



**UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO**  
**PRÓ-REITORIA ACADÊMICA**  
**COORDENAÇÃO GERAL DE PÓS-GRADUAÇÃO**  
**MESTRADO EM DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS AMBIENTAIS**

Rodrigo Almeida Galdino

**ESTRATÉGIA DE CONTROLE PARA UM PROCESSO DE FLOTAÇÃO POR  
AR DISSOLVIDO (FAD) DE SEPARAÇÃO ÁGUA / ÓLEO**

**Recife  
2015**

Rodrigo Almeida Galdino

**ESTRATÉGIA DE CONTROLE PARA UM PROCESSO DE FLOTAÇÃO POR  
AR DISSOLVIDO (FAD) DE SEPARAÇÃO ÁGUA / ÓLEO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais da Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP, como pré-requisito para a obtenção do título de **Mestre em Desenvolvimento de Processos Ambientais**.

**Área de Concentração:** Desenvolvimento em Processos Ambientais.

**Linha de Pesquisa:** Modelagem de Processos.

**Orientador:** Prof. Dra. Leonie Asfora Sarubbo

**Co-orientador:** Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos

**Recife  
2015**

**ESTRATÉGIA DE CONTROLE PARA UM PROCESSO DE FLOTAÇÃO POR  
AR DISSOLVIDO (FAD) DE SEPARAÇÃO ÁGUA / ÓLEO**

**Aluno:** Rodrigo Almeida Galdino

**Examinadores:**

---

**Prof. Dr(a) Leonie Asfora Sarubbo**

**Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP**

---

**Prof. Dr. (Francisco Madeiro)**

**Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP**

---

**Prof. Dr. (Carlos Costa Dantas)**

**Universidade Federal de Pernambuco - UFPE**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por tudo que sou e por me guiar até aqui.

Aos meus pais, por estarem ao meu lado em todos os momentos de minha vida.

Aos meus orientadores Prof(a). Dra. Leonie Asfora Sarubbo e Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos, pela liberdade e confiança referente ao presente trabalho, além da indiscutível amizade e compreensão em momentos difíceis.

Aos meus irmãos, Cristiano e Cristiane, pelo incentivo direto ou indireto.

À minha esposa, Carolina Arruda, pelo companheirismo, amor e carinho dedicados a mim.

À Caio, Catarina e Tiago, que são uma benção em minha vida.

# SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	14
SUMÁRIO.....	15
LISTA DE FIGURAS .....	17
LISTA DE TABELAS .....	18
RESUMO.....	19
ABSTRACT .....	20
CAPÍTULO I .....	21
1.1 INTRODUÇÃO .....	12
1.2 OBJETIVOS .....	15
1.2.1 Objetivo Geral.....	15
1.2.2 Objetivos Específicos .....	15
1.3 REVISÃO DA LITERATURA .....	16
1.3.1 O Processo de Flotação .....	16
1.3.2 Flotação por Ar Dissolvido.....	17
1.3.3 Mecanismos.....	18
1.3.4 Aplicações .....	21
1.3.5 Variáveis Operacionais Relevantes.....	21
1.3.5.1 Bolhas: geração e caracterização.....	21
1.3.5.2 Controle de nível.....	23
1.3.5.3 Vazão de ar / vazão de reciclo.....	23
1.3.6 Arranjos Experimentais.....	24
1.3.7 Automação e Controle de Processos .....	27
1.3.7.1 Breve histórico do controle automático.....	27
1.3.7.2 Controle de processos .....	31
1.3.7.3 Aquisição de dados.....	32
1.3.7.4 Implementação de Controles .....	32
1.3.7.4.1 Controle analógico.....	32
1.3.7.5 Sistemas de Controle.....	33
1.3.7.5.1 Sistemas de controle em malha aberta.....	34
1.3.7.5.2 Sistemas de controle em malha fechada .....	35

1.3.7.5.3 Objetivos de um sistema de controle .....	37
1.3.7.6 Controladores on/off.....	39
1.3.7.7 Controlador PID .....	42
1.3.7.7.1 Ação proporcional.....	43
1.3.7.7.2 Ação integral.....	44
1.3.7.7.3 Ação derivativa .....	45
1.3.7.8 Sintonia de controladores PID .....	46
1.3.7.8.1 Sintonia por tentativa e erro .....	47
1.3.7.8.2 Sintonia pelo método de Ziegler- Nichols .....	49
1.3.7.8.3 Sintonia por métodos baseados em modelos de 1ª ordem .....	51
1.3.7.8.4 Sintonia através de software .....	52
1.3.8 Softwares de Simulação .....	52
1.3.8.1 Simulink / Matlab.....	52
1.3.8.2 Labview .....	54
1.3.8.2.1 Programação em Labview.....	55
1.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57
CAPÍTULO II .....	63
ARTIGO.....	64
Strategy for Controlling the Level in a Dissolved Air Flotation Chamber .....	64
CAPÍTULO III .....	82
Conclusão .....	83
ANEXO I.....	84
NORMAS PARA PUBLICAÇÃO NA REVISTA CHEMICAL ENGINEERING & TECHNOLOGY .....	84

# LISTA DE FIGURAS

## CAPÍTULO I

Figura 1.1 - Processo de Flotação Convencional.....	16
Figura 1.2 - Esquema de componentes básicos de uma câmara FAD. ....	17
Figura 1.3 - Representação esquemática da captura de uma partícula sólida por uma bolha de ar ascendente na flotação, juntamente com o filme líquido.	19
Figura 1.4 – Ilustração de sistema de flotação por ar dissolvido.....	24
Figura 1.5 – Esquema do sistema de flotação por ar dissolvido. ....	25
Figura 1.6 – Modelo estrutural do tanque FAD, incluindo o fluxo de recirculação. ....	26
Figura 1.7 – Ilustração da Ação de um Controlador PID.....	28
Figura 1.8 – Ilustração de Esquema de Controle Digital. ....	30
Figura 1.9 – Ilustração de um Sistema de Automação e Controle de Processos. ....	31
Figura 1.10 - Sistema de Aquisição de Dados. ....	32
Figura 1.11 - Sistema com Controlador Contínuo. ....	33
Figura 1.12 – Sistema de controle em malha aberta.....	34
Figura 1.13 – Sistema de controle em malha fechada. ....	36
Figura 1.14 – Curva de resposta a uma entrada em degrau unitário. ....	38
Figura 1.15 - Ilustrativo do Relé do Controle on-off.....	40
Figura 1.16 - Ilustrativo de Controlador Liga-Desliga com Histerese. ....	40
Figura 1.17 - Controle On /Off.....	41
Figura 1.18 - Diagrama de Bloco do Simulink.....	54
Figura 1.19 - Painel Frontal do Labview e seu Diagrama de Bloco correspondente. ....	56
Figura 1. Esquema com disposição dos componentes do protótipo de FAD. ..	69
Figura 2. Esquema utilizado na modelagem da função de transferência da estratégia de controle de nível no protótipo de FAD. ....	70
Figura 4. Placa de comando e aquisição de dados do sistema de controle. ....	72
Figura 5. Elementos de controle (conjunto sensor / válvula). ....	73
Figura 6. Programa principal desenvolvido para controle de nível. ....	73
Figura 8. Tela do supervisor para controle de nível.....	74
Figura 9. Gráfico resposta do controle PID. ....	75
Figura 10. Fotografia da camada de espuma oleosa formada na superfície livre da câmara de flotação antes da implantação da estratégia de controle de nível. ....	76
Figura 11. Fotografia da camada de densa camada de espuma oleosa formada na superfície livre da câmara de flotação após a implantação da estratégia de controle de nível. ....	77
Figura 12. Superfície de resposta em 3D da eficiência de separação no protótipo de FAD antes da implantação da estratégia de controle de nível. ....	78
Figura 13. Superfície de resposta em 3D da eficiência de separação no protótipo de FAD após a implantação da estratégia de controle de nível. ....	79

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO I

Tabela 1.1 – Parâmetros de Sintonia por Ziegler-Nichols .....	50
Tabela 1.2 – Parâmetros Modificados de Sintonia por <i>Ziegler-Nichols</i> .....	51



## RESUMO

O estado de Pernambuco está se tornando cada vez mais industrializado e com matriz diversificada, com empreendimentos nas áreas de refino de petróleo, petroquímica, siderurgia, indústria naval e *offshore*, automobilística, e de equipamentos para energia elétrica. No contexto mundial atual, onde se prima pela preservação ambiental, o grande desafio enfrentado por esses grandes empreendimentos tem sido garantir a qualidade e o desenvolvimento contínuo de seus processos, sem comprometer a qualidade ambiental local. Portanto é de suma importância reduzir a quantidade e/ou melhorar a qualidade dos efluentes gerados pelos mais diversos setores industriais e seus respectivos processos de produção. Os sistemas de flotação por ar dissolvido (FAD) são mais compactos que os sistemas alternativos na separação água-óleo, além de possibilitarem a recuperação de matéria-prima no tratamento desses efluentes industriais. Neste sentido, o objetivo deste projeto é desenvolver uma estratégia eficiente de automação e controle de nível para um processo do tipo FAD, no tratamento de águas oleosas. Os resultados obtidos demonstram que a partir da aplicação de técnicas de controladores clássicos PID, foi possível manter o nível do líquido em um valor de referência estabelecido pelo usuário a partir do *software* LabVIEW. Com a adoção da referida ferramenta de controle, a eficiência de separação água-óleo na câmara de flotação do protótipo piloto ficou próximo a 98 %, validando a estratégia de controle adotada.

**Palavras-Chave:** Flotação por ar dissolvido, Controle PID, Separação água-óleo.

## ABSTRACT

The state of Pernambuco is becoming increasingly industrialized and diversified array, with projects in the areas of petroleum refining, petrochemical, steel, shipbuilding and offshore industry, automotive, and electrical equipment. In the current global context, where one strives for environmental preservation, the major challenge faced by these large developments has been to ensure the quality and continuous development of its processes without compromising local environmental quality. Therefore it is of paramount importance to reduce the amount and / or improve the quality of wastewater generated by various industries and their production processes. The systems of dissolved air flotation (DAF) are more compact than alternative systems in water-oil separation, and they allow the recovery of raw materials in the treatment of these industrial effluents. In this sense, the goal of this project is to develop an effective strategy for automation and process control for a type of FAD, in the treatment of oily waters. The findings demonstrate that it is possible to maintain the level of the fluid at a reference value established by the operator using the software program LabVIEW through the application of classic proportional integral derivative controllers. Using this control tool, the efficiency of water-oil separation in the pilot flotation chamber prototype was increased to nearly 98%.

**key words:** Dissolved air flotation, PID control, oil-water separation.

# **CAPÍTULO I**

## 1.1 INTRODUÇÃO

A disponibilidade de água doce é um dos grandes problemas que se enfrentam hoje no mundo e, em alguns aspectos, é o principal porque as dificuldades causadas afetam a vida de milhões de pessoas. Nos próximos anos, os problemas relacionados com a falta de água ou a contaminação de mananciais afetarão praticamente todos os habitantes do planeta. As regiões do mundo que sofrem escassez de água estão crescendo em área e em quantidade (UNESCO, 2012).

CUNHA et al. (2010) cita que uma análise comparativa entre a disponibilidade hídrica e a demanda da população no Brasil mostra que o nível de utilização da água disponível em 1991 era de apenas 0,71%. A questão que se coloca neste caso, não é a disponibilidade hídrica ou a falta de água, mas sim as formas de sua utilização que estão levando a uma acelerada perda de qualidade, em especial nas regiões intensamente urbanizadas ou industrializadas.

As crescentes demandas de água requeridas pela agricultura, indústrias e abastecimento estão causando problemas aos recursos hídricos em muitas regiões do mundo. Segundo (HOLMES et al. 2013), o percentual requerido pelo setor industrial encontra-se na faixa de 20%, perdendo apenas para a agricultura que requer 70% de toda água captada dos rios, lagos e aquíferos do mundo.

Na indústria, em geral, há uma demanda muito grande por água de boa qualidade e grande parte do referido volume será eliminado para corpos receptores com uma alta carga de matéria orgânica e sólidos, motivo pelo qual águas residuárias geradas em todos os processos industriais devem passar por um tratamento específico (HOLMES et al. 2013).

A disposição de águas residuárias (água oleosa) no solo pode provocar contaminação do lençol freático, bem como o acúmulo de produtos tóxicos no ambiente, prejudicando a fauna e a flora. Quando lançados em corpos hídricos, esses efluentes podem provocar sérios danos aos ecossistemas aquáticos, não só comprometendo a qualidade ambiental das águas, como também alterando a dinâmica da cadeia alimentar ali existente. Neste sentido justifica-se a utilização de processos de separação água/óleo compactos e de baixo custo que possam ter suas variáveis de processo, controladas por sistemas de controle eficientes / eficazes (DA COSTA, 2008).

