

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS – UNICAMP

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
SISTEMAS DE PROCESSOS QUÍMICOS E INFORMÁTICA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA OPTO-ELETRÔNICO PARA
A APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA *FIELD*BUS NA DETECÇÃO DE
BOLHAS EM TUBULAÇÕES**

Autor: Fabio Delatore

Orientadora: Ana Maria Frattini Fileti

Co-Orientador: João Alexandre F. R. Pereira

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Campinas – São Paulo
25 de Fevereiro de 2005

**UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SECÃO CIRCULANTE**

UNIDADE	BC
Nº CHAMADA	T/unicamp D375d
V	EX
TOMBO BC	64481
PROC.	16-1-00086-05
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	17,00
DATA	22/06/05
Nº CPD	

Bibid: 354213

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

D375d Delatore, Fabio
Desenvolvimento de um sistema opto-eletrônico para a aplicação da tecnologia *fieldbus* na detecção de bolhas em tubulações / Fabio Delatore.--Campinas, SP: [s.n.], 2005.

Orientadores: Ana Maria Frattini Fileti, João Alexandre Ferreira da Rocha Pereira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Detectores. 2. Bolhas (fisica). 3. Optoeletronica. 4. Laser. I. Fileti, Ana Maria Frattini. II. Pereira, João Alexandre Ferreira da Rocha. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Título em Inglês: Optical Bubble Detection System Using Fieldbus
Palavras-chave em Inglês: Detectors, Bubbles, Optoelectronics e Laseer
Área de concentração: Sistemas de Processos Químicos e Informática
Titulação: Mestre em Engenharia Química

Banca examinadora: Fabrizio Leonardi, Wagner dos Santos Oliveira

Data da defesa: 25/02/2005

Este exemplar corresponde à versão final da dissertação de Mestrado em
Engenharia Química.

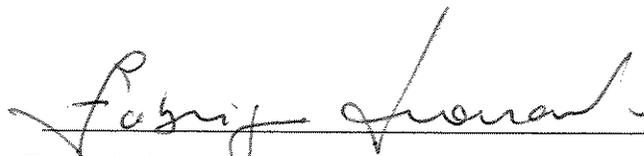
A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Ana Maria Frattini Fileti', is written over a horizontal line. The signature is stylized and includes a large, looping flourish that extends to the right.

Profa. Dra. Ana Maria Frattini Fileti - Orientadora

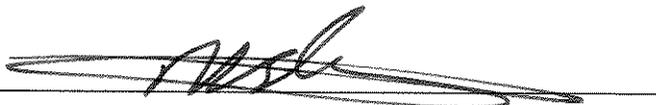
Dissertação de Mestrado defendida por Fabio Delatore e aprovada em 25 de fevereiro de 2005 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



Prof. Dra. – Ana Maria Frattini Fileti (Orientadora) – DESQ/FEQ/UNICAMP



Prof. Dr. Fabrizio Leonardi – Faculdade de Engenharia Industrial – UNIFEI



Prof. Dr. Wagner dos Santos Oliveira – DTP/FEQ/UNICAMP

A todas as pessoas que diretamente e indiretamente auxiliaram na elaboração dessa tese de mestrado, aos meus amigos e amigas, pelas pessoas que ficaram na torcida, aos professores e funcionários da FEI e da UNICAMP e principalmente aos meus pais pela ajuda e suporte nos momentos mais difíceis.

Resumo da Tese

O presente trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema óptico de detecção de bolhas em tubulações. Esta montagem foi realizada no Laboratório de Controle e Automação de Processos do DESQ/FEQ/UNICAMP.

As bolhas podem representar um problema em certos processos químicos, por exemplo, no caso de uma tubulação que alimenta uma bomba. Deseja-se exista somente líquido passando, pois bolhas geraria cavitação e também desgaste do rotor devido ao choque dessas bolhas de ar com o rotor e com as paredes internas da bomba, inutilizando-a em pouco tempo de uso. Um outro exemplo, em tubulações com líquidos quentes que alimentam um trocador de calor, a presença de bolhas faz com que a eficiência da troca térmica do equipamento diminua.

O sistema óptico desenvolvido utilizou como emissor de luz, o laser e como receptor, um componente eletrônico chamado de fototransistor. Dois tipos de sensores ópticos foram desenvolvidos. O primeiro deles, o sensor pontual, utiliza apenas um emissor laser e um fototransistor. Já o segundo, chamado de sensor multiponto, utiliza quatro emissores laser e quatro fototransistores.

Duas interfaces eletrônicas foram desenvolvidas. A interface do sensor pontual funciona com retenção do sinal de saída, ou seja, a saída não se altera até a passagem de uma nova bolha. No sensor multiponto, a interface funciona como um contador assíncrono, onde a cada passagem de bolha, o contador é incrementado.

Como a utilização da rede *Fieldbus* vem aumentando em indústrias químicas, essa rede foi escolhida para transmissão de dados do sensor até a sala de controle. A rede *Fieldbus* é um sistema de comunicação bi-direcional (envia e recebe dados), em série e totalmente digital, que interconecta os equipamentos de campo (sensores, atuadores e controladores), permitindo a distribuição das funções de controle entre os equipamentos de campo.

Um programa desenvolvido em Visual Basic realiza o monitoramento e contagem das bolhas que passam pelo sensor usando a tecnologia OPC (*OLE for Process Control*).

Com o objetivo de medição de velocidade das bolhas, mais um sensor multiponto foi colocado na tubulação com distância conhecida do primeiro sensor.

Palavras Chaves: Detector, *Fieldbus*, Sensor Óptico, Optoeletrônica, Laser, Fototransistor

Abstract

This work describes the development of an optical system to detect bubbles on chemical industries pipelines. The experimental apparatus was assembled in the Processes Control and Automation Laboratory of DESQ/FEQ/UNICAMP.

Bubbles may represent a problem in some processes. For example, the presence of bubbles in the liquid that feeds a centrifugal pump can cause a decrease in the pump efficiency and the rotor wearing down due to the friction forces. Another example can be found in pipes with hot fluid that feeds a heat exchanger. Bubble appearance will also decrease the heat transfer efficiency.

The developed optical system employs the laser pointer pen as a light source (emitter) and an electronic component, called phototransistor, as a receiver.

Two optical sensors were developed. The first one was assembled using just one emitter and one-receiver devices. The second one, called multipoint sensor, was developed using four emitters and four receivers.

An electronic interface was successfully developed to connect the optical sensor on the Fieldbus network. For the one-emitter-sensor, the interface uses the latch feature so that the transmitter state does not change until a new event happens. On the multipoint sensor, the interface works as an asynchronous counter: for every bubble event, the counter in the software is increased by one.

The use of Fieldbus technology is growing nowadays in chemical industries and for this reason it was chose to transmit the signal from the optical sensor to the control room. The Fieldbus is a bi directional digital communication system that interconnects the field instruments (sensors, actuators and controllers), allowing distribution-controlling functions between the field instruments.

A supervisory system was developed in Visual Basic to get the information from the field device using OPC (OLE for Process Control).

In order to measure on-line the bubble speed, one more multipoint sensor was connected to the pipeline, separated by a known distance from the first sensor.

The developed bubble sensors are non-intrusive, cheap and easy to implement.

Key Words: Bubble Detector, Fieldbus, Optical Sensor, Optoelectronic, Laser, Phototransistor

Capítulo 1 – Introdução	
1.1 – Introdução	1
Capítulo 2 – Conceitos Teóricos e Revisão Bibliográfica	
2.1 – Conceitos Teóricos	
2.1.1 – As portas lógicas digitais AND e NOT	4
2.1.2 – O circuito <i>Schmitt-Trigger</i>	6
2.1.3 – Fonte de corrente regulada, Diodo zener e o Transistor PNP	9
2.1.4 – O <i>Flip Flop</i> JK e o Circuito contador Assíncrono crescente	13
2.1.5 – Os sensores ópticos e o fototransistor	16
2.1.6 – O sistema <i>Fieldbus Foundation</i>	18
2.1.7 – IF302 – Conversor de corrente para <i>Fieldbus</i> com três canais	22
2.2 – Revisão Bibliográfica	25
2.3 – Conclusão e Proposta de Trabalho	29
Capítulo 3 – Sistema Experimental de Detecção de Bolhas	
3.1 – O sistema de detecção de bolhas	31
3.2 – Primeira Parte – A Instrumentação	33
3.3 – Segunda Parte – O <i>Software</i> e a Transmissão de Dados	45
3.4 – Conclusão	47
Capítulo 4 – Resultados Experimentais	
4.1 – Detecção de bolhas usando o Sensor Pontual	49
4.2 – Detecção de bolhas usando o Sensor Multiponto	53
4.3 – Determinação da velocidade das bolhas	59
4.4 – O processamento do sinal	61
4.5 – Conclusão	62
Capítulo 5 – Conclusão da Tese e Sugestões de Trabalhos Futuros	
5.1 – Conclusão da Tese	64
5.2 – Sugestões de Trabalhos Futuros	65
Bibliografia utilizada	66
Anexo 1 – Programa Desenvolvido em Visual Basic	67

Capítulo 1 – Introdução

1.1. Introdução

O surgimento de bolhas em tubulações de processos químicos é um fato que nem sempre é desejável que ocorra.

Por exemplo, em sistemas que necessitam de uma bomba para a operação ou para o transporte de líquidos, é desejável que, dentro da tubulação, tenha apenas líquido escoando. O surgimento de bolhas nesse sistema acaba ocasionando um problema conhecido como cavitação da bomba.

Este fenômeno ocorre quando a pressão do líquido na linha de sucção adquire valores inferiores ao da pressão de vapor do mesmo (para as condições do processo em questão), formando-se bolhas de vapor, causadas pelo deslocamento das pás do rotor, natureza do escoamento e/ou pelo próprio movimento de impulsão do fluido. Estas bolhas são arrastadas pelo fluxo e condensam-se voltando ao estado líquido bruscamente quando batem nas pás do rotor e alcançam zonas de alta pressão.

No momento desta troca de estado, o líquido já está em alta velocidade dentro do rotor, o que provoca ondas de pressão de tal intensidade que superam a resistência à tração do material do rotor, chegando a arrancar partículas metálicas do corpo das pás e das paredes da carcaça da bomba, inutilizando-a em pouco tempo de uso. O ruído de uma bomba cavitando é diferente do ruído da operação normal, pois dá a impressão de que ela está bombeando sólidos ou outro material que cause impacto.

Em sistemas de armazenamento de gases, onde o gás é armazenado a alta pressão com o objetivo de que ele se torne um líquido, o aparecimento de bolhas pode indicar que está ocorrendo uma diminuição da pressão interna do tanque de armazenamento, causada por um possível vazamento, ruptura da estrutura do tanque ou até algum problema no sistema de pressurização. A detecção destas bolhas é crucial para evitar vazamentos e até explosões.

Um outro caso onde o surgimento de bolhas é indesejável, ocorre em tubulações de processos onde existe o escoamento de fluidos quentes. Caso essa tubulação esteja conectada a um sistema de trocador de calor, onde o objetivo é esfriar o fluido quente, o aparecimento de bolhas fará com que a eficiência de troca térmica seja diminuída, pois a bolha representará um espaço sem função dentro do trocador de calor, podendo ocasionar algum problema no processo global.

Já no equipamento conhecido como coluna de bolhas, as bolhas são necessárias para promover uma grande agitação dos líquidos existentes dentro do equipamento, pois o objetivo é promover uma maior transferência de massa entre os líquidos presentes. Neste caso, a determinação da quantidade de bolhas poderá auxiliar no aumento da eficiência da mistura.

É nesse contexto apresentado que o presente trabalho é desenvolvido. Um sistema óptico de detecção foi desenvolvido baseado no princípio de emissão e recepção de luz. A utilização de um sistema de detecção de bolhas através de uma barreira óptica é interessante pelo fato do sensor não estar em contato com o líquido da tubulação, situação geralmente desejável em indústrias químicas. Um sensor em contato com o líquido da tubulação necessita a interrupção do processo para manutenção e limpeza, desnecessária em um sensor do tipo óptico.

Dentre as diferentes formas de aquisição de dados em ambientes industriais existentes, a rede *Fieldbus* foi escolhida por ser uma tecnologia muito utilizada atualmente nas indústrias químicas devido a sua facilidade de instalação, manutenção e flexibilidade a mudança nas estratégias de controle. Além disso, o sistema físico utilizado possui a tecnologia chamada OPC (*OLE for Process Control*). Essa tecnologia utiliza o padrão de comunicação não proprietária do Windows, permitindo que as variáveis de processo sejam lidas por qualquer computador na rede *Ethernet* da empresa e que estes dados sejam monitorados por qualquer software desenvolvido, de forma independente do software comercial associado ao hardware.

A presente dissertação está dividida em 5 capítulos. O Capítulo 1 descreve a introdução ao problema a ser resolvido. Já o Capítulo 2 apresenta todos os conceitos teóricos necessários para o entendimento do trabalho, a revisão bibliográfica e também a proposta de trabalho a ser desenvolvida nessa dissertação.

O Capítulo 3 descreve toda a montagem experimental realizada, enquanto o Capítulo 4 é um capítulo dedicado aos resultados experimentais obtidos através da montagem desenvolvida.

Finalizando, o Capítulo 5 apresenta a conclusão da presente dissertação e também sugestões para trabalhos futuros e de melhorias que podem ser realizadas no trabalho desenvolvido.

Capítulo 2 – Conceitos Teóricos e Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão apresentados alguns conceitos teóricos básicos e necessários ao entendimento do presente trabalho, procurando detalhar o princípio de funcionamento de componentes e dos circuitos eletrônicos utilizados no trabalho. Serão discutidas também as características e vantagens da rede *Fieldbus*. Será apresentada também a revisão bibliográfica referente ao presente trabalho desenvolvido, discutindo sobre trabalhos e estudos na linha de pesquisa que será desenvolvida.

2.1. Conceitos Teóricos

2.1.1. As Portas Lógicas Digitais AND e NOT

a) A Porta Lógica AND

A porta lógica *AND* é uma porta lógica que possui duas ou mais entradas, que são combinadas para produzir uma saída **X**. A Figura 2.1 mostra o funcionamento da porta lógica de duas entradas e também o seu símbolo.

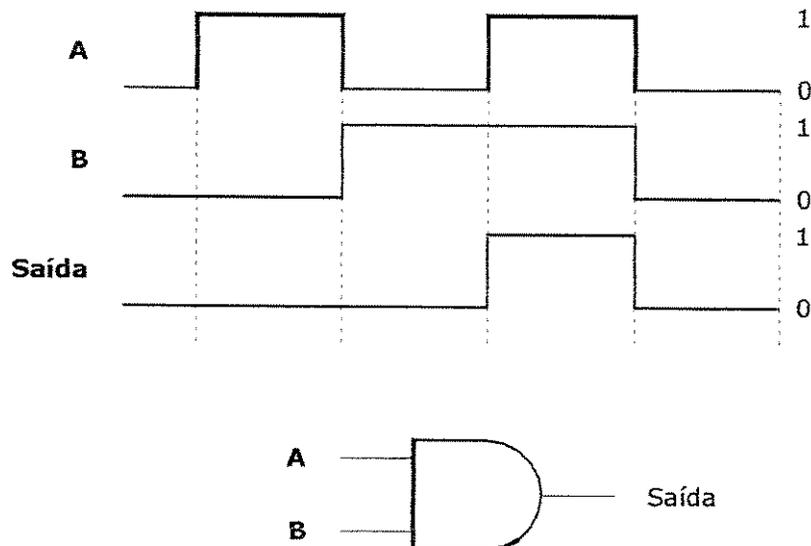


Figura 2.1 – Símbolo e funcionamento da porta lógica AND

A saída da porta *AND* é igual ao produto das suas entradas. Em outras palavras, a porta *AND* é um circuito que opera de tal maneira que a sua saída somente estará em um nível lógico ALTO (5 Volts) apenas quando todas as suas entradas estiverem também em nível lógico ALTO. Por exemplo, quando se tem uma porta *AND* de três entradas, a **Saída** é igual a:

$$Saída = A * B * C = ABC$$

O único momento em que a Saída pode assumir um nível lógico ALTO, é quando existir a condição **A=B=C=1**. (*Sistemas Digitais – Tocci*)

b) A Porta Lógica NOT

A porta lógica *NOT* é uma porta que possui apenas uma entrada, ao contrário da porta *AND*, que possui duas ou mais entradas. Se uma variável **A** qualquer é ligada em uma porta *NOT*, o resultado da sua saída pode ser expresso como o inverso do valor da variável naquele instante.

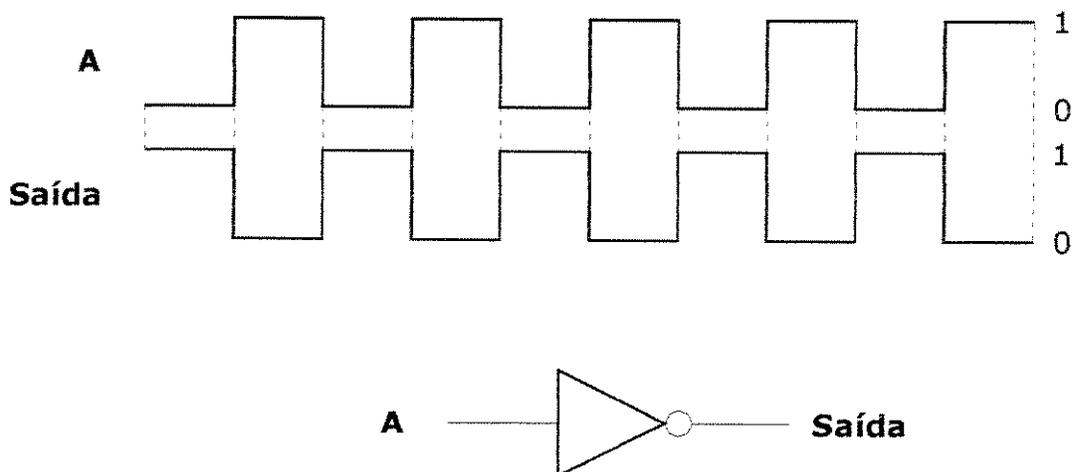


Figura 2.2 – Símbolo e funcionamento da porta lógica NOT

A porta lógica *NOT* é conhecida também como porta inversora ou porta de complemento. A característica de inversão é indicada no símbolo da porta lógica pelo pequeno círculo na saída da mesma. Qualquer outra porta lógica que possuir esse círculo na saída indica que ela possui também a função de inversora. Por exemplo, a porta lógica *AND*, que na presença do círculo na saída do seu símbolo, indica que além da função *AND*, também possui a função *NOT*, gerando a porta lógica conhecida como *NAND*. (*Sistemas Digitais – Tocci*)

2.1.2. O Circuito *Schmitt-Trigger*

O circuito *Schmitt-Trigger* é um tipo de comparador de sinal, que utiliza uma realimentação positiva do sinal de saída. A propriedade mais importante desse tipo de circuito é a característica de histerese apresentada pelo mesmo. Esse termo vem do grego e significa “atraso”, ou seja, um circuito que possui histerese, é um circuito onde apresenta um atraso na mudança do seu estado de saída (EFEITO), apesar das condições de entrada (CAUSAS) terem sido alteradas.

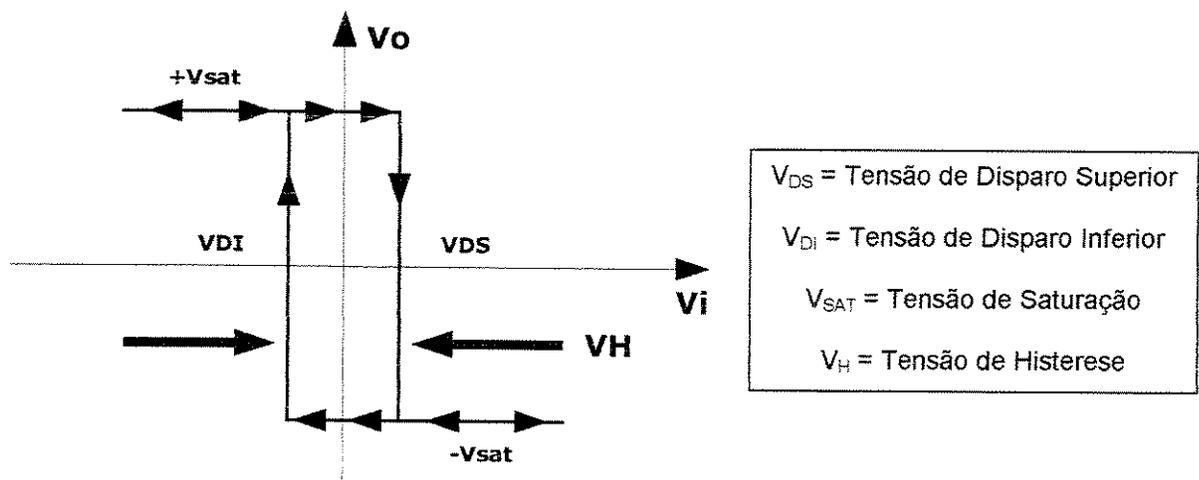


Figura 2.3 - Curva Característica de um Circuito com Histerese

A importância da histerese em um comparador é de eliminar os chaveamentos indevidos ocasionados pelo ruído que quase sempre acompanha o sinal, e evidentemente, essas comutações são falsas, pois elas estão sobrepostas ao sinal normal.

Analisando a Figura 2.3, pode-se observar dois valores de V_D , o V_{DI} e o V_{DS} . Esses valores de tensão recebem o nome de tensão de disparo superior (V_{DS}) e de tensão de disparo inferior (V_{DI}), e que estão separados por uma faixa de tensão. Essa faixa de tensão é variável e dependerá da amplitude do ruído, recebendo o nome de Tensão de Histerese (V_H), ou seja:

$$V_H = V_{DS} - V_{DI}$$

Para exemplificar, é apresentado na Figura 2.4(a), um sinal em cujo semiciclo negativo, existe um pequeno ruído sobreposto ao mesmo. Este ruído provocaria comutações falsas caso não fosse utilizado um circuito *Schmitt-Trigger*, conforme indicado na Figura 2.4(b). Entretanto, utilizando-se um circuito *Schmitt-Trigger*, será obtido um sinal de saída conforme se observa na Figura 2.4(c). Pode-se perceber assim, que o ruído não provoca mais nenhuma comutação ou chaveamento indevido. E essas comutações só irão ocorrer quando o sinal de entrada, após ter atingido um dos níveis de disparo (V_{DI} ou V_{DS}), atingir o outro nível de disparo (V_{DI} ou V_{DS}).

