sinal

dos eletrodos deve refletir essa mudança na mesma proporção, e o sinal de vazão exibido pelo medidor deve continuar constante, por meio de uma mudança no fator de correção que transforma a tensão dos eletrodos em sinal de vazão.

O fator de multiplicação para correção do sinal de vazão é igual à relação entre a corrente nominal e a corrente que está sendo aplicada nas bobinas no momento do teste. Dessa forma, se a corrente de teste for menor que a corrente nominal, a constante de correção será maior que 1, mantendo o valor da vazão constante. Como visto na seção anterior, a equação que relaciona a tensão dos eletrodos e a corrente nas bobinas com a vazão em m³/h, já com ajuste de zero, é:

$$Q = 54,828 \cdot U$$

A variável U na equação acima representa a tensão diferencial nos eletrodos pré-amplificada, sendo que para o protótipo em questão o amplificador foi ajustado para um ganho de 5100. A equação corrigida para variações na corrente de alimentação nas bobinas é:

$$Q = 54,828 \cdot \frac{I_N}{I_T} \cdot U$$

Onde:

Q = vazão instantânea (m³/h);

I_N = corrente RMS nominal das bobinas;

I_T = corrente RMS das bobinas no momento do teste;

U = o tensão RMS nos eletrodos (V) x 5100.

Para a realização desse ensaio, estabeleceu-se uma vazão estável, de 14 m³/h. Com a vazão estabilizada, as bobinas de campo foram acionadas com corrente máxima, sendo o seu valor aproximadamente igual à corrente nominal (a mesma utilizada no levantamento da curva de calibração do protótipo). A tensão de alimentação das bobinas foi mantida constante, e em seguida foi diminuída de um valor arbitrário. Após um breve período, a corrente de excitação das bobinas foi novamente levada ao valor próximo ao nominal, e então outro ciclo de diminuição da excitação foi realizado, retornando posteriormente ao valor nominal.

O resultado do procedimento pode ser visualizado na figura 73. O sinal das bobinas é representado na cor verde, e o sinal nos eletrodos na cor azul. Nota-se a definição de 5 intervalos distintos, correspondentes às diferentes correntes de excitação das bobinas de campo. Para minimizar efeitos de caráter momentâneo, a análise dos dados foi feita em blocos, compreendidos de 3.000 pontos em cada intervalo.

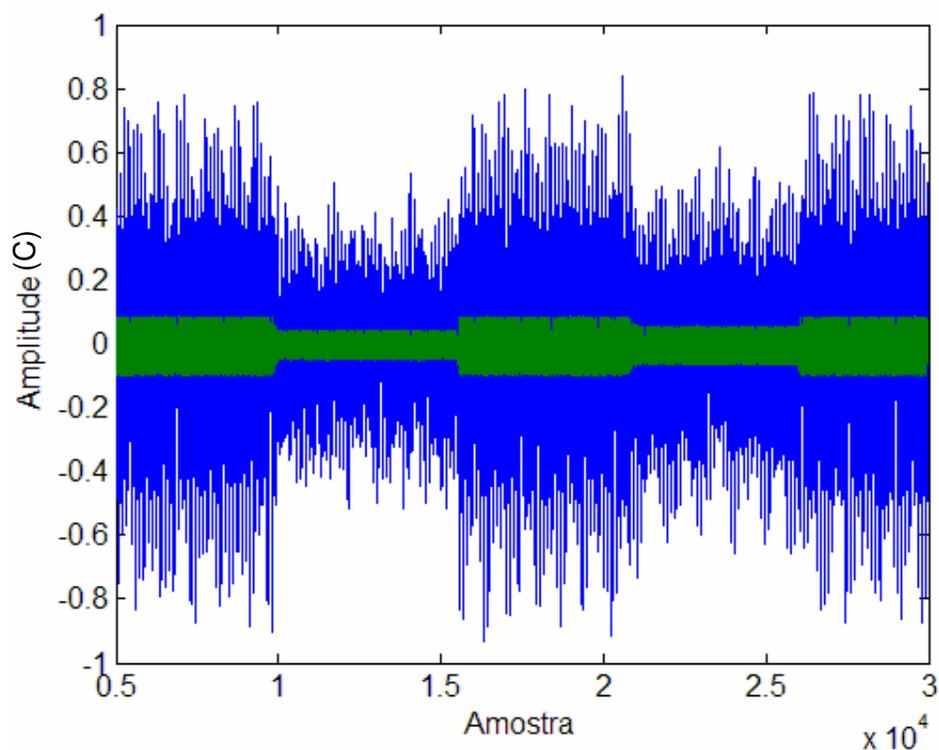


Figura 73 – Tensão nos eletrodos (azul) e corrente nas bobinas (verde) para vazão constante e variação da corrente nas bobinas

De posse dos dados coletados no teste anterior, foram realizados os cálculos de valor RMS da tensão dos eletrodos e corrente das bobinas para os diferentes intervalos. A corrente nominal nas bobinas no momento da calibração foi de 84 mA, valor que foi tomado como referência para o cálculo do fator de correção. A tabela 5 mostra os valores RMS dos dados coletados para os diferentes intervalos.

Tabela 5 – Valores RMS da tensão dos eletrodos e corrente nas bobinas para as diferentes seções do ensaio, com vazão constante

	Intervalo 1 (5000- 8000)	Intervalo 2 (11000- 14000)	Intervalo 3 (17000- 20000)	Intervalo 4 (22000- 25000)	Intervalo 5 (26000- 29000)
Eletrodos [V]	0,2921	0,1452	0,2925	0,1949	0,29286
Bobinas [A]	0,0840	0,0417	0,0841	0,0560	0,0842
Fator de correção	1	2,0144	0,9988	1,5001	0,9976
Vazão (m ³ /h)	14,0065	14,0279	14,0094	14,0203	14,0101
Erro (%)	0,047	0,199	0,067	0,145	0,072

Nota-se que mesmo para a excitação próxima ao valor nominal, existe um erro, mesmo que mínimo. Este erro está embutido na própria curva de calibração do medidor, pois a vazão utilizada como referência foi a lida no medidor eletromagnético comercial, considerado como padrão para todos os testes.