Grande parte dos materiais presentes em um efluente, responsáveis por sua contaminação, não são passíveis de serem removidos pela simples separação física. Os processos físico-químicos aplicados com o objetivo de clarificar efluentes são baseados na desestabilização dos colóides por coagulação/floculação, e separação das fases por sedimentação ou flotação (BIANCHINI et al. 2014).

A flotação é um processo físico utilizado na clarificação de efluentes com altos teores de óleos e graxas como indústrias petroquímicas, de pescado e frigoríficas, apresentando resultados significativos na redução de material poluidor (YANG et al. 2014).

O processo de flotação por ar dissolvido (FAD) surge como alternativa para o tratamento de águas oleosas, visto que é considerado o mais vantajoso para o tratamento de água por não promover forte agitação, permitir um melhor controle da produção de bolhas de ar, que está relacionada com a diferença entre a pressão de saturação e a atmosférica; não necessitar de aplicação de produtos escumantes que podem interferir na qualidade da água tratada; empregar altas taxas de aplicação superficial que levam a tempos de detenção reduzidos, tornando o processo de FAD o mais econômico em termos de custo de investimento, já que os gastos com construção civil são menores (PARK et al. 2013).

Para controlar as variáveis envolvidas no processo FAD, é possível utilizar diversas ferramentas, dentre elas o controle realimentado, ou de malha fechada no qual o controle de saída (*Control Output – CO*) é calculado como função da diferença entre o valor desejado (*Setpoint – SP*) e a variável de processo (*Process Variable – PV*) (JENG et al. 2014).

De acordo com Ogata, K. (2009), um sistema de controle de malha fechada é definido como sendo uma variação de um sistema de controle com realimentação, que por definição é um sistema que estabelece uma relação de comparação entre a saída e a entrada de referência, utilizando-a como meio de controle. Porém, especificamente, o sistema de controle de malha fechada é caracterizado pelo sinal de erro atuante, que é a diferença entre os sinais de entrada e de realimentação, que pode ser tanto o próprio sinal de saída quanto alguma função do mesmo, incluindo integrais ou derivadas, que alimenta o controlador, de modo a minimizar ou até mesmo eliminar o erro do controlador (ÅSTRÖM, 2013).

Almeida, R. G. Estratégia de controle para um processo de flotação por ar dissolvido (FAD) de separação água / óleo.

O objetivo de uma malha de controle é manter a variável de processo igual ao valor desejado, na presença de mudanças de *setpoint*, perturbações de carga ou distúrbios de origens diversas (FORMENTIN et al. 2014).

Uma das estratégias para realizar simulações dinâmicas de processos, é o controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID), que é a união dos três modos básicos de controle contínuo (Modo Proporcional, Modo Integral e Modo Derivativo) e um dos algoritmos de controle mais usados na indústria em todo o mundo para sistemas de controle industrial (SEGOVIA et al. 2013).

A popularidade de controladores PID pode ser atribuída em parte ao seu desempenho robusto em uma ampla gama de condições de funcionamento e em parte à sua simplicidade funcional, que permite aos engenheiros operá-los de uma forma simples e direta (RHINEHART et al. 2006).

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Definir e desenvolver uma estratégia de controle e automação para uma operação de uma câmara de flotação por ar dissolvido (FAD) na separação água-óleo.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Definir uma variável da operação em uma câmara de FAD para desenvolvimento de uma estratégia de controle e automação do processo;
- Propor uma estratégia para controlar o processo e mantê-lo em regime estacionário;
- Aplicar a estratégia de controle proposta em um protótipo piloto utilizando o software LabVIEW;
- Validar a estratégia de controle proposta.

## 1.3 REVISÃO DA LITERATURA

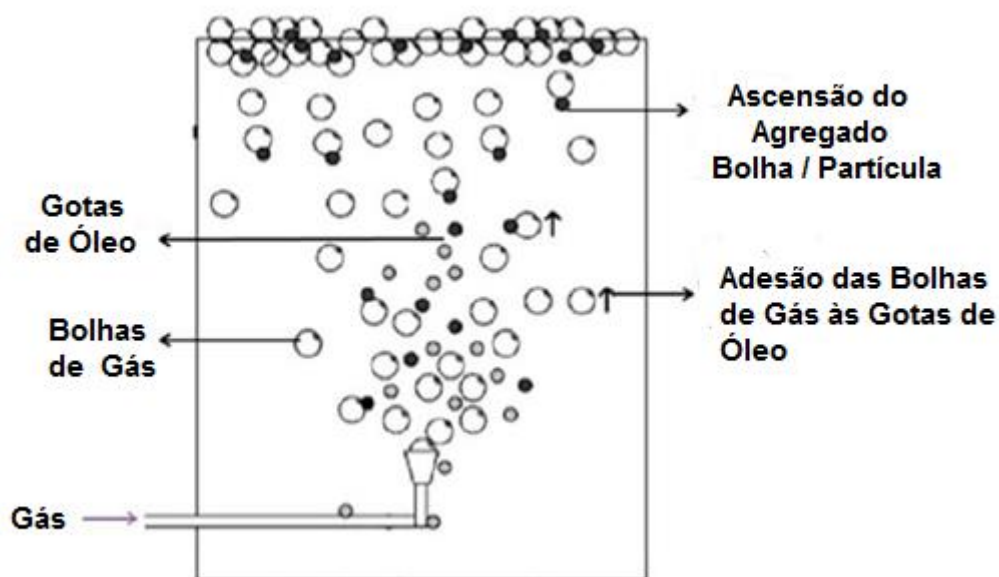
### 1.3.1 O Processo de Flotação

A flotação é a operação pela qual se consegue num determinado sistema, a separação de gotículas "líquidas" ou partículas sólidas de uma fase líquida (LIU et al. 2012). Para aumentar a eficiência é feita a introdução de pequenas bolhas de gás, normalmente o ar, as quais, aderindo à superfície das "partículas" aumentam seu empuxo, provocando assim, a ascensão das mesmas em direção à superfície da fase líquida, podendo então ser devidamente coletadas (ZHAO et al. 2014).

O processo de flotação quando aplicado em tratamento de efluentes usa métodos de injeção de ar no qual pequenas bolhas devem ser formadas ( $< 0,1\mu\text{m}$ ). Para que os sólidos sejam removidos é necessário que apresente tamanhos pequenos, baixa densidade e propriedades hidrofílicas (HAYES et al. 2013).

**Figura 1.1 - Processo de Flotação Convencional**

Fonte: Rykaart e Haarhoff, 1995.



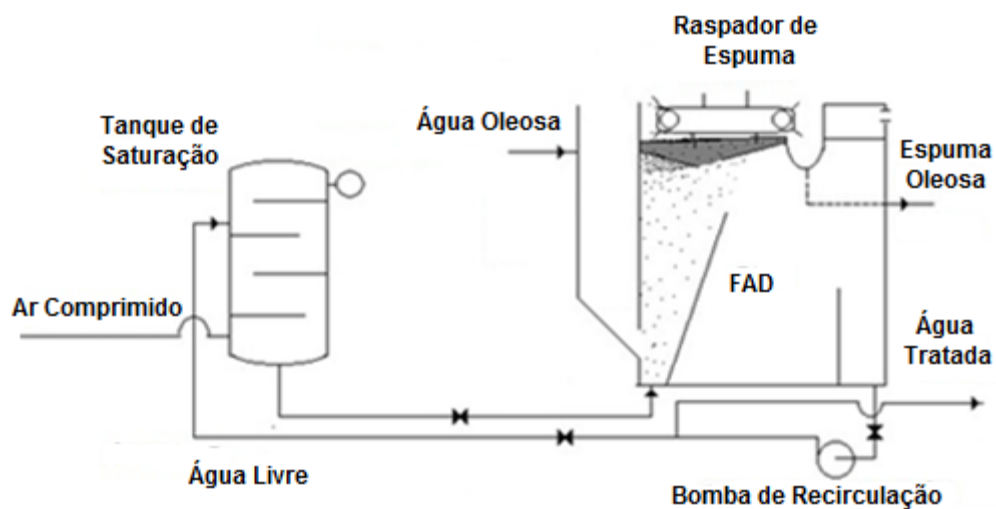


### 1.3.2 Flotação por Ar Dissolvido

A flotação por ar dissolvido (FAD) é um processo de separação sólido-líquido (e/ou líquido-líquido) no qual bolhas de ar, produzidas pela despressurização de uma corrente aquosa saturada com ar em uma pressão acima da pressão atmosférica, são utilizadas para capturar partículas sólidas (e/ou líquidas) dispersas em um meio aquoso (ZHU et al. 2014). Neste processo, a maioria das bolhas geradas possui diâmetro ( $d_b$ ) inferior a 100  $\mu\text{m}$ .

**Figura 1.2 - Esquema de componentes básicos de uma câmara FAD.**

Fonte: Rodrigues e Rubio, 2007.



Os processos FAD são aplicados com grande frequência no tratamento de água e efluentes (urbanos e industriais), assim como na reciclagem de papéis (*deinking flotation*) (ASSEMI et al. 2008). Nestas áreas de aplicação, as partículas a serem flotadas são muito pequenas ( $d_p < 20\text{-}50 \mu\text{m}$ ) e estão geralmente presentes em suspensões aquosas diluídas (RODRIGUES, RUBIO, 2007). De acordo com o regime de convecção ( $3 \mu\text{m} < d_p < 20 \mu\text{m}$ ) descrito teoricamente por Reay e Ratcliff (1973), a eficiência de colisão de partículas (com massa específica de  $2,5 \text{ g cm}^{-3}$ ) com bolhas menores que 100  $\mu\text{m}$  deve ser proporcional a  $1/d_b^{2,05}$ . Dessa forma, o uso de microbolhas pode ser considerado uma boa alternativa para a flotação de partículas finas  $d_p < 100 \mu\text{m}$ , isto é, micropartículas (XU et al. 2012).

### 1.3.3 Mecanismos

O processo de flotação consiste na captura de partículas sólidas (e/ou líquidas) por bolhas de ar, referenciada algumas vezes na literatura como heterocoagulação (YULONG et al. 2012).

De acordo com Sarrot et al. (2005), a eficiência de captura da bolha-partícula ( $E_{cap}$ ) pode ser definida como a razão entre o número de partículas capturadas por uma bolha e o número total de partículas existentes no volume deslocado pelo movimento (ascendente) da mesma. Desta forma, a eficiência de captura bolha-partícula equivale à probabilidade de que uma partícula qualquer dentro do volume deslocado pela bolha forme um agregado permanente (estável) com a mesma (PARK et al. 2013).

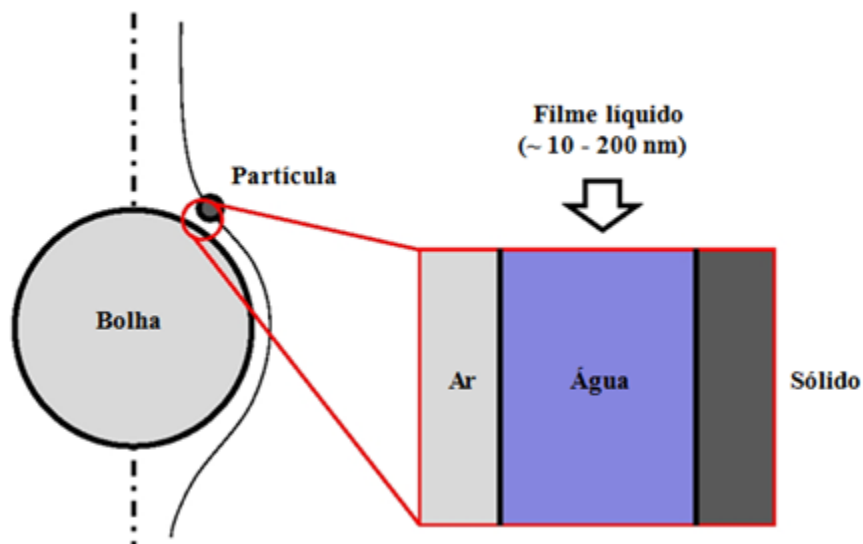
A captura de uma partícula por uma bolha de ar ascendente é modelada comumente como composta de três etapas consecutivas: colisão entre a partícula e a bolha, união (*attachment*) da partícula com a bolha e ascensão do agregado e sua respectiva estabilidade (RALSTON et al. 2002; SARROT et al. 2005). Desta forma, a eficiência de captura ( $E_{cap}$ ) é dada pelo produto das respectivas eficiências das três etapas, expresso na Equação 1.

$$E_{cap} = E_{col} \times E_{un} \times E_{est} \quad \text{eq. [ 1 ]}$$

em que  $E_{col}$ ,  $E_{un}$  e  $E_{est}$  são as respectivas eficiências de colisão, união e estabilidade bolha-partícula. A captura de uma partícula por uma bolha de ar, com a resultante formação de um filme líquido (aquoso) entre as mesmas durante a colisão/união, é mostrada esquematicamente na figura 1.3.