A propriedade de histerese apresentada pelo circuito *Schmitt-Trigger* pode ser utilizada em conjunto com outros circuitos. Uma aplicação comum pode ser observada na área de eletrônica digital. Nas portas lógicas digitais é adicionado o circuito *Schmitt-Trigger* nas suas entradas de forma que essas portas passem a aceitar sinais cuja transição é lenta, com pouca amplitude ou sinais com presença de ruído, além de fazer a função de lógica que está associada ao mesmo.

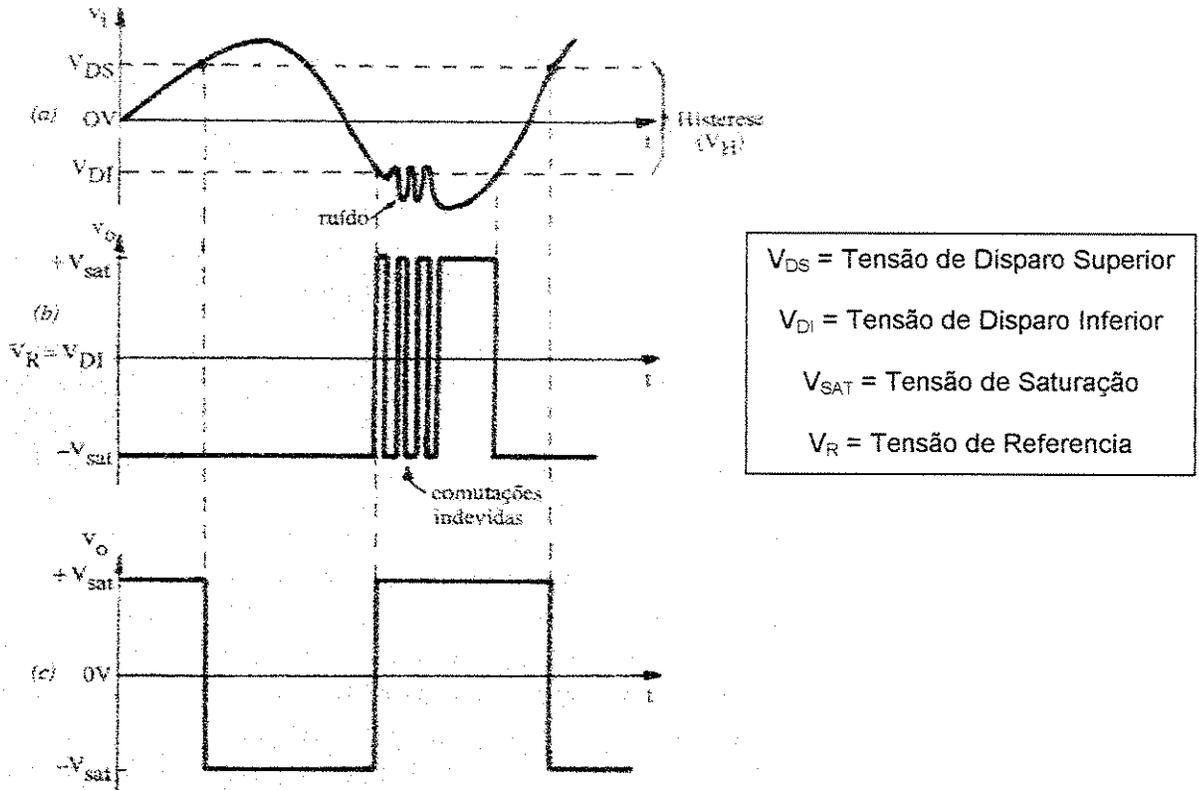


Figura 2.4 - Sinal com Ruído (a), Saída com Comutações Indevidas (b) e Saída com *Schmitt-Trigger* (c)

A diferenciação da porta lógica comum de uma porta lógica com o circuito *Schmitt-Trigger* interno é observada na Figura 2.5, onde se pode observar a porta AND com e sem circuito *Schmitt-Trigger*. (*Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos -Pertence*)

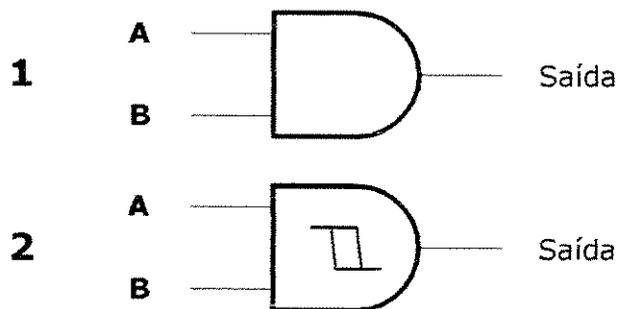


Figura 2.5 – Porta Lógica AND sem (1) e com (2) o circuito *Schmitt-Trigger*

2.1.3. Fonte de Corrente Regulada, Diodo Zener e o Transistor PNP

O objetivo de uma fonte de corrente regulada ideal é de manter um valor de corrente constante na carga (Figura 2.6). A fonte de corrente é geralmente utilizada como carregador de baterias e também como conversor tensão–corrente em instrumentação de processos.

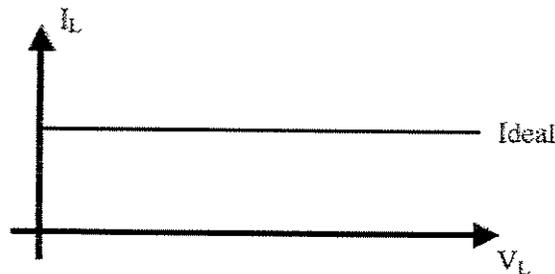


Figura 2.6 – Gráfico de uma Fonte Ideal de Corrente

Uma fonte de corrente é um circuito capaz de realizar a conversão de um valor de tensão de entrada fixo (V_E) em um valor de corrente na carga desejado (I_L), sempre respeitando os limites de trabalho dos componentes envolvidos, que são o transistor (T_R) e diodo zener (D_Z).

O circuito apresentado na Figura 2.7 ilustra uma fonte de corrente constante, com todos os seus componentes necessários.

Para o entendimento do funcionamento da fonte de corrente, é necessário que seja explicado o funcionamento do transistor e do diodo zener.

O transistor (T_R) é um dispositivo semicondutor de três terminais, base (B), emissor (E) e coletor (C), no qual existe uma camada de material do tipo P entre duas camadas de material do tipo N, resultando num transistor do tipo NPN.

Existe também o transistor do tipo PNP, composto por duas camadas de material do tipo P e uma do tipo N. O transistor utilizado na fonte de corrente é do tipo PNP, conforme a Figura 2.8.

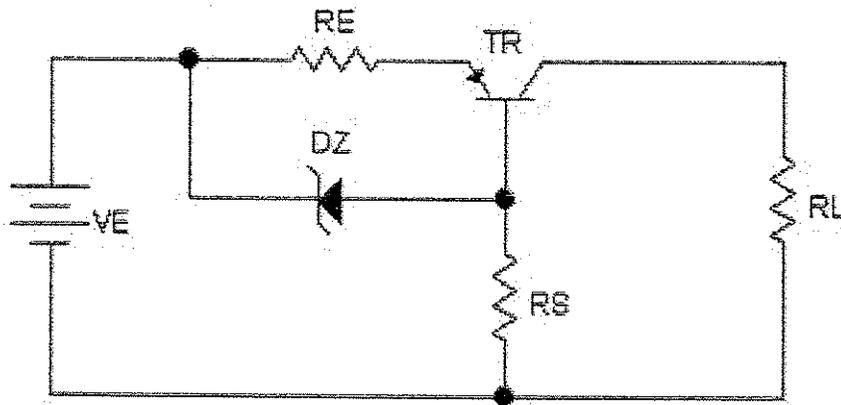


Figura 2.7 – Fonte Estabilizada de Corrente

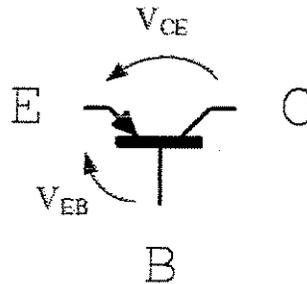


Figura 2.8 – Transistor PNP e a sua Representação

Os materiais do tipo N e do tipo P são formados pela adição de um número predeterminado de átomos de impureza em uma base de silício. Estas impurezas são adicionadas na razão de uma parte em 10 milhões, mas podem modificar completamente a característica do material formado.

Existem duas opções de trabalho, onde se pode operar o transistor de uma forma segura, sem que ele queime: a primeira é trabalhando com ele numa região chamada de região ativa e a outra é trabalhar na região de corte e saturação. A aplicação mais comum para a primeira opção é o circuito amplificador (circuito que eleva, aumenta ou amplifica um o nível de tensão ou corrente), podendo ser utilizados transistores PNP ou NPN.

Quando ele é utilizado na região de corte e saturação, a aplicação mais comum é o transistor ser usado como chave eletrônica, onde o sinal de saída do circuito é o sinal de entrada invertido, mantendo a mesma freqüência e amplitude, conforme mostra a Figura 2.9:

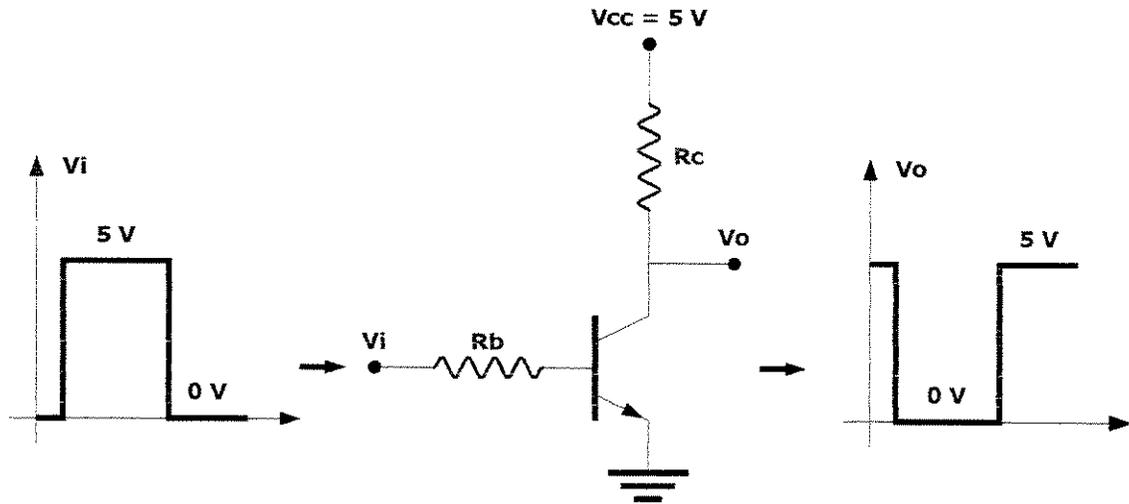


Figura 2.9 – Transistor Inversor

O diodo zener (D_Z) é também um dispositivo semicondutor muito utilizado como regulador de voltagem. A Figura 2.10 ilustra o funcionamento do diodo zener e a sua representação.

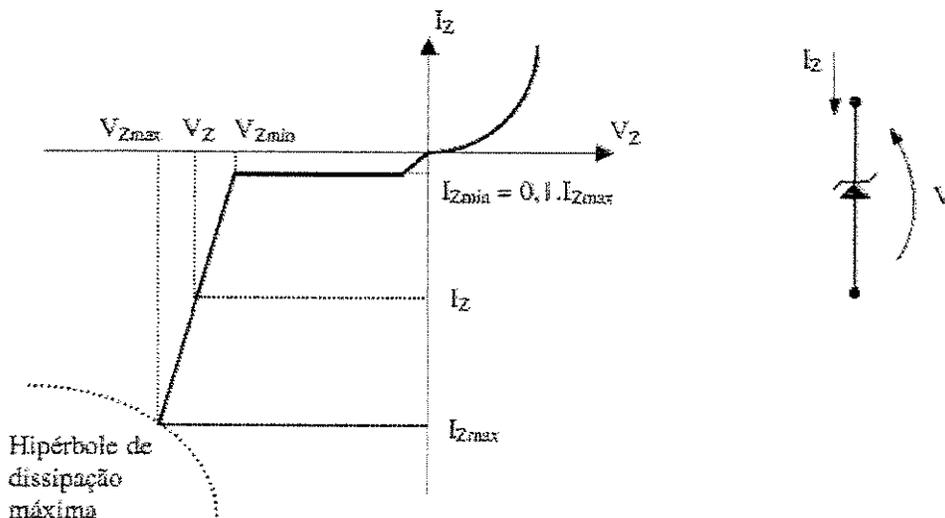


Figura 2.10 – Curva do Diodo Zener e a sua Representação

Para um diodo zener, dois dados são fundamentais para a escolha do seu ponto de trabalho: a sua tensão zener (V_Z) e a sua potência máxima (P_Z), que são dados fornecidos pelo fabricante do componente. Com esses dois valores, pode-se definir a corrente máxima ($I_{Z_{MÁX}}$) e mínima ($I_{Z_{MIN}}$) para que ele não alcance a área de dissipação máxima, o que levaria a queima do componente ou perda de polarização de $I_{Z_{MIN}}$. Uma vez escolhida a corrente de trabalho zener (I_{Z_Q}), entre os valores máximos e mínimos, a tensão zener V_Z será constante.

Uma característica que não foi abordada sobre o transistor é de que, se aplicarmos um valor de tensão constante entre o emissor e a base (Tensão V_{EB}), ele mantém a sua corrente de coletor constante dentro da sua faixa de operação na região ativa.

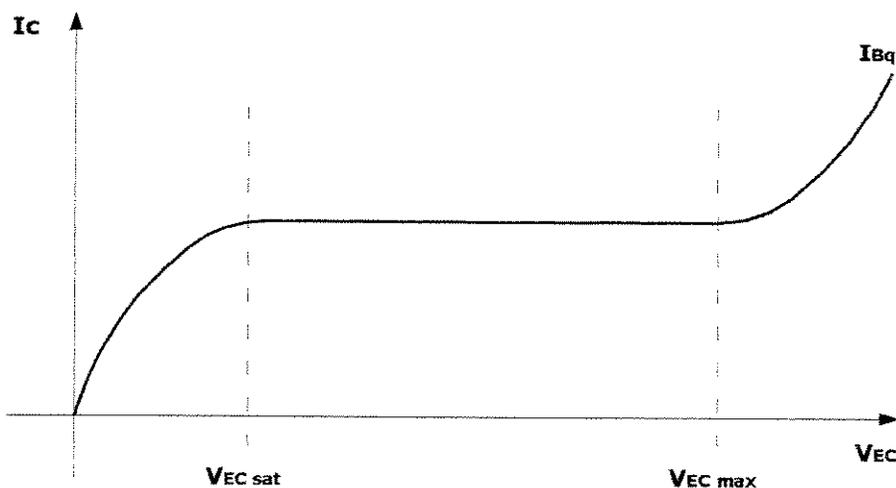


Figura 2.11 – Curva do Transistor com V_{BE} Constante

O componente responsável por proporcionar essa tensão estável aos terminais do transistor é o diodo zener. A resistência R_E será responsável por determinar o valor da corrente I_L que irá passar na carga. Já a resistência R_S , fica responsável por ajustar o valor da corrente I_Z , para que o diodo possa trabalhar dentro das suas características, conforme analisado anteriormente. (*Dispositivos e Circuitos Eletrônicos - Boylestad*)

2.1.4. O *Flip Flop* JK e o Circuito Contador Assíncrono Crescente

O *Flip Flop* (FF) é um circuito lógico com propriedade de memória, de modo que suas saídas Q e /Q (valor oposto ao da saída Q) vão para um novo estado, em resposta a um pulso de entrada (*clock*), e permanecendo nesse novo estado após o pulso de entrada terminar. O *clock* de um *Flip Flop* pode ser acionado na transição do sinal do nível baixo (0 Volts) para alto (5 Volts) e é chamado de *Flip Flop* de Borda de Subida. Quando o *Flip Flop* é acionado na transição do sinal do nível alto (5 Volts) para o nível baixo (0 Volts), este recebe o nome de *Flip Flop* de Borda de Descida.

Outras duas entradas, chamadas de *Set* e de *Clear* são utilizadas para forçar estados nas saídas do *Flip Flop*, independentemente de existir um sinal de *clock*. As combinações possíveis para essas entradas são:

- ✓ **Set = Clear = 0:** este é o estado que não provoca nenhum efeito no estado de saída, portando, as saídas Q e /Q permanecem com os mesmo valores antes da ocorrência desta condição de entrada;
- ✓ **Set = 1, Clear = 0:** essa combinação sempre leva a saída Q para um nível lógico alto, onde permanece mesmo após o *Set* retornar a 0. Conseqüentemente, /Q terá nível lógico baixo.
- ✓ **Set = 0, Clear = 1:** essa combinação sempre leva a saída Q para um nível lógico baixo, onde permanece mesmo após o *Clear* retornar a 0. Conseqüentemente, /Q terá nível lógico alto.

Na Figura 2.12 pode-se observar a tabela verdade, ou de funcionamento, e a simbologia utilizada para representar um *Flip Flop* do tipo JK, disparado pela transição de borda de subida do *clock*.

As entradas JK controlam o estado do *Flip Flop* e possuem uma característica interessante: quando as entradas J e K estiverem em um nível lógico alto, o *Flip Flop* sempre irá para um estado **oposto** quando uma transição de subida ocorrer.

Isto é chamado de operação em **modo de comutação** (*toggle mode*). Nesse modo, se ambas as entradas J e K estão em nível alto, o *Flip Flop* muda de estado a cada borda de subida do *clock*. O funcionamento e a representação desse *Flip Flop* é ilustrado pela Figura 2.12, desconsiderando as entradas *Set* e *Clear* e adotando que a saída Q está em nível alto inicialmente.

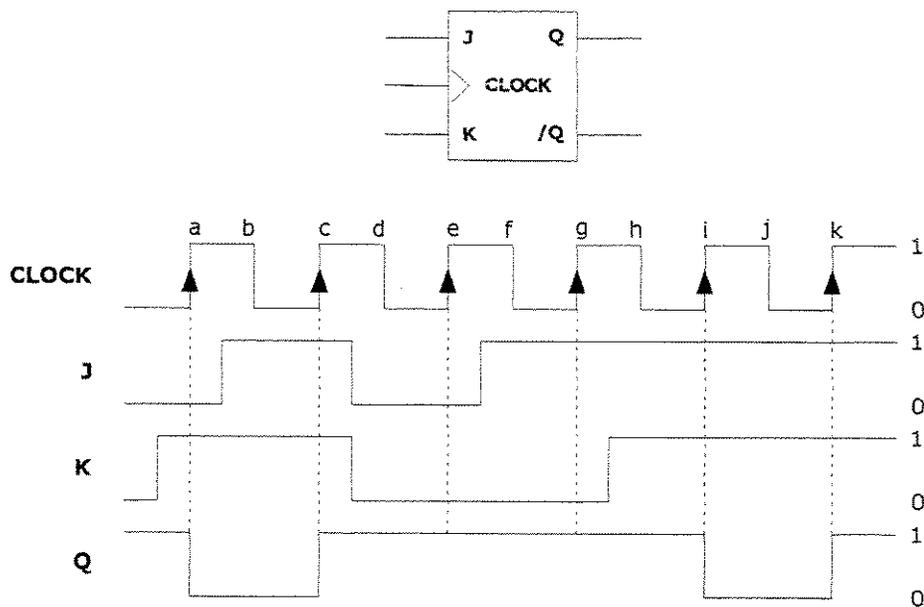


Figura 2.12 – *Flip Flop* JK que responde somente as transições de borda de subida do *clock*

Analisando essas formas de onda, verifica-se que o *Flip Flop* não é afetado pelas transições de descida dos pulsos de *clock*. Também pode-se notar que os níveis presentes nas entradas J e K somente afetam a saída se uma transição positiva do sinal de *clock* ocorrer. As entradas J e K, sozinhas, jamais poderão alterar o estado do *Flip Flop*.

Os *Flip Flop*'s JK são comumente usados como contadores. Existem dois tipos de contadores, os contadores **Assíncronos** e os contadores **Síncronos**. Ambos utilizam a característica que esse *Flip Flop* proporciona quando as suas entradas são ligadas em nível lógico alto, resultando na operação em **modo de comutação** (*toggle mode*).

Os contadores do tipo assíncrono são contadores onde os pulsos de *clock* são aplicados somente no *Flip Flop* de entrada. A partir do segundo *Flip Flop*, os *clock's* serão acionados pela saída do estágio anterior. Já os contadores do tipo síncrono, todos os *Flip Flop's* recebem o mesmo sinal de *clock*.

Um estudo sobre os contadores do tipo assíncrono será apresentado, usando *Flip Flop's* do tipo JK que trabalham com borda de descida. Utiliza-se como exemplo, um contador assíncrono de três bits da Figura 2.13. Algumas características de operação desse circuito são discutidas abaixo:

- ✓ Os pulsos de *clock* são aplicados somente na entrada CLK do *Flip Flop* A. Deste modo, o *Flip Flop* A muda de estado toda vez que os pulsos de *clock* tem uma transição negativa (de nível lógico alto para baixo);
- ✓ A saída normal do *Flip Flop* A aciona a entrada CLK do *Flip Flop* B e, portanto, o *Flip Flop* B mudará de estado sempre que a saída de A tiver uma transição negativa. Analogamente, o *Flip Flop* C comutará quando a saída de B tiver uma transição negativa também;
- ✓ As saídas C, B e A dos *Flip Flop's* representam um número binário de três bits, com o valor de C sendo como o bit mais significativo (MSB) e o valor de a como sendo o bit menos significativo (LSB). Considerando que todos os *Flip Flop's* foram "limpos" (todas as suas saídas estão em um nível lógico baixo), esse nosso contador realizará uma contagem, partindo de "000" até "111", em função dos pulsos de *clock* aplicados ao *Flip Flop* A;
- ✓ O módulo desse contador é 2^3 , onde teremos 8 combinações diferentes ("000" até "111"). O expoente do número 2 representa o número de *Flip Flop's* necessários para realizar esse arranjo;
- ✓ Após a descida do 8º pulso de *clock*, a contagem estará em "111". Na próxima descida do *clock*, tem-se o que se chama de reciclagem da contagem. Logo após a descida do 9º pulso de *clock*, o contador volta ao estado inicial "000", iniciando um novo ciclo de contagem conforme pulsos de *clock* forem aplicados.

