



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ELETRICIDADE

**CARACTERIZAÇÃO METROLÓGICA DE UM MEDIDOR VOLUMÉTRICO
PARA PEQUENAS TAXAS DE FLUXO DE GÁS UTILIZANDO O MÉTODO DE
DIFERENÇA DE PRESSÃO**

Pedro Augusto Lopes Abreu

São Luís
2011

**CARACTERIZAÇÃO METROLÓGICA DE UM MEDIDOR VOLUMÉTRICO
PARA PEQUENAS TAXAS DE FLUXO DE GÁS UTILIZANDO O MÉTODO DE
DIFERENÇA DE PRESSÃO**

Pedro Augusto Lopes Abreu

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação do Curso de Mestrado em Engenharia de Eletricidade da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciência no domínio da Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Automação e Controle.

Sebastian Yuri Cavalcanti Catunda, Dr.
Orientador

Abreu, Pedro Augusto Lopes.

Caracterização Metrológica de um medidor volumétrico para pequenas taxas de fluxo de gás utilizando o método de diferença de pressão / Pedro Augusto Lopes Abreu. – São Luís, 2011.

73 f.

Impresso por computador (fotocópia).
Orientador: Sebastian Yuri Cavalcanti Catunda.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Maranhão, Curso de Mestrado em Engenharia de Eletricidade, 2011.

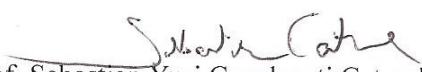
1. Fluxo de gás – Medição volumétrica. 2. Instrumentação. 3. Pressão. 4. Biodegradação anaeróbia. I. Título.


CDU 621.6.02: 31.733


**CARACTERIZAÇÃO METROLÓGICA DE UM MEDIDOR
VOLUMÉTRICO PARA PEQUENAS TAXAS DE FLUXO DE GÁS
UTILIZANDO O MÉTODO DE DIFERENÇA DE PRESSÃO**

Pedro Augusto Lopes Abreu

Dissertação aprovada em 16 de março de 2011.


Prof. Sebastian Yuri Cavalcanti Catunda, Dr.
(Orientador)


Prof. Flavio Henrique Vasconcelos, Dr.
(Membro da Banca Examinadora)


Prof. João Viana da Fonseca Neto, Dr.
(Membro da Banca Examinadora)

DEDICATÓRIA

A Deus. Aos meus pais e irmãos pelo afeto, suporte e auxílio. A minha noiva pelo apoio, amor e carinho. A todos meus amigos.

*“A mente que se abre a uma nova
ideia jamais voltará ao seu tamanho
original.”*

Albert Einstein.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pelo suporte espiritual em tantos momentos difíceis.

Ao meu orientador o professor Dr. Sebastian Yuri Cavalcanti Catunda por acreditar e contribuir para a conclusão deste trabalho. Seus conhecimentos, ensinamentos, dedicação e paciência foram fundamentais ao longo do trabalho.

Agradeço a todos os professores do Departamento de Engenharia Elétrica que participaram, positivamente, na minha formação científica na graduação e no mestrado.

Aos meus amigos do LIEA (Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Automação), em especial Jadilson, Freud, Rafael, Evandro, Shirlen, Thiago, Igor e Adelman pelo apoio, amizade, companheirismo e ajuda nos momentos difíceis no decorrer do curso.

Aos meus amigos do LCP (Laboratório de Controle e Processo) e do LAC (Laboratório de Automação e Controle), pela amizade e momentos de descontração e a todos aqueles que de alguma forma deram sua contribuição para realização deste trabalho.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela bolsa auxílio concedida de foi grande ajuda para a dedicação aos estudos e a elaboração da dissertação durante o Mestrado.

RESUMO

Os sistemas de medição de pequenas taxas de fluxo de gás tem grande relevância nos âmbitos industriais e científicos, nos quais suas aplicações exigem geralmente medições com baixa incerteza. Esses sistemas de medição tem tido uma grande evolução ultimamente. Isso se deve, principalmente, à preocupação com a liberação de gases em processos biológicos naturais como, por exemplo, o gás metano liberado no processo de biodegradação anaeróbio, e que também é aproveitado como biogás. Neste trabalho, apresenta-se o desenvolvimento de um medidor para pequenos volumes de gases utilizando o método de diferença de pressão em um recipiente de volume conhecido. Um microcontrolador é utilizado no controle das duas válvulas localizadas na entrada e na saída do recipiente. São realizados estudos apropriados de análise e propagação de incertezas, e são escolhidos componentes adequados para o desenvolvimento e construção do medidor, de modo a realizar a medição com boa exatidão e baixa incerteza. Simulações e testes experimentais são apresentados para validação do sistema proposto.

PALAVRAS-CHAVE: instrumentação; medição volumétrica; fluxo de gás; pressão; incerteza; biodegradação anaeróbia.

ABSTRACT

A system for measuring low rates of gas flow has great importance for some industrial and especially for scientific applications where usually high accuracy and low uncertainty are required. This type of measurement systems have undergone a great development in recent years primarily due to the concern with the release of gases in natural processes occurring in the environment, such as anaerobic biodegradation process which releases methane and the use in the production of biogas. In this work, the development of low-volume gas flow rate measurement system using the method of pressure difference in a container of known volume is presented. A microcontroller is used to control two valves located one gas inlet and the other at the gas outlet of the container. Appropriate analysis of uncertainty propagation is carried out, and components suitable are selected for the development of the meter in order to perform the measurement with low uncertainty. Simulations and experimental tests are presented for validating the proposed system.

KEYWORDS: instrumentation; volumetric measurement; gas flow; pressure; uncertainty; anaerobic biodegradation.

SUMÁRIO

<u>CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO</u>	1
1.1 MOTIVAÇÃO	2
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	3
<u>CAPÍTULO 2. CONTEXTUALIZAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO</u>	4
2.1 TERMODINÂMICA	4
2.2 BIODEGRADAÇÃO ANAERÓBIA	6
2.3 DESCRIÇÃO DE SISTEMAS SEMELHANTES	9
<u>CAPÍTULO 3. ESPECIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPONENTES</u>	14
3.1 ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO	14
3.2 DETALHAMENTO DO SISTEMA	15
3.2.1 PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO	18
3.2.2 PRODUÇÃO DE GÁS	20
3.3 ANÁLISE DE FALHAS	21
3.4 MODELO EM STATEFLOW	22
<u>CAPÍTULO 4. ANÁLISE DE PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS</u>	26
4.1 INTRODUÇÃO	26
4.2 ESTUDO DA PROPAGAÇÃO DE INCERTEZA	27
4.2.1 A INCERTEZA PADRÃO COMBINADA	32
4.2.2 A INCERTEZA EXPANDIDA	34
4.2.3 ANÁLISE DE MONTE-CARLO	35
4.3 MÉTRICAS DE INCERTEZA DO SISTEMA PROPOSTO	37
4.3.1 INCERTEZA DO VOLUME	39
4.3.2 INCERTEZA DOS SENSORES DE PRESSÃO	39
4.3.3 INCERTEZA DO SISTEMA	40
4.3.4 SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO	41

4.3.5	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NA ABORDAGEM GUM E NA SMC	45
<u>CAPÍTULO 5.</u>	<u>RESULTADOS E DISCUSSÕES</u>	<u>46</u>
<u>CAPÍTULO 6.</u>	<u>CONCLUSÕES</u>	<u>50</u>
6.1	PERSPECTIVAS FUTURAS	50
<u>REFERÊNCIAS</u>		<u>52</u>
<u>ANEXO A.</u>	<u>SENSOR DE PRESSÃO ATMOSFÉRICA</u>	<u>54</u>
<u>ANEXO B.</u>	<u>SENSOR DE PRESSÃO DIFERENCIAL</u>	<u>57</u>

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Dispositivo em falha e suas consequências _____	21
Tabela 4.1. Incerteza expandida _____	35
Tabela 4.2. Incerteza das grandezas de entrada _____	40
Tabela A.1. Máximas taxas ⁽¹⁾ _____	54
Tabela A.2. Características de operação ($V_S = 5 V_{DC}$; $T = 25^\circ\text{C}$) _____	55
Tabela B.1. Característica de Operação ($V_S = 5 V_{DC}$; $T = 25^\circ\text{C}$) _____	57
Tabela B.2. Máximas taxas ⁽¹⁾ _____	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Representação esquemática do sistema de medição por deslocamento de líquido.	10
Figura 2.2. Representação esquemática do sistema de medição por diferença de pressão.	12
Figura 3.1. Representação esquemática do sistema de medição.	16
Figura 3.2. Circuito de acionamento da válvula solenóide.	17
Figura 3.3. Representação do modelo em stateflow.	22
Figura 3.4. Simulação do ambiente físico	23
Figura 3.5. Simulação da pressão no recipiente.	24
Figura 3.6. Simulação do volume por ciclo.	25
Figura 4.1. PDF trapezoidal genérica.	31
Figure 4.2. Níveis de confiança de uma variável.	35
Figure 4.3. Propagação de distribuição.	37
Figura 4.4. PDF triangular do volume em apenas um ciclo.	43
Figura 4.5. PDF da taxa instantânea em um ciclo.	44
Figura 4.6. PDF da taxa média em 1 minuto.	44
Figura 5.1. Resultado experimental do volume por ciclo.	47
Figura 5.2. Taxa volumétrica instantânea.	47
Figura 5.3. Volume acumulado.	48
Figura 5.4. Taxa volumétrica média.	49
Figura A.1. Esquemático do sensor de pressão atmosférico	54
Figura A.2. Saída em relação a pressão absoluta	56
Figura B.1. Esquemático do sensor de pressão diferencial	58
Figura B.2. Saída em relação a pressão diferencial	58

LISTA DE ACRÔNIMOS

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i> (Conversor analógico digital);
Bit	<i>Binary Digit</i> (Dígito Binário);
DQO	Demanda química de oxigênio;
GUIA	<i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i> (Guia para Expressão de Incerteza de Medição);
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional para Padronização);
NF	Normalmente Fechada;
NA	Normalmente Aberta;
PDF	<i>Probability Density Function</i> (Função Densidade de Probabilidade);
pH	<i>Potencial Hidrogeniônico</i> ;
SMC	Simulação de Monte Carlo
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i> (fluxo ascendente de manta de lodo anaeróbio);

LISTA DE SÍMBOLOS

n	Número de Moles;
P	Pressão;
P_{atm}	Pressão atmosférica no ambiente de medição;
R	Constante Universal do Gases;
T	Temperatura;
V	Volume do recipiente somado com o volume morto;
V_S	Volume do recipiente;
V_D	Volume morto;
B	Coefficiente viriais;
Na^+	Íon cátion do elemento sódio;
K^+	Íon cátion do elemento potássio;
Ca^{2+}	Íon cátion do elemento cálcio;
$V1$	Válvula de entrada do sistema de medição;
$V2$	Válvula de saída do sistema de medição;
Δn_c	Incremento da quantidade de gás;
ΔP	Incremento da pressão diferencial;
ΔV_{acm}	Volume acumulado;
$\Delta V_{c,med}$	Variação média do volume;
ΔF_{inst}	Taxa instantânea de fluxo volumétrico de gás;
ΔF_{med}	Taxa média de fluxo volumétrico de gás;
Δt	Intervalo de tempo;
x	Grandeza de entrada;
$E[x]$	Esperança ou valor esperado da variável aleatória;
$Var[x]$	Variância;
u_x	Incerteza padrão de medição da grandeza x ;
σ^2	Desvio padrão;
\bar{X}	Valor médio ou esperado da grandeza x ;
$u_A(x_i)$	Incerteza padrão tipo A;
$u_B(x_i)$	Incerteza padrão tipo B;

u_c	Incerteza padrão combinada;
U	Incerteza expandida;
k	Fator de abrangência

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

Os processos em que são empregados os sistemas de medição para pequenas taxas de fluxo de gás geralmente requerem medições com baixa incerteza em suas aplicações, dentre as quais, podemos destacar a medição de gases oriundos de processos biológicos naturais.

No processo de biodegradação anaeróbio, por exemplo, a taxa de fluxo de gás e a quantidade de metano são parâmetros fundamentais para avaliar o desempenho do processo. Portanto, esses sistemas tem sido de grande valia no aprofundamento de estudos nesta área em escala laboratorial e também em escala industrial.

Além do processo de biodegradação anaeróbio em que se observa, principalmente, o teor de metano, há outros exemplos de aplicações de sistemas de medição de pequenas taxas de fluxo de gás que podem ser encontrados em diferentes áreas, tais como análise química de outros gases, lixo, controle de poluição, etc.

Na bibliografia são encontrados poucos métodos para a realização da medição de pequenas taxas de fluxos de gás, como por exemplo, o método por deslocamento de líquido. Neste método, embora seja empregada uma técnica simples, existem alguns aspectos inconvenientes, tais como: a solubilidade do gás no líquido deslocado e dificuldade de operação e automação em ambientes industriais. Outra desvantagem deste método é que o líquido precisa ser suprido regulamente de modo a compensar a perda por evaporação ou derramamento [1]. Devido a esta compensação este método necessita de frequente manutenção e ajustes [2]. Considerando as características do método anterior, decidiu-se empregar o método por diferença de pressão em que não há necessidade de envolvimento com líquido.

O consenso que se tem de um medidor de gás ideal [3] é que ele deve:

- apresentar elevada exatidão,
- ser acessível,
- registrar dados,
- ser resistente à corrosão,

- requerer pouca manutenção,
- ser capaz de medir fluxo em um grande intervalo de tempo,
- produzir no processo variações de pressão insignificante, e
- ser capaz de operar a baixas pressões.

No desenvolvimento de um instrumento para medir pequenas taxas de fluxos de gás pode existir dificuldade para incorporar todas as características de um medidor ideal especificado anteriormente, por isso é dada preferência às características principais para melhor atender os requisitos de um projeto específico.

A exatidão de um instrumento é uma de suas principais características metrológicas e por isso é priorizada neste trabalho. Ela pode ser avaliada e definida com base no estudo da contribuição dos componentes individuais para incerteza de medição, assim como do sistema como um todo. Portanto é de suma importância a realização do estudo dos componentes de incertezas que contribuem para a incerteza combinada de medição.

1.1 MOTIVAÇÃO

Dentre as aplicações de medição de baixa taxa volumétrica, destaca-se a medição de gases liberados em processos biológicos, devido à preocupação com os danos que eles podem causar ao meio ambiente e à possibilidade de utilização desses gases para outros fins. Um exemplo é o gás metano que é um dos produtos do processo de biodegradação anaeróbio. O gás metano é um dos que mais contribuem para o efeito estufa, com isso deve-se encontrar meios para diminuir a sua emissão na atmosfera e criar alternativas para sua utilização. Uma opção é aproveitar o volume de gás produzido na geração de energia em pequenas comunidades.

A motivação desse trabalho é a de realizar a caracterização metrológica para o desenvolvimento um instrumento capaz de medir o volume e a taxa com que o gás é liberado por esses processos, pois existe uma dificuldade em encontrar disponível comercialmente um instrumento adequado para medição de pequenas taxas de fluxo de gás [1]. Tal instrumento poderá ser utilizado para realizar estudos específicos em relação ao desempenho do processo

de biodegradação anaeróbio, em que é fundamental conhecer a taxa com a qual os gases estão sendo produzidos, bem como sua composição.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Além deste capítulo, o presente trabalho de dissertação está organizado em mais quatro capítulos descritos a seguir.

No capítulo 2 é apresentada a contextualização em que o protótipo está inserido, bem como as leis e propriedades físicas que regem o seu funcionamento. Além disso, é realizada uma breve revisão de sistemas semelhantes.

No capítulo 3 descreve-se o projeto do sistema de medição proposto especificando o seu funcionamento e elaborando o modelo matemático de medição para a obtenção da taxa de fluxo volumétrica de produção de gás, além de realizar uma análise das possíveis falhas nos componentes que compõem o sistema de medição. Neste capítulo, também é realizada uma simulação do modelo de fluxo de estado (StateFlow) do sistema proposto utilizando o ambiente Simulink© do software Matlab.

No capítulo 4, tomando por base o modelo desenvolvido no capítulo anterior, é realizado um estudo de propagação de incertezas do sistema de medição proposto, além de calcular e analisar suas métricas. Neste capítulo, também é realizada uma análise e uma simulação numérica de Monte Carlo de modo a fazer um comparativo dos resultados obtidos pela análise de propagação de incerteza por série de Taylor e por Monte Carlo.

No capítulo 5 são apresentados os resultados experimentais do sistema de medição proposto assim como é especificado às características de medição obtidas com os testes no protótipo.

Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões e perspectivas de novos trabalhos.

CAPÍTULO 2. CONTEXTUALIZAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

No presente capítulo, destaca-se a contextualização e a base teórica e científica no desenvolvimento de um instrumento que realize medição de pequenas taxas de fluxo de gás.