**Figura 1.3 - Representação esquemática da captura de uma partícula sólida por uma bolha de ar ascendente na flotação, juntamente com o filme líquido.**

Fonte: Sarrot, 2005.



A eficiência de colisão ( $E_{CO}$ ) pode ser definida como a razão entre o número de partículas que encontram a superfície de uma bolha (i.e. colidem com a bolha) e o número total de partículas existentes no volume deslocado pelo movimento (ascendente) da mesma. Os principais modelos matemáticos existentes na literatura para a descrição da etapa de colisão entre uma partícula e uma bolha de ar foram revisados por Amini et al. (2013).

De acordo com estes autores, os resultados obtidos pelos distintos modelos são difíceis de serem comparados entre si, já que os mesmos foram estabelecidos com distintas considerações para o sistema bolha-partícula, tais como o regime hidrodinâmico (Stokes, potencial ou intermediário) ao redor da bolha, mobilidade da superfície da bolha, mecanismos de colisão (intercepção, gravitação ou inércia), influência de forças inerciais das partículas e tamanho de bolha ou número de Reynolds da mesma ( $Re_b$ ).

A eficiência de união ( $E_{un}$ ) pode ser definida como a razão entre o número de partículas que se unem (*attach*) à bolha de ar e o número total de partículas que sofreram colisão com a mesma. A etapa de união entre uma partícula e uma bolha pode ser dividida em três subetapas principais (AMINI et al. 2013): (a) afinamento (*thinning*) do filme líquido (aquoso) existente entre a bolha e a partícula até uma espessura crítica, (b) ruptura do filme líquido e formação de um contato trifásico e (c) expansão da linha de contato trifásico (LCT) formando o agregado bolha-partícula.

A soma dos tempos correspondentes a cada uma destas subetapas corresponde ao tempo de união, comumente chamado de tempo de indução, o qual deve ser menor que o tempo de contato partícula-bolha para que a união ocorra (AMINI et al. 2013).

A estabilidade de um agregado bolha-partícula (expressa pela correspondente eficiência  $E_{est}$ ) é essencialmente um problema termodinâmico da flotação. De acordo com (LIU et al. 2005), duas condições são essenciais para que uma partícula unida a uma bolha de ar ascenda à superfície do líquido em uma célula de flotação:

- ✓ a massa da partícula deve ser inferior à máxima massa de uma partícula que pode permanecer na interface líquido/ar (da bolha) em um líquido quiescente, a qual depende principalmente do diâmetro da partícula, tensão superficial do líquido e ângulo de contato;
- ✓ a força de empuxo atuando na bolha deve exceder a força gravitacional atuante na partícula (subtraindo-se a sua força de empuxo), isto é, a massa específica do agregado bolha-partícula deve ser inferior à massa específica do líquido.

### 1.3.4 Aplicações

Diversos autores (RODRIGUES; RUBIO, 2007) salientam a grande necessidade de recuperação de partículas minerais finas ( $d_p < 100 \mu\text{m}$ ) e ultrafinas ( $d_p < 5 \mu\text{m}$ ) na indústria mineradora, sendo este um campo bastante fértil para pesquisa e desenvolvimento da FAD de partículas de dimensões micrométricas (micropartículas) e coloidais (incluindo nanopartículas).

No tocante as aplicações da flotação com microbolhas (FAD) incluem ainda o tratamento de águas/efluentes contendo coloides (óleos emulsificados em água, pigmentos, fibras), gotículas de óleos/graxas, proteínas, microalgas/microrganismos e diversos poluentes orgânicos (HAN; KIM, 2011).

### 1.3.5 Variáveis Operacionais Relevantes

#### 1.3.5.1 Bolhas: geração e caracterização

Segundo Oliveira (2012), a caracterização de bolhas atuantes no processo de flotação tem atraído a atenção de pesquisadores, apesar da grande utilização prática deste processo ao longo de vários anos na separação de partículas minerais e no tratamento de água/efluentes. Conforme Rodrigues (2007), estas bolhas são comumente classificadas de acordo com seu tamanho em três tipos: microbolhas ( $d_{32} < 100 \mu\text{m}$ ), bolhas intermediárias ( $100 \mu\text{m} < d_{32} < 600 \mu\text{m}$ ) e macrobolhas ( $d_{32} > 600 \mu\text{m}$ ), onde  $d_{32}$  refere-se ao diâmetro médio de Sauter. Ainda, a presença de bolhas sub-micrométricas (incluindo nanobolhas) ou a coexistência das mesmas com bolhas maiores no processo de flotação tem sido investigada, despertando a atenção da comunidade científica e industrial da flotação (MISHCHUK et al. 2006).

Recentemente, evidências diretas (microscopia de força atômica) e indiretas (espectroscopia no infravermelho, aparato de força superficial – *surface force apparatus*) relativas à existência de nanobolhas em superfícies hidrofóbicas têm sido exaustivamente estudadas (YAP, 2014; LIU et al. 2013).

De acordo com Mishchuck et al. (2006), a presença destas nanobolhas na superfície de partículas hidrofóbicas possui um efeito significativo para a interação bolha-partícula na flotação, isto é, heterocoagulação.

Entretanto, Zhang et al. (2008) demonstraram experimentalmente que nanobolhas não estão sempre presentes na interface entre um sólido hidrofóbico e água, mas podem ser formadas sob certas condições, ou seja, diminuição súbita de solubilidade do gás provocada por uma troca de solventes, tal como etanol-água.

Adicionalmente, estudos relativos à formação de “picobolhas” e seu uso em células de flotação têm sido relatados na literatura (TAO et al. 2008). “Picobolhas” são referidas como bolhas ou núcleos gasosos de tamanho menor que  $1\mu\text{m}$ , podendo ser geradas por ultrassom ou cavitação hidrodinâmica (TAO et al. 2008).

Conforme Tao et al. (2008), estas “picobolhas” unem-se mais facilmente a partículas sólidas do que bolhas maiores (macrobolhas) normalmente presentes na flotação convencional, aumentando a cinética do processo ao atuarem em conjunto com as últimas. A dispersão de ar em suas diversas maneiras (mecânica, borbulhamento, auto aspiração em constrições de fluxo - *nozzles*, etc.) consiste no principal mecanismo de geração de bolhas intermediárias e macrobolhas na flotação.

O uso de tensoativos (ou espumantes) e a caracterização de suas propriedades relativas à geração de bolhas (e espumas) possuem grande importância na flotação, existindo diversos estudos relatados na literatura sobre a influência dos mesmos no tamanho de bolhas (GRAU; HEISKANEN, 2005; HERNANDEZ-AGUILAR et al. 2006). Segundo Cho; Laskowski (2002) certos espumantes (álcoois, em sua maioria) não afetam o tamanho das bolhas quando estas são geradas em um dispersor de látex com um único orifício.

Entretanto, utilizando um dispersor com três orifícios, os autores observaram uma queda no diâmetro médio de Sauter ( $d_{32}$ ) das bolhas ao aumentar a concentração dos espumantes, sendo atingido um valor mínimo (e aproximadamente constante) no  $d_{32}$  após uma determinada concentração (definida como concentração crítica de coalescência - CCC) para cada tensoativo em solução. Estes resultados foram interpretados pelos autores a partir de um mecanismo de coalescência entre as bolhas (inexistente quando isoladas em solução), o qual seria mais significativo em menores quantidades de tensoativo em solução (MENEZES et al. 2011).

Almeida, R. G. Estratégia de controle para um processo de flotação por ar dissolvido (FAD) de separação água / óleo.

Ainda, de acordo com Cho; Laskowski (2002) refutaram a “crença” de que o tamanho das bolhas diminui com um aumento na concentração de tensoativo e, conseqüentemente, com uma diminuição na tensão superficial ( $\gamma$ ) proporcionada pela adição do mesmo.

A conclusão destes autores foi que os espumantes “controlam” o tamanho das bolhas em sistemas de flotação (contendo populações de bolhas) através da coalescência entre as mesmas.

#### **1.3.5.2 Controle de nível**

O controle de nível dentro dos reservatórios que compõem um sistema FAD, pode ser considerado como o item mais relevante, onde a variável do nível e os parâmetros do controlador podem ser monitorados e ajustados pelo operador através de uma interface gráfica (DIAS et al. 2014).

#### **1.3.5.3 Vazão de ar / vazão de reciclo**

A vazão de ar é uma das variáveis mais importantes no controle do processo de flotação e tem um efeito significativo sobre a recuperação do material flotado. As câmaras de flotação devem operar com uma vazão de ar muito precisa, cujo valor depende do tipo de material, da capacidade de recuperação e do tamanho das bolhas. Entretanto um acréscimo significativo da vazão de ar pode prejudicar o desempenho do processo, causando turbulência no interior da câmara e assim perdendo a interface polpa/espuma (BEHIN; BAHRAMI, 2012).

No tocante aos efeitos da razão de reciclo, o tamanho médio das microbolhas é diretamente influenciado, pela variação na razão entre a vazão de saturação ar-água e a vazão de recirculação  $Q_{\text{Saturação Ar-água}} / Q_{\text{Recirculação}}$  (BEHIN; BAHRAMI, 2012).

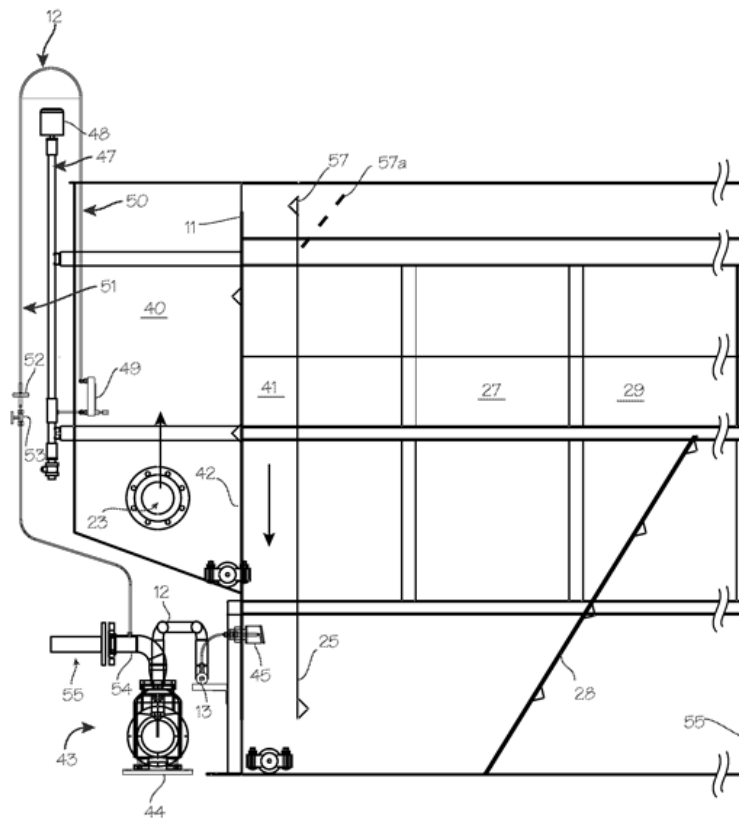
### 1.3.6 Arranjos Experimentais

O sistema de flotação por ar dissolvido proposto por (HAYES, 2011) inclui um sistema de tanque de flutuação, a remoção de resíduos, o sistema de filtragem, e sistema de controle dispostos num arranjo linear (figura 1.4). O sistema coletor de resíduos inclui um skimmer que se move através da superfície da água no tanque de flotação.

Para melhorar a eficiência do sistema, uma válvula de diafragma é incorporada na linha de entrada de ar do sistema de flotação por ar dissolvido.