A figura 73 exibe os valores de vazão corrigidos (azul) pelo fator de correção. Nota-se que a variação nos diferentes intervalos é mínima. As barras exibem o erro em % com relação ao valor de vazão médio (14m³/h), medido pelo medidor padrão utilizado no ensaio.

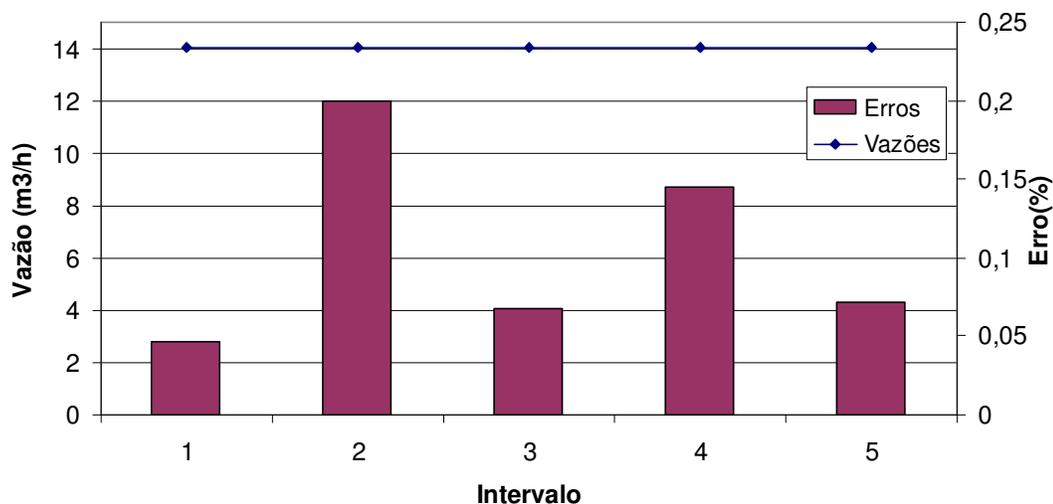


Figura 74 – Vazão nos diferentes intervalos, corrigidas com o fator de correção (azul) e erros relativos em cada uma das seções (barras).

É importante dizer, também, que o erro aumenta à medida que a corrente nas bobinas aumenta sua diferença com relação à corrente nominal. Isso se explica pela distribuição das linhas de fluxo de acordo com a corrente imposta às bobinas.

Como o ensaio acima foi realizado em laboratório e não foi identificada nenhuma influência de campos magnéticos externos, é possível dizer que os valores de erros podem ser considerados como padrão para o protótipo. Dessa forma esse teste permite dizer se há influência de campos magnéticos externos ao funcionamento do medidor, pois erros de magnitudes maiores que os encontrados nesse ensaio devem ser alertados ao usuário, como forma de diagnóstico e prevenção de possíveis problemas e prejuízos.

Para analisar essa ocorrência mais a fundo, foram realizados ensaios para avaliar a influência de campos magnéticos externos. Para tanto, foi usado um conjunto de 8 ímãs de neodímio.

Os ensaios com campos magnéticos externos foram realizados tanto no protótipo quanto no medidor comercial padrão, pelo simples motivo de que o protótipo não possui nenhum tipo de blindagem ferro magnética em torno do tubo medidor, enquanto o medidor comercial possui.

Primeiramente foi feito um teste preliminar, para a adoção de uma referência dos valores de tensão nos eletrodos, sem a interferência do campo magnético externo. As bobinas foram alimentadas em série, com os campos magnéticos gerados por cada bobina no mesmo sentido, em adição. A figura 75 mostra o sinal adquirido para essa condição normal de funcionamento:

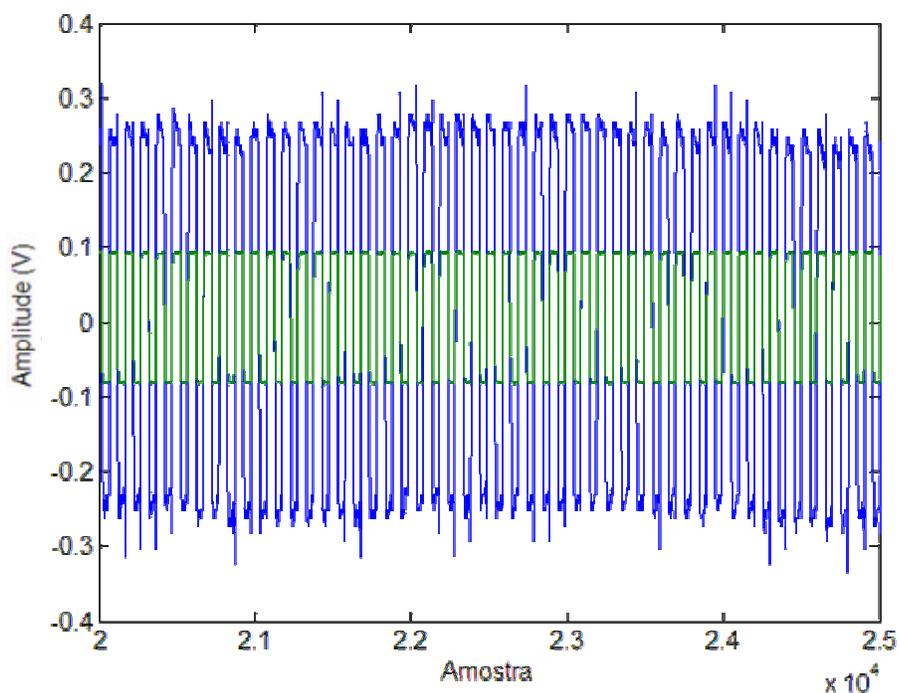


Figura 75 – Sinal adquirido para referência nos ensaios de interferências de campos magnéticos externos.