A medição da taxa volumétrica de produção de gases é de grande importância em vários processos biológicos, tais como o de biodegradação anaeróbia, em que há a liberação de gases para o meio ambiente. Nesses, a composição do gás e sua taxa de produção são indicadores-chaves do desempenho do processo.

De forma a obter um modelo matemático do sistema de medição de taxa volumétrica de gás, realiza-se uma revisão das propriedades e leis da física relacionadas. Além disso, também é feita uma breve descrição de outros protótipos de medição de pequenas taxas de fluxo de gás.

2.1 TERMODINÂMICA

O modelo do sistema de medição da taxa volumétrica de gás é baseado nas leis e propriedades físicas da termodinâmica. O modelo considerado baseia-se num sistema termodinâmico em que certa quantidade de matéria é contida dentro de um recipiente no qual as paredes podem ser fixas ou móveis, como por exemplo, pistão [4].

Neste trabalho, considera-se a lei do gás ideal, definida na equação (2.1), que é adequada para os gases reais cujas massas específicas são suficientemente baixas.

$$PV = nRT \quad (2.1)$$

Na equação (2.1), quando estabelecemos como constantes o número de moles (n) e a constante universal dos gases (R), teremos a seguinte relação:

$$\frac{P_i V_i}{T_i} = \frac{P_f V_f}{T_f}, \quad (2.2)$$

em que, os índices i e f representam, respectivamente, os valores iniciais e finais de pressão (P), volume (V) e temperatura (T).

A partir de (2.2), podemos chegar às transformações termodinâmicas conhecidas: isotérmicas (temperatura constante), isovolumétricas ou isocóricas (volume constante) e isobárica (pressão constante).

Na equação (2.2), as unidades do Sistema Internacional de Unidades (SI), para a temperatura, volume e pressão são, respectivamente, Kelvin (K), metro cúbico (m^3) e Pascal (Pa). Dessas grandezas a única que é uma unidade base é a temperatura. As outras são unidades derivadas [5].

Para o desenvolvimento desse sistema de medição são levadas em consideração as seguintes propriedades de um gás ideal [6]:

1. *O gás ideal consiste em partículas (átomos, grupo de átomos ou moléculas), que possuem movimento aleatório e obedecem as leis de Newton do movimento. As moléculas se movem em todas as direções e em uma larga faixa de velocidades.*
2. *A quantidade total de moléculas é “grande”. Admite-se que o número de moléculas é tão grande que a taxa com a qual a quantidade de movimento é fornecida a qualquer área A da parede do recipiente seja constante.*
3. *O volume ocupado pelas moléculas é uma fração desprezível do volume ocupado pelo gás.*
4. *Nenhuma força atua sobre uma molécula, exceto durante uma colisão, seja com as paredes do recipiente que a contem, seja com outra molécula.*
5. *Todas as colisões são elásticas e de duração desprezível.* A condição elástica indica que a energia cinética total da molécula é uma constante. A condição de duração desprezível estabelece que a energia potencial total da molécula, que somente pode ocorrer durante uma colisão, é desprezível.

A equação (2.1), utilizada neste trabalho, é válida para gases ideais e para gases reais cujas massas específicas sejam suficientemente baixas. Por outro lado, é importante apresentar uma equação de estado que descreva o comportamento dos gases reais, especialmente para gases com massa específica não baixa, como exemplo os compostos orgânicos. A seguir, é abordado, de maneira superficial, dois dos vários procedimentos existentes para descrever o comportamento dos gases reais [6].

- Expansão virial

Esse procedimento tem uma equação aproximada de estado para um gás real descrita por (2.3).

$$PV = nRT * \left[1 + B_1 \frac{n}{V} + B_2 \left(\frac{n}{V} \right)^2 + \dots + B_N \left(\frac{n}{V} \right)^N \right] \quad (2.3)$$

Os coeficientes, B_1, B_2, \dots, B_N , conhecidos como coeficientes viriais e são funções da temperatura. Eles devem ser obtidos empiricamente ajustando-se a equação (2.3) aos resultados de ensaios experimentais. Pode-se perceber que, para pequenas massas específicas molares ($n/V \rightarrow 0$), essa equação de estado se reduz à lei do gás ideal (2.1).

- Equação de estado de Van Der Waals

Essa equação, proposta pelo físico alemão Johanes Diderik Van Der Waals em 1873, pode ser expressa por (2.4). Os valores das constantes a e b devem ser obtidos experimentalmente.

$$\left(P + \frac{an^2}{V^2} \right) (V - nb) = nRT \quad (2.4)$$

Pode-se notar que a equação (2.4) faz uma correção na pressão e no volume em comparação com a lei do gás ideal.

2.2 BIODEGRADAÇÃO ANAERÓBIA

Descreve-se aqui o processo de produção de biogás por meio da biodegradação anaeróbica para contextualização do uso do sistema de medição desenvolvido neste trabalho. Devido a sua baixa produção de gás, esse processo requer um medidor com característica de medição para pequenas taxas volumétricas de gás.

Biodegradação é o processo pelo qual substâncias orgânicas são quebradas em componentes menores pelas enzimas produzidas por organismos vivos microbianos. Os microrganismos transformam a matéria através de processos metabólicos e enzimáticos.

Processos de biodegradação variam muito, mas, frequentemente, o produto final da degradação é o dióxido de carbono ou metano. O material orgânico pode ser degradado de forma aeróbia, com oxigênio, ou anaeróbia, sem oxigênio [7].

A matéria biodegradável é geralmente um material orgânico, como matéria vegetal e animal e outras substâncias provenientes de organismos vivos ou materiais artificiais que são similares para ser aproveitada por microrganismos.

A digestão anaeróbia ocorre quando os micróbios anaeróbios são dominantes sobre os micróbios aeróbios. Os resíduos biodegradáveis em aterro degradam na ausência de oxigênio durante o processo de digestão anaeróbia.

A digestão anaeróbia é amplamente utilizada para tratar águas residuárias e resíduos biodegradáveis [7]. Como não há a presença de oxigênio, a manipulação de microrganismos anaeróbios utiliza gases como nitrogênio, dióxido de carbono ou hidrogênio e, geralmente, libera gás carbônico e metano como produto.

Como parte de um sistema integrado de gestão de resíduos, digestão anaeróbia reduz a emissão de gás de aterro para a atmosfera. A digestão anaeróbia é uma fonte de energia renovável porque produz biogás adequado para a produção de energia ajudando a substituir os combustíveis fósseis. Também, os sólidos ricos em nutrientes deixados após digestão podem ser usados como fertilizante [8].

O processo anaeróbio de tratamento de águas residuárias pode efetivamente eliminar os poluentes orgânicos a um custo muito inferior ao dos processos aeróbios convencionais. Além de uma vantagem importante dele poder ser aplicado em praticamente qualquer lugar e em qualquer escala [3].

Na digestão anaeróbica, o processo de conversão do material celular para biogás é distinguido em quatro etapas: hidrólise; acidificação; acetogênese e metanogênese. No digestor anaeróbio os quatro processos se desenvolvem simultaneamente. Quando o digestor funciona adequadamente, a conversão dos produtos intermediários (ou seja, das primeiras três etapas da digestão anaeróbia) é quase completa, de modo que a concentração desses se mantém baixa [9].

As etapas do processo de biodegradação anaeróbica podem ser distinguidas como segue [9]:

- Hidrólise – nesta etapa as macromoléculas (proteínas, polissacarídeos e gorduras) são convertidas em moléculas de menor peso molecular, que são solúveis em água, como aminoácidos, açúcares e ácidos graxos.
- Acidificação – é onde encontramos maior desagregação dos componentes remanescentes por acidogênica (fermentação) de bactérias. Os ácidos graxos voláteis são obtidos juntamente com a amônia, dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio, bem como outros subprodutos.
- Acetogênese – é a etapa em que os produtos da acidificação são convertidos em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono por bactérias acetogênicas.
- Metanogênese – é a etapa final em que os produtos da fermentação ácida são convertidos em produtos gasosos estáveis que se desprendem da fase líquida, metano e dióxido de carbono.

Nessa última etapa da digestão anaeróbia, os produtos da fermentação ácida são convertidos nos produtos gasosos estáveis, que se desprendem da fase líquida, metano e dióxido de carbono. Somente nessa etapa ocorre efetivamente à remoção de material orgânico da fase líquida.

A quantidade de metano que pode ser produzido a partir de um material orgânico é diretamente proporcional ao conteúdo da demanda química de oxigênio (DQO)¹ conversível. Por exemplo, na equação estequiométrica da biodegradação anaeróbia metano tem uma DQO de 2 moles de oxigênio (64 gramas de DQO) por mol de metano(16 gramas), então 1 grama de metano é equivalente a 4 gramas de DQO [9].

¹ Demanda química de oxigênio é a quantidade de oxigênio em gramas capaz de oxidar o material orgânico em 1 litro de resíduo usando dicromato como agente oxidante.

Geralmente, o biogás envolvido na fase líquida durante a digestão de carboidratos contém menos dióxido de carbono que metano, sendo um dos motivos para isso a alta solubilidade do dióxido de carbono em relação ao metano na água.

Similar a muitos processos biológicos, a digestão anaeróbia é fortemente afetada por fatores ambientais, tais como:

- Temperatura – o processo pode ocorrer abaixo de 0°C, mas a taxa de produção de metano aumenta com o aumento da temperatura e o máximo relativo é alcançado de 35 a 37°C.
- Alcalinidade e pH – nas primeiras etapas do processo a digestão pode ocorrer em uma ampla faixa de valores de pH, porém na metanogênese apenas desenvolve em quando o pH é próximo de 7 (entre 6,5 e 7,5), caso contrário a produção é baixa.
- Toxicidade – diversos compostos são tóxicos na metanogênese como: excessiva concentração de amônia, os cátions Na^+ , K^+ e Ca^{2+} , metais pesados e sulfureto.

As bactérias metanogênicas, conforme observado, são as mais sensíveis às condições ambientais desfavoráveis, por isso deve-se manter o digestor em condições ótimas [9].

O medidor desenvolvido neste trabalho pode ser utilizado para verificar os parâmetros de desempenho do processo de biodegradação anaeróbio que são a taxa de fluxo de gás e o quantitativo de gás metano, com auxílio de um detector de metano para tal fim ou apenas conhecendo a relação que, aproximadamente, 60% da produção é composto por gás metano [1].

2.3 DESCRIÇÃO DE SISTEMAS SEMELHANTES

Nesta seção destacam-se dois trabalhos sobre sistemas de medição para pequenas taxas de fluxo volumétrico, referenciados em [1] e [10], em que suas aplicações são, principalmente, para processos de biodegradação anaeróbio. Em ambos os sistemas, são relatados experimentos em escala laboratorial.

No primeiro sistema, mostrado na Figura 2.1 [1], o medidor volumétrico de gás é baseado no princípio de deslocamento de líquido. Esse medidor consiste em uma célula volumétrica, dois sensores para detecção do nível do líquido, uma válvula solenoide de três vias e um circuito para controle e operação da válvula.

Na válvula solenóide, a via comum (A) é conectada ao tubo, a abertura normalmente fechada é estabelecida para a saída de gás (B), ou seja, essa abertura é direcionada para a atmosfera e a abertura normalmente aberta é estabelecida para a entrada de gás (C). O controle de operação da válvula é dependente do sinal dos sensores óticos colocados na parede da célula volumétrica.

A célula volumétrica refere-se ao tubo de vidro em forma de U que tem um diâmetro interno de 8 mm e onde é depositado o líquido utilizado na medição. O líquido deve ser escolhido de maneira a não se misturar com o gás.

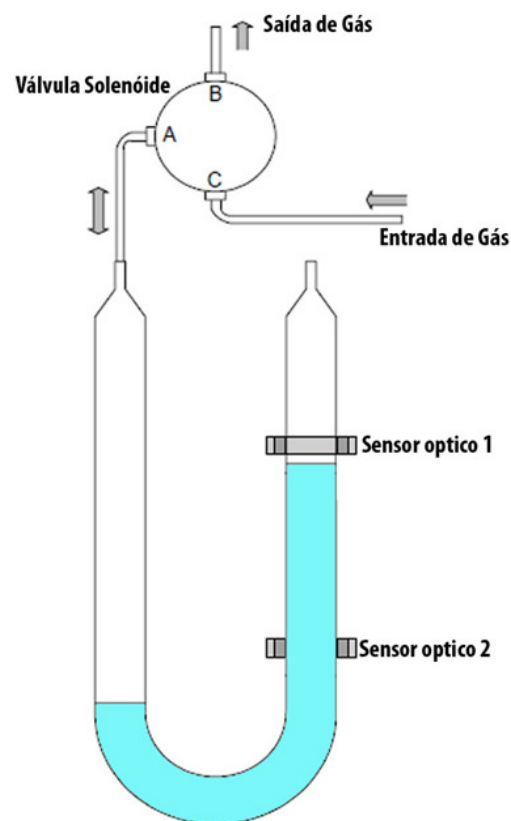


Figura 2.1. Representação esquemática do sistema de medição por deslocamento de líquido. Adaptado de [1].

O procedimento de medição inicia-se quando a válvula está no estado aberto para a entrada de gás e, conseqüentemente, fechado para a atmosfera. Nesse estado, a entrada do gás irá deslocar o líquido que está no interior do tubo. O líquido é deslocado até o nível onde está o sensor superior. Quando isso ocorrer, a válvula comuta e então o gás é expelido para atmosfera contabilizando-se um ciclo. Após a saída do gás o líquido retorna a sua condição inicial e o ciclo se repete.

O volume do gás que entrou no sistema naquele ciclo é encontrado por meio do volume do líquido deslocado, que já é conhecido. Portanto, após vários ciclos podemos determinar a taxa de produção do gás.

As desvantagens encontradas nesse protótipo são as seguintes: difícil construção de tubos com esse formato; dificuldade de operação e automação em ambientes industriais e a utilização de líquidos que precisarão ser supridos regularmente devido às perdas por evaporação.

Por causa da necessidade de compensar o líquido regularmente, o instrumento requer frequente manutenção e ajuste.

No segundo sistema, mostrado na Figura 2.2 [10], o desenvolvimento do medidor volumétrico de gás é baseado no princípio da diferença de pressão. Esse medidor consiste de uma célula volumétrica, um sensor de pressão, uma válvula solenoide de três vias e um circuito para controle e operação da válvula.

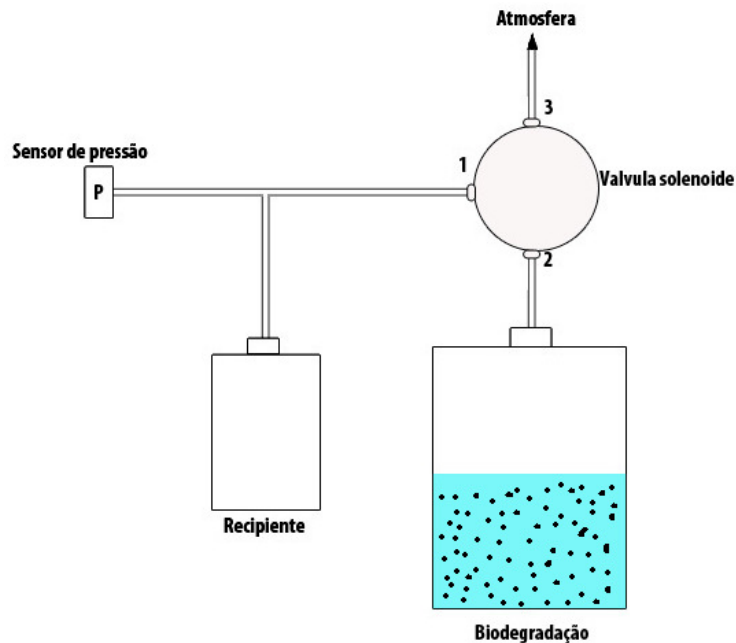


Figura 2.2. Representação esquemática do sistema de medição por diferença de pressão. Adaptado de [10].

A célula volumétrica desse protótipo, diferentemente do primeiro sistema, é um recipiente que pode ter um formato mais fácil de ser encontrado no mercado, como por exemplo, cilíndrico, retangular, etc.

Na válvula de três vias as portas de comunicação 1 e 2 são normalmente abertas e elas são conectadas a um sensor de pressão e a reação do processo, respectivamente. A porta 3 é normalmente fechada e sua abertura é direcionada para a atmosfera.

O funcionamento desse sistema é bastante simples. À medida que o processo de biodegradação for liberando gás, ele vai sendo armazenado no recipiente e a pressão no sistema vai aumentando até alcançar um limite pré-estabelecido. Quando esse limite é atingido, o circuito de controle ativa a abertura da porta 3 liberando o ar para a atmosfera e, simultaneamente, fecha a porta 2 prevenindo o contato do reator com a atmosfera. O período de tempo em que a porta 3 está aberta e a porta 2 fechada é de 2 segundos, suficientemente grande para garantir que todo o gás seja expelido e a pressão diferencial diminua até atingir zero, completando um ciclo de medição. Logo depois, a válvula é desativada e o ciclo é repetido.