**Figura 1.4 – Ilustração de sistema de flotação por ar dissolvido.**

Fonte: HAYES, 2011



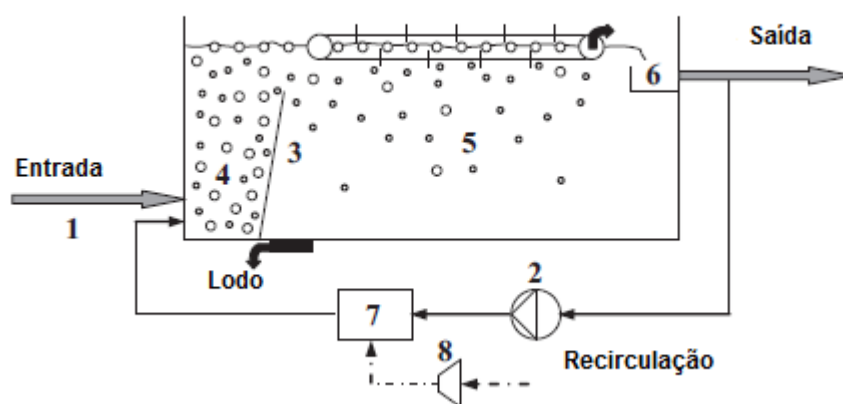


Almeida, R. G. Estratégia de controle para um processo de flotação por ar dissolvido (FAD) de separação água / óleo.

O tanque de FAD usado para a separação água-óleo, proposto por (BEHIN; BAHRAMI, 2012), foi modelado em forma retangular, com um comprimento de 6 m, uma altura de 2 m e um largura de 2,5 m (volume total de 30 m<sup>3</sup>).

**Figura 1.5 – Esquema do sistema de flotação por ar dissolvido.**

Fonte: BEHIN; BAHRAMI, 2012.



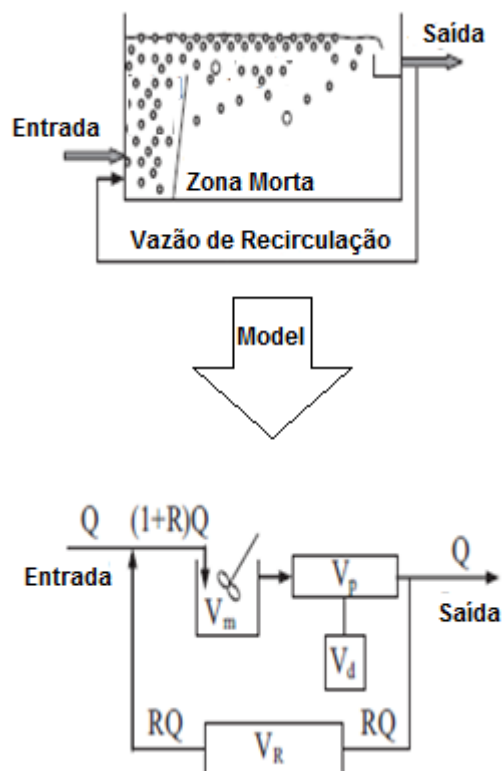
Como mostrado na figura 1.5, o principal fluxo de águas residuais entra no tanque para o painel de entrada (1), através de três linhas de tubulação (5 cm de diâmetro cada) cerca de 60 cm de distância. Uma porção da água residual de saída é reciclada através da bomba (2) e em seguida arejada no ar-saturador (7), em 5 bar de pressão fornecida por um compressor (8). A água saturada entra na zona de contacto (4) através um banco de quatro válvulas de agulha distanciados 40 cm uns dos outros. As micro-bolhas libertadas (diâmetro médio de 100) e a água mistura são conduzidas para cima pelo deflector inclinado (3) de 1 m de altura e com um ângulo de 20° para o eixo vertical. A mistura entra na zona de separação (5), e a água existente no tanque da saída (6) através de um oleoduto, que foi de 15 cm de diâmetro. Os aglomerados flutuam na superfície, e o sedimento de lama no fundo do tanque são removidos por uma pá de movimento lento.

Almeida, R. G. Estratégia de controle para um processo de flotação por ar dissolvido (FAD) de separação água / óleo.

A geometria do tanque requer uma região de mistura, uma zona de contato e uma zona de separação, bem como um fluxo tipo bujão na parte superior da zona de separação. Haverá também um volume morto no tanque (a região por trás do defletor estagnação). Um modelo que inclui uma região de mistura seguida de um volume de tampão e um volume morto pode representar a estrutura do fluxo no tanque. A reciclagem fluxo também é adicionada ao modelo, como mostrado na figura. 1.6.

**Figura 1.6 – Modelo estrutural do tanque FAD, incluindo o fluxo de recirculação.**

Fonte: BEHIN; BAHRAMI, 2012.



## 1.3.7 Automação e Controle de Processos

### 1.3.7.1 Breve histórico do controle automático

O controle automático apresenta uma história muito longa, algo em torno de dois mil anos. Entretanto, olhando pelo menos mais mil anos para trás, é possível encontrar o controle automático como ideia na mente humana, uma vez que os mitos das antigas civilizações estão repletos de referências a máquinas robóticas automáticas (NIKACEVIC et al. 2012).

Antes da Segunda Guerra Mundial, os avanços na área do controle automático estavam distribuídos entre vários campos da engenharia. No controle de processos industriais, controladores automáticos foram usados para criar produtos de melhor qualidade com um menor custo. Segundo Benetti (1979), reivindica-se que o primeiro controlador de processos de três termos: proporcional + integral + derivativo (PID) foi introduzido pela Taylor Instrument Company em 1936. O método usado para sintonizar cada um dos três termos foi desenvolvido por John G. Ziegler (1942) e Nathaniel B. Nichols, então funcionários da Taylor Instrument Company. Segundo Desborough (2002), mais de 95% dos sistemas de controle das indústrias de processo contínuo (indústrias petroquímicas, cimenteiras, siderúrgicas, papel e celulose, entre outras) utilizam esse tipo de controlador, embora muitos dos controladores sejam, na realidade, controladores do tipo proporcional-integral (PI) que, portanto, não incluem a ação derivativa.

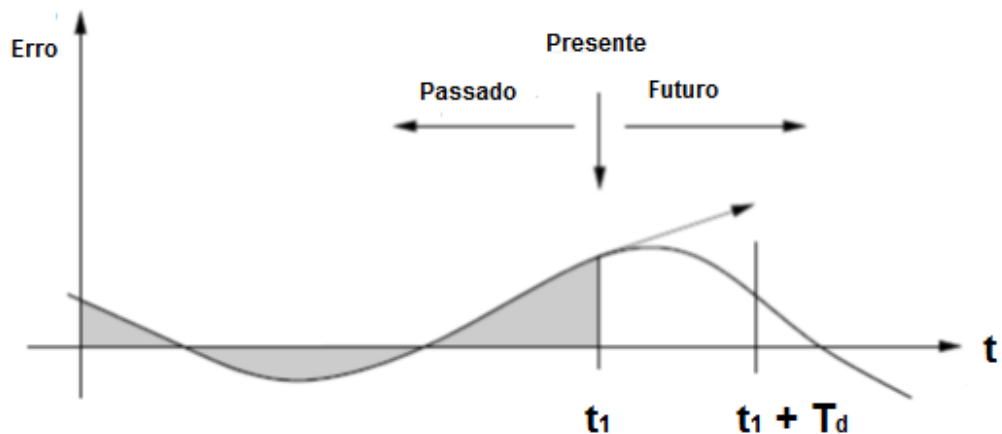
Antes disso, em 1911, o inventor norte-americano Elmer Sperry, fundador da Sperry Gyroscope Company, utilizou uma espécie de controlador PID para automatizar um mecanismo de direcionamento de navios (ROBERTS, 2008).

Em 1922, o engenheiro russo Nikolai F. Minorsky apresentou a primeira análise teórica dos controladores PID em seu trabalho “*Directional stability of automatically steered bodies*”, atualmente utilizados em quase todos os processos industriais. Minorsky baseou a sua análise na observação de um timoneiro, verificando que o timoneiro controla o navio não apenas baseado no erro presente, mas também no erro passado e na sua taxa de variação. A ação de um controlador PID é ilustrada na Figura 1.7.

No instante  $t_1$ , o passado é representado pela integral do erro (área hachurada), o presente pelo valor instantâneo do erro e o futuro pela derivada do erro que provê uma estimativa do seu crescimento ou decaimento. O tempo derivativo  $T_d$  representa aproximadamente o tempo em que o erro é antecipado.

**Figura 1.7 – Ilustração da Ação de um Controlador PID.**

Fonte: Roberts, 2008.



Em 1948, o engenheiro norte-americano Walter R. Evans (1948, 1950) apresentou sua técnica do Lugar das Raízes, outra contribuição importante para projeto de sistemas de controle. A ideia subjacente a esse método consiste em utilizar as propriedades de malha aberta do sistema para, a partir da variação de um parâmetro, determinar as propriedades do sistema em malha fechada.

Almeida, R. G. Estratégia de controle para um processo de flotação por ar dissolvido (FAD) de separação água / óleo.

Os anos 50 foram bastante profícuos em trabalhos de controle de malha fechada baseados nos requisitos de tempo de subida, sobressinal e outros parâmetros de desempenho.

Esses estudos conduziram a chamada Teoria Clássica de Controle, formulada no domínio da frequência e utilizando como ferramentas matemáticas as transformadas de Laplace e Fourier. O controle clássico mostrou-se adequado para resolver os problemas de controle durante e imediatamente após a Segunda Guerra Mundial. Sua abordagem no domínio da frequência era adequada para sistemas lineares invariantes no tempo de uma única entrada e de uma única saída.

A Teoria de Controle Clássico e suas técnicas gráficas não deram conta dos problemas de controle suscitados pela corrida espacial, iniciada com o lançamento do Sputnik em 1957 pela extinta URSS. Era necessária uma teoria de controle que pudesse lidar com equações diferenciais não-lineares em sistemas multivariáveis. Desta forma, passam a ser desenvolvidos métodos no domínio do tempo, os quais recebem um forte impulso com o desenvolvimento dos computadores digitais, que constituíam a plataforma tecnológica necessária para resolver os sistemas de equações diferenciais que produzem as leis de controle.

Aparece, então, um novo método de projeto de controle, a Teoria de Controle Moderno, que passa a representar os sistemas por variáveis de estado e trabalha quase exclusivamente no domínio do tempo.

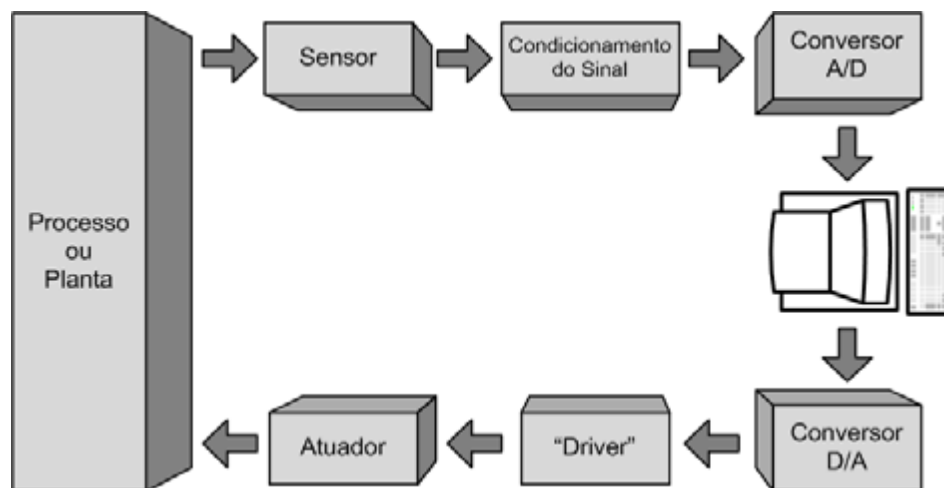
O primeiro computador dedicado ao controle de uma planta industrial foi empregado em uma refinaria da empresa de petróleo Texaco em Port Arthur, Texas, no ano de 1959 (BUSINESS WEEK, 1959). Até a década de 1970, contudo, a aplicação dos computadores digitais nos sistemas de controle estava restrita a grandes plantas industriais de processos considerados lentos, devido ao alto custo e a baixa velocidade de processamento.

Almeida, R. G. Estratégia de controle para um processo de flotação por ar dissolvido (FAD) de separação água / óleo.

O surgimento dos microprocessadores, em 1969, mudou radicalmente esta realidade, desenvolvendo uma nova área da engenharia de controle, o controle digital. Nele o papel do computador é analisar as variáveis provenientes do processo a ser controlado e, com base nessas, gerar os sinais de controle (Figura 1.8).