O primeiro procedimento realizado foi o de aproximar os ímãs ao protótipo, e realizar movimentos repetitivos, para que a influência pudesse ser avaliada posteriormente, na fase de análise de dados. O sinal obtido é exibido na figura 76.

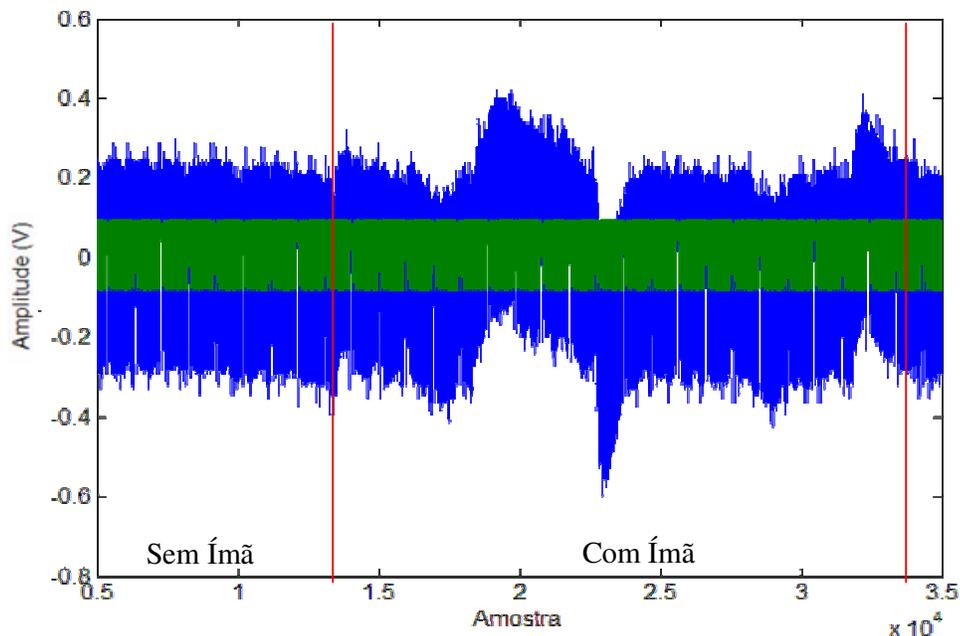


Figura 76 – Interferência causada pelo campo magnético externo ao protótipo

A interferência causada pelo campo magnético externo, gerado propositalmente nesse caso, é evidente na figura 76 e afeta a tensão lida nos eletrodos. Dessa forma, um medidor eletromagnético padrão não saberia distinguir a origem desta variação, o que tornaria impossível separar o sinal gerado pela interação do campo magnético das bobinas com o fluido do sinal originado pela interferência.

Como, por diversas razões, a corrente nas bobinas é monitorada no protótipo, é possível detectar a ocorrência desses campos magnéticos externos analisando-se o sinal nos eletrodos. Como pode ser observado na figura anterior, o campo magnético externo causa um deslocamento do sinal dos eletrodos, ora positivamente, ora negativamente, dependendo do movimento que foi imposto aos ímãs. Dessa forma, ao se analisar a envoltória do sinal detecta-se esse desequilíbrio.

Outro ensaio consiste em alimentar as bobinas de forma que essas gerem campos magnéticos em sentidos opostos. Assim, dada uma condição de vazão radialmente simétrica, a tensão nos eletrodos deverá ser próxima de zero. A ocorrência de um campo magnético externo desequilibra essa relação, dando origem a uma tensão diferente de zero nos eletrodos, mesmo com escoamento radialmente simétrico.

A figura 77 mostra o sinal obtido em um dos ensaios com alimentação das bobinas invertida.

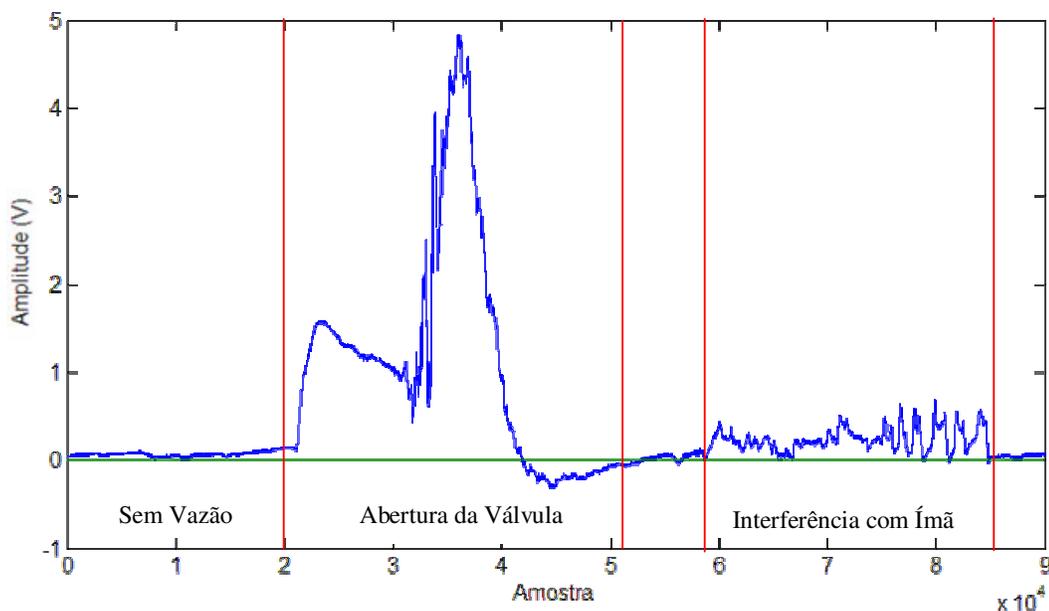


Figura 77 – Interferência causada pelo campo magnético externo ao protótipo

Como se pode observar, o sinal é próximo de zero para a condição sem vazão, e o mesmo sofre uma brusca variação no momento de abertura da válvula, estabilizando após certo tempo. O próximo intervalo compreende o momento em que os Ímãs são aproximados do protótipo. Os primeiros movimentos foram mais suaves, seguidos de movimentos mais bruscos, o que pode ser notado nos picos do sinal.