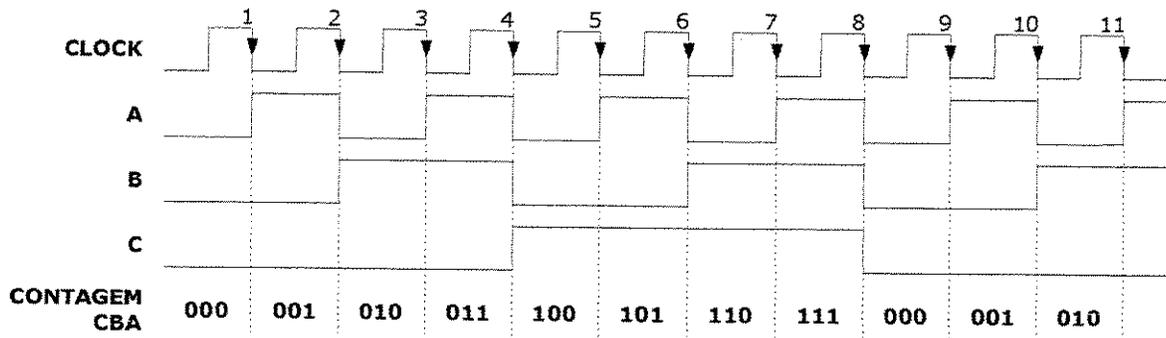


Figura 2.13 – Contador Assíncrono Crescente de 3 Bits

Esse tipo de arranjo é chamado de assíncrono porque os *Flip Flop's* não trocam de estado em exato sincronismo com os pulsos de *clock* aplicados; apenas o primeiro *Flip Flop* responde aos pulsos de *clock*. Os demais devem esperar o estágio anterior mudar de estado para ele poder comutar. O contador assíncrono é também conhecido como **contador por pulsação** devido ao modo com que os *Flip Flop's* respondem um após o outro numa espécie de efeito análogo à propagação de um pulso. (*Sistemas Digitais – Tocci*)

2.1.5. Os Sensores Ópticos e o Fototransistor

Para apresentar os sensores ópticos, alguns conceitos sobre luz são necessários. A luz é uma forma de radiação eletromagnética oscilatória que se dispersa no meio em que se encontra. O fator que melhor caracteriza uma radiação luminosa é o seu comprimento de onda, que é dado em metros. A visão humana é sensível apenas às radiações luminosas na faixa de 380nm (violeta) até 780nm (vermelho-escuro), tendo sensibilidade máxima para o amarelo-esverdeado (555nm).

Os sensores ópticos sempre são compostos por duas partes: o emissor de luz, que pode ser a luz solar ou componentes eletro-eletrônicos; e o receptor de luz, que é um componente eletrônico, que em conjunto a um circuito, detecta a variação de luz recebida.

O tipo mais comum de emissor de luz eletrônico é o LED (diodo emissor de luz). Ele emite uma luz, que pode ser visível ou infravermelha. A coloração dessa luz emitida depende da constituição química dos cristais que compõe o LED.

Um outro tipo de emissor de luz eletrônico é o LASER. Ele é o resultado da transformação da energia luminosa concentrada em um raio único. A palavra LASER corresponde à sigla: luz amplificada pela emissão estimulada de radiação (do inglês: *light amplification by stimulated emission of radiation*).

Já os componentes receptores de luz são componentes cujas características elétricas variam em função da quantidade de luz incidente. Um tipo de receptor de luz é o fototransistor, que nada mais é do que um transistor cujo encapsulamento permite a incidência de luz sobre a junção base-coletor. Com isso, uma corrente gerada pela luz na junção é amplificada, como se fosse uma corrente de base convencional. Conclui-se, portanto que a corrente de coletor do fototransistor é proporcional à intensidade luminosa incidente sobre o componente. Um circuito típico para a utilização do fototransistor é o mostrado na Figura 2.14. O funcionamento desse circuito é semelhante ao de um interruptor. Como a base do fototransistor está normalmente desconectada, a corrente que circula por ela dependerá apenas do fluxo luminoso incidente. Assim, quando não há luz aplicada no fototransistor, a corrente de base será zero e o fototransistor estará cortado (desligado), resultando na tensão do coletor igual à tensão de polarização V_{CC} . Quando a luz incidir sobre o fototransistor, a tensão no coletor irá diminuir devido ao aumento da corrente, tendendo a zero e resultando num comportamento do tipo liga-desliga: com luz na base do fototransistor, ele conduz e a tensão de saída é igual a V_{CC} . Sem luz, ele não conduz e a tensão de saída é zero.

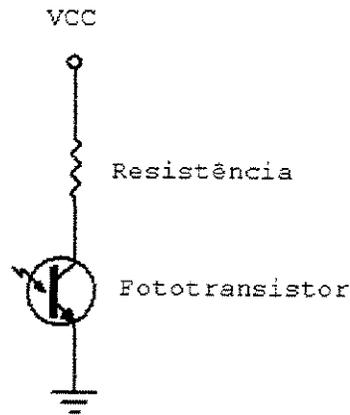


Figura 2.14 – Circuito Típico de Utilização do Fototransistor

Juntando-se então, os emissores e os receptores sensíveis à luz, e baseado no princípio de transmissão e recepção de luz, obtem-se os sensores ópticos, ou sensores fotoelétricos, que manipulam a luz de forma a detectar a presença de objetos através da interrupção do recebimento do feixe de luz pelo receptor. (*Dispositivos e Circuitos Eletrônicos - Boylestad*)

2.1.6. O Sistema *Fieldbus Foundation*

O sistema *Fieldbus* é uma evolução tecnológica na comunicação digital na área de instrumentação e controle de processos. Esse sistema difere dos demais protocolos de comunicação, porque foi desenvolvido para facilitar as aplicações em controle de processos ao invés de simplesmente transferir os dados provenientes do campo para a sala de controle, através de sinais na forma digital (Figura 2.15). É uma rede do tipo LAN (*Local Area Network*) para os instrumentos e que é usada para a automação de processos.

É um sistema de comunicação bi-direcional (envia e recebe dados), em série e totalmente digital, que interconecta os equipamentos de campo (sensores, atuadores e controladores), permitindo a distribuição das funções de controle entre os equipamentos de campo. O conceito de bloco funcional foi introduzido para tornar fácil a programação pelo usuário.

Com isso, o usuário do sistema *Fieldbus* pode facilmente construir e visualizar estratégias complexas de controle. Outra vantagem adicional é a flexibilidade. A estratégia de controle pode ser alterada, sem mudança na fiação ou qualquer modificação de hardware.

Dentro do software responsável pela configuração da rede, existe uma subdivisão na configuração, chamado de planta lógica e planta física. A planta física é responsável pela configuração de todos os instrumentos de campo presentes no processo. Já a planta lógica, é o local onde serão implementadas as estratégias de controle. Com isso, várias estratégias, usando o mesmo hardware instalado, podem ser implementadas sem que nenhuma alteração no hardware seja necessária de ser realizada.

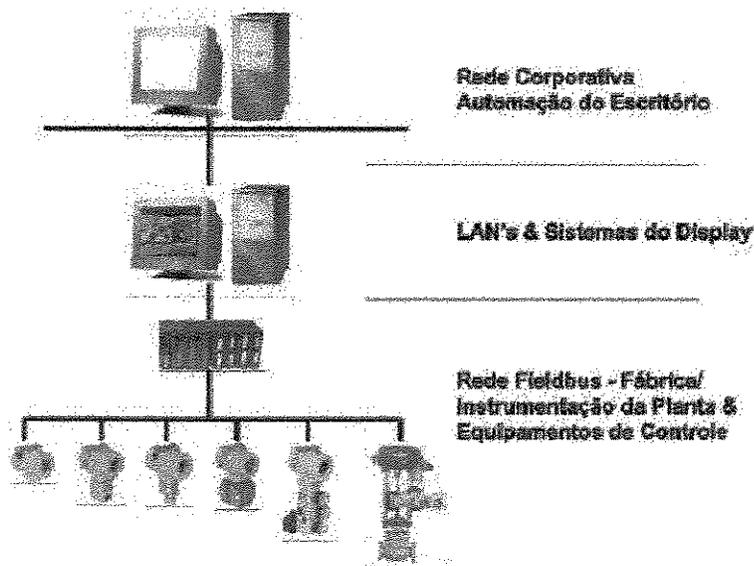


Figura 2.15 – Hierarquia de uma planta no sistema *Fieldbus*

O protocolo *Fieldbus* foi proposto inicialmente em 1994 por uma fundação sediada nos Estados Unidos, chamada de *Fieldbus Foundation*, composta pela união de duas organizações de *fieldbus* existentes, a ISP (*Interoperable System Protocol*) e uma divisão da World FIP francesa, mais um grupo de 85 empresas aliadas aos organismos internacionais de normalização IEC e ISA.

Atualmente existem *softwares* de supervisão que trabalham com o sistema *Fieldbus*, possibilitando assim uma integração entre os computadores da sala de controle com os instrumentos de campo. Esses *softwares* utilizam o padrão de comunicação não proprietária do Windows denominado OPC (*OLE for Process Control*), que é uma tecnologia baseada na comunicação cliente/servidor.

O OPC acaba permitindo assim, a configuração e monitoramento de equipamentos a partir de uma estação de trabalho (cliente) conectada remotamente a interfaces localizadas e as pontes (servidores) via rede *Ethernet*.

Os servidores geram uma lista de dados chamada de *tags*. São elas as responsáveis pela troca de informações entre as redes *Fieldbus* e a *Ethernet* usando a comunicação OPC. As *tags* possuem as suas bases de dados disponibilizadas para qualquer tipo de IHM (Interface Homem / Máquina) ou de sistema supervísório. Assim o usuário pode escolher a interface ou o supervísório de sua preferência ou até mesmo desenvolver o seu próprio *software*.

Alguns benefícios do sistema *Fieldbus* podem ser destacados quando comparados aos sistemas tradicionais de instrumentação e automação:

- **Redução de Hardware**

O sistema *Fieldbus* utiliza o que se chama de Blocos Funcionais para implementação da estratégia de controle. Algumas funções em um sistema de controle, como entradas (A_i) e saídas (A_o) analógicas e controladores PID podem ser implementados pelos instrumentos de campo através do uso dos blocos funcionais.

A distribuição do controle entre os instrumentos de campo reduz não somente a quantidade de pontos de I/O (Entrada e Saída), mas também o número de equipamentos necessários, como cartões de expansão, gabinetes e fontes de alimentação.

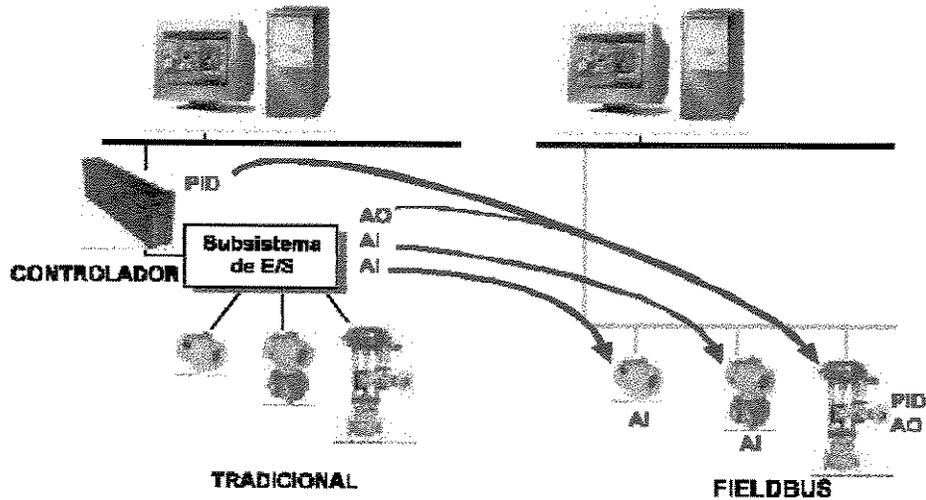


Figura 2.16 – Redução de *hardware* para Instrumentação usando o *Fieldbus*

• **Instalação**

O *Fieldbus* permite que os instrumentos de campo sejam todos conectados no mesmo par de fios, por onde trafegam as informações e também a tensão de alimentação dos transmissores, reduzindo assim a quantidade de fios envolvida na instrumentação do processo a ser controlado.

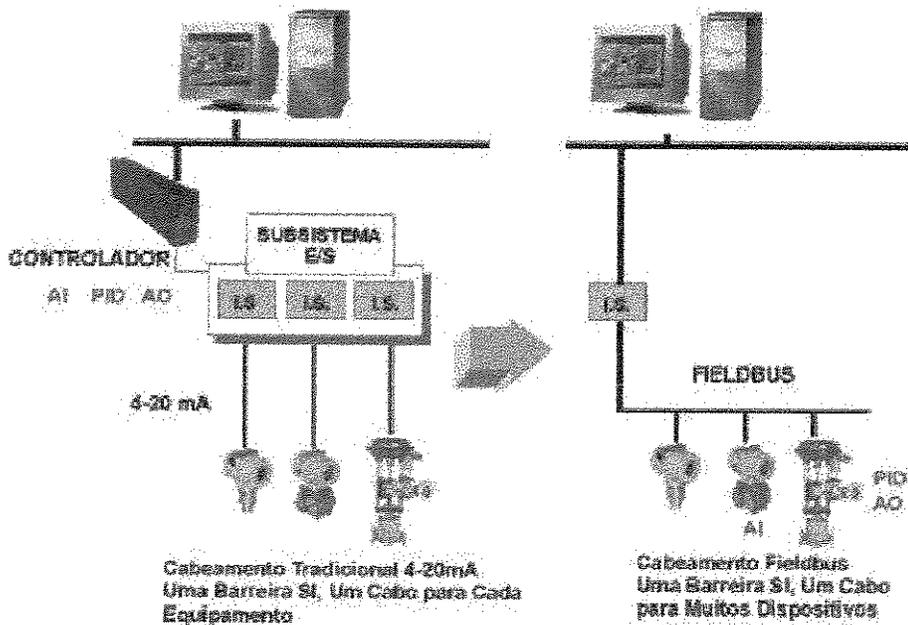


Figura 2.17 – Redução de custos com cabeamento usando o *Fieldbus*

- **Manutenção**

Os instrumentos de campo *Fieldbus* possuem uma característica chamada de realizar um autoteste, ou seja uma verificação das suas principais funções. Aliado a facilidade da comunicação digital, é possível identificar facilmente quando um instrumento está com problemas, reduzindo o número de horas com a manutenção e aumentando a segurança da planta. (*Fieldbus Reference Book*, Smar)

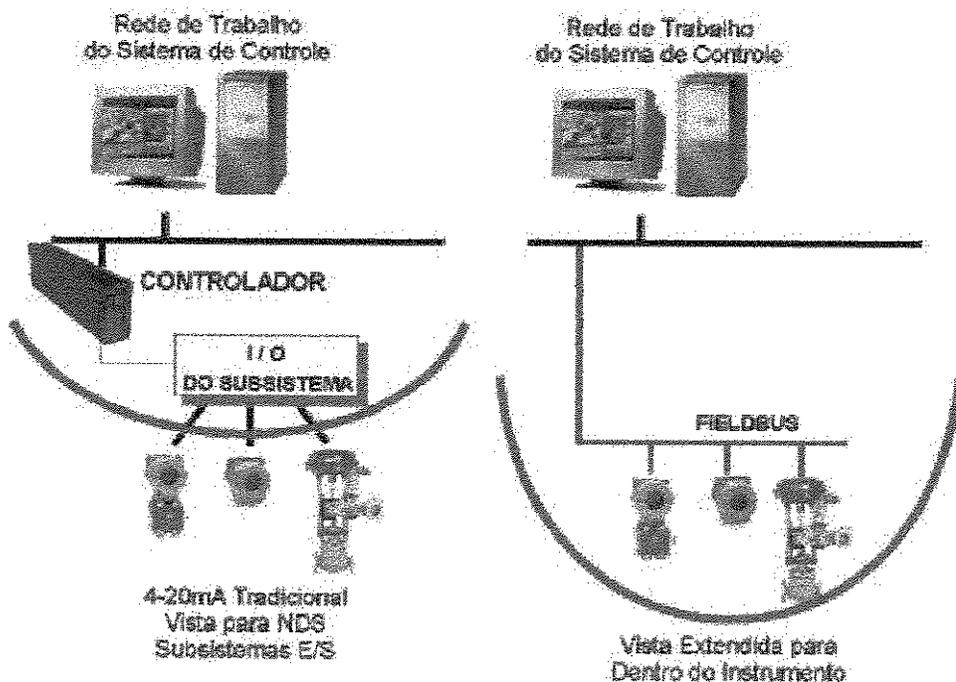


Figura 2.18 – Ampliação do campo de observação da planta usando o *Fieldbus*

2.1.7. IF302 - Conversor de corrente para *Fieldbus* com três canais

O IF302 é um conversor destinado a interfacear transmissores analógicos com uma rede *Fieldbus*. Ele pode receber até três sinais de corrente tipicamente de 4-20 mA ou 0-20 mA e torna-os disponíveis para um sistema *Fieldbus*.

O IF302 faz parte de uma linha de equipamentos que permite a distribuição das funções de controle entre os equipamentos de campo. Ele também possui blocos funcionais integrados (controlador PID, seletor de entrada, entre outros), permitindo uma flexibilidade na implementação da estratégia de controle, características essas que acabam resultando num menor tempo morto e melhor controle, sem mencionar a redução dos custos.

O IF302 é dividido em três placas (Figura 2.19), cada uma com sua função específica: a placa do circuito principal, a placa do display, e a placa do circuito de saída.

- **Placa do circuito principal:**

Na placa principal, encontra-se o cérebro do transmissor, ou seja, a CPU. Dentre as suas funções, pode-se citar o gerenciamento do transmissor como um todo e da comunicação do mesmo com a rede e a realização do *self-test* (autodiagnóstico) para detectar eventuais falhas.

O programa de controle que é desenvolvido pelo operador é armazenado na memória E2PROM. Essa memória pode ser programada, apagada e reprogramada quantas vezes forem necessárias. Uma vez programada, a memória E2PROM é uma memória não volátil, o que irá manter os dados armazenados mesmo depois da alimentação do sistema ser desligada. Devido possuir essas características, é nessa memória onde também são guardados os dados de calibração, configuração, etc do transmissor.

A memória RAM, que uma memória muito utilizada para armazenamento temporário de dados, porém ela é uma memória do tipo volátil, isto é, ela vai perder a informação armazenada caso a alimentação do sistema for desligada. No IF302, ela realiza o armazenamento temporário dos dados provenientes da leitura dos canais de entrada do transmissor.

O *Modem* é o dispositivo responsável por codificar (modular) e enviar os sinais provenientes do campo no padrão *Fieldbus*, monitorar a atividade da linha e decodificar (demodular) as informações enviadas por outros.

O ajuste local é a possibilidade que o instrumento possui de que o operador realize a programação do mesmo em campo, sem a necessidade de utilizar o software. Esse ajuste é realizado utilizando duas chaves magnéticas, aumentando dessa forma a segurança da planta, uma vez que não haverá “chaveamento” de nenhuma natureza para que o transmissor seja programado localmente.

A fonte de alimentação converte a tensão recebida pelo barramento em níveis de tensão mais baixos para alimentação dos circuitos internos.

Essa característica é importante em atmosferas explosivas, onde não é desejável uma formação de faíscas elétricas, que poderiam ser causadas pelos contatos elétricos.

- **Placa do circuito de entrada**

A placa de entrada é a responsável por receber os sinais que são enviados pelos transmissores analógicos de 4 a 20 mA ou de 0 a 20 mA instalados no campo. Essa placa possui um circuito para isolar o sinal de saída do conversor *A/D* (que converte os sinais de entrada analógicos para um formato digital) e a CPU (Isolador de Sinal) e também um isolador da fonte de alimentação, que complementa a isolação entre as placas principal e de entrada.

O MUX, ou circuito multiplexador é um circuito que possui várias entradas e apenas uma saída. Esse circuito funciona como uma chave seletora, que em tempos diferentes, disponibiliza os valores de cada entrada na saída.

No caso do IF302, os intervalos são de 75ms, ou seja, em $t=t_0$ tem-se o valor do canal 1 na saída do MUX. Em $t=t_0 + 75$, temos o valor na saída do canal 2. Já em $t=t_0 + 150$ o valor do canal 3. Uma nova leitura do canal 1 será feita em $t= t_0 + 225$ e assim sucessivamente.

Mesmo utilizando apenas um canal do IF302, o sistema de leitura das suas entradas, descrito anteriormente, não é alterado.

- **Placa do Display**

Ela é responsável pela captação das informações que a CPU envia a ela para que seja disponibilizada no *display*.

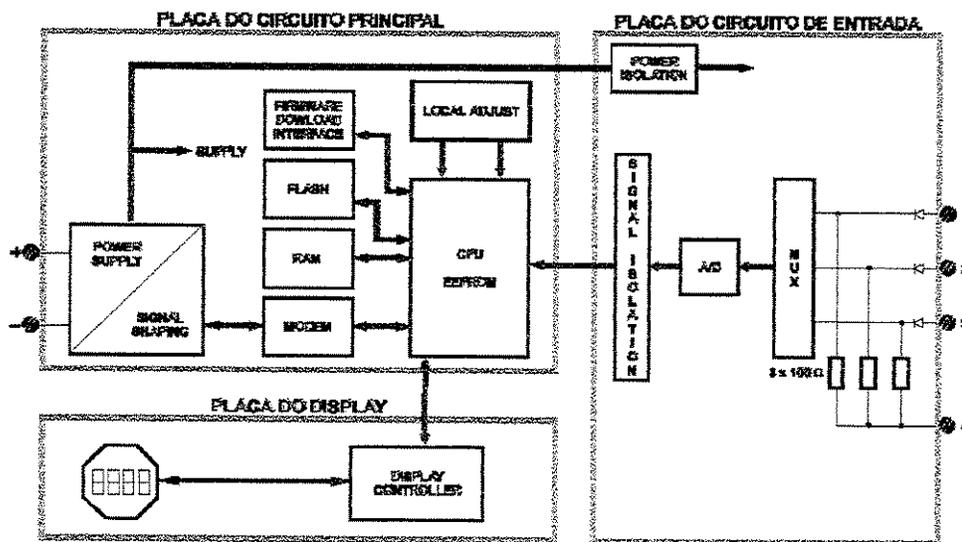


Figura 2.19 – Diagrama de Blocos do IF302

2.2. Revisão Bibliográfica

Por meio de pesquisa realizada no portal de periódicos da CAPES, foram encontrados alguns artigos que podem ser ligados de uma forma indireta ao tema do presente trabalho.