**Figura 1.8 – Ilustração de Esquema de Controle Digital.**

Fonte: Segovia e Theorin, 2013.



A proliferação de microprocessadores no mundo do controle de processos permitiu o surgimento de uma nova topologia de controle, o controle distribuído. No começo da década de 1980, um sistema em rede usando comunicação serial conectava os prédios do campus da Universidade de Melbourne, Austrália até uma sala de controle. O sistema instalado usava microprocessadores Z80 da Zilog, tanto na sala de controle, quanto nas unidades remotas (SEGOVIA; THEORIN, 2013).

Nas últimas décadas, os esforços têm se concentrado, sobretudo, nas teorias de controle robusto e controle ótimo. Os métodos de controle robusto tentam a busca de soluções em sistemas reais e que, portanto, estão sujeitos a certas incertezas na planta, nos sensores e nos atuadores. O controlador deve ser projetado não somente para atender ao modelo matemático (modelo nominal), mas também de forma a considerar pequenas variações paramétricas.

No controle ótimo o projeto de controladores além de garantir a estabilidade deve ser encarado como um problema de otimização matemática, buscando um conjunto ótimo de critérios de desempenho.

Por fim, apesar de serem normalmente apresentadas separadamente na literatura, está claro nos dias atuais que a engenharia de controle deve considerar simultaneamente as teorias do domínio do tempo e do domínio da frequência.

### 1.3.7.2 Controle de processos

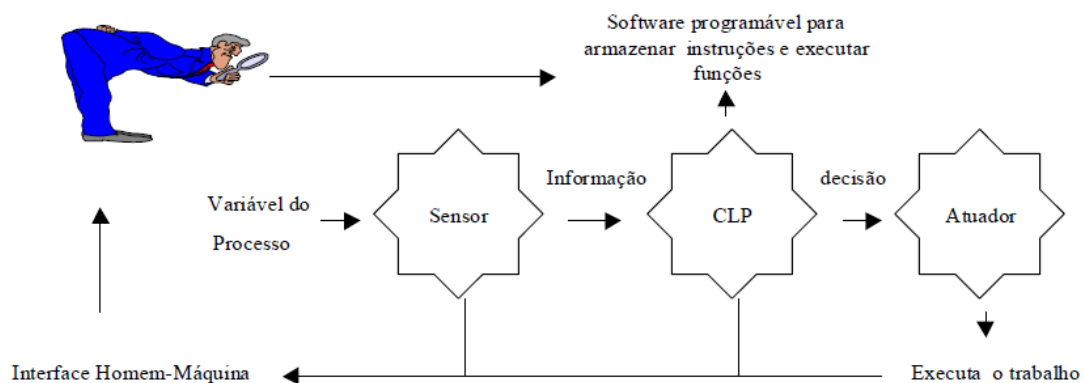
A relevância deste setor para os sistemas modernos de manufatura, segundo Ogata (2009) consiste no controle dos processos de transformação industrial, dentre os quais pode-se destacar o controle das seguintes variáveis desses processos: pressão, temperatura, velocidade, umidade, vazão, proximidade, entre outros.

Os sistemas automáticos de controle, além de serem usados para se obter aumento da produtividade e melhoria de um sistema, podem ser utilizados também para o controle dentro de tolerâncias especificadas e para se obter alta precisão nos processos de produção (YANG et al. 2012).

A figura 1.9 ilustra, de maneira geral, o funcionamento dos sistemas de automação de controle de processos.

**Figura 1.9 – Ilustração de um Sistema de Automação e Controle de Processos.**

Fonte: SENAI, 2011.



### 1.3.7.3 Aquisição de dados

Trata-se da coleta de informação de um processo em forma de dados que pode ser manipulado por um computador. Estes dados obtidos são monitorados passando por uma análise, e logo em seguida armazenados em um computador (ROMAGNOLI; PALAZOGLU, 2012). Os componentes de um sistema de aquisição de dados que realizam a conversão de dados são destinados às conexões com sinais, que podem ser analógicos ou digitais (no caso de sinais analógicos são convertidos em sinais digitais).

**Figura 1.10 - Sistema de Aquisição de Dados.**

Fonte: Vieira, 2005.



### 1.3.7.4 Implementação de Controles

#### 1.3.7.4.1 Controle analógico

Consiste em utilizar componentes analógicos para o controle de um determinado sistema, ou seja, trata-se de controladores que trabalham com sinais contínuos no tempo, e sua variável de processo é medida por um sensor que converte a grandeza física em geral de um sinal elétrico ou mecânico.



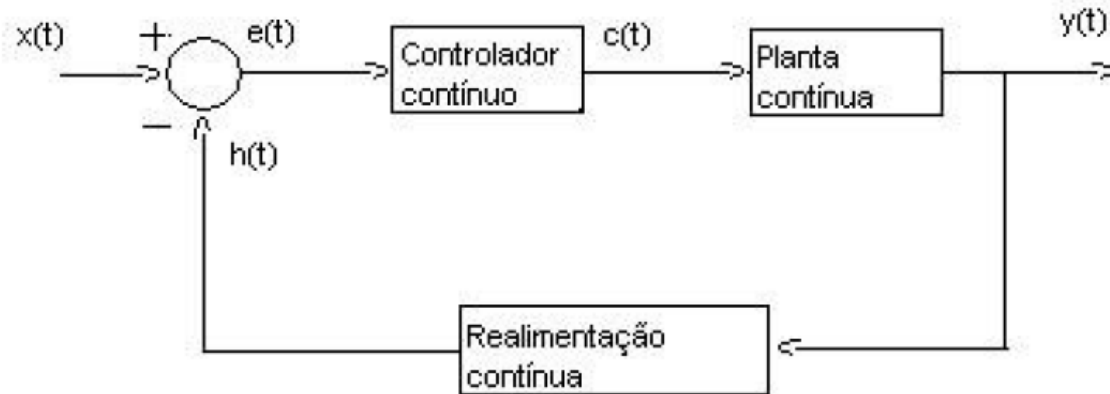
Almeida, R. G. Estratégia de controle para um processo de flotação por ar dissolvido (FAD) de separação água / óleo.

Este sinal é comparado com uma referência de mesma grandeza. A diferença entre os dois sinais é então aplicada a um controlador que nada mais é que um sistema elétrico ou mecânico que irá gerar um sinal contínuo a ser aplicado na entrada da planta a ser controlada.

A figura 1.11 mostra um esquema de um sistema com controlador contínuo. (SOUZA E COSTA FILHO, 2001).

**Figura 1.11 - Sistema com Controlador Contínuo.**

Fonte: Souza e Costa Filho, 2001.



### 1.3.7.5 Sistemas de Controle

Apesar de grande parte dos sistemas físicos serem tratados como lineares, a maioria é realmente linear apenas para um intervalo limitado de operação. Na prática, muitos sistemas largamente utilizados para o controle de processos industriais envolvem relações não-lineares entre suas entradas e saídas (OGATA, 2009).

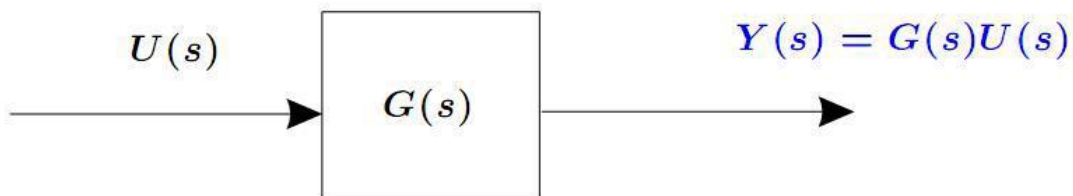
Segundo SHERIDAN et al. (2011), um sistema de controle é um arranjo de componentes físicos conectados ou relacionados de tal maneira para comandar, regular ou direcionar a si mesmo ou a outro sistema. Aplicando essa linguagem ao ambiente industrial, pode-se afirmar que um sistema de controle é um determinado conjunto de equipamentos destinados a manter o funcionamento do processo dentro de sua faixa de operação ótima.

### 1.3.7.5.1 Sistemas de controle em malha aberta

Ogata (2009) define sistemas de controle de malha aberta como aqueles em que o sinal de saída não interfere na ação de controle do sistema. Ou seja, o sinal de saída não é medido nem realimentado para comparação com a entrada. Como a saída não é comparada com a entrada, cada entrada de referência corresponde a uma condição fixa de operação, independente das outras variáveis inerentes ao processo, deixando o sistema de controle em malha aberta altamente dependente de uma calibração.

**Figura 1.12 – Sistema de controle em malha aberta**

Fonte: PALHARES, 2009.



A figura 1.12 mostra o diagrama de blocos de um sistema de controle em malha aberta, onde a saída do controlador  $Y(s)$  depende somente da entrada  $U(s)$  e da função de transferência  $G(s)$  do controlador.

Outra característica inerente aos sistemas de controle em malha aberta é a resposta aos distúrbios. Uma vez que a saída não é medida, não é possível determinar o erro ou desvio do sistema com relação ao valor desejado, com isso, qualquer distúrbio pode impedir ou pelo menos atrapalhar o sistema de executar a tarefa desejada para tal entrada (EDSON et al. 2013).

Almeida, R. G. Estratégia de controle para um processo de flotação por ar dissolvido (FAD) de separação água / óleo.

Os sistemas de controle em malha aberta são mais indicados para casos em que a relação entre a entrada e a saída do sistema seja conhecida e que não haja nenhum distúrbio interno ou externo. O que torna sua aplicação mais restrita no campo industrial, devido a dificuldade de obtenção dos modelos matemáticos que regem as operações. (KIENLE et al. 2014).

*Softwares* de monitoramento das malhas deduzem os modelos das malhas monitoradas, porém, como os modelos são deduzidos a partir de testes como degrau, rampa, impulso, entre outros; tal modelo pode variar com as condições específicas do processo em que o teste foi realizado, inviabilizando assim o uso de um sistema de controle em malha aberta (sem realimentação) (PAUL et al. 2014).

Uma das vantagens dos sistemas de controle em malha aberta é que estes são mais fáceis de serem construídos, principalmente devido ao fato de a estabilidade ser um problema de mais fácil resolução. Além disso, a maioria dos testes de estabilidade ou de sintonia devem ser feitos com o sistema em malha aberta, ou seja, sem realimentação (WALI et al. 2013).

Para aplicações que necessitam de um alto nível de desempenho, pode-se utilizar um controle em malha aberta com sinal de *feedforward* (compensação direta). Tal controle se baseia nos distúrbios, e não no erro, medindo as perturbações mais importantes que podem afetar o processo antes que as mesmas o afetem. Então um sinal é enviado diretamente ao controlador, que realiza os cálculos e determinam a saída de controle correta para que a variável de processo continue próxima ao SP mesmo sob o efeito de perturbações (PAUL et al. 2014)..

Algumas características do controle *feedforward* são: em geral possui custo elevado para implantação, possui várias equações complexas e apresenta um alto desempenho quando programado corretamente.

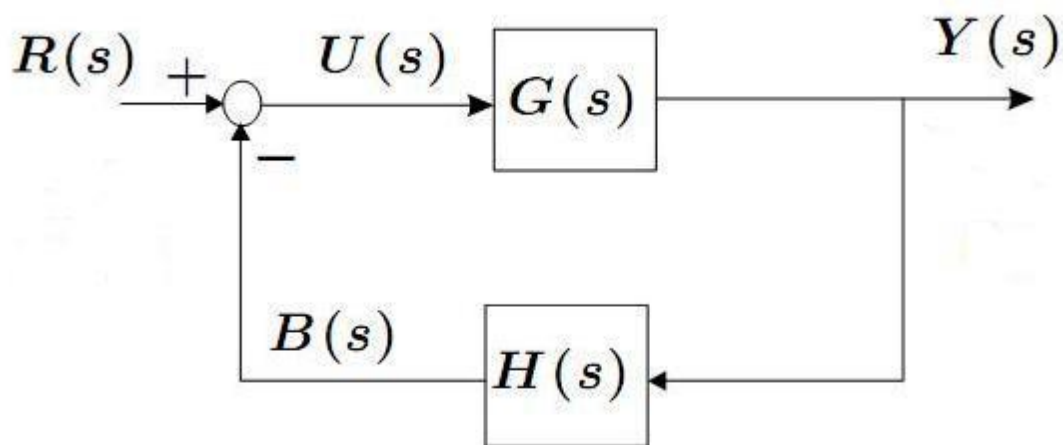
#### **1.3.7.5.2 Sistemas de controle em malha fechada**

Segundo Edson et al. (2013), a principal diferença entre o controle em malha aberta e o controle em malha fechada (também denominado as vezes como controle realimentado) é o fato do controle em malha fechada detectar qualquer afastamento da variável controlada (PV) em relação ao valor desejado (SP) e responder com uma ação para corrigir tal afastamento.