As considerações acima expostas foram feitas com base nos ensaios com a movimentação do ímã. Para uma análise mais profunda da ocorrência de campos magnéticos externos, também foram feitos testes para analisar a interferência causada por um eletroímã, emulando, por exemplo, um gerador, motor, ou mesmo um condutor por onde flui uma corrente.

Para tanto foi construída mais uma bobina, com 2000 voltas, usando-se os mesmos materiais utilizados para a confecção das bobinas de campo do protótipo. Essa nova bobina foi alimentada por um gerador de funções, sendo possível alterar a sua frequência de excitação durante os ensaios. A corrente dessa bobina também foi medida, de forma a

possibilitar distinguir o campo gerado pela bobina de interferência do campo gerado pelas bobinas de campo.

A bobina de interferência construída foi colocada sobre o protótipo, conforme mostra a figura 78.



Figura 78 – Bobina de interferência colocada sobre o protótipo

Primeiramente, com a bobina de interferência posicionada sobre o protótipo, foi estabelecida uma vazão de $8 \text{ m}^3/\text{h}$. A seguir, a bobina de interferência foi excitada com uma senoidal 10 Hz, por um período de 15 segundos e depois foi desligada. Após 30 segundos a bobina de interferência foi novamente acionada, agora na frequência de 100 Hz, por um período de 25 segundos. A figura 79 mostra os dados adquiridos para esse ensaio.

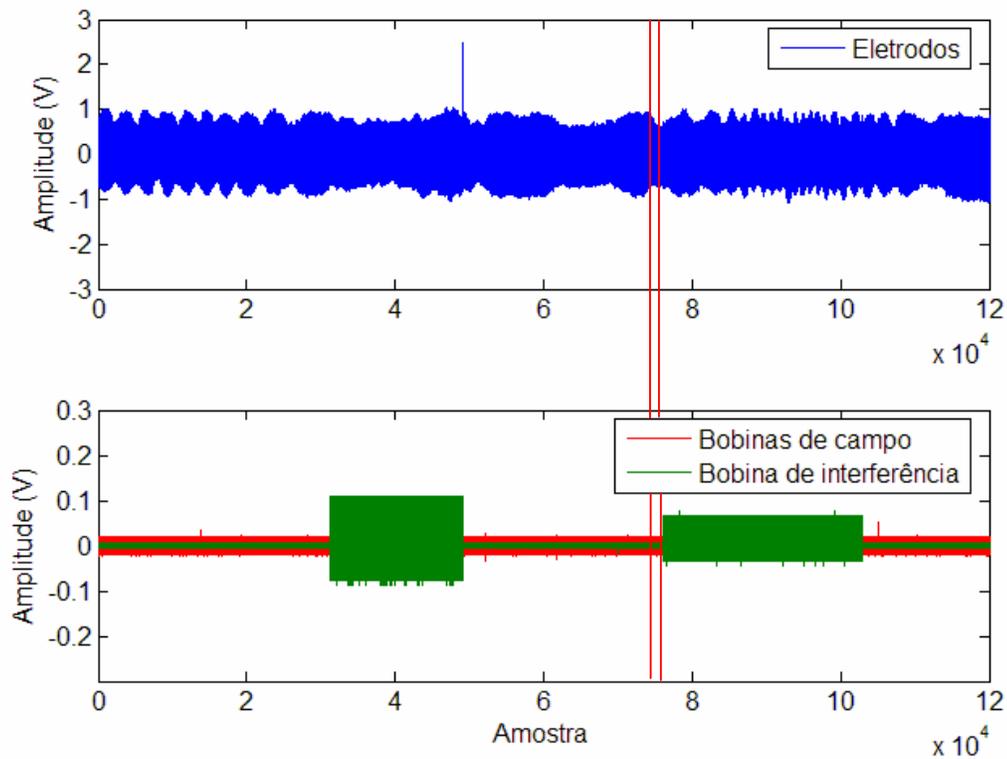


Figura 79 – Testes realizados com a bobina de interferência

Analisando a figura 79, visualmente não é possível observar as alterações causadas pelo campo magnético externo. Uma análise mais cuidadosa e em uma escala maior, porém, permite observar que o sinal nos eletrodos sofre influência de campos magnéticos externos.

A figura 80 apresenta um destaque mostrando o sinal na bobina de interferência e nos eletrodos. No momento em que a bobina de interferência é acionada, referente ao sinal compreendido entre as duas linhas verticais da figura 79.

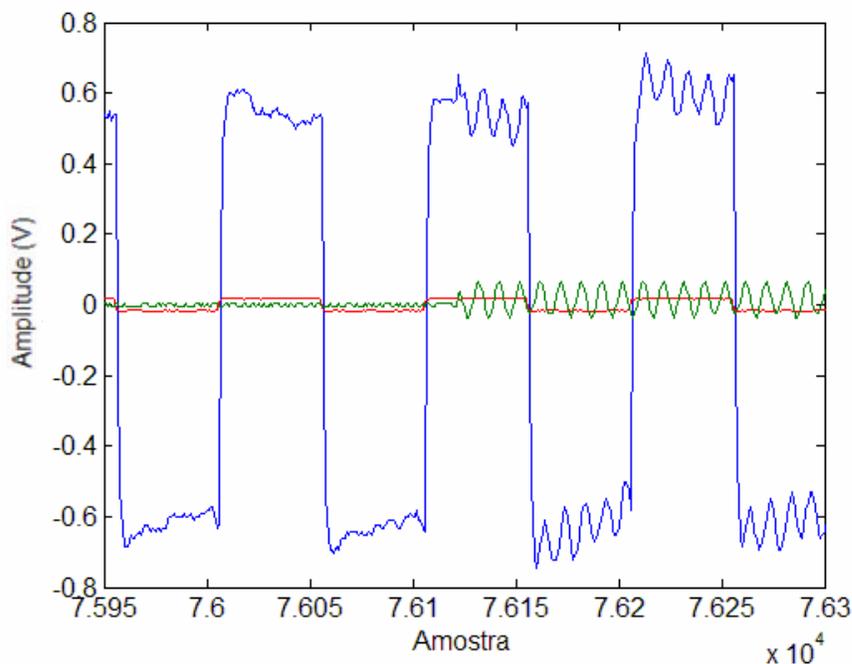


Figura 80 – Destaque para momento em que a bobina de interferência (verde) é acionada em 100Hz

Uma forma de identificar tal tipo de interferência é computar a FFT dos sinais. Assim, é possível detectar a ocorrência de frequências distintas das frequências impressas pelas bobinas de campo à tensão dos eletrodos. A tabela 6 mostra as principais componentes em cada intervalo.