No trabalho proposto por *Prasser (2000)*, a utilização de sensores *Wire Mesh* para detecção e medição da distribuição das bolhas em um sistema de duas fases (água + AR) é descrita.

O sensor *wire mesh* desenvolvido é utilizado em tubulações com 51,2 mm de diâmetro e é constituído por duas grades separadas por uma distância X entre elas e com 16 eletrodos cada uma, resultando numa resolução de 16x16 pontos igualmente distribuídos na tubulação e sensíveis à passagem de uma bolha. Essa resolução, segundo o autor, é suficiente para detectar, não somente bolhas individuais, mas também “grupos” de bolhas que possam passar todas de uma vez pelos sensores.

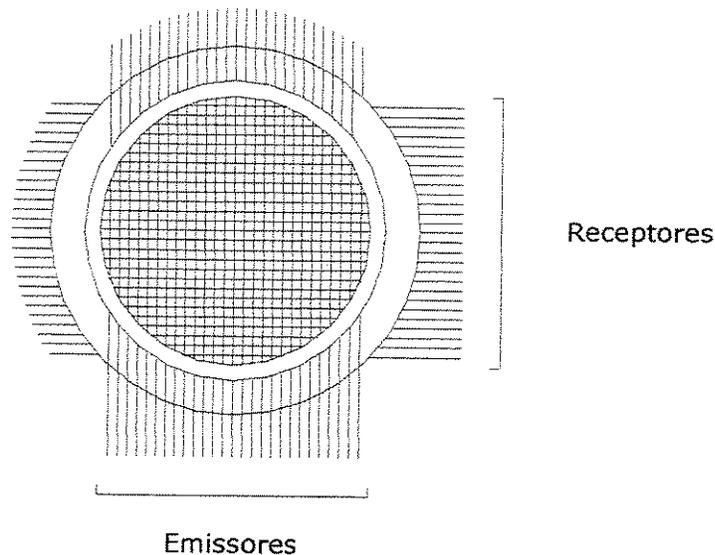


Figura 2.20 – Sensor *Wire Mesh*

Observando a Figura 2.20, essa grade formada pelo cruzamento dos fios emissores e receptores, foi confeccionada de tal forma que, os transmissores e os receptores fiquem a uma distância de 1,5 mm entre eles, ou seja, os fios não se tocam. O trabalho desenvolvido permite que possa ser detectado não somente as bolhas no interior da tubulação, mas também a velocidade, posição e quantificação das bolhas. A desvantagem desse tipo de medição é da necessidade de ter um sensor em contato direto com o líquido que está escoando pela tubulação e também por ocasionar a “quebra” das bolhas grandes em várias bolhas de menor tamanho.

Uma outra forma de detecção de bolhas foi apresentado por *Ramayya (1996)*, onde transmissores de pressão bem sensíveis foram instalados nas paredes da tubulação.

Esses transmissores medem a variação da pressão causada na vizinhança deles causada pela passagem da bolha na tubulação. Segundo o autor, este sistema funcionou bem para sistemas em que a frequência de passagem de bolhas pelo local de detecção é conhecida, podendo realizar uma medição precisa.

Servindo de base para o desenvolvimento do sistema óptico de detecção de bolha proposto, o estudo do autor *Musazzi (2001)* é apresentado. Este desenvolveu um tipo de sensor óptico com o objetivo de detectar o tamanho e também o número de partículas sólidas que passam por esse sensor. O sistema desenvolvido é composto por uma fonte emissora de luz e um sistema de recepção de luz, onde através da variação da intensidade luminosa recebida, determina a quantidade e tamanho dessas partículas. Isso é possível, pois as partículas ao passarem pelo sensor fazem com que a quantidade de luz recebida pelo receptor seja diminuída. Esse sistema é semelhante ao trabalho proposto, porém a diferença está na aplicação. O autor utiliza um sistema óptico para detecção de partículas sólidas através da variação da intensidade de luz recebida. Já no trabalho proposto, o sistema óptico será utilizado para detectar a passagem de bolhas em tubulações, onde a recepção de luz será interrompida a cada passagem de bolha.

Um sistema de detecção não intrusivo de bolhas voltado para a área médica foi estudado pelo autor *Nebuya (2004)*. O sistema utilizado para o estudo foi um tanque cúbico com um sistema de medição de impedância elétrica em quatro diferentes pontos, conforme ilustrado na Figura 2.21. Esses medidores de impedância formam uma combinação linear, espaçados de um em um centímetro entre eles e foram instalados em um dos lados desse cubo.

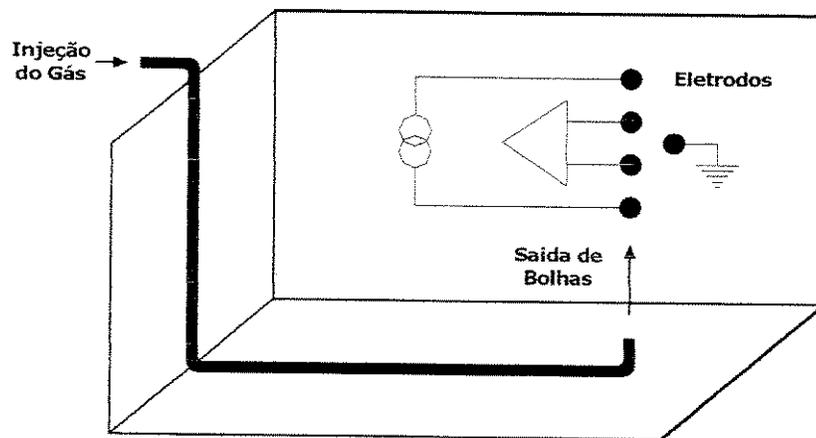


Figura 2.21 – Montagem Experimental de Nebuya, S (2004)

O autor utilizou uma solução salina para preencher esse cubo, e o dióxido de carbono na forma gasosa pra simular as bolhas de ar. Foram realizadas medições de impedância usando bolhas de ar de diferentes tamanhos e em diferentes posições dentro do cubo, que permitiram ao autor realizar comparações com a profundidade das veias e artérias do corpo humano e do tamanho da bolha de ar que pode ser detectada. Bolhas de 0,5 mm de diâmetro podem ser detectadas em uma profundidade de até 5,3 mm, que é equivalente a profundidade da veia safena magna, que é a veia da perna e que garante grande parte do retorno venoso ao coração. Já para bolhas com diâmetro de 2,3 mm podem ser detectadas em uma profundidade de até 21 mm, semelhante à profundidade da artéria carótida comum, que se encontra no pescoço, responsável pela irrigação do cérebro.

Utilizando-se também da tecnologia óptica, o autor *Leung (2004)* descreve um método de monitoramento e análise de bolhas em sistemas binários de gás-líquido. O método utilizado pelo autor está baseado pela variação na quantidade de radiação de luz que atravessa o sistema gás-líquido, semelhante ao sistema óptico para detecção de partículas sólidas desenvolvido por *Musazzi (2001)*. Nesse trabalho, o autor desenvolveu um sistema de emissor a laser e um receptor sensível à variação de luz recebida.

O laser é refletido em um espelho e direcionado para um canal de 40 mm de largura por 30 mm de altura com uma intensidade luminosa constante. A passagem do gás entre o emissor e o receptor faz com que a intensidade luminosa recebida pelo receptor diminua, detectando dessa a presença de gás no líquido. Algumas análises estatísticas dos dados fornecidos pelo sensor permitiram relacionar o tamanho da bolha e também a frequência em que elas são formadas.

Já o autor *Guelt (2003)* descreve em seu trabalho um sistema também óptico, para determinação da velocidade e do tamanho de bolhas individuais em tubulações usando quatro *probes* de fibra óptica (cada *probe* é um ponto de emissão e recepção de luz).

Segundo o autor, esse tipo de detecção obteve bons resultados em tubulações verticais e com uma vazão elevada, conseguindo conciliar precisão na detecção e no número efetivo de bolhas que passaram pelos "*probes*".

A diferença entre o sensor desenvolvido pelo autor e o trabalho proposto nessa dissertação se dá nos componentes utilizados para a detecção. Enquanto o autor utiliza fibra óptica tanto para emissão quanto para a recepção de luz, o trabalho proposto utiliza uma caneta ponteira laser como emissor de luz e o componente chamado fototransistor para a recepção do laser.

2.3. Conclusão e Proposta de Trabalho

Pela importância em questões de segurança da indústria química, o trabalho desenvolvido nessa dissertação de mestrado tem como objetivo principal o desenvolvimento de um sistema óptico de detecção de bolhas em tubulações utilizando fotosensores. Como fonte emissora de luz, foi escolhido o laser por possuir um feixe de luz intenso e concentrado em um único ponto. A vantagem de se utilizar um sistema de detecção de bolhas através de uma barreira óptica é de eliminar a necessidade do sensor estar em contato com o líquido que está escoando pela tubulação, o que é desejável em indústrias químicas.

Tomando como base os trabalhos de *Musazzi (2001)* e *Guelt (2003)* esse sistema foi desenvolvido baseado no princípio de emissão e recepção de luz. As diferenças básicas entre os trabalhos citados e o desenvolvidos se encontram no tipo de sensor óptico desenvolvido e do processo onde foi aplicado. O autor *Guelt* determinou a velocidade e o tamanho de bolhas individuais em tubulações usando quatro *probes* de fibra óptica. Já o autor *Musazzi* utilizou o princípio de emissão e variação da intensidade da luz recebida para detectar partículas sólidas.

Dois tipos de sensores ópticos foram desenvolvidos. O primeiro deles foi chamado de sensor pontual, composto por apenas um emissor laser e um fototransistor. O segundo, com o objetivo de uma varredura e uma precisão como no sensor *wire mesh* descrito no trabalho de *Prasser (2000)*, foi desenvolvido o sensor multiponto. Ele é composto por quatro emissores laser e quatro fototransistores. Em ambos os sensores, o laser emitido sempre incide perpendicularmente à parede da tubulação para que não ocorra difração.

Para a transmissão dessas informações utilizou-se a rede *Fieldbus*. Essa rede possui algumas vantagens quando comparadas às redes tradicionais utilizadas para transmissão de dados provenientes do campo, como diminuição do número de cabos necessários para interligar a sala de controle com o campo e a possibilidade de modificar a estratégia de controle facilmente. Além disso, a transmissão de dados de campo é feita pela rede *Ethernet* através do padrão de comunicação não proprietária do Windows, denominado *OPC (OLE for Process Control)*. Esta é uma tecnologia baseada na comunicação cliente/servidor que permite o monitoramento de equipamentos a partir de uma estação de trabalho (cliente) conectada remotamente a interfaces (pontes, servidores) via rede *Ethernet*.

Para o monitoramento da tubulação através da estação de trabalho, um programa em linguagem Visual Basic 6.0 foi desenvolvido. Esse programa realiza a contagem das bolhas que passam pelos sensores e calcula a velocidade de passagem da bolha pelos sensores.

Capítulo 3 – O Sistema Experimental de Detecção de Bolhas

Neste capítulo será apresentada a montagem experimental desenvolvida no Laboratório de Controle e Automação de Processos do DESQ/FEQ/UNICAMP. Foram desenvolvidos dois sistemas de detecção de bolhas em tubulação utilizando detector externo e não intrusivo, através de uma barreira óptica posicionada na tubulação: o sensor pontual e o sensor multiponto. Serão abordados a montagem de cada parte desse sistema óptico (circuitos, sensores), a transmissão dos dados e o software desenvolvido para contagem de bolhas e determinação da velocidade das bolhas.

3.1. O Sistema de Detecção das Bolhas

A propõe o desenvolvimento de um sistema óptico para detecção de bolha em tubulações de processos químicos, utilizando a rede *Fieldbus* como meio de transmissão dos dados.

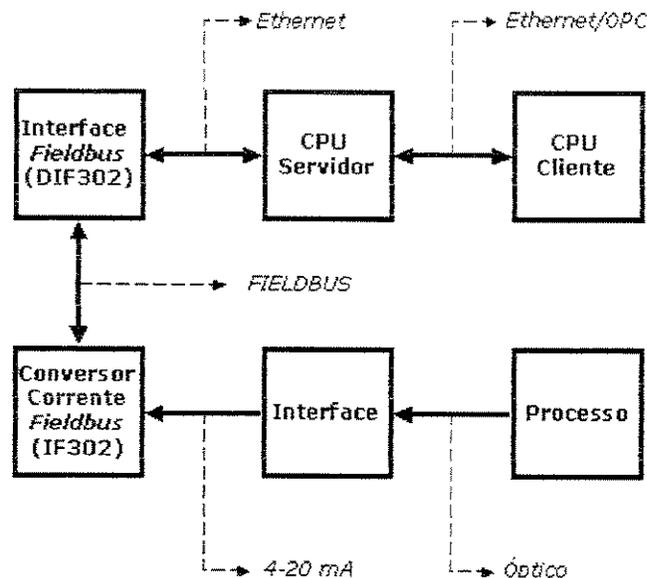


Figura 3.1 – Diagrama de Blocos do Sistema de Comunicação de Dados

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

O estudo foi realizado em um tubo de vidro de três centímetros de diâmetro, usando como líquido a água. Para criar as bolhas, um sistema de injeção de ar usando compressor de baixa potência foi utilizado. Uma válvula do tipo agulha realizou a regulagem da vazão de ar que foi injetada na tubulação.

O diagrama de blocos apresentado na Figura 3.1 descreve como está estruturado o sistema de transmissão de dados e a instrumentação no Laboratório de Controle e Automação de Processos do DESQ/FEQ/UNICAMP, bem como os meios de transmissão envolvidos e o sentido do fluxo de dados. Já a Figura 3.2 ilustra a montagem do equipamento.

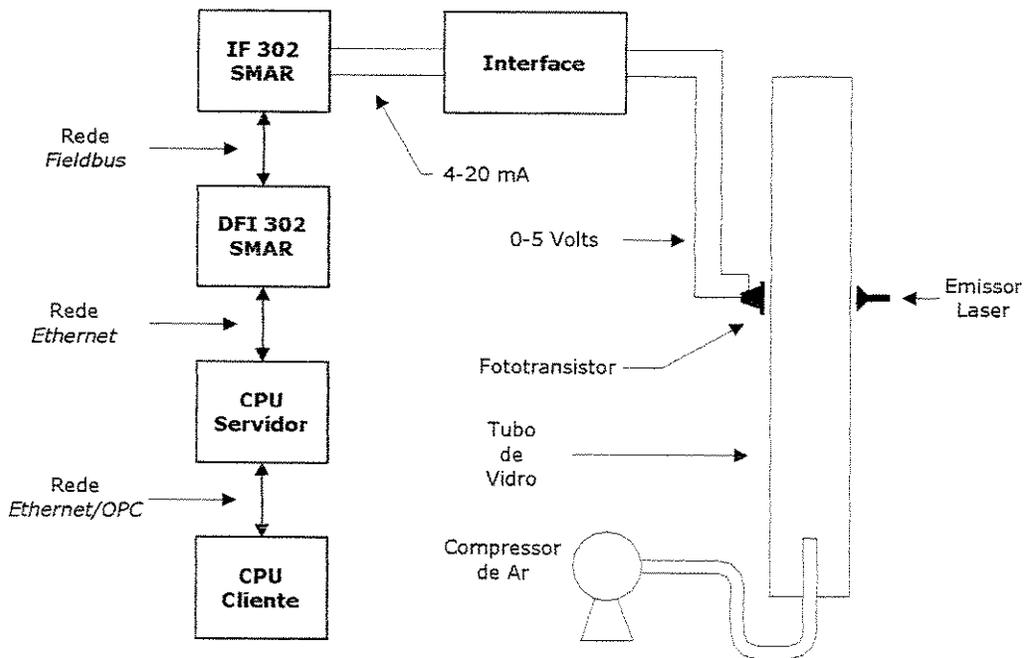


Figura 3.2 – Montagem Experimental: Sensor Pontual

A interface DFI302 permite que se trabalhe com sinais de entrada e saída do tipo discreto (digitais), analógico e também sinais *Fieldbus*. A rede *Fieldbus* foi escolhida para a transmissão dos dados provenientes do processo porque a utilização desse tipo de sistema em indústrias químicas vem crescendo rapidamente.

Foram utilizados os conversores de corrente 4-20 mA para *Fieldbus* IF302 da SMAR para interligar o sistema de detecção de bolhas com a rede *Fieldbus*. Uma interface entre a barreira óptica e o IF302 se fez necessária, tendo em vista que o sinal emitido pelo fototransistor é em tensão (0-5 Volts) e o que o IF302 recebe é um sinal em corrente (4-20 mA).

Essa interface tem uma característica de *latch* (retenção do sinal de saída), ou seja, a saída da interface somente será alterada caso exista alguma variação no sinal de entrada desse circuito.

A explicação do fluxograma da Figura 3.1 será dividida em partes, ou seja, será detalhada a parte de instrumentação (IF302 + Detector) e depois a parte de *software* juntamente com a de transmissão de dados através das redes *Ethernet*, *OPC* e *Fieldbus*.

3.2. Primeira Parte - A Instrumentação

Baseado no princípio de funcionamento dos sensores do tipo óptico, dois tipos de detectores foram desenvolvidos: o sensor pontual e o sensor multiponto. A montagem experimental ilustrada na Figura 3.2 mostra a montagem do sensor pontual. Este é composto por apenas uma fonte emissora e uma fonte receptora de luz. O outro sensor, o multiponto, é composto por 4 emissores e 4 receptores espalhados de maneira uniforme ao redor da tubulação de vidro.

A fonte emissora utilizada foi o laser devido o mesmo possuir um feixe de luz intenso e concentrado em um único ponto. Como o custo de aquisição de um diodo laser é relativamente alto e seria necessária a confecção de uma lente colimadora do feixe de luz, foi utilizado um emissor laser de baixo custo. Como esse emissor utiliza baterias para o seu funcionamento, uma modificação se fez necessária. Foi desenvolvida uma fonte de alimentação externa para que não fosse mais necessária a utilização das baterias.

Para a recepção do laser, utilizou-se um componente eletrônico chamado de fototransistor, modelo OP505D da empresa Optek, com 3 mm de diâmetro. O fototransistor pode funcionar de duas maneiras:

- Pode fornecer valores de tensão e corrente de saídas proporcionalmente a intensidade luminosa recebida;
- Pode funcionar como “chave” liga/desliga em função da presença/ausência de luz sobre o mesmo.

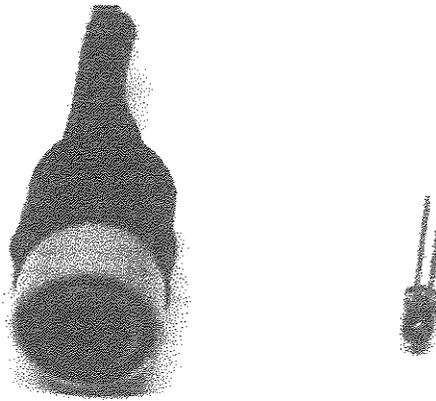


Figura 3.3 – Emissor Laser (esquerda) e o Fototransistor (direita)

Na montagem desenvolvida, o fototransistor funciona como uma chave, ou seja, quando a bolha passar por essa “barreira óptica” formada pelo laser e pelo fototransistor, o ar fará com que o laser seja difratado, desligando o fototransistor e com isso, será gerado um degrau no comportamento de estado estacionário do sistema.

Enquanto existir apenas líquido dentro da tubulação, o sinal de saída será sempre 5 volts, ou seja, ligado. A passagem da bolha de ar faz com que esse sinal caia de 5 para 0 Volts, caracterizando a passagem de uma bolha de ar pela barreira óptica, conforme o exemplo dado pela Figura 3.4.

Adicionando mais uma barreira óptica na tubulação, percebe-se uma defasagem entre os sinais para a passagem da mesma bolha, conforme é observado na Figura 3.5. Com essa defasagem, será calculada a velocidade de ascensão dessa bolha pela tubulação, pois a distância entre as barreiras é conhecida, restando somente medir a diferença de tempo entre os dois sinais.