Ogata (2009) define um sistema de controle em malha fechada como uma variação de um sistema de controle com realimentação, que por definição é um sistema que estabelece uma relação de comparação entre a saída e a entrada de referência, utilizando-a como meio de controle. Porém, especificamente, o sistema de controle de malha fechada é caracterizado pelo sinal de erro atuante, que é a diferença entre os sinais de entrada e de realimentação, que pode ser tanto o próprio sinal de saída quanto alguma função do mesmo, incluindo integrais ou derivadas; que realimenta o controlador, de modo a minimizar ou até mesmo eliminar o erro do sistema.

**Figura 1.13 – Sistema de controle em malha fechada.**

Fonte: PALHARES, 2009.



A figura 1.13 representa um diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada, onde a entrada  $R(s)$  é comparada ao sinal de realimentação  $B(s)$ , que é uma função  $H(s)$  da saída  $Y(s)$ . A diferença entre  $R(s)$  e  $B(s)$  gera o sinal de erro  $U(s)$  que alimenta  $G(s)$ , que representa o conjunto controlador/processo.

### 1.3.7.5.3 Objetivos de um sistema de controle

O objetivo de um sistema de controle é, basicamente, manter a variável de processo igual ao *setpoint* na presença de interferências, mudanças de carga ou até mesmo mudanças de *setpoint*. Porém, não se pode julgar o desempenho de um sistema de controle apenas por um ângulo (OGATA, 2009).

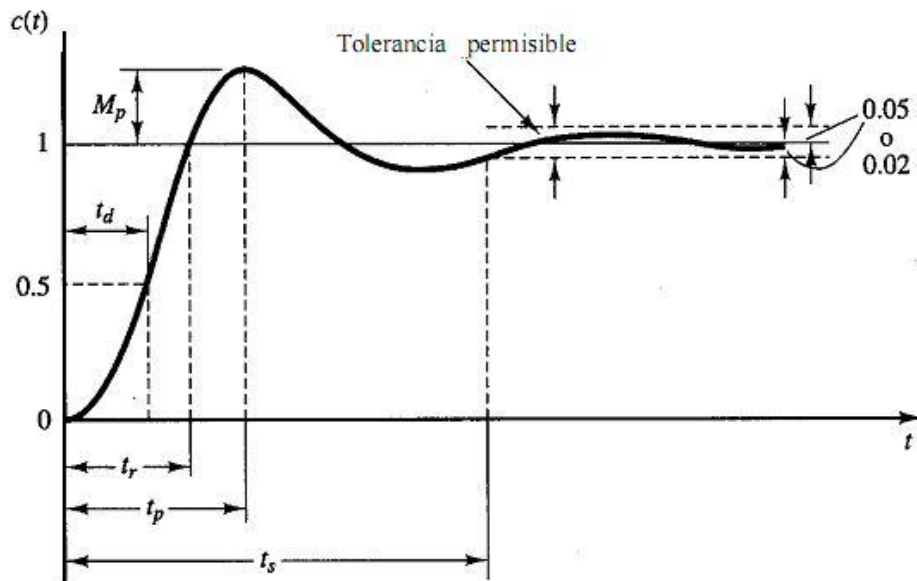
Como dito anteriormente, não é determinante para o desempenho global da malha a análise somente estacionária ou dinâmica do sistema. Uma malha pode atender as exigências de controle em regime estacionário, porém, não ter um desempenho satisfatório em regime transiente. Ou até mesmo o contrário, apresentar bom desempenho em regime transiente e insatisfatório para regime estacionário.

Certamente o ideal seria um controlador perfeito, sem oscilações e sensível a mudanças de *setpoint* e robusto a distúrbios de carga, interferências. Mas a realidade é que algumas dessas qualidades devem ser priorizadas de acordo com características do processo que está sendo controlado. Além disso, certamente não é possível conseguir a mesma resposta obtida em simulações e cálculos teóricos quando se trata da realidade (KIENLE et al. 2014)..

Algumas características da resposta do controlador a uma mudança de *setpoint* ou de carga são mais comuns de serem analisadas para determinar se o desempenho do controlador está como o desejado. Algumas delas se encontram na figura 1.14 e podem ser definidas segundo Ogata (2009) como:

Figura 1.14 – Curva de resposta a uma entrada em degrau unitário.

Fonte: OGATA, 1998.



- ✓  $t_r$  (tempo de subida): é o tempo necessário para que a resposta passe de 10% a 90%, de 5% a 95%, ou de 0% a 100% do valor final. A variação da faixa se dá de acordo com o tipo de sistema, se o mesmo é subamortecido, amortecido ou superamortecido;
- ✓  $t_d$  (tempo de atraso): é o tempo necessário para que a resposta alcance metade do seu valor pela primeira vez;
- ✓  $t_p$  (tempo de pico): é o tempo para que a resposta atinja o primeiro pico de sobre-sinal;
- ✓  $t_s$  (tempo de acomodação): é o tempo necessário para que a curva de resposta alcance valores dentro de uma faixa, geralmente de  $\pm 2\%$  a  $\pm 5\%$ , em torno do valor final;
- ✓  $M_p$  (máximo sobre-sinal, *overshoot*): é o valor máximo de pico da curva de resposta. E é calculado como:

$$Mp = \frac{C(tp) - C(\infty)}{C(\infty)} \quad \text{eq. [ 2 ]}$$

Além destes, alguns outros parâmetros não demonstrados na figura 1.15 podem ser relevantes na análise de desempenho do controlador; como por exemplo:

- ✓  $Td$  (tempo morto): é a quantidade de tempo necessária para se detectar uma mudança na variável de processo após uma mudança no valor enviado para a saída de controle;
- ✓  $ess$  (offset ou erro em estado estacionário): diferença entre o valor desejado e o valor final atingido pela variável de processo.

Em uma situação ideal, cada um dos parâmetros apresentados acima teria de ser ajustado para que todos tendessem a zero, o que é impossível na prática. Portanto, deve-se analisar o processo a ser controlado para minimizar a maioria desses parâmetros.

#### 1.3.7.6 Controladores on/off

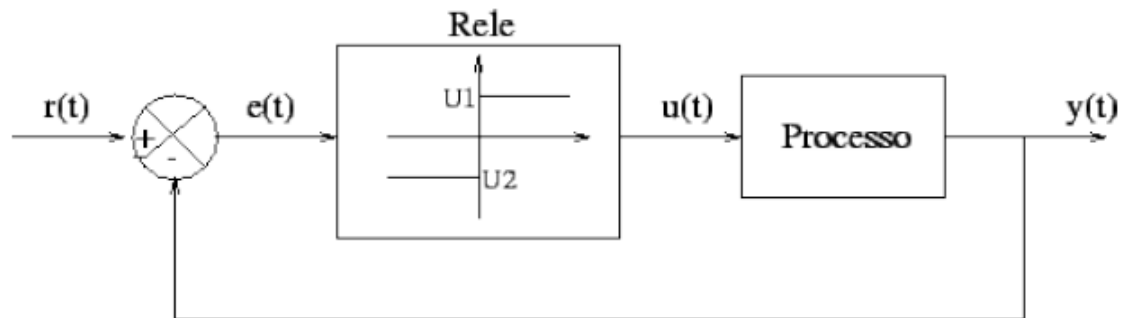
Os controladores podem ser entendidos como um dispositivo que realiza operações matemáticas sobre o sinal de erro  $e(t)$ , a fim de produzir o sinal  $u(t)$  a ser empregado a planta com o intuito de satisfazer o objetivo estipulado. Estas operações matemáticas constituem o que chamamos de ações de controle. Podemos identificar 4 ações básicas de controladores:

Detalharemos as 4 ações, sendo que sua compreensão física são fundamentais para o perfeito entendimento e sintonia dos controladores PID (SOUZA et al. 2013).

Neste tipo de ação o controlador é modelado por um relé conforme mostra a Figura 1.15

**Figura 1.15 - Ilustrativo do Relé do Controle on-off**

Fonte: Silva, 2001.



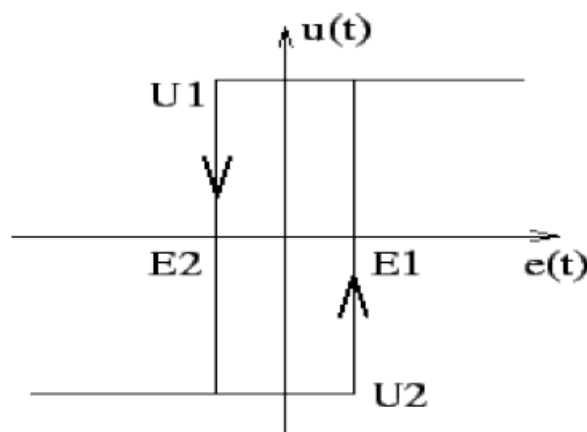
O sinal de controle  $u(t)$  pode assumir apenas dois valores, conforme o erro seja positivo ou negativo. Em outras palavras tem-se:

Este tipo de função pode ser implementada como um simples comparador ou mesmo um relé físico. Neste caso teríamos uma fraqueza em zero, na presença de ruídos, teríamos chaveamentos espúrios quando o sinal  $e(t)$  for próximo de zero.

Para evitar este tipo de problema, utiliza-se na prática o que chamamos de controlador liga-desliga com histerese mostrado na figura 1.16.

**Figura 1.16 - Ilustrativo de Controlador Liga-Desliga com Histerese.**

Fonte: Silva, 2001.





Com este tipo de controlador temos o seguinte comportamento:

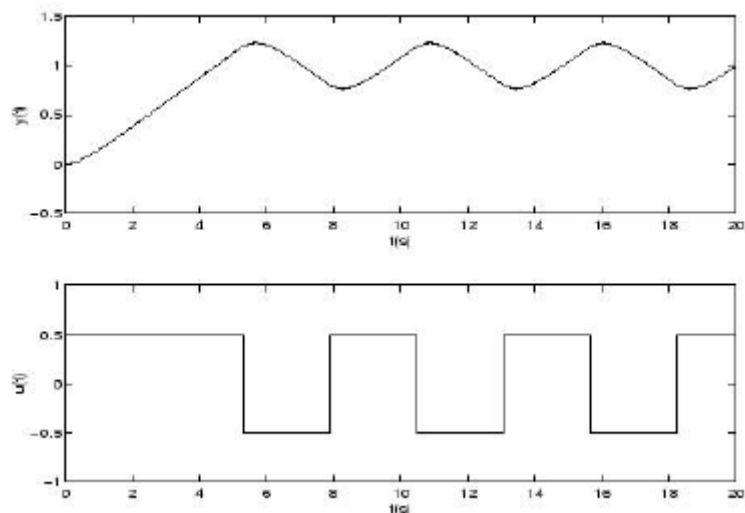
- ✓ Se  $u(t)=U1$ , é necessário que o valor de  $e(t)$  desça abaixo de  $- E2(t)$  para que haja um chaveamento para  $U2$ .
- ✓ Se  $u(t)=U2$ , é necessário que o valor de  $e(t)$  ultrapasse o valor de  $E1$  para que haja um chaveamento para  $U1$ .

O gráfico da figura 1.17 mostra a curva de resposta em malha fechada e seu respectivo sinal de controle para um sistema com controladores liga-desliga (on - off) com histerese. Em regime permanente, as saídas dos sistemas apresentam oscilações em torno do valor de referência.

Fato que denota sua baixa precisão obtida com estes tipos de controladores. Sua amplitude e frequência de oscilação são funções do intervalo  $[E1, E2]$ . Sua determinação de intervalo  $[E1, E2]$  devera ser feita levando-se em consideração sua precisão desejada, aos níveis de ruído e a vida útil dos componentes envolvidos neste intervalo. (SOUZA et al. 2013).

**Figura 1.17 - Controle On /Off**

Fonte: Silva,2001.



Sua ação de controle (liga-desliga) pode ser considerada ação de controle mais simples e mais econômica. Este tipo de ação possui limitações no que diz respeito ao comportamento ativo e em regime permanente do sistema em malha fechada. Suas aplicações restringem-se a sistemas onde não é necessária precisão nem bom desempenho ativo (SOUZA et al. 2013).