Tabela 6 – Principais componentes da tensão dos eletrodos

	Intervalo 1 (29000-30000)	Intervalo 2 (32000-33000)	Intervalo 3 (75000-76000)	Intervalo 4 (77000-78000)
10Hz	0,7615	0,8242	0,7632	0,7638
30Hz	0,2586	0,2590	0,2569	0,2593
50Hz	0,1544	0,1529	0,1507	0,1537
70Hz	0,1092	0,1083	0,1050	0,1077
90Hz	0,0847	0,0814	0,0793	0,0849
100Hz	0	0	0	0,0533
110Hz	0,0680	0,0652	0,0624	0,06376

A comparação dos dados da tabela anterior evidencia a presença de frequências diferentes da frequência de acionamento das bobinas. A figura 81 mostra as componentes.

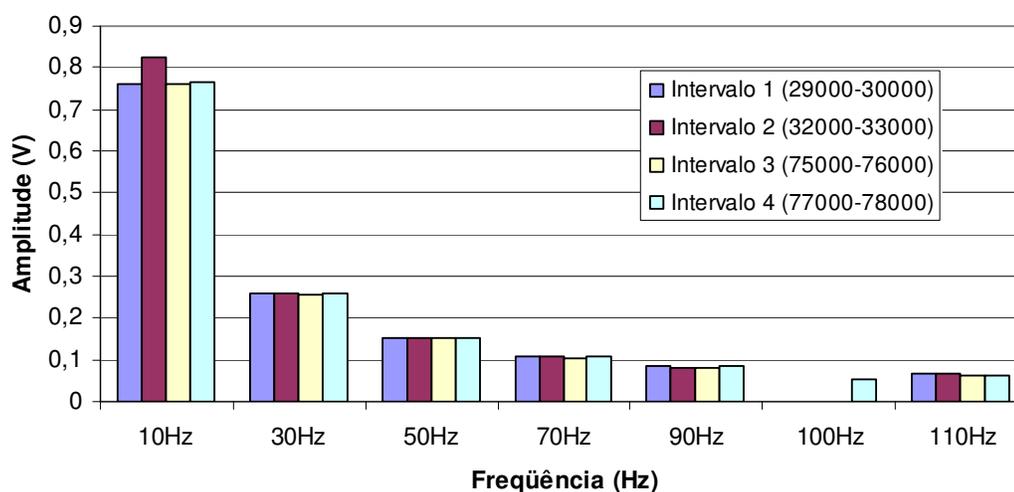


Figura 81 – Diferenças entre componentes do sinal dos eletrodos para os diferentes períodos

Nota-se claramente um pico na frequência de 10 Hz para o período 2. Foi utilizada uma frequência de 10 Hz para o acionamento da bobina de interferência justamente para evidenciar que mesmo uma frequência igual à das bobinas de excitação pode ser detectada por esse método, bastando para isso comparar também as outras componentes. Dessa forma, qualquer alteração nas componentes será detectada.

Nota-se também o surgimento da frequência de 100 Hz no período 4, referente ao intervalo em que a bobina de interferência foi acionada por uma tensão senoidal de 100 Hz. Novamente, o surgimento de uma frequência que não pertence ao sinal das bobinas de excitação é evidenciado pelo cálculo das componentes harmônicas do sinal dos eletrodos.

Prosseguindo na análise da influência de campos magnéticos externos sobre o protótipo, foi realizado um novo ensaio, dessa vez com as bobinas de campo ligadas de forma que seus campos magnéticos se opusessem. Como citado anteriormente, em condições normais de funcionamento e com fluxo axialmente simétrico em seu interior, o medidor deve apresentar tensão diferencial próxima de zero em seus eletrodos.

A figura 82 mostra a tensão nos eletrodos, a corrente nas bobinas de campo e a corrente na bobina de interferência, para o ensaio realizado com as bobinas ligadas de forma inversa.