O sensor de pressão diferencial utilizado pelo autor tem faixa de medição de 0 a 10 Torr, ou seja, de 0 a 1,3 kPa. Porém, pode-se utilizar um transdutor que tenha uma faixa diferente, como por exemplo, de 0 a 5 kPa.

Em relação ao primeiro sistema descrito, esse sistema é de simples construção e não possui as desvantagens citadas anteriormente. Portanto, neste trabalho é escolhido o método de diferença de pressão para a obtenção da taxa de fluxo volumétrica e realizado um estudo de propagação de incerteza.

CAPÍTULO 3. ESPECIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPONENTES

No presente capítulo, é feita a especificação de projeto, além de detalhar e discutir o sistema de medição proposto.

Uma análise com relação a possíveis falhas do sistema de medição é realizada. Além disso, o sistema de medição é modelado e simulado em StateFow e Simulink.

3.1 ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO

Neste trabalho, o principal objetivo é projetar um sistema de medição para obtenção da taxa volumétrica de gás e para isso é necessário especificar, por exemplo, os componentes e a faixa de operação em que este sistema irá trabalhar.

Os componentes necessários para a construção do protótipo são: duas válvulas do tipo *on-off* de duas vias, um sensor de pressão diferencial, um sensor de pressão atmosférica, um recipiente de volume conhecido, um microcontrolador com conversor-analógico digital (ADC) para controlar a abertura e fechamento das válvulas e realizar medições, além de tubos de pequenos diâmetros e conexões.

As válvulas podem ser normalmente fechadas (NF) ou normalmente abertas (NA), mas como é desejado um sistema com baixo consumo de energia é recomendável à utilização de uma válvula NA e outra válvula NF, pois para medição de pequenas vazões o carregamento do recipiente é bem mais lento que a descarga.

O sensor de pressão diferencial deve ter uma pequena faixa de medição e, conseqüentemente, elevada sensibilidade, além de boa exatidão. Quanto ao sensor de pressão atmosférica é necessário ter uma boa exatidão.

O volume do recipiente escolhido deve ser conhecido e pode ter qualquer formato. Outra característica é que ele, preferivelmente, deve ser pequeno, já que a medição é realizada para pequenas taxas e um volume maior pode aumentar a incerteza de medição.

As tubulações e as conexões devem ser constituídas de material que permita facilidade de manuseio para simplificar a montagem do protótipo, além de possuir pequeno diâmetro para não aumentar a incerteza de medição.

As especificações para o sistema de medição proposto neste trabalho é dependente das seguintes variáveis: volume do recipiente, o limite de pressão estabelecido para o chaveamento das válvulas e o tempo de chaveamento que define um ciclo de medição.

Para o recipiente, quanto maior seu volume, maior será o volume em um ciclo de medição, porém o tamanho influencia na portabilidade do instrumento. Portanto, a escolha do recipiente depende da aplicação do medidor. Neste caso, a aplicação é para sistemas com baixas taxas de fluxos, assim, um recipiente de pequeno volume é suficiente e desejado.

O limite de pressão especificado é baseado em valores utilizados em sistemas semelhantes na bibliografia pesquisada, portanto o valor de pressão em cada ciclo pode variar de 1.0 a 1.2 kPa.

O tempo de chaveamento é fundamental para especificar a taxa instantânea, assim quanto menor o tempo maior a taxa. Experimentos [11] demonstraram que o tempo mínimo para o recipiente descarregar é de, aproximadamente, 0.3 s, portanto é recomendável utilizar 0.4 s para ter uma margem segura.

De acordo com [10], o tempo máximo de 2 s é suficientemente grande para descarregar o recipiente. Então, nesse trabalho o tempo de chaveamento é especificado para trabalhar na faixa de 0.4 a 2 s. Neste trabalho, o tempo máximo é limitado pelo tempo em que o Matlab espera a informação de pressão do microcontrolador. Assim, ele pode ser facilmente alterado se requerido.

O microcontrolador, por sua vez, envia valor de pressão zero se a pressão de 1.0 kPa não foi atingida, e envia o valor de pressão medida quando a pressão no recipiente varia de 1.0 a 1.2 kPa.

3.2 DETALHAMENTO DO SISTEMA

O sistema de medição para pequenas taxas de fluxo de gás é mostrado esquematicamente na Figura 3.1.

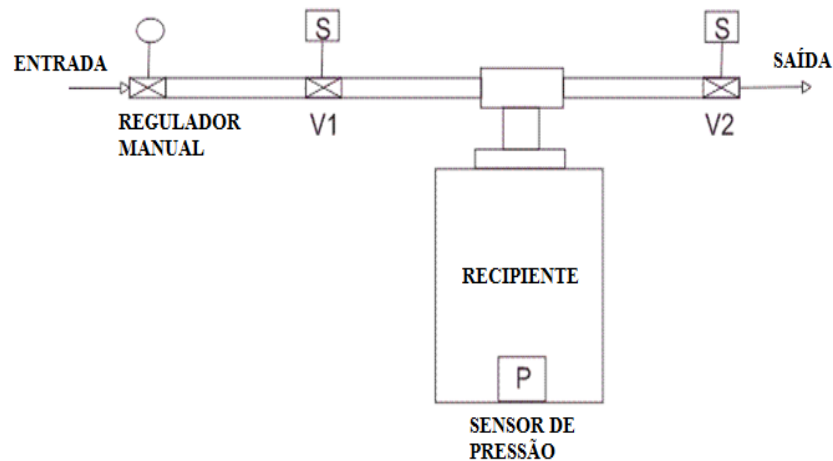


Figura 3.1. Representação esquemática do sistema de medição.

O sistema de medição é composto por um microcontrolador de 8 bits com um conversor analógico-digital (ADC) de 12 Bits embutido; duas válvulas solenóides on-off de duas vias normalmente fechadas (NF); um recipiente de pequeno volume; sensores de pressão diferencial e atmosférica, além de tubos e conexões.

O microcontrolador é responsável pelo controle de operação de abertura e fechamento das válvulas e pelo processamento dos sinais provenientes da medição de pressão diferencial e atmosférica. Ele envia a informação de pressão via porta serial RS-232 para o software Matlab onde é feito o tratamento dos valores de pressão para a obtenção do volume e da taxa de fluxo volumétrico.

As válvulas V1 de entrada e V2 de saída trabalham em oposição de operação, sem sobreposição, ou seja, enquanto uma está energizada permitindo a passagem do fluido, a outra válvula encontra-se desenergizada impedido a passagem e vice-versa.

As válvulas solenóides resistem a uma pressão máxima de 965.27 kPa (140 psi) e operam com uma tensão de 12 V e uma corrente de 500 mA. Elas são especificadas para trabalharem com fluidos de baixa viscosidade e ar, e não necessitem de qualquer pressão diferencial para operarem.

Essas válvulas são acionadas por um microcontrolador e um *driver* de corrente necessitando assim de um circuito de potência para seu acionamento, já que o microcontrolador, além de não ter corrente suficiente para acionar a válvula, fornece uma

saída de 5 V e a tensão de alimentação da válvula é de 12 V. Na Figura 3.2, é mostrado o circuito utilizado para acionar uma válvula.

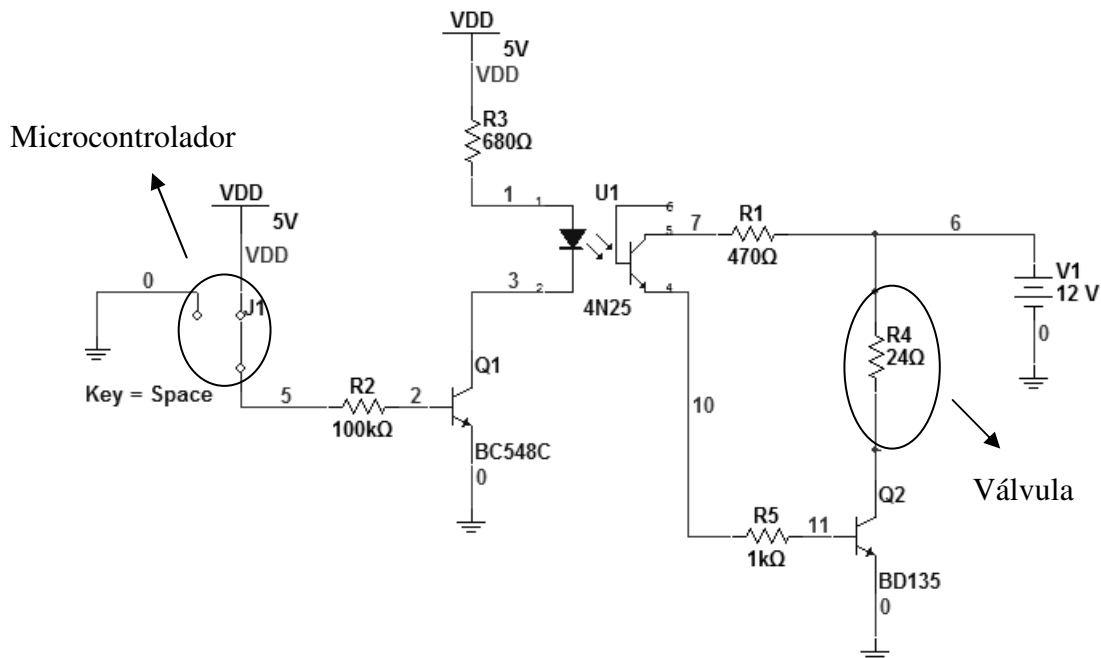


Figura 3.2. Circuito de acionamento da válvula solenóide.

A chave destacada no circuito da Figura 3.2 representa a saída do microcontrolador para ligar ou desligar uma válvula. Quando a chave está em 0 V, o transistor Q1 está em corte e a válvula encontra-se desligada. Quando a chave está em 5 V, o transistor Q1 está saturado e a válvula é ligada.

Um acoplador óptico é utilizado para isolar a parte de controle da parte de potência prevenindo assim contra possíveis danos que podem ser causados ao microcontrolador. Nesse circuito, a válvula é representada por uma resistência de 24 Ω , que é a impedância equivalente para consumir 500 mA com uma alimentação de 12 V.

Os sensores de pressão são do tipo piezoresistivo, ou seja, a pressão aplicada gera uma variação na resistência do elemento sensível (*strain-gauge*) que possibilita uma mudança na tensão de saída analógica. Eles também são compensados e ajustados em relação à temperatura para a faixa de variação de 0 a 85 °C.

O sensor de pressão atmosférica tem uma faixa de medição total de 15 a 115 kPa fornecendo uma saída analógica que varia de 0.2 a 4.8 V [12]. Já o sensor de pressão

diferencial tem uma faixa de medição total de 0 a 3.92 kPa (0 a 400 mmH₂O) e fornece uma tensão de saída analógica que varia de 1.0 a 4.9 V [13].

É importante ressaltar que a saída do sensor de pressão diferencial é o resultado da diferença entre a pressão dentro do recipiente do sistema de medição e a pressão atmosférica, ou seja, se a saída for zero significa que a pressão do recipiente é igual a da atmosfera, inexistindo volume de gás extra no recipiente.

A tubulação é composta por tubos de poliuretano, que possuem certa flexibilidade, com diâmetros externo e interno de 6 e 4 mm, respectivamente. As conexões são constituídas de duas partes, uma feita com material plástico possuindo encaixe rápido, o que permite uma facilidade na montagem do protótipo, além de ser seguro em relação a vazamentos que prejudicam o sistema de medição, e a outra feita de material metálico com rosca onde são acopladas as válvulas.

3.2.1 PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO

O procedimento de medição é uma descrição detalhada da medição de acordo com um ou mais princípios de medição e para um dado método de medição, baseada no modelo de medição e incluindo quaisquer cálculos para obter o resultado de medição [14].

Assim, o sistema proposto consiste em medir o volume de gás utilizando a diferença de pressão que é causada por variação da quantidade de fluido que entra e deixa o sistema sendo considerada desprezível a variação de temperatura.

Primeiramente, liga-se a válvula V1 deixando o fluido entrar no recipiente, que contém o sensor de pressão diferencial, e a válvula V2 permanece desligada impedindo o fluido escapar, conforme pode ser visto na Figura 3.1.

Após o sensor atingir um nível de pressão diferencial pré-estabelecido configurado no microcontrolador, que por sua vez, desliga a válvula V1 e liga a válvula V2 deixando o fluido escapar. Quando isso ocorre, a pressão diferencial no sistema vai pra zero, um ciclo de medição é completado e o procedimento se repete. Neste trabalho, o limite de pressão estabelecido para o cálculo do volume é de 1 kPa podendo chegar a 1.2 kPa.

De acordo com [10], o volume de gás que deixa o sistema em cada ciclo pode ser encontrado fazendo uma combinação da equação (2.1), a lei do gás ideal, com a equação (3.1) que indica a quantidade de gás.

$$\Delta n_c = \frac{V\Delta P}{RT} \quad (3.1)$$

Portanto, a expressão de variação do volume (ΔV_c) como função do diferencial de pressão pode ser determinada por

$$\Delta V_c = \frac{V\Delta P}{P_a}, \quad (3.2)$$

em que,

P_a é a pressão atmosférica no ambiente de medição

R é a constante universal dos gases;

T é a temperatura do sistema de medição;

V é o volume do sistema de medição;

Δn_c é o incremento da quantidade de gás;

ΔP é o incremento da pressão diferencial;

Outro importante parâmetro que deve ser considerado como característica para o desenvolvimento de um protótipo de medição de pequenas taxas volumétricas de gás é a contabilização do volume acumulado (ΔV_{acm}). Tal contabilização é importante para a realização de estudos que desejam conhecer a taxa de gás e o quanto de gás é liberado em determinado lugar, como por exemplo, em aterros de antigos lixões, em que se deseja construir um empreendimento. Portanto, o volume acumulado é dado por

$$\Delta V_{acm} = \sum_{i=1}^n \Delta V_{c,i}. \quad (3.3)$$

Em cada ciclo de medição podemos calcular a taxa instantânea de fluxo volumétrico de gás (ΔF_{inst}), em ml/s, de acordo com

$$\Delta F_{inst} = \frac{\Delta V_{c,i}}{\Delta t_i}, \quad (3.4)$$

Em que Δt_i representa o instante de tempo no qual foi obtido o volume $\Delta V_{c,i}$.

A taxa média de fluxo volumétrico de gás (ΔF_{med}) para n ciclos de medição pode ser obtida pela relação do somatório do volume obtido em cada ciclo ($\Sigma \Delta V_{c,i}$) e do somatório de tempo em um período determinado ($\Sigma \Delta t_j$), conforme

$$\Delta F_{med} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta V_{c,i}}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}, \quad (3.5)$$

A unidade da taxa média é dada em mililitros por segundo (ml/s) e verificada de minuto em minuto.

Uma aplicação para esse sistema é a medição de gases liberados pelo processo anaeróbio. Se quisermos medir, por exemplo, a quantidade de gás metano liberado devemos saber que em um processo de biodegradação anaeróbio, a sua relação representa, aproximadamente, 60% da composição de gases gerados [1].

3.2.2 PRODUÇÃO DE GÁS

A produção de gás é simulada utilizando uma bomba de ar com fluxo praticamente constante na entrada do sistema. Para simular uma variação na produção de gás, é utilizado também um regulador de fluxo manual, na entrada do sistema de medição, que foi ajustado ao longo dos experimentos. O ajuste foi feito para aumentar ou diminuir fluxo de ar.

O gás poderia ser produzido utilizando, na entrada do sistema de medição, um reator do tipo UASB (Upflow anaerobic sludge blanket - fluxo ascendente de manta de lodo anaeróbio). O material orgânico é depositado no reator e o gás produzido pelo processo escapa pela tubulação devido às saliências nas paredes internas do reator. Para a utilização

deste reator é preciso fazer apenas algumas adaptações quanto ao diâmetro da tubulação de saída do reator e da tubulação de entrada do sistema de medição.

3.3 ANÁLISE DE FALHAS

Nesta seção será realizada uma breve análise das possíveis falhas que esse sistema pode sofrer e será feita uma tentativa para prever o que pode ocorrer, e como pode ser possível detectar tal falha. Entretanto, a análise apresentada aqui é apenas inicial e serve como base para um estudo de falhas mais detalhado.

Os componentes que serão considerados como passíveis de falhas serão as válvulas V1 e V2 e os sensores de pressão. A Tabela 3.1 mostrada abaixo expõe os casos de falhas das válvulas, sensores e tubulação, com suas respectivas consequências e as possíveis formas de detectar determinada falha. No entanto, algumas falhas apresentam características similares, em que pode ser difícil isolar o elemento causador, sem uma inspeção detalhada do sistema.