### 1.3.7.7 Controlador PID

Existem três estruturas predominantes para um controlador PID. A utilização de cada uma dessas estruturas influencia não só na implementação do controlador, mas também na sintonia do mesmo. Alguns fabricantes de PLC's utilizam estruturas diferentes, o que exige uma maior atenção do profissional que irá lidar com a implementação/manutenção dos controladores (JENG et al. 2014).

As três estruturas são:

- ✓ **Ideal (padrão; ISA, não-interativa):** é definida pela equação:

$$CO = Kp \times \left( E + Ki \times \int E dt + Kd \times \frac{dE}{dt} \right) \quad \text{eq. [ 3 ]}$$

Onde:

- CO = Saída do Controlador;
- E = PV – SP;
- Kp = Ganho Proporcional;
- Ki = Ganho Integral;
- Kd = Ganho Derivativo.

- ✓ **Série (interativo):** é definida pela equação:

$$CO = Kp \times (1 + Ki (Kd)) \times \left( E + \frac{1}{1/Ki + Kd} \times \int E dt + \frac{dE/dt}{1/Kd + Ki} \right) \quad \text{eq. [ 4 ]}$$

✓ **Paralelo (não-interativo):** é definida pela equação:

$$CO = Kp \times (E + Ki) \times \int E dt + \left( Kd \times \frac{de}{dt} \right) \quad \text{eq. [ 5 ]}$$

Apesar de apresentarem estruturas diferentes, é possível obter parâmetros equivalentes para as três estruturas, e assim, obter a mesma resposta para o controlador em questão (JENG et al. 2014).

#### 1.3.7.7.1 Ação proporcional

A ação proporcional de um controlador pode ser descrita, de uma forma sucinta, como um amplificador operacional puro, que multiplica o valor do erro do sistema pela constante  $Kp$  para obter o valor da variável de saída (SEGOVIA et al. 2014).

Como não há padrões em controladores PID, fabricantes utilizam várias unidades para mensurar a ação proporcional. A mais comum é o ganho proporcional, explicado anteriormente, que também pode ser obtido dividindo a diferença obtida na saída pela diferença aplicada na entrada. Porém, é possível encontrar variações para a medição da ação proporcional, e a mais comum dentre estas é a banda proporcional, que pode ser definida como uma representação gráfica da faixa do controlador e é igual ao inverso do ganho proporcional em porcentagem.

$$Kp = \frac{\Delta CO}{\Delta E} \quad \text{eq. [ 6 ]}$$

$$Pb = \left( \frac{1}{Kp} \right) \times 100\% \quad \text{eq. [ 7 ]}$$

Quando se utiliza um controlador puramente proporcional, deve-se observar que quanto maior o valor de  $K_p$ , menor será o erro em estado estacionário; porém, este erro nunca será anulado completamente. Além disso, se aumentarmos muito o ganho proporcional em sistemas de segunda ou maior ordem, o mesmo pode apresentar instabilidade. Num controlador proporcional puro, a saída de controle seria:

$$CO = K_p \times E \qquad \text{eq. [ 8 ]}$$

Alguns controladores industriais trazem seus parâmetros em função do ganho proporcional ou da banda proporcional, cabendo ao profissional observar esses detalhes para um ajuste ótimo do controlador (PAUL et al. 2014).

#### 1.3.7.7.2 Ação integral

Como dito anteriormente, a ação proporcional pura consegue diminuir o sinal de erro presente no sistema, mas não consegue anulá-lo. Isso pode ser feito através do ajuste de um *feedforward*, porém essa é uma solução de curta duração, pois no surgimento de um distúrbio de carga qualquer, o erro residual aparecerá novamente.

Para eliminar o erro em estado estacionário permanentemente, utiliza-se a ação integral, que age através da integral do erro no tempo. Isso também pode ser explicado pela integral levar em conta o histórico do processo, ou seja, modifica a saída de controle de acordo com o histórico do erro. Diferentemente da ação proporcional que modifica a saída de controle apenas baseada no erro atual (JENG et al. 2014).

É importante notar que a ação integral age somente para eliminar o erro característico de um controle puramente proporcional, e tal ação traz consigo consequências. Uma das mais notórias é o aumento do *overshoot* com o aumento da parcela de ganho integral inserida no controlador. Analogamente a ação proporcional, há duas maneiras mais comuns de se especificar a ação integral. Uma delas é o ganho integral  $K_i$ ; e a outra é o tempo de integral  $T_i$ . A relação entre as duas ações pode ser vista na equação abaixo:

$$K_i = \frac{1}{T_i} \quad \text{eq. [ 9 ]}$$

Não são encontrados controladores puramente integrais na indústria, pois os mesmos não podem ser aplicados separados de uma ação proporcional. Para tanto, utiliza-se o controlador PI (proporcional e integral), cuja relação entre saída e erro para a estrutura de um controlador em paralelo pode ser vista na equação abaixo.

$$CO = (K_p \times E) + (K_i \times \int E dt) \quad \text{eq. [ 10 ]}$$

#### 1.3.7.7.3 Ação derivativa

A ação derivativa dificilmente é utilizada nos controladores industriais, devido a dualidade de opiniões sobre o seu uso entre os profissionais da área. Assim como a ação integral, a derivativa não pode ser aplicada isoladamente, e sim acompanhada de uma ação proporcional, constituindo-se assim um controle PD (proporcional e derivativo) (YANG et al. 2012)..

A variação na saída do controlador devido a ação derivativa pode ser descrita como uma ação proporcional a velocidade da variação do sinal de erro, ou seja, a parcela derivativa do controlador tem o intuito de reduzir a velocidade das variações da variável de processo, evitando que a mesma aumente ou diminua muito bruscamente. Devido a isso, a ação derivativa também é conhecida como ação antecipatória (ÁSTRÖM; HÄGGLUND, 1995).

Se o erro do sistema é constante, não há variações da saída do controlador oriundas da ação derivativa, pois se derivarmos uma constante, naturalmente o resultado será nulo. Observa-se melhor a atuação do controle derivativo durante o estado transitório do sistema, na presença de perturbações de carga, mudanças de *setpoint* ou durante a partida do processo (COSTELLO, 2013)..

Uma das maiores consequências do uso da ação derivativa nos controladores é a diminuição do *overshoot* e a rejeição a grandes mudanças no sinal de erro. Porém, a parcela derivativa presente no controlador causa um aumento no tempo de subida do sistema, tornando-o mais lento, e inviável para certas aplicações (ÁSTRÖM; WITTENMARK, 2013).

Além disso, para respostas com erros pequenos e com presença de ruídos, o controlador pode computar grandes derivadas, resultando em grandes saídas de controle sem necessidade. Tornando extremamente importante o uso de filtros de ruído, para evitar a amplificação dos mesmos pela ação derivativa do controlador.

Diferentemente da ação integral, a derivativa não apresenta diferenças entre o tempo derivativo  $Td$  e o ganho derivativo  $Kd$ , o que torna mais simples a padronização do controlador (ÁSTRÖM; HÄGGLUND, 1995). A ação derivativa pode ser usada somente com a proporcional, ou em conjunto com as duas outras ações, formando o PID.

$$CO = (Kp \times E) + \left( Kd \times \frac{dE}{dt} \right) \quad \text{eq. [ 11 ]}$$

#### 1.3.7.8 Sintonia de controladores PID

A sintonia de um controlador pode ser definida, simplificada, como definir os valores de ganho das ações proporcional, integral e derivativa, para alcançar o objetivo de controle adequado aquela malha. Como discutido anteriormente, tal objetivo de controle varia de acordo com o processo em questão e suas condições ótimas de funcionamento (FORMENTIN et al. 2014).

Ao sintonizarmos uma malha, devemos escolher o tipo de sintonia mais adequada a mesma: agressiva, lenta ou intermediária. Apesar de, na escolha de uma sintonia agressiva, o controle estar sempre mais próximo a instabilidade, tal estratégia se torna necessária para malhas com constantes mudanças de *setpoint*, caso comum em malhas que possuem o mesmo sendo calculado em tempo real (JENG et al. 2014).

Por outro lado, se escolhermos uma sintonia lenta, na presença de perturbações ou mudanças de *setpoint*, o erro gerado será corrigido lentamente, sendo assim inviável para alguns casos onde é extremamente importante que tais erros não persistam na malha.

Deve-se ter muita cautela na sintonia de controladores, pois apesar de não haver nenhuma restrição prévia para os valores de ganhos, o ajuste impensado dos mesmos pode levar o controlador a insensibilidade ou a instabilidade. Geralmente a razão entre a instabilidade e a insensibilidade pode ser determinada por um fator de 4, tanto para o ganho proporcional quanto para o integral e derivativo (KIENLE et al. 2014).

Os dois métodos de sintonia de controladores PID mais utilizados na prática atualmente apresentam objetivos de sintonia completamente opostos. Um busca respostas rápidas a qualquer tipo de perturbações, sem preocupar-se com oscilações ou *overshoot* e é chamado de Sintonia *Ziegler-Nichols*; e o outro é chamado de Sintonia *Lambda*, que apresenta resposta lenta a perturbações ou mudanças de *setpoint*, mas possui estabilidade e robustez maiores que a de *Ziegler-Nichols* (KIENLE et al. 2014).

Apesar de opostas, os dois métodos abarcam uma boa parte das necessidades de sintonia presentes na indústria. No caso de um *setpoint* dinâmico, que é calculado durante cada *scan* do PLC, se torna mais adequado o método ZN (*Ziegler-Nichols*), já no caso de um *setpoint* estático, que apresenta modificações somente por demandas do processo, pode ser adotado o método *Lambda*. Mas estes não são os únicos métodos possíveis de sintonia de controladores, havendo várias outras possibilidades de sintonia (KIENLE et al. 2014).

#### **1.3.7.8.1 Sintonia por tentativa e erro**

Este é o método de sintonia mais utilizado atualmente em sistemas industriais, talvez esse seja um dos maiores responsáveis pelo mau funcionamento da maioria das malhas de controle. Tal método consiste em alterar, iterativamente, os valores de  $K_p$ ,  $K_d$  e  $K_i$ ; buscando melhorar o desempenho do controlador (ÁSTRÖM, HÄGGLUND, 1995).

Embora seja possível obter resultados considerados bons, para tal é necessário uma grande experiência dos profissionais responsáveis pela sintonia. Além disso, na maioria das vezes, tais resultados são mantidos somente fora da presença de distúrbios de carga ou mudanças de *setpoint*, pois é feita uma mudança nos parâmetros de forma a diminuir as oscilações. Isso causa uma falta de sensibilidade do controlador a quaisquer distúrbios do sistema, apesar de diminuídas consideravelmente as oscilações (ÁSTRÖM; WITTENMARK, 2013).

Porém, apesar de não ser uma técnica muito eficiente se utilizada isoladamente, a sintonia por tentativa e erro pode ser muito útil após a aplicação de outros métodos de sintonia. Segundo Yang (2012), para tanto, é necessário entender as alterações causadas pelas modificações em cada um dos ganhos do controlador. Seborg et al. (1989) apresentam algumas considerações adotadas na sintonia por tentativa e erro:

- ✓ Se aumentarmos muito  $K_p$ , controlador responderá mais rapidamente ao aparecimento de um erro, porém, isso causará oscilações tanto na PV quanto na CO. No caso desta última, é gerado um desgaste excessivo no atuador.
- ✓ Por outro lado, se diminuirmos muito  $K_p$ , certamente as oscilações na PV e CO serão atenuadas, mas o controlador se tornará mais lento para correção de erros e em um caso extremo até insensível as mesmas.
- ✓ Para corrigir o erro em estado estacionário deixado em caso de um controle apenas proporcional, é incorporado o controle integral para eliminar tal erro. Se  $K_i$  for muito pequeno, o erro será corrigido muito lentamente. Em contrapartida, se aumentarmos muito  $K_i$ , o sistema se tornará rápido, porém oscilatório e mais próximo da instabilidade.
- ✓ Além da ponderação entre velocidade e estabilidade, o controle integral deve trazer consigo a preocupação de saturação da saída do controlador, conhecida como “Reset Windup”. Para isso é recomendável acoplar mecanismos de limitação da ação integral (“anti-windup”), aliados a utilização de parâmetros mais conservativos.



- ✓ A ação derivativa pode diminuir os efeitos desestabilizadores da ação integral, reduzindo as oscilações na PV e na CO, pois tem efeito antecipatório, ou seja, que age com base na tendência do sinal de erro, diminuindo o tempo de acomodação do sistema. Porém, deve-se tomar cuidado, pois esta ação amplifica os sinais de alta frequência, como ruídos por exemplo. Portanto, sendo necessária a implementação de um filtro na PV, o que nem sempre é possível.