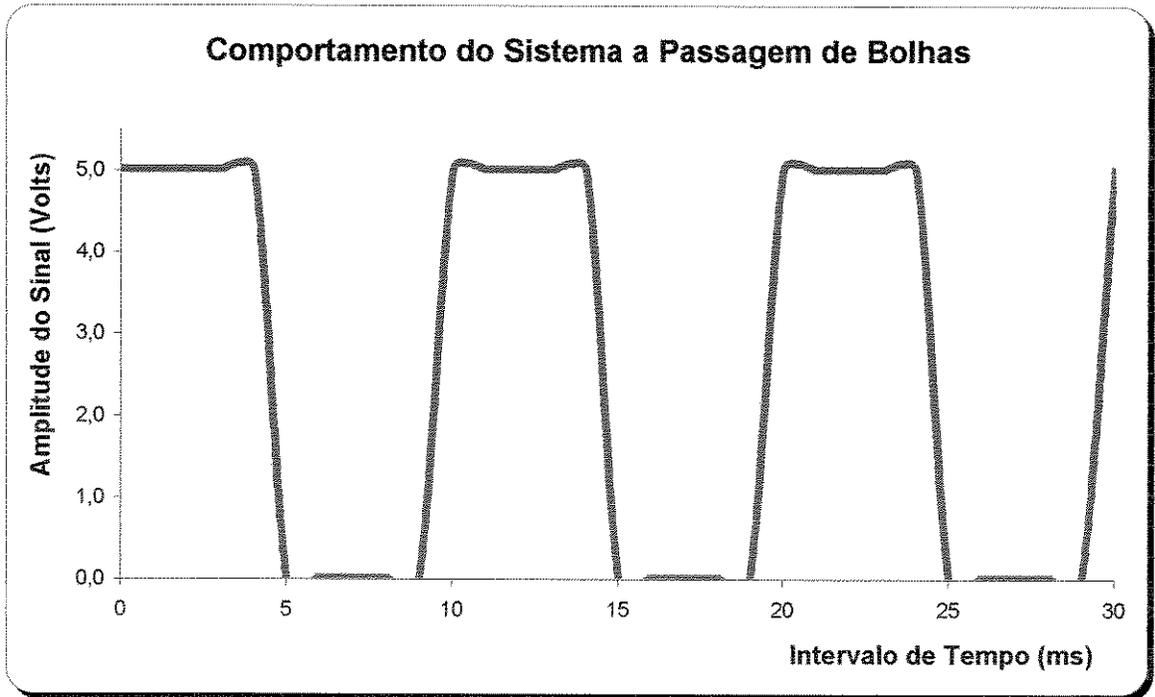


Figura 3.4 – Tensão de saída do Fototransistor para sistema com uma barreira óptica

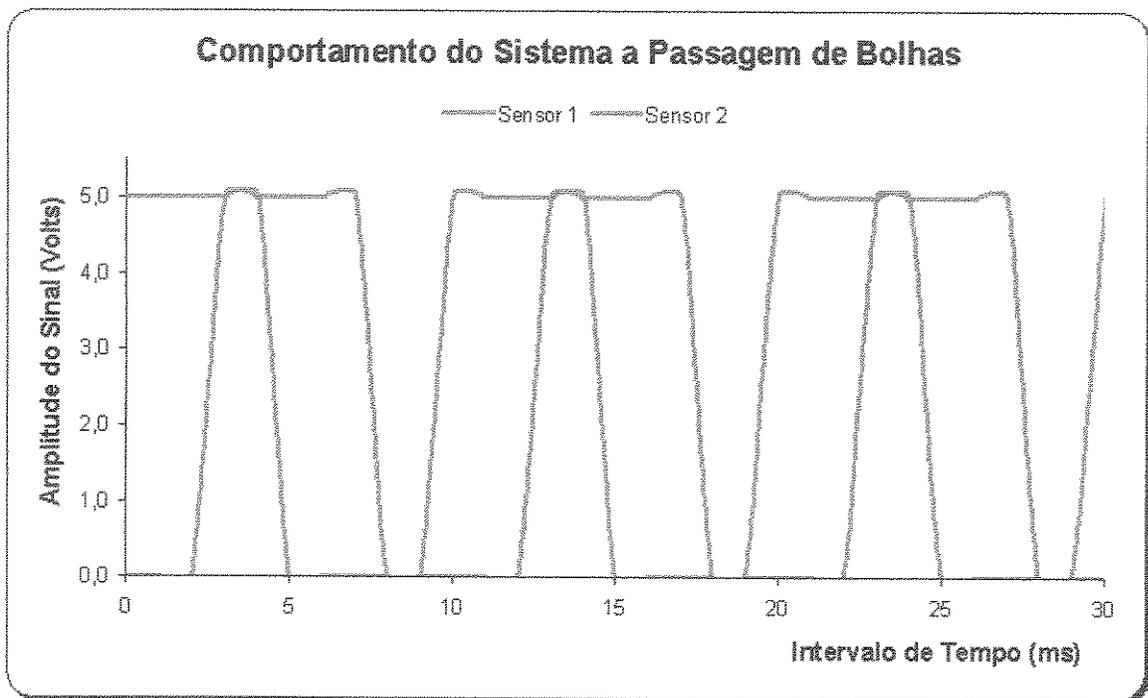


Figura 3.5 – Tensão de saída do Fototransistor para sistema com duas barreiras ópticas

Para a ligação do sensor óptico na rede *Fieldbus*, foi desenvolvida uma interface (Figura 3.6) para compatibilizar os sinais entre os sensores ópticos e o transmissor IF302 da Smar. Essa interface converte o sinal fornecido pelo sensor (que é em tensão) com o sinal que o transmissor IF302 é capaz de “entender” (variações de corrente entre 4-20 mA). Cada transmissor IF302 permite a ligação de até 3 transmissores de 4 a 20 mA.

A interface, além de converter o sinal de tensão em corrente, possui uma característica chamada de *latch* ou retenção do sinal de saída. Utilizando um *Flip Flop* do tipo JK, essa característica é obtida. Mantendo os valores de J e K em 5 volts, resulta em um comportamento do tipo *toggle mode*, ou seja, a cada evento de *clock*, que será a passagem de uma bolha, temos a inversão do nível de tensão do seu sinal de saída (0 V \Rightarrow 5 V ou 5 V \Rightarrow 0 V).

A utilização dessa inversão de nível de tensão na interface foi necessária, pois a frequência de amostragem do IF302 (75 ms) não é rápida o suficiente para conseguir detectar a passagem da bolha usando uma interface do tipo linear (sem retenção). Nessa interface linear, o tempo em que o fototransistor ficava desligado era muito pequeno, o que acabava não permitindo a leitura desse sinal pelo IF302.

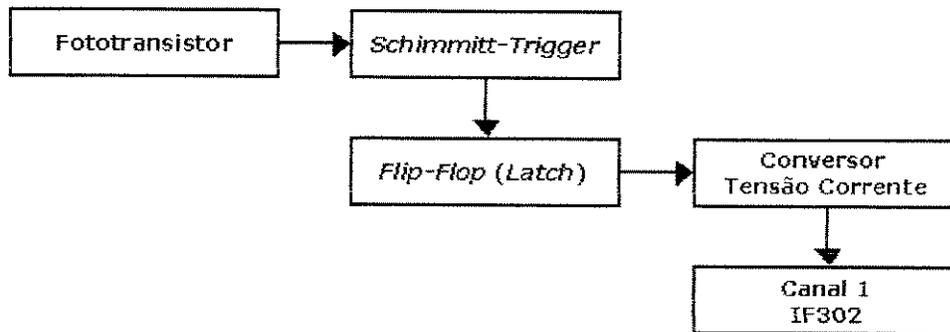


Figura 3.6 – Diagrama de Blocos do Circuito de Interface 1

A primeira parte desse circuito (da saída do fototransistor até a entrada do *Flip Flop*) é responsável pela recepção e tratamento do sinal proveniente do fototransistor. Esse sinal “passa” através do circuito *Schmitt Trigger* para eliminação de ruídos e para garantir uma amplitude de sinal que seja capaz de ser um sinal de *clock* para o *Flip Flop*. Este último é o responsável pela retenção do sinal de saída (*latch*).

A parte final do circuito (da saída do *Flip Flop* até a conexão com o IF302), realiza a conversão do sinal de tensão proveniente do *Flip Flop* para os valores de corrente entre 4 mA e 20 mA, que são os valores que o transmissor IF302 aceita, usando uma fonte de corrente regulada.

Um outro tipo de sensor, chamado de sensor multiponto também foi desenvolvido. Nesse sensor, foram utilizados quatro emissores laser e quatro fototransistores, espalhados de maneira uniforme ao redor da tubulação.

Na Figura 3.7a é mostrada a peça em PVC onde os emissores laser e os fototransistores ainda serão acoplados. Já na Figura 3.7b é mostrada a peça acoplada a tubulação, já com os fototransistores e os emissores laser acopladas a peça e devidamente ligados.

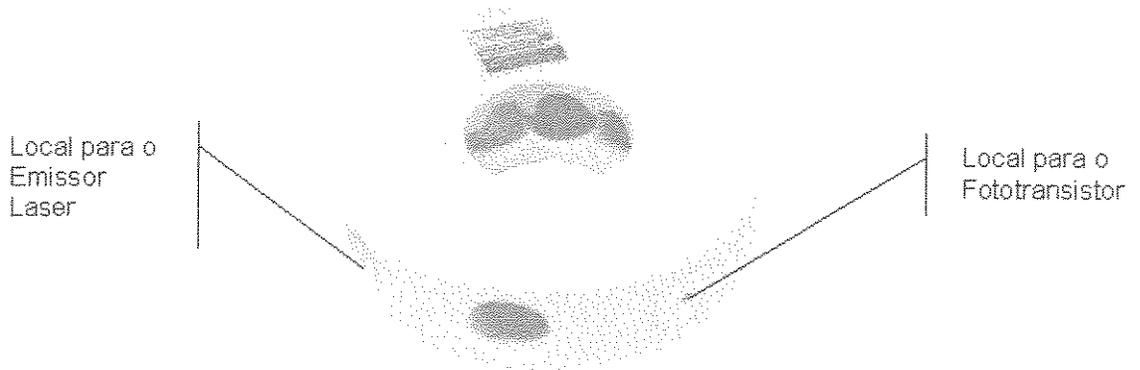


Figura 3.7a – Sensor Multiponto (base)

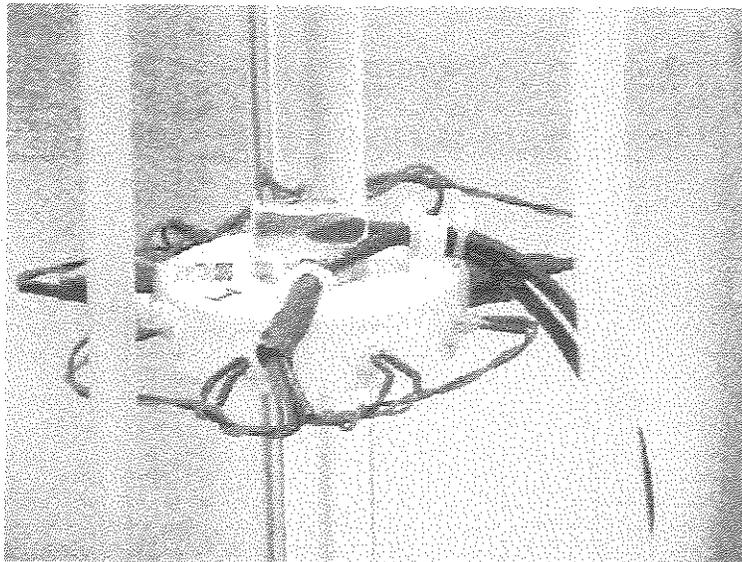


Figura 3.7b – Sensor Multiponto Acoplado a Tubulação

Para esse sensor multiponto, uma melhoria na interface entre o sensor e o IF302 foi desenvolvida, devido ao tempo de amostragem do mesmo ser um pouco elevado.

A amostragem do IF302 é realizada a cada 75 ms, ou seja, realizando-se uma leitura em t_0 no canal 1, o canal 2 será feita em t_0+75 e no canal 3 em t_0+150 . Uma nova leitura no canal 1 será realizada somente depois de 225 ms, mesmo que as outras entradas (2 e 3) não estejam sendo utilizadas. Com isso, pode-se causar perda de informações de leitura do sensor, ou seja, passar bolhas pelo sensor e o IF302 não conseguir detectar devido a esse atraso de leitura. Na figura 3.8, temos dois sinais, o de amostragem e o sinal proveniente do sensor óptico, que ilustrará o problema de funcionamento descrito acima.

Percebe-se que, no instante $t_0 = 75$ ms, o sinal proveniente do sensor está em um nível de tensão, chamado de “alto”, e na nova amostragem em $t_1 = 225$ ms, o sinal também está em um nível de tensão “alto”. Porém, o sensor acusou sete transições do nível de tensão “alto” para o nível de tensão “baixo”, e que não foram detectados pelo IF302, devido ao seu sistema de amostragem.

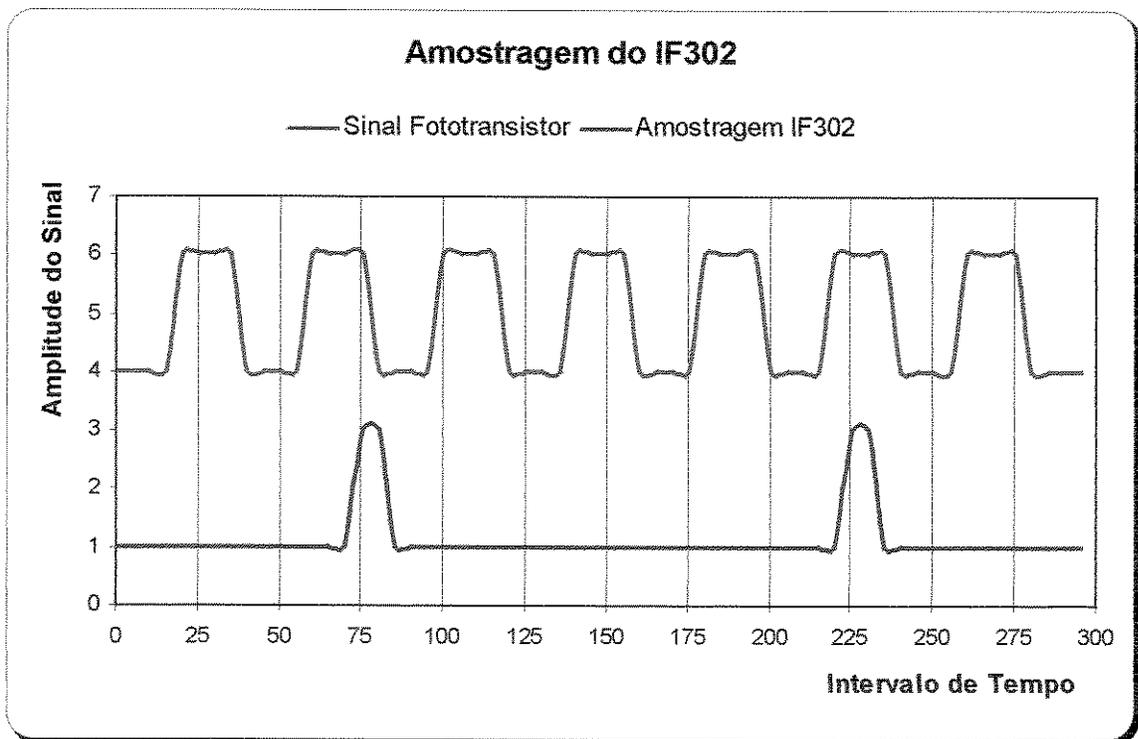


Figura 3.8 – Amostragem do Canal 1 do IF302

A nova interface desenvolvida teve como base à mesma que foi utilizada para o sensor pontual, porém realizando algumas modificações em todas as partes.

Como esse sensor passará a ter 4 fototransistores, uma lógica de detecção foi criada. Lembrando do funcionamento do fototransistor, que na presença de luz na sua base funciona como uma chave na posição ligada, temos para esse sensor multiponto, 4 chaves ligadas. Para que se tenha apenas um sinal de saída, pois o *Flip Flop* necessita de apenas uma entrada (*clock*) para mudar o estado de saída, utiliza-se a porta lógica digital *AND* (Porta E).

Relembrando o funcionamento dessa porta lógica, tem-se na Figura 3.9 o diagrama de tempos e a sua representação no circuito. As entradas dessa porta lógica são representadas pelas letras Q1 e Q2.

A saída é representada pela letra S. Perceba que a saída dessa porta somente é “ligada” quando a entrada **Q1** *AND* a entrada **Q2** estiverem ligadas.

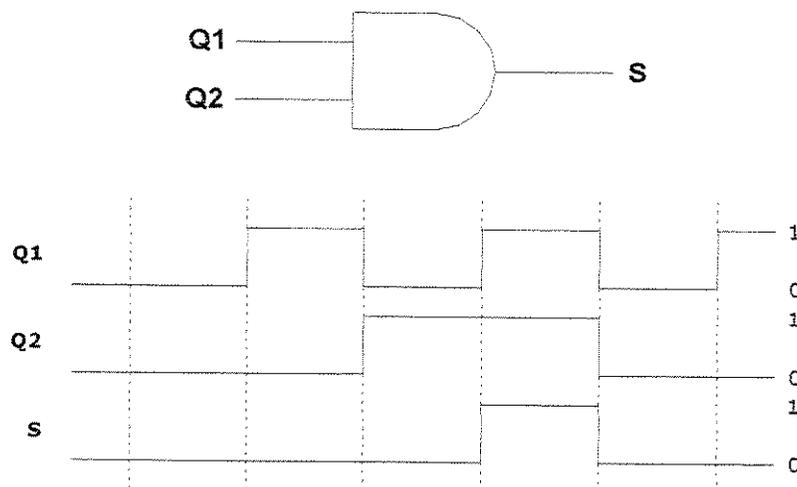


Figura 3.9 – Porta lógica AND

Com a utilização dessa porta lógica, o pulso de “desligado” que caracteriza a passagem de uma bolha pelo sensor óptico, agora é obtido interrompendo qualquer um dos quatro fototransistores e não mais apenas um só, como era no sensor pontual, conforme o esquema da Figura 3.10.

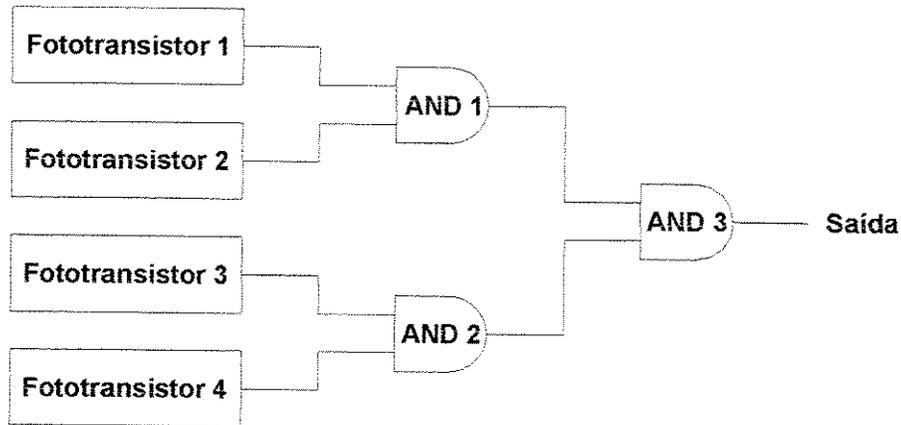


Figura 3.10 – Novo circuito de entrada usando as portas AND

Com isso, a área para detecção de bolhas foi aumentada, pois os espaços livres existentes na tubulação diminuiram com o aumento do número do conjunto de emissores laser - fototransistores, tornando esse sensor mais sensível à passagem de bolha quando comparado ao primeiro desenvolvido, que foi o sensor pontual.

Uma outra modificação visando melhorar a eficiência do sistema de detecção juntamente com o tempo de amostragem do IF302 foi realizada. Um circuito do tipo contador assíncrono foi acrescentado ao sistema, para que a cada passagem de bolha, seja gerada uma palavra (um código) de 3 bits, resultando em oito diferentes códigos. Para cada saída desse contador, foi acoplado um conversor tensão corrente.

Usando o exemplo da Figura 3.8, realizando a leitura no instante $t_0=0$ ms, a interface passa a fornecer um valor que é uma combinação de três números. Da mesma maneira, quando é realizada a leitura no instante t_0+225 ms, seria uma outra combinação, um outro código.

Isso será útil para que seja realizada a contagem de bolhas que passam pelo sensor através do software, fazendo com que diminuam as possibilidades de passagem de bolhas e o sensor não seja capaz de detectar. A Figura 3.11 mostra o diagrama de blocos da nova interface e a Figura 3.12 a interface 2 montada.

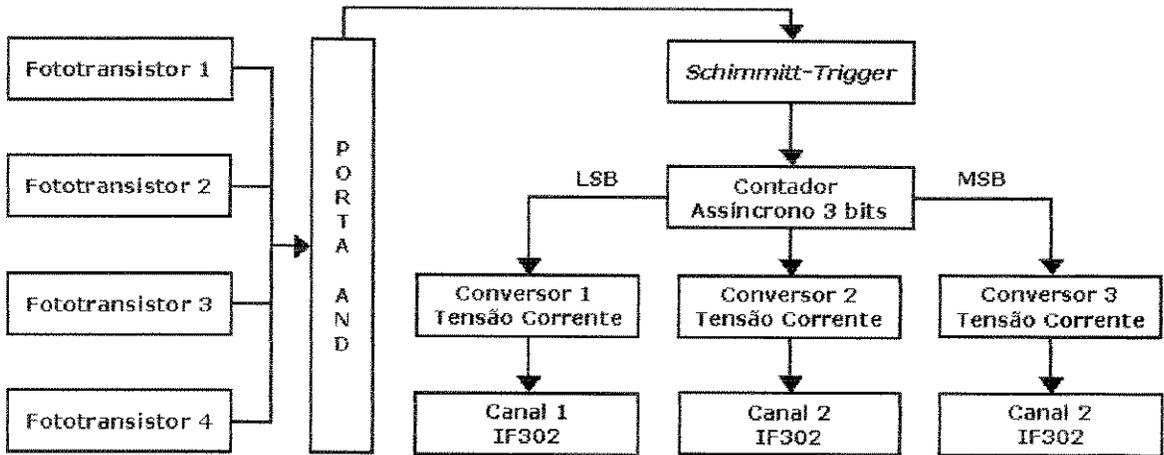


Figura 3.11 – Diagrama de Blocos da Interface 2

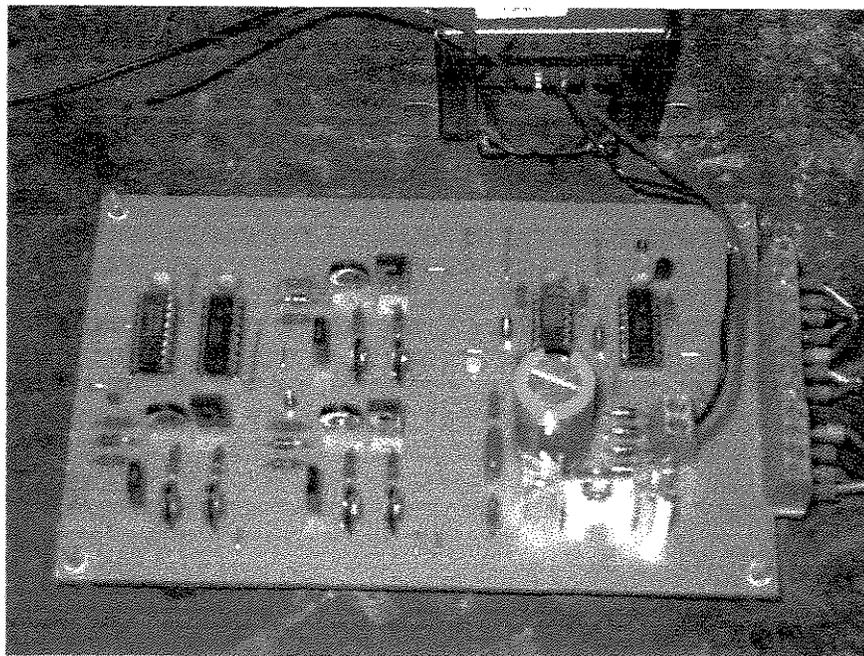


Figura 3.12 – Placa Final da Interface 2

A escolha do número de bits (três) desse contador foi devido ao fato do IF302 possuir três canais de entrada de sinal de 4-20 mA. Os índices MSB (bit mais significativo) e LSB (bit menos significativo) servem para indicar a ordem de leitura das entradas do IF302 pelo software. É através dessa seqüência de leitura, do mais significativo para o menos significativo que se garante a geração de oito combinações diferentes de valores.