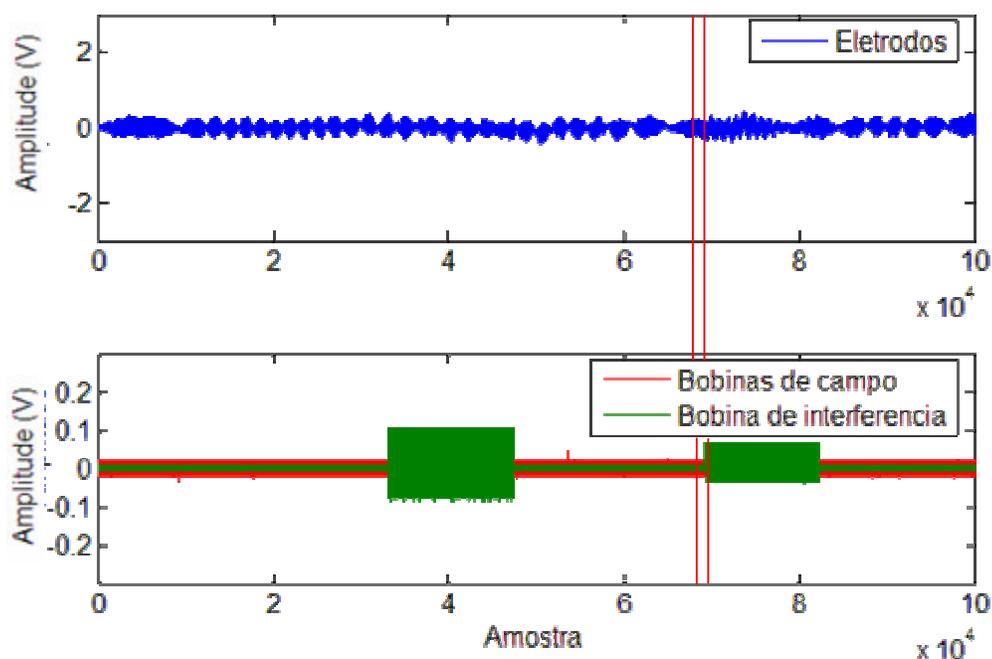


Figura 82 – Ensaio de interferência realizado com as bobinas ligadas invertidas

Mais uma vez, a simples visualização do sinal como um todo não permite chegar a nenhuma conclusão. É necessário realizar uma avaliação mais cuidadosa dos sinais. A figura 83 mostra em detalhe o efeito do campo magnético de interferência sobre a tensão nos eletrodos. Esse período corresponde ao período compreendido entre as linhas verticais vermelhas da figura 82.

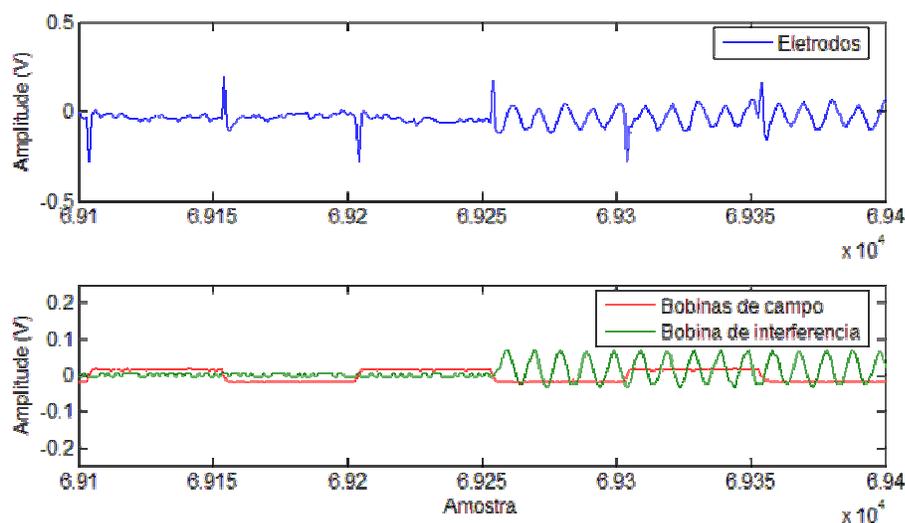


Figura 83 – Detalhe do sinal antes e após interferências

A análise das componentes do sinal por FFT também é útil nesse caso. Como o sinal dos eletrodos tem componentes muito pequenas, o resultado foi multiplicado por 100, para facilitar a análise. Realiza-se o cálculo da FFT para a tensão dos eletrodos antes e após as interferências. O resultado pode ser visualizado na figura 84.

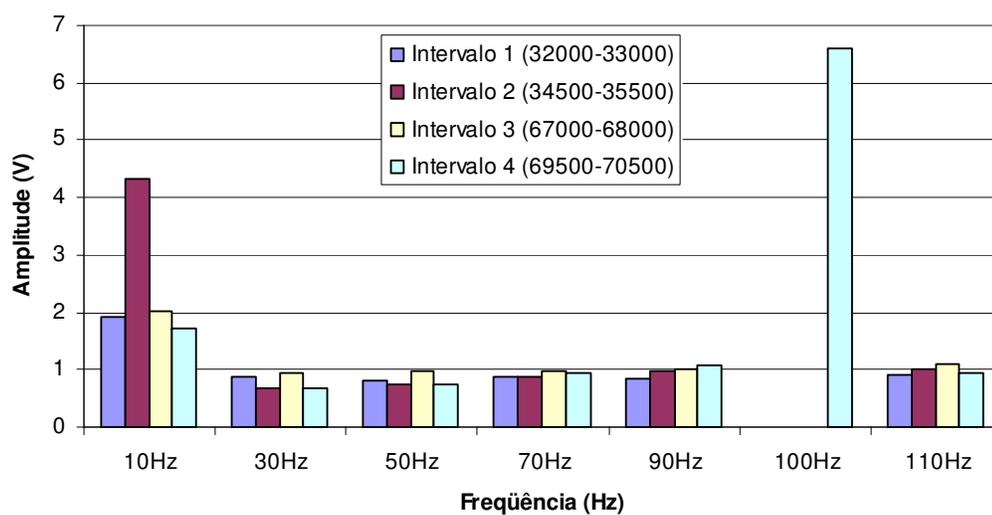


Figura 84 – Comparação entre frequências componentes

A análise da figura 84 evidencia o aumento da componente em 10 Hz no intervalo 2 e o surgimento da componente em 100 Hz no intervalo 4, ambas causadas pelo campo magnético externo criado pela bobina de interferência.

Os mesmos procedimentos descritos anteriormente foram também realizados com o medidor comercial utilizado nos testes, não se notando nenhuma influência dos campos magnéticos externos, devido à blindagem eletromagnética do mesmo.

Apesar de o medidor comercial ensaiado não ter apresentado interferências, tal fato pode se dar por defeitos na estrutura, ou até mesmo por influência sobre os componentes eletrônicos. Portanto, a realização automática e periódica deste teste é interessante, garantindo ainda mais confiabilidade à medição de vazão.

Capítulo 5

CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS

5.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho foi útil para apresentar, discutir e aplicar algumas formas de auto-teste em medidores eletromagnéticos de vazão.