Tabela 3.1. Dispositivo em falha e suas consequências

Dispositivo em falha	Falha	Consequências	Possível detecção
V1	Sempre ligada	O sensor tende ler a pressão do sistema mais a pressão do reator; Pode causar problemas caso o recipiente não descarregue por completo	Verificação de pressão residual no reator após descarga.
	Sempre desligada	O sistema para de medir a taxa de fluxo, pois o sensor tem saída constante igual à zero.	Longo período de tempo sem variação de pressão.
V2	Sempre ligada	O sensor vai ler uma pressão residual próxima de zero.	Pressão do recipiente não atinge o valor de descarga.
	Sempre desligada	A tendência é o sensor ler uma pressão constante.	Pressão do recipiente não diminui durante a descarga.
Sensor de pressão atmosférica	Sem sinal ou zero	O resultado da variação de volume tenderá ao infinito	Pressão atmosférica fora dos valores esperados.
Sensor de pressão diferencial	Sem sinal ou zero	O resultado da variação de volume será zero	Pressão do recipiente não varia durante o ciclo de carga.
Tubulação	Vazamento	Medição incorreta	Difícilmente detectável, a não ser durante um processo de calibração.
	Desconexão	O resultado da variação de volume será zero	Pressão do recipiente não varia durante o ciclo de carga.

3.4 MODELO EM STATEFLOW

Nesta seção é mostrado o modelo desenvolvido em StateFlow do Matlab para o sistema de medição proposto. A ferramenta StateFlow foi utilizada para modelar o sistema de medição e juntamente com o Simulink© do Matlab podemos simular o ambiente físico antes de colocarmos o sistema em prática. Portanto, foi realizada uma simulação neste ambiente de modo a obter um resultado satisfatório para ser aplicado na prática.

A Figura 3.3, mostrada abaixo, representa o sistema de controle do funcionamento das válvulas para o sistema de medição proposto para pequenas taxas de fluxo de gás. O funcionamento das válvulas é representado pelos estados em que as válvulas V1 e V2 se encontram: On-aberta ou Off-fechada. Também são definidas as condições para mudanças de estado das válvulas de ligar para desligar e vice-versa. Essas condições dependem do valor da pressão P no recipiente que neste caso é ajustado para 1.0 kPa.

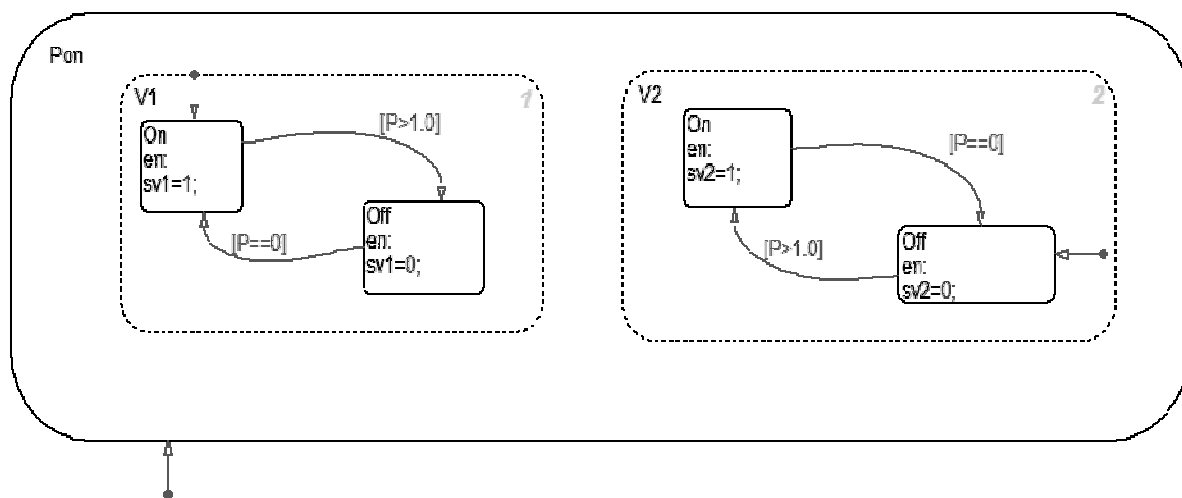


Figura 3.3. Representação do modelo em stateflow.

Na representação em StateFlow, os estados representados por linhas pontilhadas são hierárquicos e concorrentes, ou seja, eles podem ser ativados simultaneamente, enquanto que os estados limitados por linhas contínuas são não concorrentes.

O estado “maior”, *Pon*, representa o início do sistema para realizar a medição em que a válvula V1 está aberta e a V2 fechada. No caso de uma produção de gás com taxa elevada, o

valor da pressão tende a ultrapassar o valor limite estabelecido para a válvula chavear, pois o recipiente encherá mais rapidamente.

O modelo do ambiente físico feito em simulink contendo o controlador em StateFlow para a simulação e o cálculo para encontrar o volume por ciclo de medição pode ser verificado na Figura 3.4.

O sistema simulado é síncrono como uma taxa de amostragem da pressão no recipiente de 0.1 s.

Nesta figura, a função *rampa* representa a taxa volumétrica (*TV*) com que o gás está sendo produzido. A taxa de produção é incrementada de 0.1 ml/s.

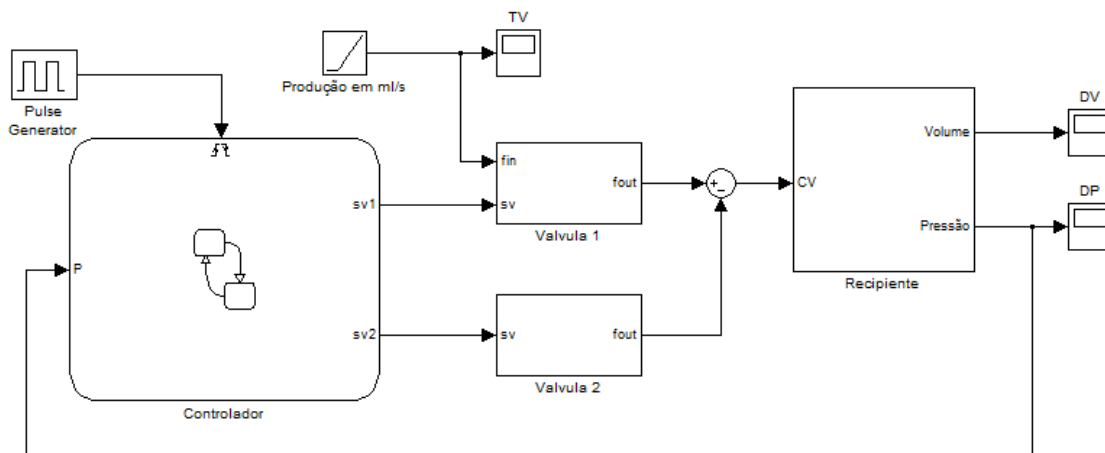


Figura 3.4. Simulação do ambiente físico

Essa figura pode ser dividida em quatro subsistemas da seguinte forma:

- *Controlador*: é o modelo em StateFlow do controlador de abertura e fechamento das válvulas, conforme mostrado na Figura 3.3.
- *Válvula 1*: esse subsistema representa o carregamento do sistema. Como entrada tem-se a produção do gás, simulada utilizando uma função *rampa*, e a informação *sv1* que indica se a válvula V1 está ligada ou desligada. Caso V1 ligado, o recipiente irá carregar e a saída *fout* representará o fluxo de carregamento. O tempo em que o sistema irá se carregar até atingir o limite de pressão é dependente da taxa em que está sendo produzido o gás (*TV*).

- *Válvula 2*: esse subsistema representa o descarregamento do sistema. A sua entrada é apenas a informação *sv2* que indica se a válvula V2 está ligada ou desligada. Caso V2 ligado, o recipiente irá se descarregar. Neste caso, a saída *fout* foi ajustada para o sistema descarregar em 0.4 s. Esse tempo é fixo e independente do fluxo.
- *Recipiente*: nesse subsistema, a entrada *CV* representa a capacidade de volume do recipiente utilizado. Ele é responsável pelos cálculos para obtenção do diferencial de pressão (*DP*) em cada ciclo, assim como o volume de gás correspondente (*DV*)

O resultado da variação da pressão com a variação na produção de gás é mostrado na Figura 3.5. Os resultados, para efeito de simulação, são os valores esperados das grandezas desconsiderando qualquer fonte de incerteza.

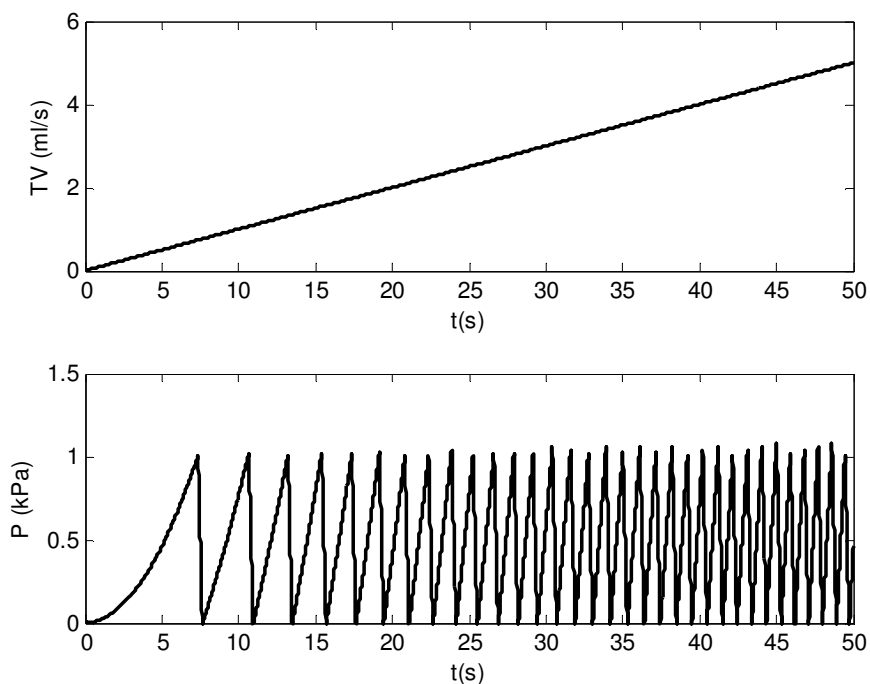


Figura 3.5. Simulação da pressão no recipiente.

Nesta figura mostra-se que quanto maior da taxa de produção de gás maior a frequência de chaveamento das válvulas e conseqüentemente menor o ciclo de medição mantendo o tempo de descarga do sistema fixo em 0.4 s.

Na simulação da pressão no sistema de medição, o tempo em que a pressão no recipiente atinge o limite de 1.0 kPa, ou seja, o sistema é carregado, varia de é de 0.1 a 3 s. O tempo de descarregamento, ou seja, quando a pressão do sistema se iguala a pressão do ambiente, é em torno de 0.4 s. Então, neste caso, o intervalo do ciclo de medição compreende de 0.5 a 3.4 s.

A partir do valor da simulação de pressão da Figura 3.5 e de acordo com a equação (3.3) chega-se ao volume correspondente, conforme mostrado na Figura 3.6.

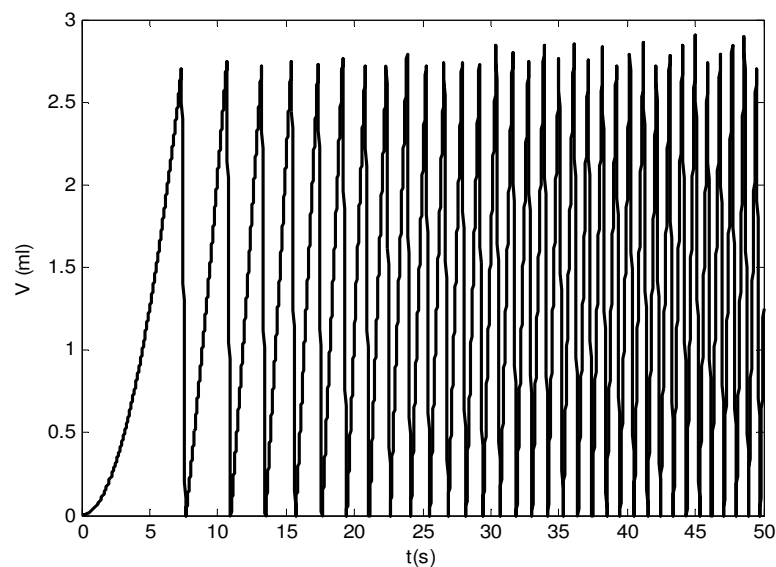


Figura 3.6. Simulação do volume por ciclo.

CAPÍTULO 4. ANÁLISE DE PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS

Em qualquer medição de uma grandeza física o resultado é uma estimativa do valor verdadeiro desta grandeza. Uma indicação quantitativa desta estimativa é necessária para avaliar a qualidade do resultado de medição. Desse modo, no presente capítulo apresenta-se uma análise de propagação de incerteza do sistema de medição, importante em qualquer instrumento de medição.

4.1 INTRODUÇÃO

A incerteza de medição pode ser dita como sendo um parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas [15].

No projeto de um instrumento de medição, com característica de alta exatidão, componentes de erros devem ser identificados, quantificados e, se possível, minimizados. Assim, a análise da propagação de incertezas relacionadas ao processo de medição permite determinar as especificações de operação do instrumento de medição, tais como incerteza da medição e faixa de medição.

A incerteza de medição reflete a falta de conhecimento completo do valor de um mensurando que é sempre afetado por fatores externos, como por exemplo, temperatura. Variabilidades que contribuem para a incerteza e o fato de que o resultado de uma medição não pode ser caracterizado por um único valor, são denominados de fontes de variações ou de incerteza, dentre as quais podem-se incluir as seguintes [16]:

- definição incompleta do mensurando;
- amostragem não representativa do mensurando;
- não conhecimento do processo para definição completa do mensurando;
- conhecimento inadequado das condições ambientais nos procedimentos de medição ou medidas

- imperfeições das condições ambientais;
- método inadequado;
- valores inexatos dos padrões de medição e dos materiais de referência (não-calibrado);
- princípio de medição impróprio.

4.2 ESTUDO DA PROPAGAÇÃO DE INCERTEZA

Para expressar e avaliar o resultado em qualquer medição de uma grandeza física, o principal método para avaliação da incerteza de medição é definido no Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (Guia) [17].

O Guia contém diretrizes para avaliação da incerteza de medição, com base em métodos estatísticos usados para expressar a incerteza. Antes de sua publicação eram usados os conceitos da análise de erros para quantificar a incerteza de medição. Entretanto, a teoria de análise de erros possuíam limitações, nas quais estas eram responsáveis por conflitos de comunicação gerados entre as áreas científicas e técnicas de medição. Para superar estas limitações, o Guia foi desenvolvido no intuito de criar uma diretriz definitiva para a avaliação da incerteza de medição baseada nos próprios princípios clássicos da análise de erros [15].

Além disso, o Guia fornece a base para expressar o resultado e a respectiva incerteza de medição que podem ser expressas como incertezas padrão (em termos de desvio-padrão) ou incertezas expandidas. Para avaliar a incerteza padrão pelo Guia é necessário obter uma função de medição, que representa o modelo matemático do processo de medição.

Seguindo o método, cada termo da função de medição é uma variável aleatória que pode ser representada por uma PDF. Assim, na avaliação do resultado do mensurando e de sua incerteza de medição os parâmetros estatísticos mais importantes de uma grandeza x são a média $E[x]$ (esperança ou valor esperado da variável aleatória) e a variância $\text{Var}[x]$.

O primeiro momento estatístico ($E[x]$) é a melhor estimativa de uma medição e o segundo momento estatístico ($\text{Var}[x]$) é a melhor estimativa da incerteza padrão de medição

(u_x). As expressões para a obtenção dos dois momentos estatísticos de uma variável aleatória (x) contínua são

$$E[x] = \int_{-\infty}^{+\infty} w g_x(w) dw \quad (4.1)$$

$$u_x = \text{Var}[x] = \int_{-\infty}^{+\infty} (w - E[x])^2 g_x(w) dw \quad (4.2)$$

Em que w representa os possíveis valores de uma grandeza x na qual possui uma PDF $g_x(w)$.

Portanto, conforme mostrado nas equações (4.1) e (4.2), é necessário o conhecimento da PDF das grandezas de entrada que, pelo Guia, pode ser obtida de duas maneiras, incertezas do tipo A e incertezas do tipo B.

1) Incerteza do Tipo A

Essa técnica consiste em obter uma PDF a partir de uma série de k observações de uma grandeza x_i . Então, as equações (4.1) e (4.2) precisam ser tornadas discretas por um conjunto de valores $x_{i,k}$ amostrados que irão formar uma PDF amostral (uma distribuição de frequência).