O *clock* desse contador assíncrono será dado pela passagem de bolha por qualquer um dos quatro fototransistores. Com isso, um pulso de *clock* é gerado, fazendo com que o contador seja incrementado. A Tabela 3.1 mostra a seqüência dos oito diferentes códigos gerados.

Tabela 3.1 – Seqüência de contagem da Interface 2 em função da passagem de bolha

	Canal 3 (mA) - MSB	Canal 2 (mA)	Canal 1 (mA) - LSB
Combinação			
1	4	4	4
2	4	4	20
3	4	20	4
4	4	20	20
5	20	4	4
6	20	4	20
7	20	20	4
8	20	20	20

Uma análise mais detalhada da Tabela 3.1 permite que se chegue a algumas conclusões desse tipo de circuito:

- Para cada evento de passagem de bolha, o sinal do Canal 1 estará sempre sendo alterado;

- A cada duas mudanças do sinal do Canal 1, ocorrerá uma mudança do sinal do Canal 2;
- A cada duas mudanças do sinal do Canal 2 ou a cada quatro mudanças do sinal do Canal 1, temos a alteração do sinal do Canal 3.

Com o objetivo de realizar também o monitoramento e determinação da velocidade das bolhas, foi instalado um segundo sensor multiponto na tubulação, juntamente com mais um transmissor IF302. Com isso, dois sinais serão enviados ao software para que seja possível realizar esse cálculo.

Nas Figuras 3.13 e 3.14 pode-se observar a montagem final do equipamento, com os dois sensores multipontos instalados na tubulação, a caixa contendo as duas placas da interface 2 e também os conversores 4-20 mA *Fieldbus* IF302.

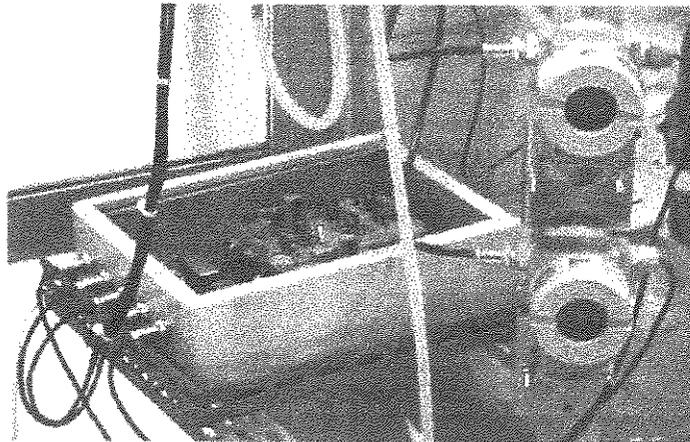


Figura 3.13 – Caixa com duas Interfaces 2 e os Transmissores IF302

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SECÇÃO CIRCULANTE

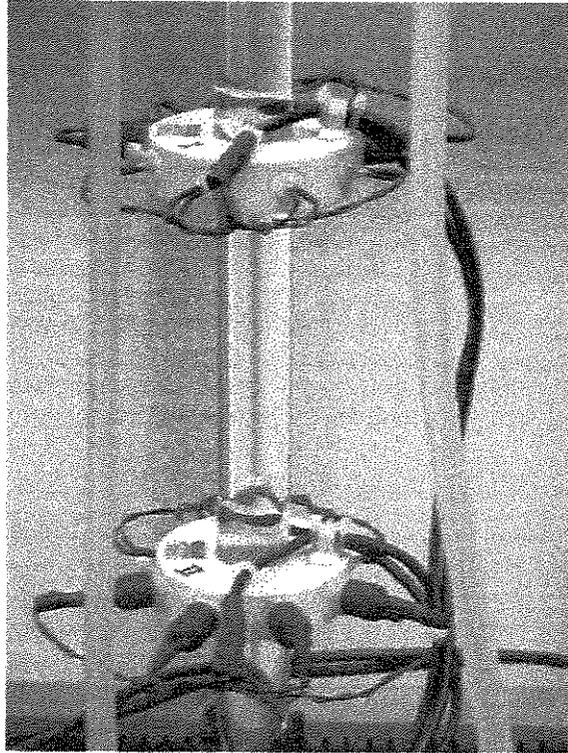


Figura 3.14 – Detalhe dos Sensores Multipontos Instalados na Tubulação

3.3. Segunda Parte – O Software e a Transmissão de Dados

Nessa parte, será abordada a transmissão de dados a partir do IF302, ou seja, a rede *Fieldbus*. Uma vez desenvolvida a instrumentação para o sensor multiponto, representada pela interface 2, lembrando o diagrama de blocos da Figura 3.2, será analisada a forma de transmissão dos dados do campo para a sala de controle.

Através da CPU 1, que será chamada de computador servidor, foi desenvolvida toda a configuração da rede *Fieldbus* e é através desse servidor que as informações são transmitidas da rede *Ethernet/OPC* para o DF1302, sendo que este último é quem gerencia o tráfego de informações do *Fieldbus*.

Diante da flexibilidade que o OPC permite, foi desenvolvido um software na linguagem Visual Basic para o tratamento dos dados provenientes da instrumentação. Esse programa foi desenvolvido e configurado para ser utilizado na CPU 2, que será chamada de computador cliente.

O funcionamento é basicamente o seguinte: o computador cliente está conectado ao computador servidor através da rede *Ethernet* local. No computador servidor é que estão todas as informações que são recebidas do campo pelo DF1302, e que são repassadas ao computador cliente. A Figura 3.12 mostra a tela principal do programa desenvolvido. A versão final do programa encontra-se no Anexo 1.

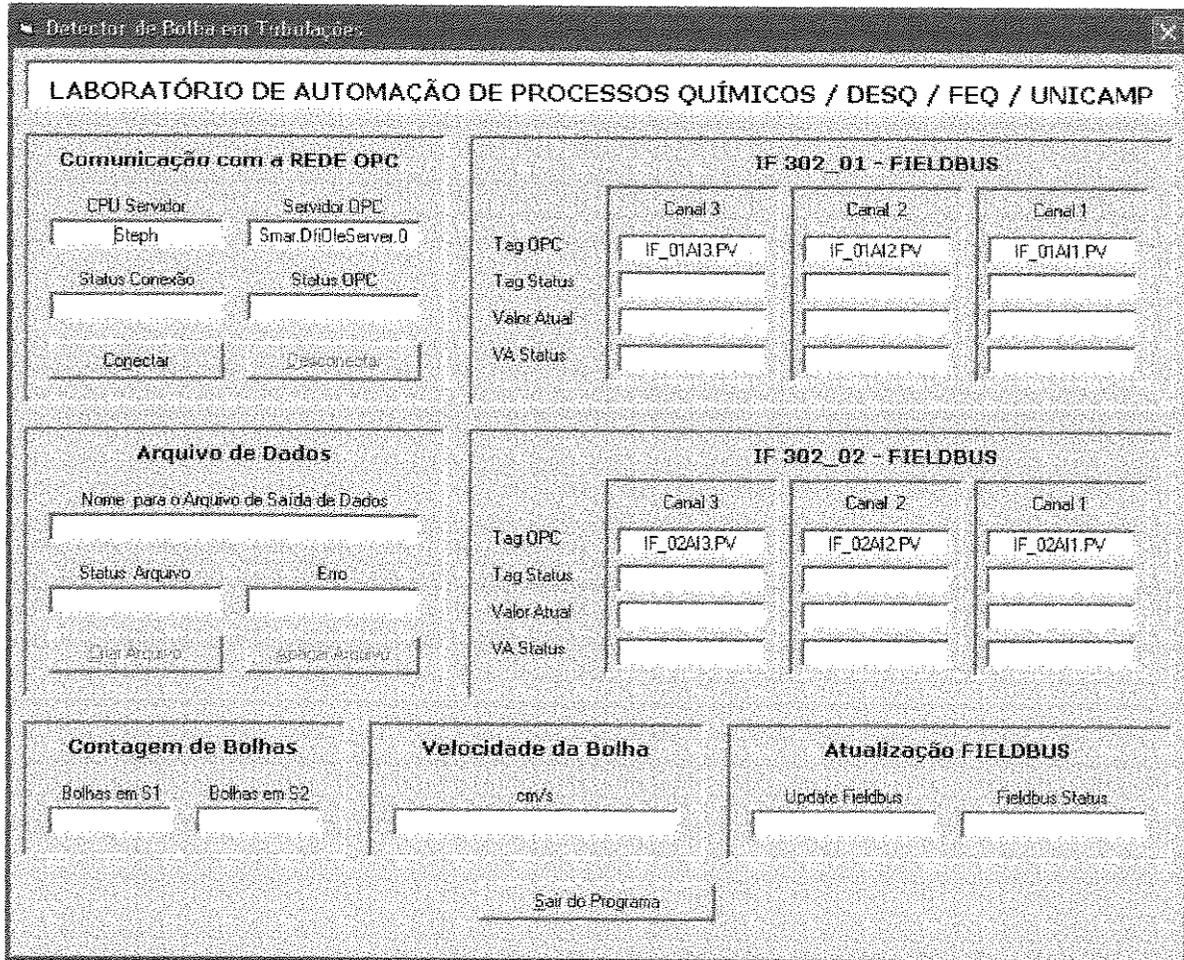


Figura 3.15 – Tela principal do programa desenvolvido

Na tela do programa, percebe-se campos separados. Cada um desses campos realiza uma função específica, detalhada a seguir:

- **Comunicação com a Rede OPC:** é o campo responsável pela conexão do programa com a rede OPC, para o programa ter acesso as *tag's* da rede *Fieldbus*. Nesse campo é escolhido o nome do computador servidor que será realizada a conexão;
- **Arquivo de Dados:** o programa permite que seja criado um arquivo de dados, no formato de arquivo de texto (TXT), com os valores atuais de cada canal de cada IF302 instalado em campo;
- **Entradas do IF302:** é nessa parte do programa onde se têm as entradas propriamente ditas do IF302. Através do *tag OPC*, escolhe-se o que se deseja “ler” dos transmissores instalados em campo. Tem-se, portanto, a leitura dos três canais de cada IF302 instalado em campo;
- **Contagem de Bolhas:** o programa fornece ao usuário um número de bolhas que passam pelos sensores, desde que a frequência das mesmas seja baixa;
- **Velocidade da Bolha:** a instalação de dois sensores multipontos permitiu o cálculo da velocidade de passagem da bolha pelos sensores. Esses dois sensores são separados por uma distância L conhecida (Δ_{Sensores}). Mede-se então o intervalo de tempo em que a mesma bolha aciona o sensor multiponto 1 (t_1) e n segundos depois o sensor multiponto 2 (t_2). Usando a fórmula do cálculo da velocidade média, obtém-se o valor da velocidade de ascensão da bolha na tubulação:

$$V_{\text{MÉDIA}} = \frac{\Delta_{\text{Sensores}}}{(t_2 - t_1)}$$

3.4. Conclusão

O objetivo proposto por essa dissertação foi alcançado, tendo em vista que foram desenvolvidos dois tipos de sensores (pontual e multiponto).

O sensor pontual deixava uma grande área da tubulação sem cobertura, podendo causar imprecisão na detecção de bolhas pequenas.

Buscando uma precisão semelhante a do sensor *Wire Mesh* apresentado por *Prasser (2000)* foi desenvolvido o sensor do tipo multiponto, onde a precisão foi aumentada com o acréscimo de mais três conjuntos de emissores e receptores, totalizando num sistema composto por 4 emissores laser e 4 fototransistores.

Juntamente com a melhoria do sistema óptico, algumas modificações foram realizadas na interface buscando aumentar a precisão. Essa interface é responsável por compatibilizar os sinais e permite a ligação do sensor óptico com o transmissor IF302, fazendo com que esse sistema de detecção trabalhe na rede *Fieldbus*.

Capítulo 4 – Resultados Experimentais

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos com as montagens dos sensores pontual e multiponto. Com a montagem desses sensores na tubulação em vidro e utilizando-se um compressor para geração das bolhas internas a tubulação, foram realizados testes experimentais para a análise de desempenho dos mesmos em relação a detecção, contagem e determinação da velocidade das bolhas.

4.1. Detecção de Bolhas usando o Sensor Pontual

Os resultados apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2 foram retirados usando-se o sensor pontual para a detecção. O sensor pontual foi construído de forma que o seu feixe de luz ficasse focado bem no centro da tubulação. A utilização desse tipo de sensor fez com que algumas bolhas de tamanho reduzido não pudessem ser detectadas. Através de observações do movimento de ascensão da bolha ao longo da tubulação, percebeu-se que ela possui um movimento aleatório. Devido a esse efeito, as bolhas pequenas acabavam, ora passando pelo centro, ora pelas extremidades, o que gerava uma imprecisão na contagem e na detecção das mesmas, pois elas acabavam desviando do feixe laser emitido e não o interrompiam.

Através da Tabela 4.1, observa-se que este tipo de sensor possui uma boa resposta a passagem de bolhas de diâmetro grande, quase igual ao diâmetro da tubulação e *slugs* (bolhas que preenchem completamente o diâmetro da tubulação), apresentando um erro de leitura pequeno.

Na Tabela 4.2, encontram-se estão os valores da contagem realizada para bolhas de diâmetro reduzido. O intervalo de tempo utilizado para a contagem total foi de 5 minutos e a frequência de passagem de bolhas constante.

Tabela 4.1 – Resultados do Sensor Pontual – Bolhas de Diâmetro Grande e *Slugs*

Aquisição	Contagem Manual	Contagem Automática	%Erro
1	50	47	6,0%
2	53	49	7,5%
3	44	41	6,8%
4	48	45	6,3%

Tabela 4.2 – Resultados do Sensor Pontual – Bolhas de Diâmetro Reduzido

Aquisição	Contagem Manual	Contagem Automática	%Erro
5	45	29	35,5%
6	47	30	36,2%
7	40	27	32,5%
8	50	34	32%

Analisando a Tabela 4.2, percebe-se que o sensor do tipo pontual não possui uma boa resposta para detectar bolhas de diâmetros reduzidos, apresentando um erro de leitura elevado. Já para a detecção de bolhas grandes e *Slugs*, o seu desempenho é melhor, apresentando um erro de leitura da ordem de 6,7%.

Os gráficos das Figuras 4.1 e 4.2 representam a aquisição de número 3 e número 7, respectivamente, realizada pelo programa desenvolvido em Visual Basic. O programa realiza a gravação dos valores num arquivo do tipo texto, permitindo a sua utilização no Excel para a confecção dos gráficos. Cada transição dos valores de 20mA para 4mA ou de 4mA para 20 mA corresponde à passagem de uma bolha pelo sensor. Pode-se perceber que os estados estão bem definidos (4 ou 20 mA), sem valores intermediários.

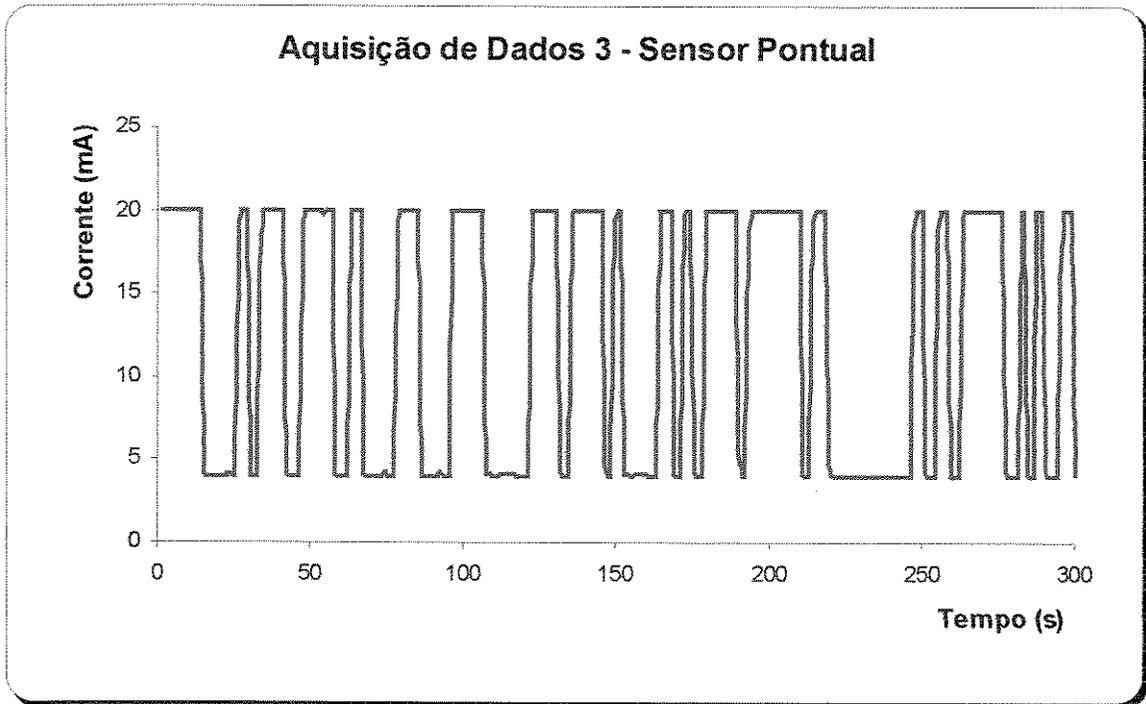


Figura 4.1 – Aquisição de Dados 3, Sensor Pontual – Bolhas com Diâmetro Reduzido

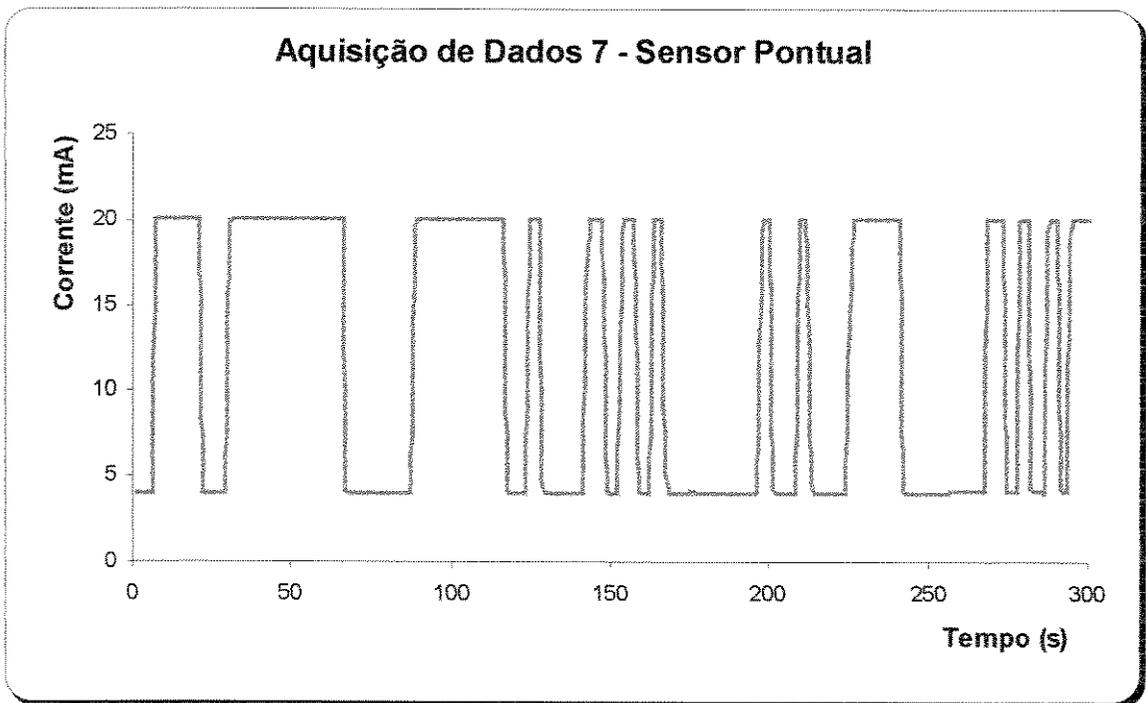


Figura 4.2 – Aquisição de Dados 7, Sensor Pontual – Bolhas com Diâmetro Grande e Slugs

Já a Figura 4.3 mostra uma aquisição onde apareceram estados intermediários, indicados pelos círculos em preto, aos estados normais (4 ou 20mA). Isto ocorre devido à baixa frequência de conversão analógica-digital que o conversor IF302 opera. Estes estados intermediários aparecem quando a frequência de bolhas aumenta, fazendo com que o sistema não seja capaz de realizar a propriedade de contagem, porém mantendo ainda assim a sua função inicial, que é de detecção de bolhas.