Foi desenvolvido um protótipo de medidor eletromagnético totalmente funcional, no qual grande parte das rotinas de auto-teste propostas pôde ser aplicada. Foi realizada, ainda, uma calibração do protótipo, comparando-o com um medidor comercial disponível na bancada de testes.

Com relação ao teste de linearidade do conversor de sinais e influência de campos magnéticos externos foi possível observar que o protótipo apresenta um erro máximo de 0,2% para uma diminuição da corrente de excitação da ordem de 50%, indicando uma boa linearidade do mesmo. Também ficou evidente que, por não possuir nenhum tipo de blindagem eletromagnética, o protótipo é extremamente sensível a campos magnéticos externos. Entretanto, foram demonstradas formas de se detectar tais influências através da composição dos sinais dos eletrodos.

Foram provocadas mudanças na condutividade do líquido de processo, através da adição de barrilha e tal variação foi verificada através do teste de condutividade do líquido de processo.

Também foi possível avaliar mudanças na resistência entre os eletrodos para condições constantes do líquido de processo, porém com adesão de uma camada isolante sobre um dos eletrodos. Os ensaios em laboratório mostraram o aumento da resistência, de acordo com o que fora previamente pesquisado na bibliografia.

O potencial dos eletrodos foi monitorado e foi possível provocar e detectar falhas como curto-circuito entre eletrodos e bobinas, falhas intermitentes nos eletrodos e ausência de aterramento adequado.

O sinal dos eletrodos foi monitorado e processado também para a detecção de altos níveis de ruídos, provenientes de bolhas de gás na tubulação e/ou partículas em suspensão no líquido de processo. Tal procedimento foi realizado utilizando-se dois métodos distintos, sem a preocupação de quantificar tal ruído.

Demonstrou-se que é possível monitorar a resistência das bobinas de campo, e através de uma relação linear inferir a temperatura do protótipo. Tal informação é importante para se ter conhecimento da carga térmica do instrumento, o que influi diretamente a vida útil do mesmo.

A ocorrência de deformações no revestimento interno foi simulada através da inserção de obstáculos à vazão no interior do protótipo. Isso fez com que o fluxo fosse deformado, e foi detectado através de testes com as bobinas gerando campos magnéticos opostos um ao outro.

Pode-se dizer, portanto, que o trabalho traz muitas contribuições para estudos relacionados a auto-testes em medidores eletromagnéticos de vazão. Todos os dados utilizados nesse trabalho serão disponibilizados à Universidade Federal de Itajubá, bem como o protótipo desenvolvido, a fim de possibilitar desenvolvimentos futuros nessa área na instituição. A tabela 7 mostra as principais causas de erros que podem ser detectadas e potenciais resultados.

Tabela 7 – Resumo de principais causas e resultados

Erro sinalizado	Causas e resultados	
	Causa	Resultado
Imprecisão na conversão de sinais	- Variação de componentes	Erros de medição
Temperatura das bobinas muito elevada	- Temperatura ambiente ou do líquido de processo muito alta	Redução do tempo de vida
Não linearidade	- Campos magnéticos externos - Defeitos na eletrônica	Erros de medição
Corrente de campo instável	- Defeitos na eletrônica - Abertura/mau contato da bobina - Curto entre espiras	Erros de medição
Alto nível de ruídos	- Bolhas na tubulação - Problemas de aterramento - Problemas de conexão dos eletrodos	Erros de medição
Perfil de escoamento	- Instalação próxima a singularidades - Deformação no revestimento interno - Tubo parcialmente cheio	Erros de medição
Condutividade muito baixa	- Condutividade do líquido muito baixa - Eletrodo com deposição de camada isolante	Erros/impossibilidade de medição

5.2 PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O presente trabalho contempla o desenvolvimento de procedimentos de auto-teste em medidores eletromagnéticos de vazão. Uma proposta interessante para o prosseguimento do trabalho é programar as rotinas e funções realizadas pelo computador e pelo gerador de sinais em DSP (Digital Signal Processor) e confeccionar circuitos de potência, criando um conversor de sinais para o protótipo.

Os testes realizados nesse trabalho têm caráter mais qualitativo que quantitativo, ou seja, preocupou-se mais em avaliar que tipo de influências alguns defeitos poderiam causar, e que tipos de procedimentos de auto-teste podem ser usados para detectar tais anomalias. Entretanto, uma avaliação quantitativa das influências das anomalias deve ser feita para que as rotinas de auto-teste possam ser aplicadas em larga escala.

Vê-se que esse é um campo ainda bastante aberto, com poucos trabalhos sobre o assunto, e muita necessidade de estudo, pois o desenvolvimento e implementação de rotinas que possam minimizar a necessidade de manutenção corretiva significa economia de dinheiro para os usuários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, **NBR10396 (1988)**, Medidores de vazão de fluidos, Rio de Janeiro, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988
- BAKER, R.C., **An Introductory Guide to Flow Measurement**, Londres, Mechanical Engineering Publications Limited, 1989.
- CHEREMISINOFF, N.P., **Applied Fluid Flow Measurement – Fundamentals and Technology**, 1ª edição, Nova Iorque, Marcel Dekker Inc., 1979.
- FARADAY, M., **Experimental Researches in Electricity**, Phi.Trans. 15, p. 175, 1832
- GAO, R., ERYUREK, E., TSOUKALAS, L. H., **Magnetic Flowmeter Neural-Wavelet Diagnostics System**, Purdue University, 2000.
- GÖRGÉNYI, A., SUJBERT, L., BOGÁR, I., MOLNÁR, K., DABÓCZI T., **DSP-based Electromagnetic Flowmeter with Sinusoidal Excitation**, Instrumentation and Measurement Technology Conference, Ottawa, Canada, 2005.
- HOFMANN, F., **Fundamental Principles of Electromagnetic Flow Measurement**, Krohne Messtechnik GmbH & Co. KG, 3rd Edition, Duisburg, 2003.
- HORNER, B., **A Novel Profile-Insensitive Multi-Electrode Induction Flowmeter Suitable for Industrial Use**, Measurement 24, 131–137, 1998.
- INCONTRI, J., **Recent Advances in Electromagnetic Flow Measurement Technology**, ISA Expo 2005.