A melhor estimativa desses parâmetros de uma grandeza x_i são dados por

$$\bar{x}_i = \sum_{k=1}^n \frac{x_{i,k}}{n}, \quad (4.3)$$

e

$$\sigma^2(x_i) = \sum_{k=1}^n \frac{(x_{i,k} - \bar{x}_i)^2}{n-1}. \quad (4.4)$$

Em que \bar{x}_i é a média aritmética ou média de n independentes observações ($x_{i,k}$) da grandeza x_i e a raiz quadrada positiva de $\sigma^2(x_i)$ resulta no desvio padrão experimental.

Para determinar a incerteza padrão da estimativa x_i , o Guia recomenda utilizar o desvio padrão experimental da média, dada por

$$\sigma(x_i) = \sqrt{\frac{\sigma^2(x_i)}{n}}. \quad (4.5)$$

A equação (4.5) é válida série de observações $x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n}$ independentes e o número de observações $n \geq 23$. Então, para incerteza padrão tipo A, $u_A(x_i) = \sigma(x_i)$, sendo $\sigma(x_i)$ estimado pela equação (4.4) [15].

Entretanto, quando o número de observações pertence ao intervalo $4 \leq n \leq 22$, é recomendado utilizar a incerteza padrão bayesiana, dada por [15].

$$u_A(x_i) = u_{Bayes}(x_i) = \sqrt{\frac{n-1}{n-3}} \sqrt{\frac{\sigma^2(x_i)}{n}} \quad (4.6)$$

Porém, existem casos em que temos menos que quatro observações devido a alguns fatores tais como: restrições operacionais e custo para realização do experimento. Logo, o desvio padrão experimental da média não pode ser obtido pelas equações (4.5) e (4.6).

Quando o valor atribuído ao mensurando for experimental, e não sua média, a incerteza padrão do tipo A deve ser estimada pelo desvio padrão experimental da amostra utilizando a equação (4.4).

2) Incerteza do Tipo B

Essa outra técnica consiste na determinação de uma PDF *a priori* proveniente da apuração das informações da grandeza de entrada (x). Assim, a incerteza padrão do tipo B ($u_B(x_i)$) é a estimativa de uma grandeza de entrada x_i avaliada a partir de um julgamento científico baseado em toda informação disponível a respeito da variabilidade da grandeza de entrada x_i .

Segundo o Guia, as informações para compor a incerteza do tipo B podem incluir:

- dados históricos de medições;
- experiência ou conhecimento geral a respeito do procedimento de medição;
- propriedades relevantes a respeito dos materiais ou dos instrumentos de medição;

- especificações do fabricante;
- relatório de calibração e dados de outros certificados e
- incertezas de outros dados de referência presentes em manuais.

É importante destacar dois aspectos: o primeiro é que, segundo o Guia, a estimativa da incerteza do tipo B pode ser tão confiável quanto à incerteza do tipo A, principalmente quando se possui poucas medições, e o segundo aspecto refere-se ao fato da incerteza padrão do tipo B ser baseada em conceitos da estatística bayesiana, já que sua avaliação utiliza fontes de informações disponíveis a respeito do processo e medição.

A PDF *a priori* pode ter várias formas tais como: uniforme, triangular, trapezoidal entre outras. Essas PDF's são descritas a seguir [15, 18]:

a) PDF uniforme

Quando é conhecido apenas o menor valor (a_-) e o maior valor (a_+) da grandeza de entrada X_i , então sua PDF pode ser representada por:

$$g(x_i) = \begin{cases} \frac{1}{a_+ - a_-}, & a_- < x_i < a_+ \\ 0, & \text{para outros valores de } x_i \end{cases} \quad (4.7)$$

Neste caso, a esperança de x_i ($E[x_i]$) é calculada como o ponto médio do intervalo $x_i = (a_- + a_+)/2$ e se a diferença entre os extremos do intervalo for denotada por $2a$, o desvio padrão associado ou incerteza padrão do tipo B da estimativa de x_i é dada por

$$u_B(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (4.8)$$

b) PDF triangular

Quando, além dos limites inferiores e superiores, é conhecida também a média aritmética dos valores de x_i que pertencem ao intervalo. Neste tipo de distribuição é esperado que os valores próximo aos extremos sejam menos frequentes do que os valores próximos a média.

Se a diferença entre os limites do intervalo a e a_+ for denotada por $2a$, então sua PDF pode ser representada por

$$g(x_i) = \begin{cases} (x_i - a_-)/a, & a_- < x_i < a \\ (a_+ - x_i)/a, & a < x_i < a_+ \\ 0, & \text{para outros valores de } x_i \end{cases} \quad (4.9)$$

Neste caso, a média de uma distribuição triangular simétrica é $x_i = (a_- + a_+)/2$ e o desvio padrão ou incerteza padrão tipo B é dada por

$$u_B(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (4.10)$$

c) PDF trapezoidal

Essa é uma PDF em se conhece os limites superior e inferior, além de dois pontos pertencentes a esse intervalo. A PDF é mostrada na Figura 4.1 abaixo.

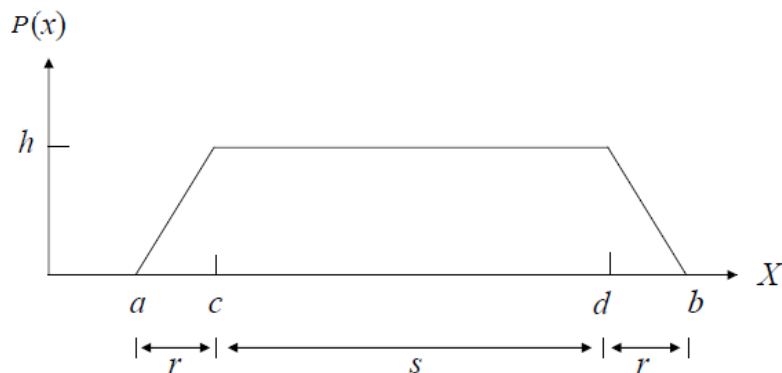


Figura 4.1. PDF trapezoidal genérica.

De acordo com a Figura 4.1, a representação, a média e a variância da PDF trapezoidal são dadas, respectivamente, por

$$p(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a \\ \frac{(x-a)}{(c-a)} h, & \text{se } a \leq x \leq c \\ h, & \text{se } c \leq x \leq d \\ \frac{(b-x)}{(b-d)} h, & \text{se } d \leq x \leq b \\ 0, & \text{se } b \leq x \end{cases} \quad (4.11)$$

$$E[x] = \frac{a+b}{2} \quad (4.12)$$

$$V[x] = \frac{2r^2 + 2rs + s^2}{12} \quad (4.13)$$

4.2.1 A INCERTEZA PADRÃO COMBINADA

O principal objetivo do Guia ISO-GUM é quantificar o resultado de uma medição e sua incerteza padrão combinada originária das várias grandezas de entrada a partir de um modelo de medição.

A incerteza padrão combinada, representada neste trabalho por u_c , é utilizada para representar a estimativa do desvio padrão do resultado, sendo obtida combinando a incerteza padrão individual (e covariâncias conforme o caso), seja resultante de uma incerteza Tipo A ou do Tipo B, utilizando o método usual para combinar os desvios-padrão. Esse método é chamado de *lei da propagação de incerteza* [17, 19].

Essa lei é usada quando, por exemplo, um mensurando Y não é determinado diretamente e sim dependente de n outras grandezas de entrada X_1, X_2, \dots, X_n através de uma função de medição conforme

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n). \quad (4.14)$$

A função da equação (4.14) deve expressar não apenas uma lei física, mas um processo de medição e, em particular, deve conter todas as grandezas que podem contribuir com uma incerteza significativa para a medição dos resultados [16].

Uma estimativa de Y , denotado por y , é obtida de (4.14) a partir das grandezas de entrada estimadas, denotadas por x_1, x_2, \dots, x_n . Então a saída estimada, resultado da medição, é representada por

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (4.15)$$

Portanto, a incerteza padrão combinada do resultado de medição y , denotada por $u_c(y)$ e que representa o desvio padrão estimado do resultado, é baseada na aproximação da série de Taylor de primeira ordem da equação (4.15) e convenientemente referida à *lei da propagação de incerteza*, e definida por:

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} \right) u(x_i, x_j)}. \quad (4.16)$$

Em que as derivadas parciais são chamadas de coeficientes de sensibilidades, $u(x_i)$ é a incerteza padrão associada a estimativa de grandeza de entrada x_i e $u(x_i, x_j)$ é a covariância estimada associadas as grandezas de entrada que pode ser obtida por

$$u(x_i, x_j) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_{i,k} - x_i)(x_{j,k} - x_j). \quad (4.17)$$

Na prática, é muito comum expressar a covariância $u(x_i, x_j)$ em termos de coeficientes de correlação $r(x_i, x_j)$ na qual sua relação é dada por

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)}. \quad (4.18)$$

Quando as grandezas de entrada que compõe a função de medição são consideradas independentes, ou seja, não correlacionadas a covariância torna-se zero ($u(x_i, x_j) = 0$) reduzindo a equação (4.16) a

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)}. \quad (4.19)$$

Em situações prática, como, por exemplo, em projetos de instrumentos de medição, em que há a necessidade de identificar qual grandeza de entrada que mais contribui para a

incerteza padrão combinada, usamos a análise de contribuição para a incerteza usando o coeficiente de contribuição $h(y, x_i)$ de cada grandeza de entrada.

As equações (4.20) e (4.21) representam os coeficientes de contribuição para as grandezas de entradas não correlacionadas e correlacionadas, respectivamente.

$$h(y, x_i) = \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{u(x_i)}{u_c(y)} \right]^2, \quad (4.20)$$

$$h(y, x_i) = \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{u(x_i)}{u_c(y)} \right] r(x_i, x_j). \quad (4.21)$$

4.2.2 A INCERTEZA EXPANDIDA

A incerteza de um resultado de medição pode ser expressa quantitativamente pela incerteza padrão combinada, u_c , contudo em algumas aplicações, comerciais e industriais, é preciso definir um intervalo com maior abrangência em torno do resultado de medição que podem razoavelmente ser atribuído ao mensurando.

Essa abrangência conferida ao resultado de medição é chamada de incerteza expandida, denotada por $U(y)$, e é obtida pela multiplicação da incerteza padrão combinada por um fator de abrangência (k),

$$U(y) = k u_c(y). \quad (4.22)$$

Na equação (4.22), o fator de abrangência k confere ao resultado da medição um maior nível de confiança e para calcular o valor de k deve-se [19]:

- levar em conta o “Teorema do Limite Central”;
- usar a expressão de Welch-Satterthwaite para cálculo dos graus de liberdade efetivos V_{eff} e
- usar a tabela para distribuição t de Student e achar o valor de k .

Um exemplo de incerteza expandida, após realizar os três itens acima, é mostrada na Tabela 4.1 e na Figura 4.2 abaixo.

Tabela 4.1. Incerteza expandida

Níveis de confiança aproximado	Fator de abrangência encontrado
68%	$k = 1$
95%	$k = 2$
99%	$k = 3$

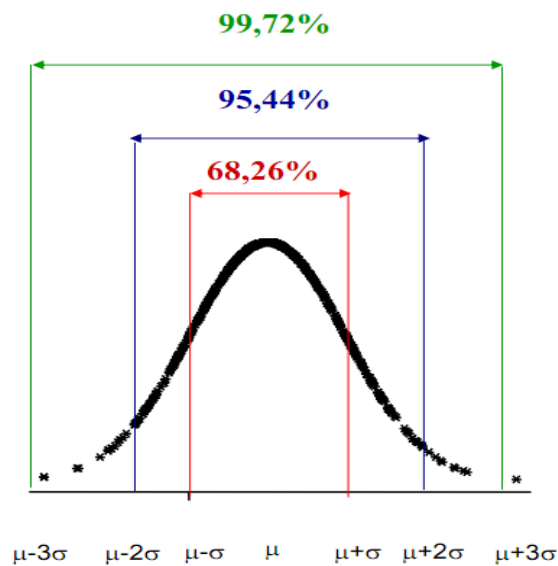


Figure 4.2. Níveis de confiança de uma variável.

Se, por exemplo, em um resultado de medição é desejado um nível de confiança de 95%, então faremos o procedimento descrito para encontrar o fator de abrangência k , que neste exemplo é 2. Os limites em azul na Figura 4.2 representa esse nível de confiança.

4.2.3 ANÁLISE DE MONTE-CARLO

Uma abordagem bem estabelecida para a análise de propagação de incerteza de medição é definida pelo Guia. Porém, essa abordagem possui algumas limitações importantes que devem ser consideradas, tal como [21]: a lei de propagação de incerteza, equação (4.16), na qual é aplicada para obter a incerteza padrão combinada, é o resultado do truncamento da expansão de Taylor, por conseguinte é uma aproximação linear podendo apresentar erros em uma abordagem não-linear.

Portanto, para superar essa limitação o uso da simulação de Monte-Carlo pode ser considerado para a avaliação da incerteza de medição.

O método de Monte-Carlo é um procedimento numérico utilizado na resolução de problemas matemáticos por meio da simulação de variáveis aleatórias [21]. Deste modo deve-se conhecer a função de distribuição de probabilidade da grandeza de entrada x_i da função de medição y .

A ideia básica do método de Monte-Carlo é obter M amostras da PDF conjunta das grandezas de entrada e propagar esses valores através da equação de medição de modo a produzir M amostras da grandeza de saída. Assim, é construída uma PDF empírica ou amostral da grandeza de saída na qual representa uma estimativa da sua PDF. Na simulação de Monte-Carlo, quanto maior o número de amostra M melhor serão os resultados obtidos [19]. Portanto, o resultado de medição é obtido pela média da PDF amostral e a incerteza padrão é associada ao desvio padrão dessa PDF.

A análise de Monte Carlo pode ser entendida como sendo uma ferramenta que fornece uma PDF de saída a partir das PDF's de entrada. Números aleatórios são gerados e usados para simular os valores das variáveis aleatórias, em vez de cálculos analíticos. Dessa maneira, melhores resultados são obtidos em relação à incerteza clássica baseada na expansão de Taylor.

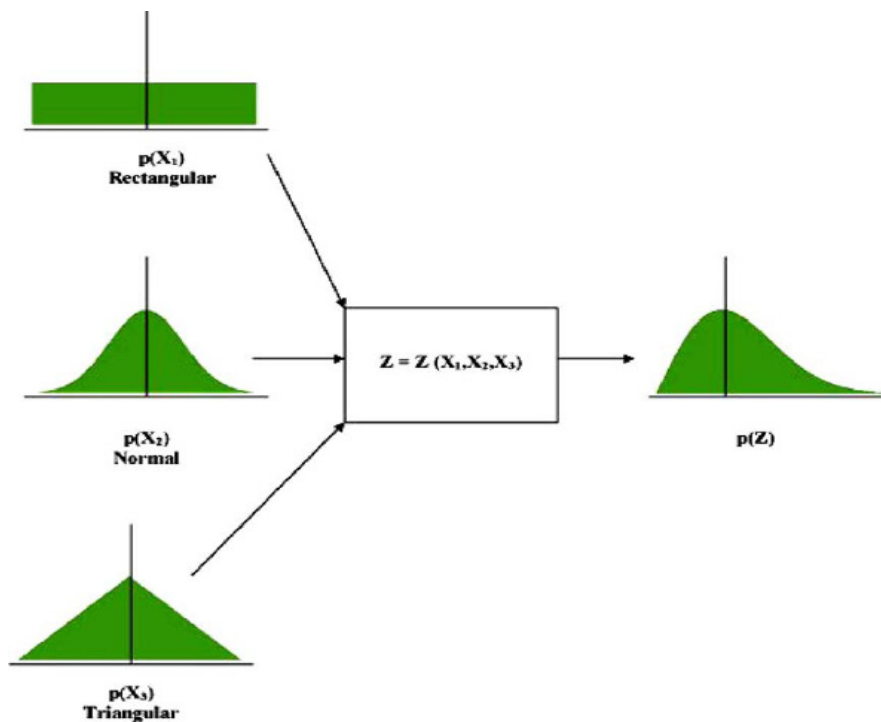


Figure 4.3. Propagação de distribuição.

Na Figura 4.3, é mostrado um exemplo de um sistema de medição cuja função é formada por $Z = f(X_1, X_2, X_3)$, em que as grandezas de entrada X_1 , X_2 , X_3 , tem função de distribuição retangular, normal e triangular, respectivamente. A propagação de distribuição apresenta como resultado uma PDF não-simétrica.

A incerteza padrão do exemplo da Figura 4.3 tomando M amostras pode ser calculada como um desvio padrão da PDF resultante de acordo com [21], como:

$$u(Z) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M Z_i^2 - \left(\sum_{i=1}^M Z_i\right)^2 / M}{M-1}}. \quad (4.23)$$

4.3 MÉTRICAS DE INCERTEZA DO SISTEMA PROPOSTO

A fim de verificar a contribuição das fontes de incerteza para o sistema final de medição, uma análise da propagação de incerteza é realizada considerando, primeiramente, todas as fontes de incerteza possuindo uma função de distribuição de probabilidade normal.