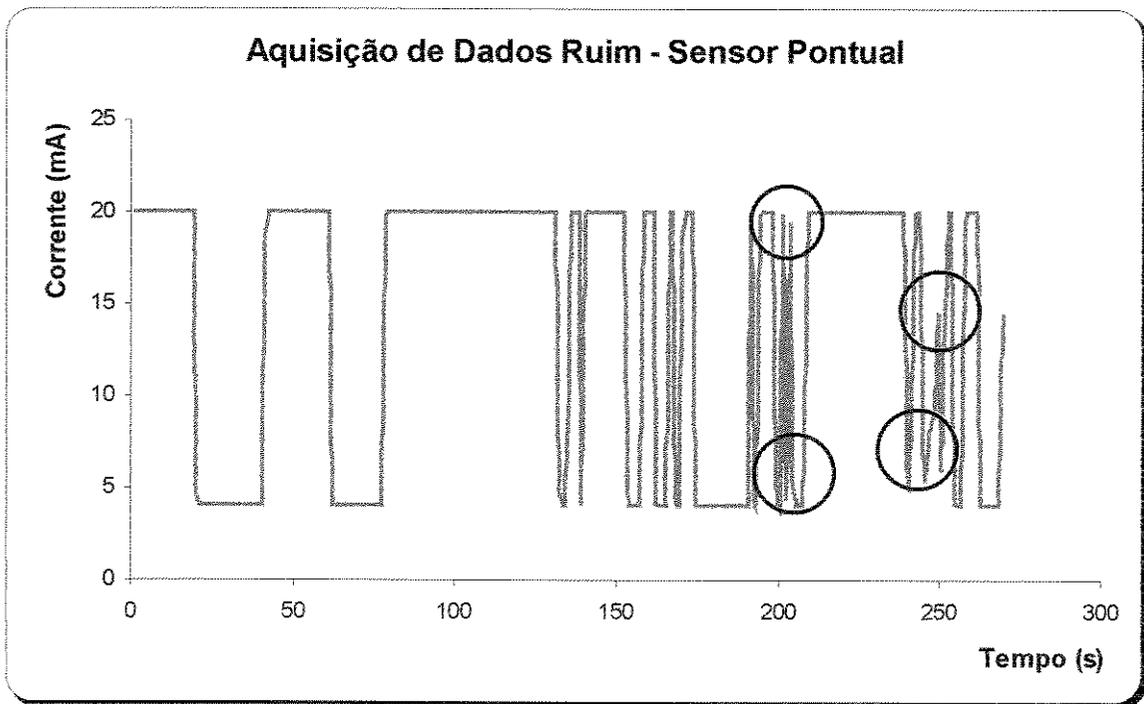


Figura 4.3 – Aquisição de Dados Ruim com o Sensor Pontual

A Figura 4.4 mostra uma aquisição onde, apesar de apresentar um estado intermediário (assinalada pelo círculo), pode ser considerada satisfatória. Esse estado intermediário representa a passagem de uma bolha na seqüência da outra, em um curto intervalo de tempo, fazendo com que o estado da interface 1 seja alterado antes da rede *Fieldbus* ser atualizada.

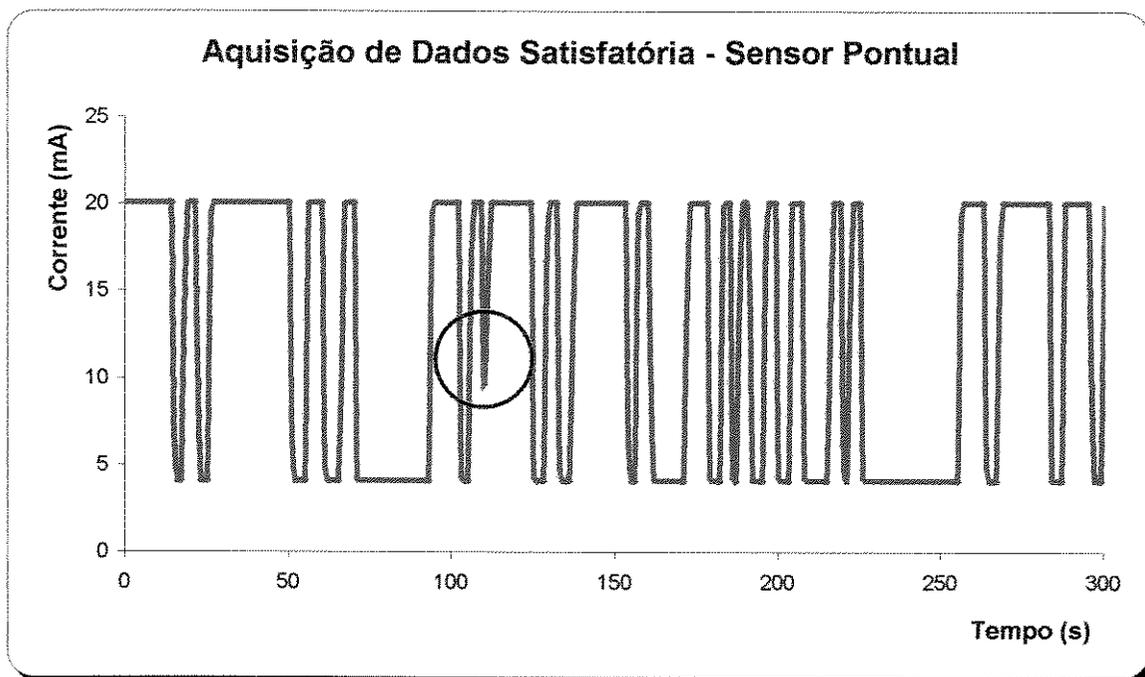


Figura 4.4 – Aquisição de Dados Satisfatória, Sensor Pontual

4.2. Detecção de Bolhas usando o Sensor Multiponto

Visando minimizar o problema que o sensor pontual apresentava para a detecção de bolhas de diâmetro reduzido foi confeccionado o sensor multiponto. A área coberta pelo laser emitido foi aumentada. O diâmetro da tubulação foi dividido em 8 partes iguais, formando uma barreira óptica, diminuindo assim o espaço livre na tubulação que existia com o sensor pontual. Com o aumento da área óptica, conseguiu-se melhorar a sensibilidade e a precisão na detecção a passagem de bolhas pela tubulação.

A Figura 4.5 mostra uma representação esquemática comparativa do sensor do tipo pontual com o sensor do tipo multiponto, onde é possível perceber o aumento da área sensora, representada pelas linhas em vermelho.

Existe a possibilidade ainda da bolha de ar não ser detectada mesmo com o aumento de sensibilidade provocado pelo sensor multiponto, porém ela é bem menor quando comparada com o sensor pontual.

Isso poderá ser observado nos ensaios realizados, que comparam a contagem automática com a contagem manual das bolhas, que são apresentados logo a seguir.

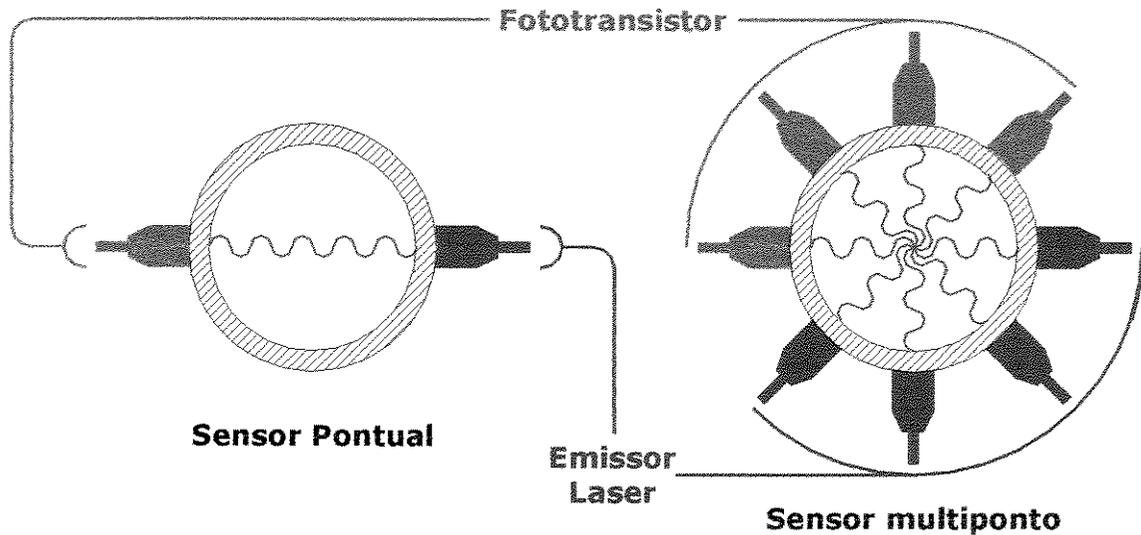


Figura 4.5 – Comparação entre os Sensores Pontual e Multiponto

O mesmo teste realizado com o sensor pontual foi realizado também com o sensor multiponto. Da mesma forma que o teste anterior, foi utilizada uma frequência constante de bolhas durante um intervalo de tempo de 5 minutos. As Tabelas 4.3 e 4.4 mostram respectivamente, os resultados obtidos para bolhas com diâmetros grandes e *slugs* e para bolhas de tamanho reduzido.

Analisando as tabelas, percebe-se que esse tipo de sensor possui um desempenho semelhante para a detecção de bolhas pequenas e grandes.

Tabela 4.3 – Resultados do Sensor Multiponto – Bolhas do tipo *Slug* e de Diâmetro Grande

Aquisição	Contagem Manual	Contagem Automática	%Erro
9	27	26	3,7%
10	32	30	6,3%
11	25	24	4,0%
12	29	27	6,9%

Tabela 4.4 – Resultados do Sensor Multiponto – Bolhas de Diâmetro Reduzido

Aquisição	Contagem Manual	Contagem Automática	%Erro
13	45	43	4,5%
14	47	44	6,4%
15	50	48	4,0%
16	43	41	4,7%

As Figuras 4.7 e 4.8 mostram uma aquisição realizada utilizando-se o sensor multiponto. A amplitude do sinal, proveniente de cada canal do IF302, tem uma variação desde 4mA até 20 mA. Os índices MSB (*Most Significant Bit*) e LSB (*Less Significant Bit*) são as saídas do contador assíncrono que existe na interface 2 e foram ligados respectivamente ao canal 3 e ao canal 1 do IF302.

Com o objetivo de mostrar que o funcionamento do conjunto sensor multiponto + interface 2 está de acordo com o do contador assíncrono descrito no Capítulo 2, foram traçadas duas retas na Figura 4.6 (A e B) e na Figura 4.7 (C e D) cruzando os sinais dos três canais (1, 2 e 3), cujos valores são representados na Tabela 4.5:

Tabela 4.5 – Valores Instantâneos do Sistema de Detecção

Reta	Canal (CH) 3 (mA)	Canal (CH) 2 (mA)	Canal (CH) 1 (mA)
A	20	4	4
B	4	20	20
C	20	20	4
D	4	20	20

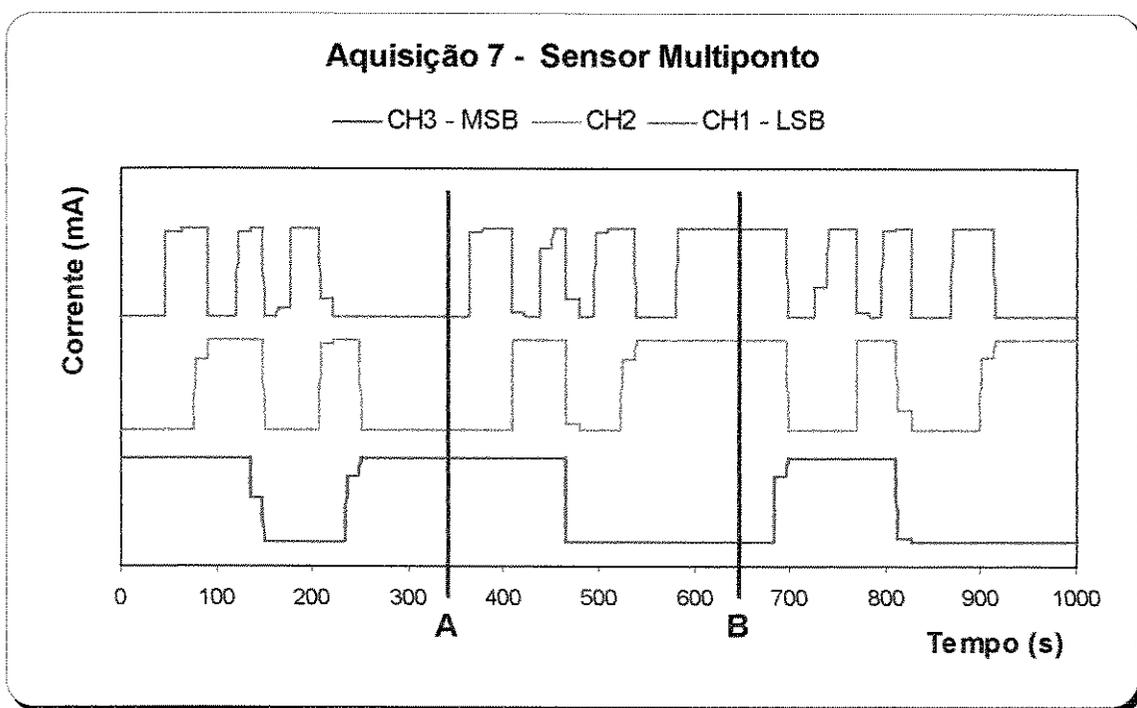


Figura 4.6 – Aquisição de Dados 1, Sensor Multiponto

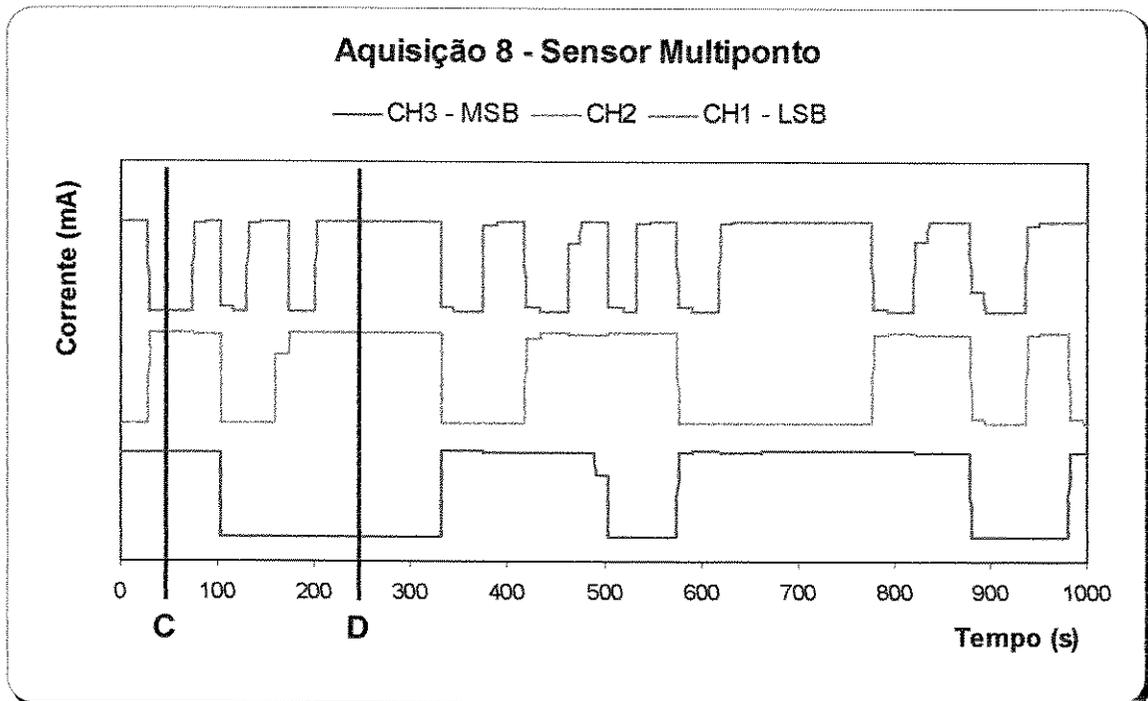


Figura 4.7 – Aquisição de Dados 2, Sensor Multiponto

Para que seja verificada a quantidade de bolhas que passaram no intervalo de tempo representado pelos pares de retas A – B e C – D, a Tabela 4.6 é apresentada. Ela mostra o funcionamento do contador assíncrono com a sua lógica de contagem.

Comparando os valores associados às retas apresentados pela Tabela 4.5 com os estados apresentados pela Tabela 4.6, uma associação pode ser realizada. Para o primeiro intervalo de tempo, representado pelo par de retas A – B, o estado associado para a reta A é o estado 5 e para a reta B, o estado 4.

Como a seqüência de contagem é sempre crescente, no intervalo de tempo em estudo, o contador foi incrementado 7 vezes, passando do estado 5 para o estado 4.

Tabela 4.6 – Funcionamento do Contador Assíncrono

	Canal 3 (mA)	Canal 2 (mA)	Canal 1 (mA)
<i>Estado</i>			
1	4	4	4
2	4	4	20
3	4	20	4
4	4	20	20
5	20	4	4
6	20	4	20
7	20	20	4
8	20	20	20

Lembrando que a passagem de bolhas através do sensor multiponto é a responsável pelo incremento do contador assíncrono, ou seja, a passagem de bolhas é o *clock* do contador, para que o contador fosse incrementado 7 vezes, passou pelo sensor óptico 7 bolhas no intervalo de tempo representado pelo par de retas A – B.

A análise do par de retas C – D é feita da mesma maneira. O estado associado a reta C é o estado 7 e o estado associado a reta D é o estado 4, o que resulta num incremento do contador em 5 vezes, representando a passagem de 5 bolhas pelo sensor multiponto no intervalo de tempo representado pelo par de retas C – D.

4.3. Determinação da Velocidade das Bolhas

Com o objetivo de medir a velocidade de ascensão da bolha na tubulação, um segundo sensor multiponto foi instalado na tubulação. Visando comparar a precisão entre os sensores, a Tabela 4.7 mostra a contagem realizada pelos sensores comparando com a contagem manual realizada num intervalo de 5 minutos, com uma frequência de passagem de bolhas constante.

É possível que uma bolha seja detectada pelo sensor 1, mas não seja detectada pelo sensor 2 e vice versa, o que acaba gerando as diferenças apresentadas nas contagens automáticas realizadas são ocasionadas. Apesar do sensor 1 e 2 possuírem o mesmo projeto, os componentes e materiais utilizados possuem pequenas diferenças entre si, podendo influenciar no desempenho dos mesmos.

Além disso, apesar do aumento da precisão proporcionada pelo sensor multiponto, o feixe laser não consegue cobrir a tubulação totalmente, fato que pode ser observado pela Figura 4.5. Na figura percebe-se que, no centro da tubulação, os espaços vazios (sem atuação do sensor) são menores do que nas paredes da tubulação. Levando em consideração que a bolha possui um comportamento aleatório dentro da tubulação, as chances da bolha não ser detectada são maiores, caso ela passe através dos sensores mais próxima a parede da tubulação. Dessa forma, as diferenças existentes nas contagens manual e automática realizadas pelos sensores 1 e 2 são diferentes em algumas aquisições, pois a bolha pode ser detectada pelo sensor 1 mas não pelo sensor 2, e vice versa.

Tabela 4.7 – Resultados do Sensor Multiponto

Aquisição	Contagem Manual	Contagem Automática			
		Sensor 1	Erro 1	Sensor 2	Erro 2
1	40	40	0%	30	25%
2	45	30	33%	45	0%
3	100	80	20%	75	25%
4	50	40	20%	50	0%
5	48	42	12,5%	44	8,3%
6	64	58	9,3%	62	3%

Na Figura 4.8 podemos observar dois sinais, com uma pequena defasagem de tempo entre eles. Essa defasagem é o intervalo de tempo em que a mesma bolha levou para acionar o Sensor 1 (t_k) e depois o Sensor 2 (t_{k+1}). A diferença existente em amplitude é muito pequena e se deve à diferença de ajuste da fonte de corrente existente na Interface 2.

Foram utilizados apenas os sinais do canal 1 (LSB) dos dois transmissores IF302 para mostrar a defasagem entre os sinais, porém essa defasagem ocorre também para o canal 2 e 3 (MSB).

Essa defasagem de tempo (Δt) entre os dois sensores é também calculada pelo programa em Visual Basic. Como a distância (Δs) entre os dois sensores pontuais é conhecida (17 cm), utilizando-se a fórmula da velocidade média (Eq. 1) pode-se calcular a velocidade de passagem da bolha:

$$(1) \quad V_{\text{média}} = \frac{\Delta s}{(t_{K+1} - t_K)}$$

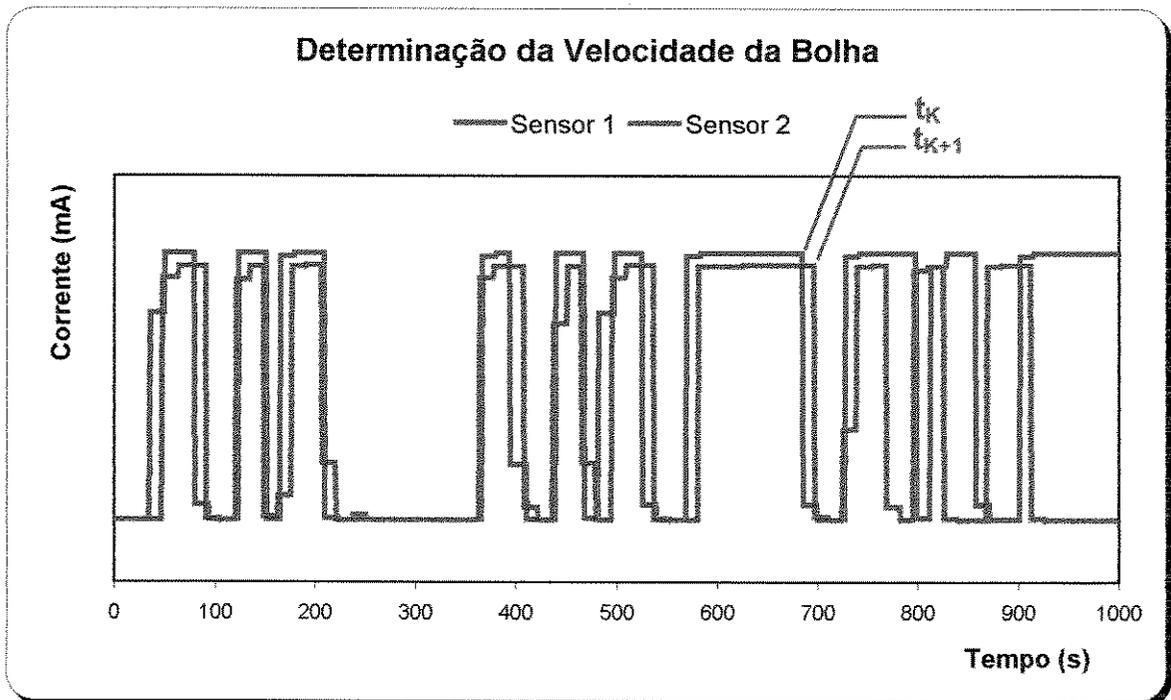


Figura 4.8 – Aquisição de Dados para Determinação da Velocidade usando o Sensor Multiponto

Após vários ensaios, sempre passando bolhas isoladas e sem variar as condições de operação do compressor de ar, o intervalo de tempo Δt foi da ordem de 1,1s. Com isso, foi possível determinar um valor médio de velocidade de passagem dessas bolhas no sistema montado, que foi de aproximadamente 15 cm/s.