LIANG, B., **Digital Simulation of Electromagnetic Flowmeter for Insulating Liquids.** Proceedings of 14th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL 2002), Graz (Austria), July 7-12, 2002.

LINFORD, A., **Flow Measurement & Meters.** 2^a edição, E&F Spon Ltda., 1961.

LIM, K.W., CHUNG, M. K., **Relative errors in evaluating the electromagnetic flowmeter signal using the weight function method and the finite volume method,** Flow Measurement and Instrumentation vol. 9, p. 229-235, 1998.

MAALOUF, A. I., **The Derivation and Validation of the Practical Operating Equation for Electromagnetic Flowmeters: Case of Having an Electrolytic Conductor Flowing Through.** IEEE Sensors Journal, vol. 6, no. 1, 2006.

MAALOUF, A. I., **A Validated Model for the Zero Drift Due to Transformer Signals in Electromagnetic Flowmeters Operating With Electrolytic Conductors,** IEEE Sensors Journal, vol. 6, no. 6, Dezembro 2006

MENEZES, M., **Improving Mill Availability & Efficiency Using Measurement Performance Diagnostics and Best Practices.** ISA website, 2005. Disponível em <http://www.isa.org/intech/modernprocess/diagnostics/>. Acesso em 10/12/2006

MICHALSKI, A., JACUBOWSKI, J., **A New Approach to the Estimation of Basic Flow Parameters Within the Electromagnetic Measuring Method for Open Channels,** IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 06/2006

PEROVIC, S., HIGHAM, E. H., **Electromagnetic Flowmeters as a Source of Diagnostic Information.** Flow Measurement and Instrumentation 13, 87 – 93, 2002.

POLO, J., ARENY, R. P., VIDE, J. P. M., **Analog Signal Processing in an AC Electromagnetic Flowmeter.** IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 51, no. 4, 2002.

SHERCLIFF, J.A., **The Theory of Electromagnetic Flowmeasurement**. 1ª edição, Londres, Ed. Cambridge Univ., 1962.

SHERCLIFF, J.A., **Experiments on the Dependence of Sensitivity on Velocity Profile in Electromagnetic Flowmeters**, Journal of Applied Physics, 25, 817-818, 1954.

SOUZA, Z.; BORTONI, E. C., **Instrumentação para sistemas energéticos e industriais**, Editora Novo Mundo, Brasil, 2006.

STRANGAS, E.G., SCOTT, T.W., **Design of a Magnetic Flowmeter for Conductive Fluids**, IEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 37 no. 1, 1988.

THÜRLEMANN, B., **Methode zur Elektrischen Geschwindigkeitsmessung in Flüssigkeiten**, Helv. Phys. Acta, pp. 383-419 3, 1941.

XU, L., HAN, J., WANG, Y., **Design of Electrode Array of Inductance Flowmeter**, IEEE Sensors Journal, vol. 5, nº 5, 2005.

WALKER, J. R., **Diagnostics Advance in Electromagnetic Flow Metering**, Endress+Hauser, Greenwood, Indiana, 2001.

YODER, J., **The Global Market for Magnetic Flowmeters**, Flow Research Inc., Wakefield, MA, 2005.

Revistas:

MECATRÔNICA Atual, **Medidor de vazão tipo magnético**, Editora Saber, Ed. 020, Janeiro 2005

<http://www.controleng.com/article/CA6274879.html?text=flowmeter+market&spacedesc=news>

Apêndice

EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Os seguintes equipamentos foram utilizados durante os testes realizados em laboratório.

Tabela 8 – Dados do medidor eletromagnético comercial

Medidor eletromagnético de vazão	
Modelo	IFS 4000/6
Fabricante	Conaut
Faixa de operação	0 m ³ /h – 15 m ³ /h
Tipo	Com conversor de sinal remoto DN: 2” Revestimento interno: borracha Eletrodos: Hastelloy C

Tabela 9 – Dados do sistema de aquisição de dados

Sistema de aquisição de dados 1	
Modelo	NI USB-6008
Fabricante	National Instruments
Características	Taxa de amostragem: 10kHz Resolução: 12 bit Saídas: 0 a 5V Entradas: -10 a 10V Conexão USB
Sistema de aquisição de dados 2	
Modelo	DAQP - 208
Fabricante	Quatech
Características	Taxa de amostragem: 100kHz Resolução: 12 bit Saídas: - 5 a + 5V Entradas:-10 a +10V Conexão PCMCIA

Tabela 10 – Dados do osciloscópio

Osciloscópio	
Modelo	TDS 210
Fabricante	Tektronix
Faixa de operação	60Mhz – 1GS/s

Tabela 11 – Dados do gerador de funções

Gerador de funções	
Modelo	ETB-511
Fabricante	Entelbra
Faixa de operação	1Hz-100kHz
Amplitude máx	10V (pico)

Tabela 12 – Dados do termômetro de contato

Termômetro de contato	
Modelo	Salvterm 700
Fabricante	Gulton do Brasil Ltda
Faixa de operação	-40,0°C a 700°C
Tipo	Termopar tipo J (Ferro-Constantan)

Tabela 13 – Dados do condutivímetro

Termômetro de contato	
Modelo	CG 859
Fabricante	Schott Ger'a'te

Tabela 14 – Dados da balança

Balança	
Modelo	440-53
Fabricante	Kern
Faixa de operação	1 – 6000 g , D = 1g

Tabela 15 – Dados do multímetro

Multímetro	
Modelo	ET-1502
Fabricante	Minipa
Faixa de operação	<p>Display de 4 ½ dígitos</p> <p>Tensão Contínua: 200mV a 1.000 V</p> <p>Tensão Alternada: 200mV a 750V</p> <p>Corrente Contínua: 20μA a 20A</p> <p>Corrente Alternada: 20μA a 20^a</p> <p>Resistência: 1Ω a 20M Ω</p>