Esta análise leva em consideração apenas a combinação de incertezas inerentes aos sensores e configurações, sem considerar os erros introduzidos pelo sistema de medição [19, 20].

Os erros introduzidos pelo sistema de medição estão relacionados à conversão analógico-digital realizada pelo kit de desenvolvimento e também a possíveis incertezas introduzidas por circuitos analógicos. Por esse motivo, não foi utilizado um circuito de condicionamento entre o sensor e o ADC.

A partir do modelo de medição em (3.3) e utilizando a expressão de propagação de incerteza clássica, baseada na expansão de Taylor, equação (4.19), pode-se determinar a incerteza do volume em cada ciclo por:

$$\left(\frac{u_{\Delta V_c}}{\Delta V_c}\right)^2 = \left(\frac{u_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{u_{\Delta P}}{\Delta P}\right)^2 + \left(\frac{u_{P_a}}{P_a}\right)^2, \quad (4.24)$$

em que:

$u_{\Delta V_c}/\Delta V_c$ é a incerteza combinada relativa do volume de gás que deixa o sistema em cada ciclo.

u_V/V é o componente de incerteza relativa do volume do recipiente e do volume morto (somatório dos volumes da tubulação e das conexões).

$u_{\Delta P}/\Delta P$ é a incerteza relativa fornecida pela folha de dados do sensor de pressão diferencial.

u_P/P é o componente de incerteza relativa da pressão atmosférica. Ela pode ser obtida com base na folha de dados do sensor ou se for constatado pequena variação da pressão atmosférica, podemos admitir o valor de P como sendo a média dos dados históricos.

A partir da equação (3.4) e considerando que o intervalo de tempo não seja uma fonte de incerteza, encontramos a incerteza da taxa instantânea de fluxo volumétrico por

$$\left(\frac{u_{\Delta F_i}}{\Delta F_i}\right) = \left(\frac{u_{\Delta V_{c_i}}}{\Delta V_{c_i}}\right). \quad (4.25)$$

Da mesma maneira que em (4.25), a incerteza do volume acumulado (ΔV_{acum}) é definida por

$$\left(\frac{u_{\Delta V_{acum}}}{\Delta V_{acum}} \right) = \left(\frac{u_{\Delta V_{C_i}}}{\Delta V_{C_i}} \right). \quad (4.26)$$

4.3.1 INCERTEZA DO VOLUME

O volume V é inicialmente desconhecido, e é formado pelo volume do recipiente (V_S) e pelo volume morto (V_D), portanto para utilização do volume V deverá ser levado em consideração uma incerteza associada.

O volume e a incerteza de V_D são formados pelas medições das dimensões da tubulação e das conexões. Foi considerada a incerteza de 0.125 mm, um pouco acima da incerteza padrão de 0.1 mm [22], dos diâmetros interno e externo dos tubos de poliuretano que compõe a tubulação do sistema de medição. A expressão (4.27) foi utilizada para calcular o volume morto.

$$V_D = \frac{\pi d^2}{4} L \quad (4.27)$$

Logo, $V_D = 3.48 \pm 0.1$ ml.

Para conhecer o volume do recipiente (V_S) e sua incerteza foi utilizada uma balança calibrada fabricada pela Marte Balanças e Aparelhos de Precisão LTDA, modelo AL 500. O recipiente foi preenchido com água destilada até a borda e, depois de repetidas medições verificou-se uma massa de 268.3 gramas de água, e considerando que a densidade do líquido utilizado seja de 1 quilograma por litro então o volume do recipiente foi de 268.3 ± 0.1 ml.

Portanto, o volume do recipiente e tubulação do sistema de medição (V) foi obtido como:

$$V = V_S + V_D = 271.78 \pm 0.14 \text{ ml} \quad (4.28)$$

4.3.2 INCERTEZA DOS SENSORES DE PRESSÃO

De acordo com a folha de dados do sensor de pressão diferencial, em anexo, a tolerância na medição é definida como sendo 2.5% de fundo de escala para toda a faixa de medição de pressão e 1.5% se utilizarmos 25% da faixa, ou seja, usando de 0 a 100 mm H₂O.

Portanto, o sistema proposto irá trabalhar com uma faixa de medição limitada de maneira a reduzir a incerteza de medição.

O sinal de saída do sensor é conectado diretamente ao conversor analógico-digital que está integrado ao microcontrolador utilizado, logo não é introduzido componentes analógicos que contribuem para o aumento da incerteza de medição.

Além disso, nesse caso, o uso de circuitos de condicionamento de sinal não é estritamente necessário, já que a introdução de componentes analógicos aumenta a incerteza do sistema de medição. Assim, o sinal de saída do sensor é conectado diretamente ao conversor analógico-digital que está integrado ao microcontrolador utilizado.

Outra fonte de incerteza é a variabilidade da fonte de alimentação, pois interfere na incerteza de medição dos sensores de pressão, já que as equações para a obtenção da pressão estão em função da tensão de entrada e da tensão de saída. Porém, neste trabalho essa variabilidade é desconsiderada, ou seja, consideraremos que a fonte não sofra variação permanecendo em 5 volts.

Uma proposta de continuidade deste trabalho poderá contemplar a variabilidade das fontes de alimentação dos sensores utilizando a incerteza padrão do tipo A [23], conforme mostrado anteriormente.

A incerteza das grandezas de entrada do sistema de medição proposto é mostrada na Tabela 4.1 abaixo.

Tabela 4.2. Incerteza das grandezas de entrada

Grandezas	Incerteza relativa (%)
V	0.05
ΔP	1.5
P_{atm}	1.5

4.3.3 INCERTEZA DO SISTEMA

Após o cálculo da incerteza do volume e os valores de incerteza obtidos das folhas de dados dos sensores de pressão diferencial e atmosférica, mostrados na Tabela 4.2, podemos

calcular a incerteza do sistema de medição a partir da expressão (4.24). A incerteza relativa ($u_{\Delta V_c}/\Delta V_c$) do sistema de medição em um ciclo é dada por

$$\left(\frac{u_{\Delta V_c}}{\Delta V_c}\right) = \sqrt{(0.05)^2 + (1.5)^2 + (1.5)^2} = 2.12 \% \quad (4.29)$$

4.3.4 SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

A utilização da equação de propagação de incerteza, baseada na expansão de Taylor em modelos não lineares, como as equações (3.3) e (3.4), produz uma probabilidade de abrangência (coverage probability) com um valor mais elevado do que seria razoável. Nesses casos tem sido indicado usar o método de Monte Carlo para calcular o valor da incerteza combinada.

Outro aspecto que deve ser levado em consideração é que a contribuição de fatores obtidos de folha de dados dos sensores, tais como: exatidão (*accuracy*), resolução (*resolution*) da escala do instrumento, sensibilidade (*sensitivity*) ou qualquer outra característica para a qual se tenha informações limitadas são, geralmente, descritas por funções de distribuição de probabilidade (PDF's) uniformes (retangulares) e, também, porém menos comum de acontecer, funções triangulares.

Assim, com exceção da incerteza do volume do recipiente que foi obtida a partir dos valores calculados utilizando o método de pesagem em uma balança calibrada (repetitividade) que, segue uma distribuição normal, os demais terão outros tipos de distribuição. Tomando como base o sistema de medição proposto, será considerada que os outros parâmetros do sistema terão função de distribuição uniforme.

Esse último aspecto, considerando que nem todas as variáveis do sistema de medição proposto tem função de distribuição normal, está, inclusive, de acordo com o fato de que a expressão para o cálculo da incerteza combinada baseado em Taylor não é adequada.

A simulação de Monte Carlo (SMC) foi realizada utilizando o software Matlab na qual se observou a incerteza do sistema de medição por ciclo e as taxas instantânea e média de fluxo volumétrico. Os valores utilizados estão de acordo com a Tabela 4.2 e esses valores das simulações das variáveis e do sistema são representados por um nível de confiança de,

aproximadamente, 68,27% [24], ou seja, esse nível representa a probabilidade de encontrar um valor esperado em determinado intervalo.

A. SMC para o volume por ciclo

A simulação de Monte-Carlo utilizada para o cálculo do volume em cada ciclo foi baseada na equação (3.3) do sistema de medição. Ela possui três grandezas de entrada, o volume do sistema (recipiente mais volume morto), a pressão atmosférica e pressão diferencial.

A PDF amostral que representa o volume do sistema (recipiente mais volume morto) foi tomada como sendo uma PDF normal com média e desvio padrão iguais a 271,78 e 0,14, respectivamente, de acordo com os cálculos realizados na seção 4.3.1.

A PDF amostral que representa a pressão atmosférica, obtida da folha de dados do sensor, tem média igual a 101,325 e desvio padrão igual a 0,88. E a PDF amostral da pressão diferencial tem média igual a 1 e desvio padrão igual a 0,0086.

A Figura 4.4, mostrada abaixo, é o resultado da variação de volume em apenas um ciclo causada por uma pressão diferencial de 1,0 kPa e considerando que o experimento seja realizado no nível do mar, ou seja, a pressão atmosférica é de 101,325 kPa. Nesta simulação a função de distribuição de probabilidade encontrada pela simulação de Monte-Carlo é triangular. Essa PDF resultante tem média igual a 2,68 ml e desvio padrão igual a 0,033. Sua incerteza calculada foi de 1,23%.

Portanto, conforme havia sido previsto e explicado, a incerteza padrão do volume em cada ciclo teve uma melhor estimativa utilizando a simulação de Monte-Carlo por meio das PDF's amostrais das grandezas de entrada. Antes, conforme (4.29), a incerteza calculada era de 2,12%, e com essa simulação reduziu para 1,23% que representa uma maior exatidão no resultado.

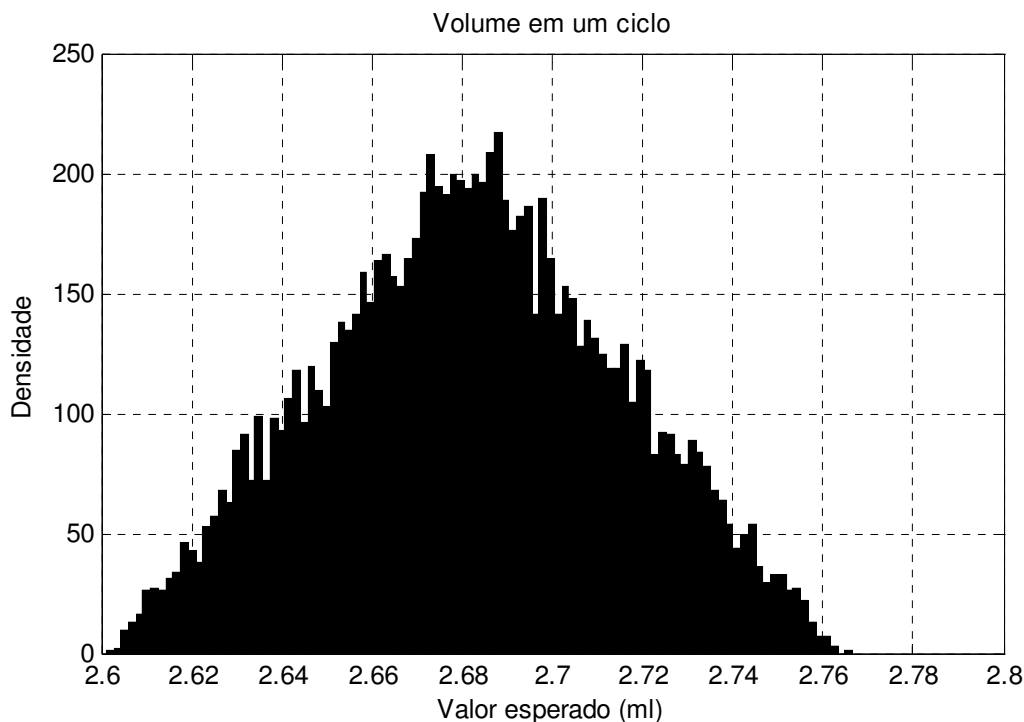


Figura 4.4. PDF triangular do volume em apenas um ciclo.

B. SMC para a taxa instantânea de fluxo volumétrico

Primeiramente, deve-se observar que a SMC para a taxa instantânea de fluxo volumétrico resulta em uma mesma incerteza anteriormente calculada para o volume em apenas um ciclo de medição, pois de acordo com (3.4) a taxa instantânea é o volume calculado em um determinado ciclo dividido pelo tempo de duração desse ciclo. O intervalo de tempo é considerado, neste trabalho, determinado livre de qualquer fonte de incerteza.

A simulação de Monte-Carlo para a taxa instantânea de fluxo volumétrico foi baseada na equação (3.4) do sistema de medição e os resultados são mostradas em forma de histograma na Figura 4.5. Foi considerado um ciclo de 0,7 s de duração com pressão de 1,1 kPa . O resultado foi uma PDF triangular com média igual a 4,21 ml/s e desvio padrão igual a 0,049. E sua incerteza calculada foi de 1,16%.

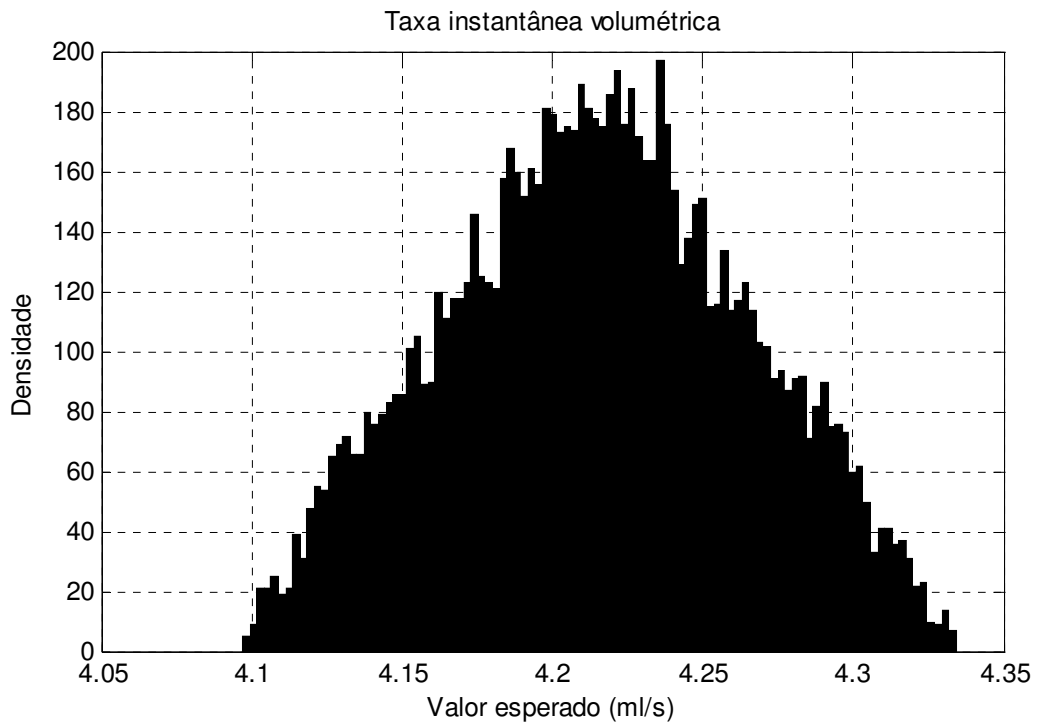


Figura 4.5. PDF da taxa instantânea em um ciclo.