4.4. O Processamento do Sinal

O atraso de sinal provocado pela interface 1 e 2 está em torno de 120 μs , valor determinado através da soma dos tempos de atraso de cada componente envolvido na construção das interfaces.

O atraso total, ou seja, desde o momento de passagem da bolha na tubulação até o aparecimento do evento de passagem na tela do programa desenvolvido em Visual Basic foi de 1,8 s. A Figura 4.9 mostra todas as etapas da transmissão do sinal, desde o sensor óptico até o computador cliente, onde está o programa desenvolvido.

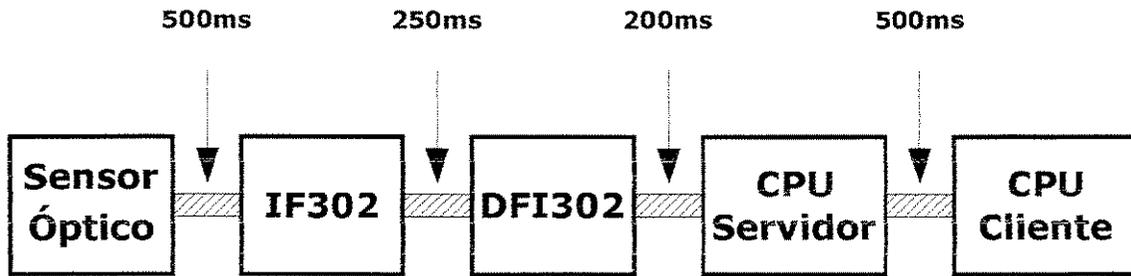


Figura 4.9 – Tempos de Atualização de Cada Etapa do Sistema

Percebe-se uma pequena diferença entre a soma de todas as atualizações envolvidas em cada etapa (1,45 s) com o medido, que foi em torno de 1,8 s. Essa diferença é justificada pelo processamento realizado pelo programa em Visual Basic, que não foi computado na soma.

Como os valores envolvidos em cada atualização são da ordem de milissegundos, o tempo de atraso proporcionado pela Interface se torna desprezível, pois é da ordem de microsegundos.

4.5. Conclusão

Analisando os resultados obtidos, conclui-se que tanto o sensor pontual, como o sensor multiponto possui um bom desempenho para detectar bolhas grandes e *slugs*, porém o sensor multiponto seria o mais indicado para ser utilizado, pois o seu desempenho é semelhante na detecção de bolhas pequenas e também de bolhas grandes.

Apesar do sistema *Fieldbus* não possuir uma atualização rápida, fazendo com que esse sistema não seja o mais indicado para analisar as propriedades da bolha em frequências elevadas (como velocidade e diâmetro), a sua utilização está crescendo muito ultimamente em indústrias químicas, por possuir muitas vantagens, apresentadas no Capítulo 2.

Sendo assim, o conjunto *Fieldbus* – Sensor Multiponto é um sistema que possui um desempenho muito bom como detector de bolhas, qualquer que seja a frequência e o diâmetro de bolha.

Capítulo 5 – Conclusão e Sugestões de Trabalhos Futuros

5.1. Conclusão da Tese

O trabalho desenvolvido nessa dissertação de mestrado teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema óptico de detecção de bolhas em tubulações utilizando fotosensores. Como fonte emissora de luz, foi utilizado um emissor laser de baixo custo. Para a recepção do mesmo, utilizaram-se fototransistores.

A vantagem em se utilizar um sistema de detecção de bolhas através de uma barreira óptica é eliminar a necessidade do sensor estar em contato com o líquido que está escoando pela tubulação, o que geralmente é desejável nas indústrias químicas. Um sensor em contato com o líquido da tubulação necessita a interrupção do processo para manutenção e limpeza do mesmo, desnecessário em um sensor do tipo óptico. Além disso, o contato com do sensor com o líquido poderia contamina-lo quimicamente.

No presente trabalho, dois tipos de sensores ópticos foram desenvolvidos. O primeiro deles foi chamado de sensor pontual, composto por apenas um emissor laser e um fototransistor. O segundo, buscando uma precisão semelhante a do sensor *Wire Mesh* apresentado por Prasser (2000) foi desenvolvido o sensor do tipo multiponto, onde a precisão de detecção foi aumentada com o acréscimo de mais três conjuntos de emissores e receptores, totalizando num sistema composto por 4 emissores laser e 4 fototransistores.

A análise dos resultados obtidos experimentalmente com os dois tipos de sensores (pontual e multiponto) permite que sejam levantados alguns pontos importantes:

- Ambos os sensores apresentaram resultados bastante satisfatórios quando submetidos à detecção de bolhas grandes e *slugs*, porém de uma forma geral, o sensor multiponto seria o mais indicado para ser utilizado, pois consegue detectar com uma precisão maior, bolhas de diâmetro menor;

- Conforme discutido no Capítulo 4, existe uma pequena diferença de precisão entre os sensores do tipo multiponto. Este fato pode ser justificado pela diferença que existe entre os componentes eletrônicos utilizados, pois apesar de serem do mesmo tipo, pequenas diferenças de fabricação podem existir entre eles. Além disso, existe o fato que apesar do aumento da precisão proporcionada pelo sensor multiponto, o feixe de luz não consegue cobrir a tubulação totalmente. Levando o fato que a bolha possui um comportamento aleatório dentro da tubulação, o sensor 1 pode detectar essa bolha, mas o sensor 2 não, e vice versa;
- Para que o sistema funcione não somente como detector de bolhas, mas também realize a contagem e determine a velocidade das bolhas, a frequência de bolhas não pode ser maior que 0,25 Hz, pois o sistema montado opera com uma frequência de amostragem de 0,5 Hz;
- O sistema montado funciona bem como detector, qualquer que seja a frequência de bolha utilizada. Sua montagem é de baixo custo e apresenta a facilidade de ser utilizado com redes do tipo *Fieldbus*;

5.2. Sugestões de Trabalhos Futuros

Para que sejam realizadas com uma precisão maior a contagem e a medição da velocidade, a utilização de um CLP (Controlador Lógico Programável) seria mais indicada, pois o tempo de conversão analógica-digital dos mesmos é de aproximadamente 1 milissegundo. Outra possibilidade seria a utilização de um sistema dedicado utilizando um microcontrolador para o tratamento do sinal proveniente do sensor multiponto, antes de enviá-lo para o conversor IF302. Sugere-se esta atividade para futuros trabalhos onde deverá ocorrer o desenvolvimento tanto do hardware, como do software necessário para que esse microcontrolador realize as funções desejadas utilizando alguns dos conceitos aplicados no presente trabalho.

Bibliografia Utilizada

- ✓ ASSUMPCÃO, Milton Mira. *Microsoft Visual Basic 6.0 – Guia do Programador*. São Paulo: Makron Books, 1999, 921 p
- ✓ BOYLESTAD, Robert L., NASHELSKY, Louis. *Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos*. São Paulo: Pearson Education, 2004, 696 p
- ✓ GUET, S. Bubble velocity and size measurement with four-point optical fiber probe. *Particle & Particle Systems Characterization*, v.20, p.219-230, June 2003
- ✓ LEUNG, SA. Continuous real-time bubble monitoring in microchannels using refractive index detection. *Measurement Science & Technology*, v.15, p.290-296, January 2004
- ✓ MUSAZZI, Sérgio. Optical particle sizers for on-line applications in industrial plants. *Optical and Lasers in Engineering*, v.39, p.141-154, July 2001
- ✓ NEBUYA, S. Estimation of the size of air emboli detectable by electrical impedance measurement. *Medical & Biological Engineering & Computing*, v.42, p.142-144, January 2004
- ✓ PERTENCE Jr, Antônio. *Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos*. São Paulo: McGraw-Hill, 1998. Cap. 5: Aplicações Não Lineares com AOP's, p.120-125.
- ✓ PRASSER, H.-M. Bubble size measurement using wire-mesh sensors. *Flow Measurement and Instrumentation*, v.12, p.299-312, September 2000
- ✓ RAMAYA, A. Venkata. Bubble detection with horizontal pressure gradient measurements in gas-fluidised beds. *Powder Technology*, v.97, p.77-84, November 1997
- ✓ SEDRA, Adel S., SMITH, Kenneth C. *Microeletrônica*. São Paulo: Makron Books, 2000. Cap. 4: Transistores Bipolares de Junção (TJB) p.207-319.
- ✓ SMAR, *Fieldbus Reference Book – 1999*, 320 p
- ✓ TOCCI, Ronald J., WILDMER, Neal S. *Sistemas Digitais*. São Paulo: Pearson Education, 2003, 776 p
- ✓ VARELA, José Roberto. *Iniciando no Visual Basic 6.0*. São Paulo: Érica, 1999, 406 p

ANEXO 1 – Programa em Visual Basic Desenvolvido

```

Dim Cod1 As String, Initimer As Integer
Dim VA As Single, Bol As Single, VAold As Single, Cont As Integer, Comp
As String
Dim VA2 As Single, Bol2 As Single, VA2old As Single, Cont2 As Integer,
Comp2 As String
Dim Tempo_Total As Single, Velocidade As Single
Dim T As Single, cs As Integer
Dim T2 As Single, cs2 As Integer

'Subrotina de conexão com o Servidor do DFI302

Private Sub Conectar_Click()

Opcdatal.OPCProgID = Nome_Servidor_OPC.Text
Opcdatal.NodeName = Nome_CPU_Servidor.Text
Status_Conexão.Text = "Acessando..."
Opcdatal.Connect
Status_Conexão.Text = Opcdatal.ConnectStatus
Status OPC.Text = Opcdatal.ConnectHR
Criar_Arquivo.Enabled = True
Desconectar.Enabled = True
Apagar_Arquivo.Enabled = False
Conectar.Enabled = False
Nome_CPU_Servidor.Enabled = False
Nome_Servidor_OPC.Enabled = False

End Sub

'Subrotina para desconexão com o servidor do DFI302

Private Sub Desconectar_Click()

Opcdatal.Disconnect
Status_Conexão.Text = Opcdatal.ConnectStatus
Conectar.Enabled = True
Nome_CPU_Servidor.Enabled = True
Nome_Servidor_OPC.Enabled = True
Nome_Arquivo_Dados.Enabled = True
Tag_Sensor_1.Enabled = True
Tag_Sensor_2.Enabled = True
Tag_Sensor_3.Enabled = True
Tag_Sensor_4.Enabled = True
Tag_Sensor_5.Enabled = True
Tag_Sensor_6.Enabled = True
Apagar_Arquivo.Enabled = False
Criar_Arquivo.Enabled = False
Desconectar.Enabled = False
Timer_Print.Enabled = False
Timer_Valor_Atual.Enabled = False
Timer_Valor_Atual2.Enabled = False

Close #1

End Sub

```

'Subrotina para criar um arquivo os valores das saídas 1, 2 e 3 do IF302

```
Private Sub Criar_Arquivo_Click()
```

```
Cod1 = "D:\Detector\" + Nome_Arquivo_Dados.Text + ".txt" 'Cria um  
arquivo
```

```
Open Cod1 For Output As #1
```

```
Opccdata1.ItemID(0) = Tag_Sensor_1.Text  
Opccdata1.ItemID(1) = Tag_Sensor_2.Text  
Opccdata1.ItemID(2) = Tag_Sensor_3.Text  
Opccdata1.ItemID(3) = Tag_Sensor_4.Text  
Opccdata1.ItemID(4) = Tag_Sensor_5.Text  
Opccdata1.ItemID(5) = Tag_Sensor_6.Text  
Status_Arquivo.Text = "Acessando..."  
Opccdata1.CreateGroup  
Status_Arquivo.Text = Opccdata1.GroupStatus  
Código_Erro.Text = Opccdata1.GroupHR  
Tag_Status_S1.Text = Opccdata1.AddError(0)  
Tag_Status_S2.Text = Opccdata1.AddError(1)  
Tag_Status_S3.Text = Opccdata1.AddError(2)  
Tag_Status_S4.Text = Opccdata1.AddError(3)  
Tag_Status_S5.Text = Opccdata1.AddError(4)  
Tag_Status_S6.Text = Opccdata1.AddError(5)  
Apagar_Arquivo.Enabled = True  
Timer_Atualização.Enabled = True  
Timer_Print.Enabled = True  
Criar_Arquivo.Enabled = False  
Nome_Arquivo_Dados.Enabled = False  
Tag_Sensor_1.Enabled = False  
Tag_Sensor_2.Enabled = False  
Tag_Sensor_3.Enabled = False  
Tag_Sensor_4.Enabled = False  
Tag_Sensor_5.Enabled = False  
Tag_Sensor_6.Enabled = False
```

```
End Sub
```

'Subrotina para apagar arquivo de dados

```
Private Sub Apagar_Arquivo_Click()
```

```
Opccdata1.DeleteGroup  
Status_Arquivo.Text = Opccdata1.GroupStatus  
Conectar.Enabled = True  
Nome_Arquivo_Dados.Enabled = True  
Apagar_Arquivo.Enabled = False  
Criar_Arquivo.Enabled = False  
Desconectar.Enabled = False  
Timer_Print.Enabled = False  
Timer_Valor_Atual.Enabled = False  
Timer_Valor_Atual2.Enabled = False
```

```
Close #1
```

```
End Sub
```

```
'Subrotina de inicialização do programa, desligando alguns botões

Private Sub Form_Load()

Apagar_Arquivo.Enabled = False
Criar_Arquivo.Enabled = False
Desconectar.Enabled = False
Cont = 0
Cont2 = 0
Comp = 0
Comp2 = 0
Bol = 0
Bol2 = 0

End Sub

'Saída do programa

Private Sub Sair_Programa_Click()

Close #1
End

End Sub

'Subrotina que faz a atualização automática das variáveis da rede OPC

Private Sub Timer_Atualização_Timer()

Timer_Valor_Atual.Enabled = True
Timer_Valor_Atual2.Enabled = True
Opccdata1.Update
Present_Value_S1.Text = Format(Opccdata1.Value(0), "#.##")
Present_Value_S2.Text = Format(Opccdata1.Value(1), "#.##")
Present_Value_S3.Text = Format(Opccdata1.Value(2), "#.##")
Present_Value_S4.Text = Format(Opccdata1.Value(3), "#.##")
Present_Value_S5.Text = Format(Opccdata1.Value(4), "#.##")
Present_Value_S6.Text = Format(Opccdata1.Value(5), "#.##")
Update_PV_S1_S2.Text = Opccdata1.UpdateStatus
Update_Status_S1_S2.Text = Opccdata1.UpdateHR
PV_Status_S1.Text = Opccdata1.ReadError(0)
PV_Status_S2.Text = Opccdata1.ReadError(1)
PV_Status_S3.Text = Opccdata1.ReadError(2)
PV_Status_S4.Text = Opccdata1.ReadError(0)
PV_Status_S5.Text = Opccdata1.ReadError(1)
PV_Status_S6.Text = Opccdata1.ReadError(2)

End Sub

'Subrotina que realiza a gravação dos valores dos saídas 1, 2 e 3 do
IF302 no arquivo

Private Sub Timer_Print_Timer()

Print #1, Format(Present_Value_S3, "#.##"), Format(Present_Value_S2,
"#.##"), Format(Present_Value_S1, "#.##"), Format(Present_Value_S6,
```

```
"#.##"), Format(Present_Value_S5, "#.##"), Format(Present_Value_S4,
"#.##")

End Sub

Private Sub Timer_Valor_Atual_Timer()

Dim X As Single, Y As Single, Z As Single

X = Format(Opdata1.Value(0), "#.##")
Y = Format(Opdata1.Value(1), "#.##")
Z = Format(Opdata1.Value(2), "#.##")
VA = Format(((X) + (2 * Y) + (4 * Z)), "#")
Cont = Cont + 1

If Cont = 1 Then

    VAold = 28
    Comp = VA
    If Comp = "26" Or Comp = "27" Or Comp = "28" Or Comp = "29" Then

        Bol = 0
        Comp = 0
        VAold = VA

    End If

Contador_1.Text = Bol

End If

If (VA <> VAold) Then

    Comp = VA

    If Comp = "26" Or Comp = "27" Or Comp = "28" Or Comp = "29" Then

        Bol = Bol + 1
        Comp = 0
        VAold = VA
        Timer_Valor_Atual.Enabled = False

    ElseIf Comp = "42" Or Comp = "43" Or Comp = "44" Or Comp = "45" Then

        Bol = Bol + 1
        Comp = 0
        VAold = VA
        Timer_Valor_Atual.Enabled = False

    ElseIf Comp = "58" Or Comp = "59" Or Comp = "60" Or Comp = "61" Then

        Bol = Bol + 1
        Comp = 0
        VAold = VA
        Timer_Valor_Atual.Enabled = False

    ElseIf Comp = "74" Or Comp = "75" Or Comp = "76" Or Comp = "77" Then
```

```

    Bol = Bol + 1
    Comp = 0
    VAold = VA
    Timer_Valor_Atual.Enabled = False

ElseIf Comp = "90" Or Comp = "91" Or Comp = "92" Or Comp = "93" Then

    Bol = Bol + 1
    Comp = 0
    VAold = VA
    Timer_Valor_Atual.Enabled = False

ElseIf Comp = "106" Or Comp = "107" Or Comp = "108" Then

    Bol = Bol + 1
    Comp = 0
    VAold = VA
    Timer_Valor_Atual.Enabled = False

ElseIf Comp = "122" Or Comp = "123" Or Comp = "124" Then

    Bol = Bol + 1
    Comp = 0
    VAold = VA
    Timer_Valor_Atual.Enabled = False

ElseIf Comp = "137" Or Comp = "138" Or Comp = "139" Or Comp = "140"
Then

    Bol = Bol + 1
    Comp = 0
    VAold = VA
    Timer_Valor_Atual.Enabled = False

Else

    VAold = VA

End If

Contador_1.Text = Bol
T = Timer
cs = (T - Int(T)) * 10000

End If

End Sub

Private Sub Timer_Valor_Atual2_Timer()

Dim X2 As Single, Y2 As Single, Z2 As Single

X2 = Format(Opcdatal.Value(3), "#.#")
Y2 = Format(Opcdatal.Value(4), "#.#")
Z2 = Format(Opcdatal.Value(5), "#.#")
VA2 = Format(((X2) + (2 * Y2) + (4 * Z2)), "#")

```

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

```
Cont2 = Cont2 + 1

If Cont2 = 1 Then
    VA2old = 28
    Comp2 = VA2

    If Comp2 = "27" Or Comp2 = "28" Or Comp2 = "29" Or Comp2 = "30" Then
        Bol2 = 0
        Comp2 = 0
        VAold2 = VA2
    End If
End If

If (VA2 <> VA2old) Then
    Comp2 = VA2

    If Comp2 = "27" Or Comp2 = "28" Or Comp2 = "29" Or Comp2 = "30" Then
        Bol2 = Bol2 + 1
        Comp2 = 0
        VA2old = VA2
        Timer_Valor_Atual2.Enabled = False
    ElseIf Comp2 = "43" Or Comp2 = "44" Or Comp2 = "45" Or Comp2 = "46"
    Then
        Bol2 = Bol2 + 1
        Comp2 = 0
        VA2old = VA2
        Timer_Valor_Atual2.Enabled = False
    ElseIf Comp2 = "58" Or Comp2 = "59" Or Comp2 = "60" Or Comp2 = "61"
    Or Comp2 = "62" Then
        Bol2 = Bol2 + 1
        Comp2 = 0
        VA2old = VA2
        Timer_Valor_Atual2.Enabled = False
    ElseIf Comp2 = "74" Or Comp2 = "75" Or Comp2 = "76" Or Comp2 = "77"
    Or Comp2 = "78" Then
        Bol2 = Bol2 + 1
        Comp2 = 0
        VA2old = VA2
        Timer_Valor_Atual2.Enabled = False
    ElseIf Comp2 = "87" Or Comp2 = "88" Or Comp2 = "89" Or Comp2 = "90"
    Or Comp2 = "91" Then
        Bol2 = Bol2 + 1
```

```
    Comp2 = 0
    VA2old = VA2
    Timer_Valor_Atual2.Enabled = False

    ElseIf Comp2 = "104" Or Comp2 = "105" Or Comp2 = "106" Or Comp2 =
"107" Then

        Bol2 = Bol2 + 1
        Comp2 = 0
        VA2old = VA2
        Timer_Valor_Atual2.Enabled = False

    ElseIf Comp2 = "120" Or Comp2 = "121" Or Comp2 = "122" Or Comp2 =
"123" Then

        Bol2 = Bol2 + 1
        Comp2 = 0
        VA2old = VA2
        Timer_Valor_Atual2.Enabled = False

    ElseIf Comp2 = "135" Or Comp2 = "136" Or Comp2 = "137" Or Comp2 =
"138" Then

        Bol2 = Bol2 + 1
        Comp2 = 0
        VA2old = VA2
        Timer_Valor_Atual2.Enabled = False

    Else

        VA2old = VA2

    End If

    Contador_2.Text = Bol2
    T2 = Timer
    cs2 = (T2 - Int(T2)) * 10000

    End If

    Tempo_Total = (Abs(cs2 - cs)) / 100 'tempo em segundos

    If Tempo_Total = 0 Then

        Veloc.Text = " "

    ElseIf Tempo_Total <> 0 Then

        Velocidade = (17) / (Tempo_Total) 'velocidade em cm/s
        'Veloc.Text = Velocidade

    End If

    End Sub
```