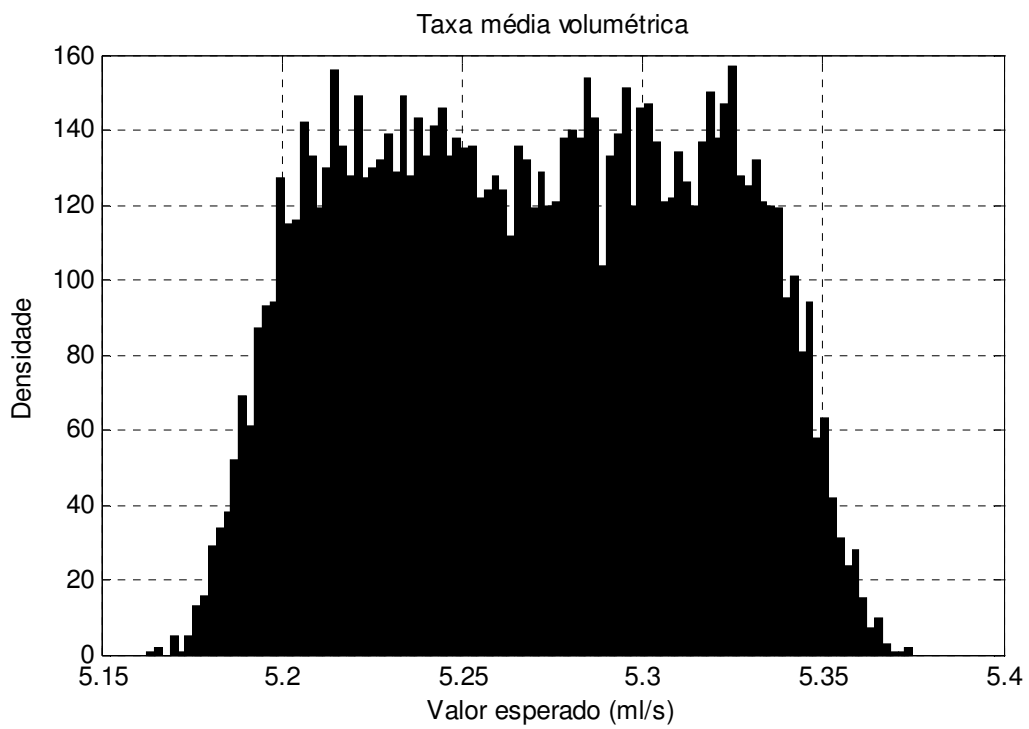


Figura 4.6. PDF da taxa média em 1 minuto.

De acordo com a equação (3.5), a taxa média volumétrica foi simulada utilizando 75 ciclos de medição com pressão variando de 1 a 1,2 kPa. O resultado, mostrado na Figura 4.6, foi uma PDF normal com média igual a 5,27 ml/s e desvio padrão igual a 0,047. Sua incerteza calculada foi de 0,89%.

4.3.5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NA ABORDAGEM GUM E NA SMC

Após a obtenção da incerteza de medição utilizando a abordagem ISO-GUM e realizando a simulação numérica de Monte Carlo podemos fazer uma comparação dos resultados obtidos por essas duas abordagens.

Conforme verificado anteriormente, o resultado comprova que a abordagem SMC obtém-se uma melhor avaliação da incerteza em relação à abordagem GUM, quando são consideradas distribuições de probabilidade das variáveis de entrada diferentes da distribuição normal. Enquanto que o método SMC a incerteza do volume foi de 1,23%, pelo método ISO-GUM foi de 2,12%.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O sistema de medição de pequenas taxas de fluxo de gás proposto neste trabalho é relativamente barato e de simples construção, além disso, os materiais que constitui esse protótipo são de simples manuseio e operação [11].

O desempenho do medidor de gás foi testado com um fluxo de ar em temperatura ambiente. O ar foi produzido por uma bomba semelhante à utilizada em aquários em que o fluxo sofre pouca variação. É importante destacar que os experimentos ocorreram com um fluxo de ar bem elevado em relação à taxa de produção de gás que é esperada ocorrer nos processos de biodegradação anaeróbio.

Portanto, esse protótipo, além de se adequar para tal aplicação, ele pode ser aplicado em outros tipos de medição de gases quem tenha taxas pouco mais elevadas. Porém, ele deve sofrer algumas modificações, tais como: a substituição do recipiente por outro de maior capacidade e utilização de um sensor com uma faixa maior do que a utilizada.

Os experimentos realizados, cujos resultados são mostrados a seguir, tiveram uma duração de 4 minutos e foi dividido em quatro etapas. No primeiro minuto, o regulador de fluxo foi ajustado para deixar escapar um fluxo pequeno de ar. No segundo e no terceiro minuto, o fluxo de ar foi aumentado gradativamente. No quarto e último minuto, deixou todo o ar passar para a medição da taxa volumétrica máxima.

No experimento do volume por ciclo de medição, conforme mostrado na Figura 5.1 abaixo, observou-se um volume variando de 2,68 a 2,8 por ciclo de medição e o ciclo variou de 1,7 a 0,6 s. Nesta figura e nas outras a seguir, cada ponto do gráfico representa o valor medido da grandeza em um ciclo. Desse modo, podemos dizer que apesar do fluxo contínuo de gás, esse sistema realiza uma medição de forma discreta.

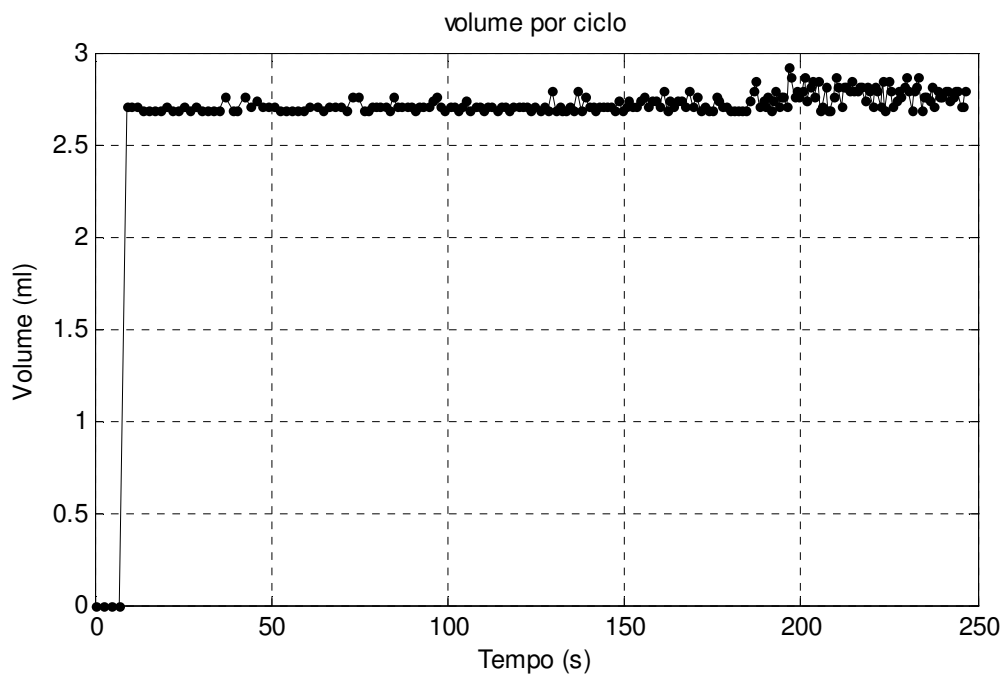


Figura 5.1. Resultado experimental do volume por ciclo.

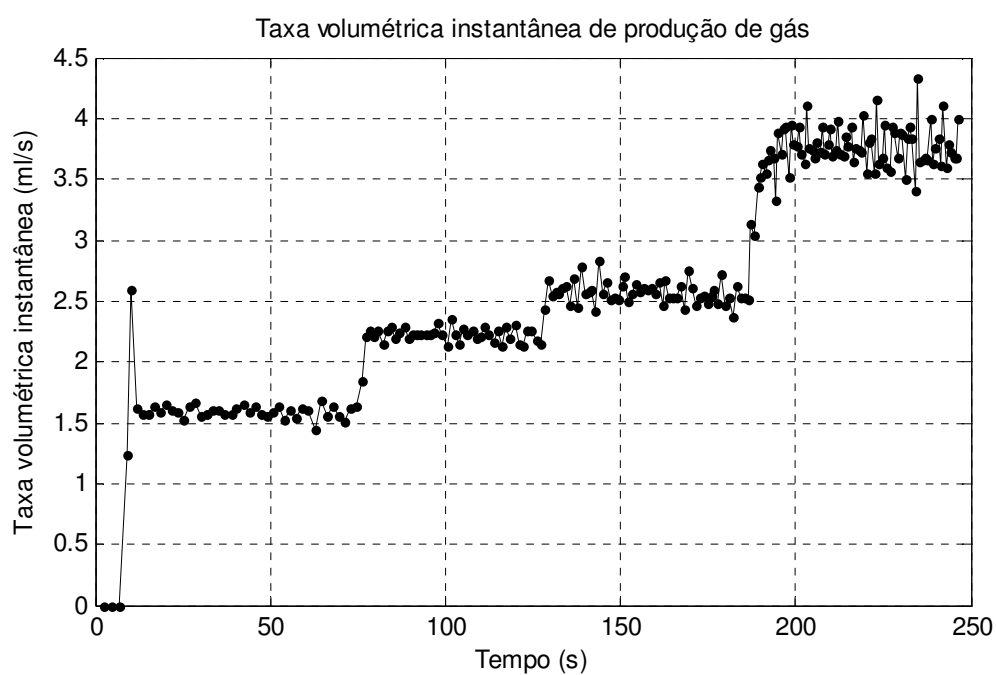


Figura 5.2. Taxa volumétrica instantânea.

Na Figura 5.2, apresentam-se os valores obtidos da taxa volumétrica instantânea, em que sua faixa de medição varia de 1,34 a 4,3 ml/s. Verificou-se também que algumas outras

medições apresentaram valores com picos alcançando 5,3 ml/s [11]. Isso ocorre porque a bomba de ar quando está sob qualquer tipo de perturbação mecânica externa faz com que seu fluxo varie tornando a duração do ciclo menor ou maior, conseqüentemente o valor da taxa instantânea irá variar.

Na Figura 5.3, apresenta-se o volume de gás acumulado durante o período de realização do experimento, quatro minutos. Como podemos observar, o volume de gás produzido foi de pouco mais de 620 ml.

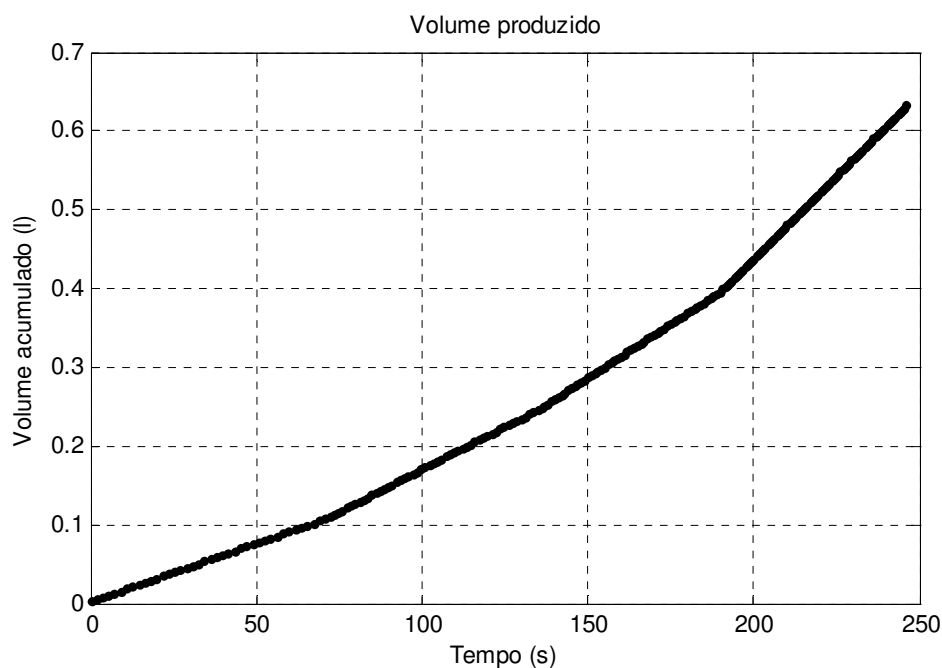


Figura 5.3. Volume acumulado.

Além da taxa instantânea, nesse trabalho foi considerada também a taxa volumétrica média apenas para o fluxo ser contabilizado de minuto em minuto. O seu resultado é mostrado na Figura 5.4 abaixo.

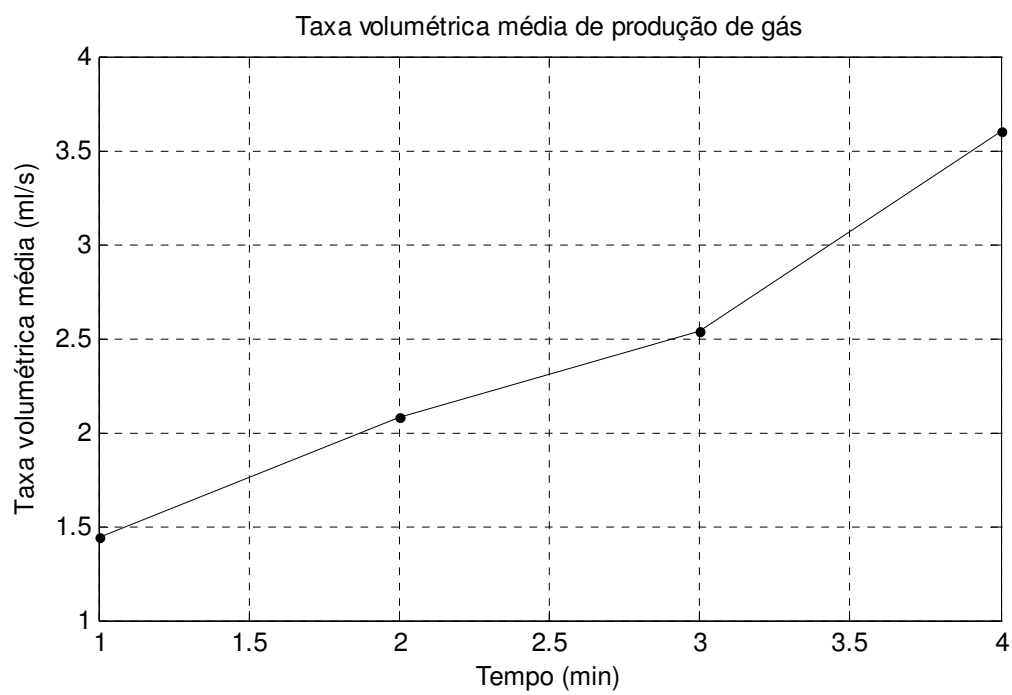


Figura 5.4. Taxa volumétrica média.

CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma análise metrológica para o desenvolvido de um instrumento para medição de pequenas taxas de fluxo de gás com característica de baixa incerteza. O método utilizado no sistema de medição proposto quando comparado com outros métodos descritos em [1] e [10] demonstra uma melhor desempenho com respeito ao processo de medição que não envolve líquido. Outra vantagem do medidor proposto refere-se à facilidade na obtenção dos materiais que compõe o sistema, além da montagem, ajuste e operação do sistema de medição.

O método de medição abordado neste trabalho atendeu as expectativas de obtenção da taxa de fluxo volumétrico a que foi proposto, além de possuir uma boa exatidão, ou seja, possui uma baixa incerteza de medição.

Observou-se também que a fonte que mais contribuiu com a incerteza de medição foi o volume do sistema de medição que é caracterizado pela quantidade de volume do recipiente, tubulação e conexões. Também, foi observado que o método de Monte-Carlo produziu uma melhor estimativa da incerteza comparada com o de Taylor, considerando diferentes PDF das variáveis de entrada.

6.1 PERSPECTIVAS FUTURAS

Com a realização deste trabalho, alguns pontos de discussão foram levantados e que constituem em propostas de continuidade e sugestões para trabalhos futuros. Uma sugestão é contemplar a variabilidade das fontes de alimentação dos sensores como fonte de incerteza utilizando, a incerteza padrão do tipo A, para determinar a curva de calibração dos sensores comparando com a folha de dados do fabricante.

Outra proposta é construir e utilizar um reator anaeróbio pra fazer medições reais do gás liberado, além de construir uma placa de circuito impresso contendo o sistema de aquisição de dados, o conversor A/D e o circuito para acionar a válvula, além de realizar uma

calibração no sistema de medição. Assim, desenvolver um sistema em que pode ter um monitoramento remoto.

Pode-se também, caso haja necessidade, substituir o recipiente por um de maior volume de modo a estender a utilização desse protótipo para outros tipos de medição em que a produção e liberação de gases sejam em taxas mais elevadas.

A variação de temperatura dentro do recipiente pode ser um item a ser estudado em situações práticas de aplicação desse método de medição para pequenas taxas de fluxo de gás, já que neste trabalho ela foi considerada desprezível, além de verificar se essa variação causará alteração na incerteza encontrada aqui.

A utilização de apenas uma válvula sendo esta de três vias da mesma forma que em [1] pode ser uma alternativa de construção de um protótipo e, conseqüentemente, um estudo de seus parâmetros e suas incertezas.

REFERÊNCIAS

- [1] LIU, Jing, OLSSON, Gustaf, MATTIASSON, Bo. **A volumetric meter for monitoring of low gas flow rate from laboratory-scale biogas reactors**. *Sensors and Actuators B* 97 (2004) 369–372.
- [2] GUWY, A. J., HAWKES, D. L., HAWKES, F. R. **On-line low flow high-precision gas metering systems**. *Wat. Res.* Vol. 29, No. 3, pp. 977-979, 1995.
- [3] SMITH, Simon A., STOCKLE, Claudio O. **A biogas meter with adjustable resolution and minimal back-pressure**. *Bioresource Technology* 99 (2008) 8537–8539.
- [4] NUSSENZVEIG, H. Moysés. **Curso de Física Básica 2**. 4ª edição. Editora Blucher. 2002.
- [5] INMETRO. **Sistema Internacional de Unidades - SI**. 8ª ed.(revisada), Rio de Janeiro, 2007.
- [6] RESNICK, Robert. HALLIDAY, David. KRANE, Kenneth S. **Física 2**. Quinta edição. Editora LTC. 2007.
- [7] ALESSI, Maria C. M. **Avaliação da hidrólise alcalinada gordura sobre a biodegradação anaeróbia de soro de queijo**. Dissertação de mestrado da Universidade Federal de Uberlândia. 2005.
- [8] JOHANSSON, Thomas B., AMULKA, Henry Kelly, REDDY, K. N., WILLIAMS, Robert H. **Renewable Energy: Sources for fuel and electricity**. Editora Island Press. Washington, 1993.
- [9] VAN HAANDEL, Adrianus, MARAIS, Gerrit. **O Comportamento do Sistema de Lodo Ativado. Teoria e Aplicações para Projetos e Operação**. Campina Grande-PB, egraf, 1999.
- [10] BEAUBIEN, A., JOLICOEUR, C., ALARY, J. F. **Automated High Sensitivity Gas Metering System for Biological Processes**. *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 32, pp. 105-109 (1988).
- [11] ABREU, Pedro A. L. CATUNDA, Sebastian Y. C. VASCONCELOS, Flávio H. FREIRE, Raimundo C. S. **Development of a Volumetric Meter for Low Gas Flow Rate**, IMTC, Instrumentation and Measurement, Technology Conference, China, 2011. In press
- [12] FREESCALE SEMICONDUCTOR, **Fabricante de sensor**, disponível em: < http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=MPXHZ6115A&fsrc=1&sr=1 >. [Acesso em: 27/05/2010]

- [13] FREESCALE SEMICONDUCTOR, **Fabricante de sensor**, disponível em: < http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=MPXx5004&fsrch=1&sr=1 >. [Acesso em: 27/05/2010]
- [14] INMETRO, **Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados (VIM 2008)**. 1ª Edição Brasileira. Rio de Janeiro, 2009.
- [15] MARTINS, Márcio A. F., KALID, Ricardo A., NERY, Gesner A., TEXEIRA, Lucas Aguiar, GONÇALVES, Guilherme A. A. **Comparação entre os Métodos Linear e Não Linear para Estimativa da Incerteza de Medição**. Revista Controle & Automação/Vol.21 no.6/Novembro e Dezembro 2010.
- [16] SILVA, Claudio B. C., **Uncertainty in the measurement of the flow rate: a simple technique, however powerful, to increase the productivity, minimize losses and reduce spills to the environment**. Bol. Téc. Petrobras, Rio de Janeiro, 47 (2/4): 202 - 232, abr./dez. 2004.
- [17] INMETRO. **Guia para a Expressão da Incerteza de Medição**. 3ª Edição Brasileira, Rio de Janeiro, 2003.
- [18] KACKER, R. N. e LAWRENCE, J. F. **Trapezoidal and triangular distributions for type B evaluation of standard uncertainty**, Metrologia 44(2): 117–127, 2007.
- [19] TAYLOR, B. N. and KUYATT, C. E., **Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results**, in NIST Technical Note 1297, 1994.
- [20] TAYLOR, J. R., **An introduction to error analysis: the study of uncertainties in physical measurement**, 2nd ed. Sausalito, Calif.: University Science Books, 1997.
- [21] HERRADOR, M. A. e GONZALEZ, A. **Evaluation of measurement uncertainty in analytical assays by means of Monte-Carlo simulation**, Talanta 64(2): 415 – 422, 2004.
- [22] AIRTEC Automação Industrial, **Fabricante da tubulação de poliuretano**, disponível em: < http://www.airtec.com.br/_uploads/produtos/produto_arquivo_64_0_nor.pdf >. [Acesso em: 16/06/2010].
- [23] FERREIRA, José L., PEREIRA, Nadja C., JÚNIOR, Marconi O., SILVA, João L., BRITTO, Raquel, PARREIRA, Verônica F., VASCONCELOS, Flávio H., CRIOLLO, Carlos J. T., **Maximum respiratory pressure measuring system: calibration and evaluation of uncertainty**. Revista Controle & Automação/Vol.21 no.6/Novembro e Dezembro 2010.
- [24] CATUNDA, S., PESSANHA, J., FONSECA, J., CAMELO, N., SILVA, P. **Uncertainty analysis for defining a wind power density measurement system structure**, IMTC, Instrumentation and Measurement, Technology Conference, Italy, 2004.

ANEXO A. SENSOR DE PRESSÃO ATMOSFÉRICA

A seguir, as principais partes, figuras e tabelas, da folha de dados do sensor de pressão atmosférica cujo fabricante é a Freescale Semiconductor.

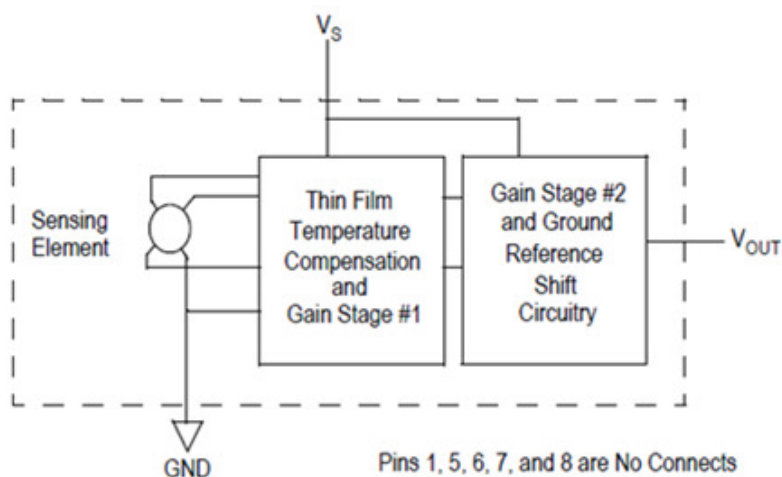


Figura A.1. Esquemático do sensor de pressão atmosférico

Tabela A.1. Máximas taxas⁽¹⁾

Rating	Symbol	Value	Units
Maximum Pressure ($P_1 > P_2$)	P_{max}	400	kPa
Storage Temperature	T_{stg}	-40° to +125°	°C
Operating Temperature	T_A	-40° to +125°	°C
Output Source Current @ Full Scale Output ⁽²⁾	I_{o+}	0.5	mAdc
Output Sink Current @ Minimum Pressure Offset ⁽²⁾	I_{o-}	-0.5	mAdc

1. Exposure beyond the specified limits may cause permanent damage or degradation to the device.

2. Maximum Output Current is controlled by effective impedance from V_{out} to Gnd or V_{out} to V_S in the application circuit.

Tabela A.2. Características de operação ($V_S = 5 V_{DC}$; $T = 25^\circ\text{C}$)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Pressure Range	P_{OP}	15	—	115	kPa
Supply Voltage ⁽¹⁾	V_S	4.75	5.0	5.25	Vdc
Supply Current	I_o	—	6.0	10	mAdc
Minimum Pressure Offset ⁽²⁾ @ $V_S = 5.0$ Volts	V_{off}	0.133	0.200	0.268	Vdc
Full Scale Output ⁽³⁾ @ $V_S = 5.0$ Volts	V_{FSO}	4.633	4.700	4.768	Vdc
Full Scale Span ⁽⁴⁾ @ $V_S = 5.0$ Volts	V_{FSS}	4.433	4.500	4.568	Vdc
Accuracy ⁽⁵⁾	—	—	—	± 1.5	% V_{FSS}
Sensitivity	V/P	—	45.9	—	mV/kPa
Response Time ⁽⁶⁾	t_R	—	1.0	—	ms
Warm-Up Time ⁽⁷⁾	—	—	20	—	ms
Offset Stability ⁽⁸⁾	—	—	± 0.25	—	% V_{FSS}

1. Device is ratiometric within this specified excitation range.
2. Offset (V_{off}) is defined as the output voltage at the minimum rated pressure.
3. Full Scale Output (V_{FSO}) is defined as the output voltage at the maximum or full rated pressure.
4. Full Scale Span (V_{FSS}) is defined as the algebraic difference between the output voltage at full rated pressure and the output voltage at the minimum rated pressure.
5. Accuracy is the deviation in actual output from nominal output over the entire pressure range and temperature range as a percent of span at 25°C due to all sources of error including the following:
 - Linearity: Output deviation from a straight line relationship with pressure over the specified pressure range.
 - Temperature Hysteresis: Output deviation at any temperature within the operating temperature range, after the temperature is cycled to and from the minimum or maximum operating temperature points, with zero differential pressure applied.
 - Pressure Hysteresis: Output deviation at any pressure within the specified range, when this pressure is cycled to and from minimum or maximum rated pressure at 25°C .
 - TcSpan: Output deviation over the temperature range of 0° to 85°C , relative to 25°C .
 - TcOffset: Output deviation with minimum pressure applied, over the temperature range of 0° to 85°C , relative to 25°C .
6. Response Time is defined as the time for the incremental change in the output to go from 10% to 90% of its final value when subjected to a specified step change in pressure.
7. Warm-up Time is defined as the time required for the product to meet the specified output voltage after the pressure has been stabilized.
8. Offset Stability is the product's output deviation when subjected to 1000 cycles of Pulsed Pressure, Temperature Cycling with Bias Test.

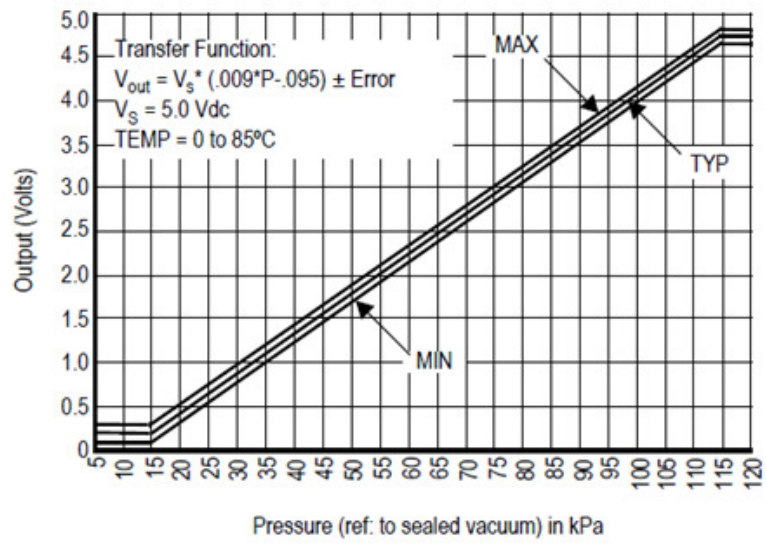


Figura A.2. Saída em relação a pressão absoluta

ANEXO B. SENSOR DE PRESSÃO DIFERENCIAL

A seguir, as principais partes, figuras e tabelas da folha de dados do sensor de pressão diferencial cujo fabricante é a Freescale Semiconductor.

Tabela B.1. Característica de Operação ($V_S = 5 V_{DC}$; $T = 25^\circ\text{C}$)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Units
Pressure Range	P_{OP}	0	—	3.92 400	kPa mm H ₂ O
Supply Voltage ⁽¹⁾	V_S	4.75	5.0	5.25	V_{DC}
Supply Current	I_S	—	—	10	mAdc
Span @ 306 mm H ₂ O (3 kPa) ⁽²⁾ Full Scale Span @ 400 mm H ₂ O (3.92 kPa) ⁽²⁾	V_{FSS}	—	3.0 4.0	—	V
Offset ⁽³⁾	V_{OFF}	0.75	1.0	1.25	V
Sensitivity	V/P	—	1.0	—	V/kPa
Accuracy ⁽⁴⁾ (5)					
0 to 100 mm H ₂ O (10 to 60°C)	—	—	—	±1.5	% V_{FSS} with auto zero
100 to 400 mm H ₂ O (10 to 60°C)	—	—	—	±2.5	% V_{FSS} with auto zero
0 to 400 mm H ₂ O (10 to 60°C)	—	—	—	±6.25	% V_{FSS} without auto zero

1. Device is ratiometric within this specified excitation range.
2. Span is defined as the algebraic difference between the output voltage at specified pressure and the output voltage at the minimum rated pressure.
3. Offset (V_{off}) is defined as the output voltage at the minimum rated pressure.
4. Accuracy (error budget) consists of the following:
 - Linearity: Output deviation from a straight line relationship with pressure over the specified pressure range.
 - Temperature Hysteresis: Output deviation at any temperature within the operating temperature range, after the temperature is cycled to and from the minimum or maximum operating temperature points, with zero differential pressure applied.
 - Pressure Hysteresis: Output deviation at any pressure within the specified range, when this pressure is cycled to and from the minimum or maximum rated pressure, at 25°C.
 - Offset Stability: Output deviation, after 1000 temperature cycles, -30 to 100°C, and 1.5 million pressure cycles, with minimum rated pressure applied.
 - TcSpan: Output deviation over the temperature range of 10 to 60°C, relative to 25°C.
 - TcOffset: Output deviation with minimum rated pressure applied, over the temperature range of 10 to 60°C, relative to 25°C.
 - Variation from Nominal: The variation from nominal values, for Offset or Full Scale Span, as a percent of V_{FSS} , at 25°C.
5. Auto Zero at Factory Installation: Due to the sensitivity of the MPVZ5004G, external mechanical stresses and mounting position can affect the zero pressure output reading. Autozeroing is defined as storing the zero pressure output reading and subtracting this from the device's output during normal operations. Reference AN1636 for specific information. The specified accuracy assumes a maximum temperature change of ±5°C between autozero and measurement.

Tabela B.2. Máximas taxas⁽¹⁾

Rating	Symbol	Value	Unit
Maximum Pressure ($P_1 > P_2$)	P_{MAX}	16	kPa
Storage Temperature	T_{STG}	-30 to +100	°C
Operating Temperature	T_A	0 to +85	°C

1. Exposure beyond the specified limits may cause permanent damage or degradation to the device.

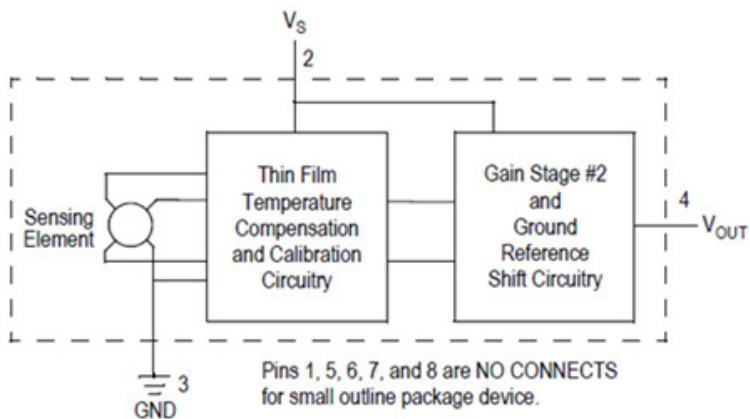


Figura B.1. Esquemático do sensor de pressão diferencial

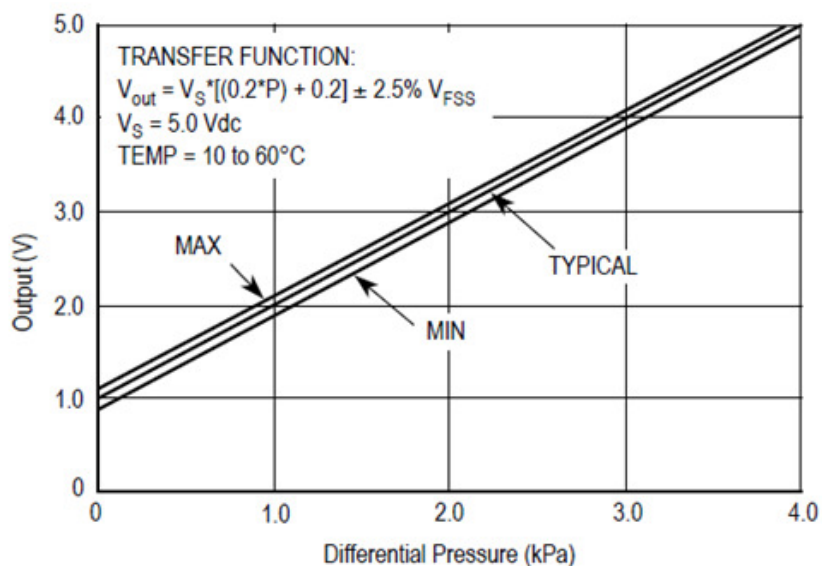


Figura B.2. Saída em relação a pressão diferencial