#### 1.3.7.8.2 Sintonia pelo método de Ziegler- Nichols

Segundo Segovia (2014), a grande difusão do método ZN se deve a facilidade de sua implantação em plantas e sistemas de controle reais, e aos resultados frequentemente bons obtidos com sua aplicação, mas deve-se observar que tal método gera respostas muito agressivas do controlador, sendo inviável para alguns casos.

Na verdade Ziegler e Nichols propuseram dois métodos para determinação dos parâmetros de controladores P, PI e PID. Um método em malha aberta que usa a curva de resposta ao degrau (“Curva de Reação”) e outro em malha fechada (“*continuous cycling method*”). Nesse primeiro instante trataremos apenas do método em malha fechada (ÁSTRÖM; HÄGGLUND, 1995).

O método ZN em malha fechada tem a vantagem de poder ser realizado em sistemas que possuem dinâmica e modelo desconhecidos, o que facilita sua aplicação em indústrias. Porém, o mesmo foi desenvolvido para gerar *overshoot* de aproximadamente 25%, podendo variar de 10% a 60%. Para a diminuição de *overshoot* pode-se utilizar uma sintonia fina através de tentativa e erro depois de obtida a sintonia de ZN.

Para obtenção dos parâmetros, primeiramente deve-se zerar os ganhos integral e derivativo, de forma a deixar o controlador apenas com a parcela proporcional. Então, deve-se aumentar o ganho proporcional até que sejam obtidas oscilações contidas (de mesma amplitude e período) na PV.

Almeida, R. G. Estratégia de controle para um processo de flotação por ar dissolvido (FAD) de separação água / óleo.

O valor de  $K_p$  para o qual o sistema apresentou oscilações é denominado ganho crítico ( $K_{cr}$ ), e o período das oscilações é denominado período crítico ( $P_{cr}$ ). Vale ressaltar que este método serve apenas para modelos de ordem igual ou superior a dois (ÁSTRÖM; HÄGGLUND, 1995).

A partir do ganho e período críticos, é possível determinar os ganhos para controladores P, PI ou PID conforme a tabela 1.1. Lembrando que se utilizados sem um posterior refinamento, os parâmetros obtidos pelo método ZN geram um controlador agressivo.

**Tabela 1.1 – Parâmetros de Sintonia por Ziegler-Nichols**

Fonte: SEBORG, 1989.

<b>Controlador</b>	<b><math>K_p</math></b>	<b><math>T_i</math></b>	<b><math>T_d</math></b>
P	$0,5 \times K_{cr}$	-	-
PI	$0,45 \times K_{cr}$	$0,83 \times P_{cr}$	-
PID	$0,6 \times K_{cr}$	$0,5 \times P_{cr}$	$0,125 \times P_{cr}$

A sintonia gerada pelo método ZN gera uma resposta com taxa de amortecimento de  $\frac{1}{4}$  de onda. Porém, para algumas aplicações tanto o *overshoot* quanto o decaimento de  $\frac{1}{4}$  apresentado pela sintonia de ZN são indesejáveis. Assim, foi proposto por Seborg et al. (1989) uma modificação dos parâmetros de modo a obter-se uma resposta mais lenta e amortecida. Tais modificações estão demonstradas na tabela 1.2.

**Tabela 1.2 – Parâmetros Modificados de Sintonia por Ziegler-Nichols**

Fonte: SEBORG, 1989.

	$K_p$	$T_i$	$T_d$
Original (1/4 decaimento)	$0,6 \times K_{cr}$	$0,5 \times P_{cr}$	$0,125 \times P_{cr}$
Algum overshoot	$0,33 \times K_{cr}$	$0,5 \times P_{cr}$	$0,333 \times P_{cr}$
Sem overshoot	$0,2 \times K_{cr}$	$0,5 \times P_{cr}$	$0,333 \times P_{cr}$

#### 1.3.7.8.3 Sintonia por métodos baseados em modelos de 1ª ordem

Também conhecida como métodos de sintonia baseados em modelos FOPDT (“*First Order Plus Dead Time*” – Primeira ordem mais tempo morto), este tipo de sintonia oferece uma alternativa para a determinação de parâmetros de sistemas cujo método de ZN em malha fechada pode ser inadequado. Seja pelo fato de se levar o sistema próximo a instabilidade ou pela presença de grandes constantes de tempo (ÁSTRÖM; WITTENMARK, 2013).

Se o modelo FOPDT do sistema for conhecido, torna-se uma tarefa trivial sintonizar um controlador PID. Um dos problemas que podem ser levantados são a simplicidade e imprecisão dos modelos de 1ª ordem, mas mesmo com tais características, os FOPDT's podem descrever satisfatoriamente a maioria dos sistemas encontrados nas indústrias. O maior problema enfrentado pelos profissionais é encontrar tal modelo.

Uma das formas mais utilizadas para obtenção do modelo FOPDT é observando a resposta do sistema, em malha aberta, a um degrau na CO (“Curva de Reação” de ZN). Uma vez obtida essa resposta, pode-se determinar o ganho  $K$ , a constante de tempo  $\tau$  e o tempo morto  $\theta$  do sistema para determinação dos parâmetros de sintonia.

Almeida, R. G. Estratégia de controle para um processo de flotação por ar dissolvido (FAD) de separação água / óleo.

O maior problema desse tipo de sintonia é o fato de que apenas a inspeção visual da resposta do controlador não proporcionará a obtenção de tais parâmetros do controlador se o sinal de saída do sistema contiver ruídos, o que é muito comum na indústria. Assim, torna-se necessário um *software* para identificação e sintonia da malha (ÁSTRÖM; HÄGGLUND, 1995).

#### **1.3.7.8.4 Sintonia através de software**

Apesar de apresentarem altos índices de eficiência, os métodos manuais de sintonia são trabalhosos e imprecisos; principalmente devido ao fato de serem dependentes de várias informações, na maioria das vezes de difícil obtenção.

Métodos como o de ZN produzem uma sintonia muito agressiva, sendo necessária uma sintonia fina após a aplicação do mesmo; o oposto da sintonia *Lambda*, que produz parâmetros muito conservadores; já para o método Direto, se faz necessário o conhecimento do modelo do processo, que o torna muitas vezes inviável, e finalmente os métodos baseados em modelos FOPDT, se realizados sem o auxílio de um *software*, são muito prejudicados pela presença de ruídos (ÁSTRÖM; WITTENMARK, 2013)..

*Softwares* além de auxiliarem na sintonia de controladores, possuem vários parâmetros de diagnóstico de falhas e possíveis causas de desvios no desempenho do sistema (KIENLE et al. 2014).

### **1.3.8 Softwares de Simulação**

#### **1.3.8.1 Simulink / Matlab**

O Simulink é um pacote de um *software* para modelar, simular, e analisar sistemas dinâmicos. Suporta sistemas lineares e não-lineares modelados em tempo contínuo, tempo discreto ou com uma mistura dos dois. Os sistemas também podem ter partes diferentes que são amostradas ou atualizadas com taxas diferentes (PILTAN et al. 2012).

Almeida, R. G. Estratégia de controle para um processo de flotação por ar dissolvido (FAD) de separação água / óleo.

Para modelar, o Simulink possui uma interface gráfica com utilizador (GUI – Graphical User Interface) para construir modelos como diagramas de blocos, usando as operações de clicar-e-arrastar do "mouse". Com esta interface, o usuário pode construir os modelos da mesma forma que se constroem numa folha de papel (ou como a maioria dos livros de controle os descreve). Esta abordagem constitui um enorme avanço relativamente às soluções tradicionais que utilizam métodos numéricos (PILTAN et al. 2012).

O Simulink inclui uma biblioteca de blocos pré-definidos, podendo o usuário também personalizar e criar os seus próprios blocos.

Depois de definir um modelo, é possível simulá-lo. Alguns blocos permitem que se vejam os resultados enquanto a simulação estiver ainda a ser executada. Além disso, o aluno pode modificar os parâmetros e observar imediatamente os resultados obtidos. Os resultados da simulação podem ser enviados para o workspace do MATLAB para visualização e utilização posterior.

Muitas outras ferramentas do MATLAB podem ser usadas no Simulink, sendo por esse facto que o MATLAB e o Simulink estão integrados.

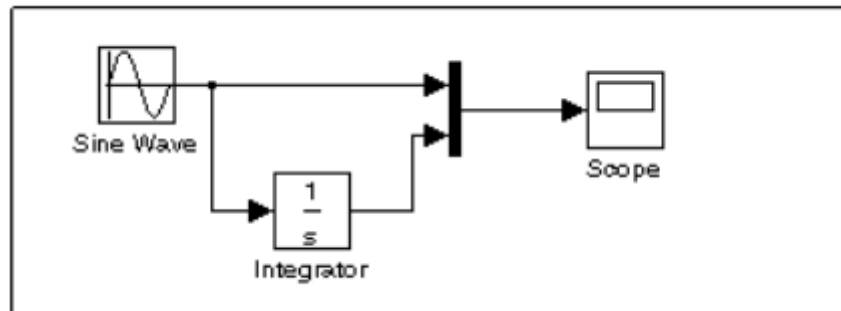
É possível simular, analisar, e rever os modelos em qualquer ambiente a qualquer ponto.

O Simulink permite-nos criar o modelo de qualquer tipo de artefato, dispositivo ou aparelho que não existe fisicamente e vê-los funcionando antes que venham a ser realmente construídos (PILTAN et al. 2012).

Construir um modelo utilizando muitos comandos de construção de modelos e ações utilizando o simulink é muito simples. O diagrama de blocos do modelo representado na figura 1.18, é composto por um integrador e um gerador de sinais sinusoidal. A onda sinusoidal é integrada e o osciloscópio (scope) apresenta os resultados.

**Figura 1.18 - Diagrama de Bloco do Simulink**

Fonte: PILTAN, 2012



O Matlab (Matrix Laboratory) trata-se de um software interativo de alta performance voltado para o cálculo numérico. O MATLAB integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos em ambiente fácil de usar onde problemas e soluções são expressos somente como eles são escritos matematicamente, ao contrário da programação tradicional (CHA et al. 2011).

O MATLAB é um sistema interativo cujo elemento básico de informação é uma matriz que não requer dimensionamento. Esse sistema permite a resolução de muitos problemas numéricos em apenas uma fração do tempo que se gastaria para escrever um programa semelhante em linguagem Fortran, Basic ou C. Além disso, as soluções dos problemas são expressas quase exatamente como elas são escritas matematicamente (SALMI et al. 2012).

### 1.3.8.2 Labview

O LabView (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) é uma linguagem de programação gráfica da National Instruments. Sua primeira versão surgiu no ano de 1986 para o Macintosh e atualmente existem ambientes de desenvolvimento integrado para outros sistemas operacionais como Windows, Linux e Solares (JENSEN; TALLMAN, 2013).

As principais áreas de aplicação do LabView são a realização de medições e automação. Sua programação é feita dependendo do seu modelo de fluxo de dados, oferecendo vantagens para a aquisição de dados e para sua manipulação.

Almeida, R. G. Estratégia de controle para um processo de flotação por ar dissolvido (FAD) de separação água / óleo.

A programação feita em LabView é também conhecida como instrumentos virtuais ou VI's. Estes programas são compostos por um painel frontal que contém a interface e pelo diagrama de blocos, que contém o código gráfico do programa. A programação em LabView não é processada por um interpretador, mas sim compilado desse modo sua performance é comparada às linguagens de programação de alto nível. A linguagem gráfica do LabView também é chamada de "G" (JENSEN; TALLMAN, 2013).

#### **1.3.8.2.1 Programação em Labview**

O programador conecta os VI's com linhas de ligação e define o fluxo de dados. Cada VI pode assumir o papel de entrada e/ou saídas. A execução dos VI's tem início quando todas as entradas estão disponíveis e os resultados do processamento são mostrados nas saídas somente quando a execução do subprograma chegue ao fim. Desse modo a ordem que pela quais as tarefas são executadas é definida em função dos dados. É importante ressaltar a facilidade com que pode ser criados processos paralelos no LabView. Os sub-VI's que não contém uma interdependência dos respectivos dados, são processados em paralelos (CHOUDER et al. 2013).

Muitas funções próprias do LabView são, por sua vez, VI's normais, podendo ser modificado pelo programador, porém este tipo de modificação não é recomendada. Estes VI's se baseiam numa série de funções básicas denominadas "primitivas" e estas não podem ser modificadas pelo programador (RAMASAMY et al. 2012).

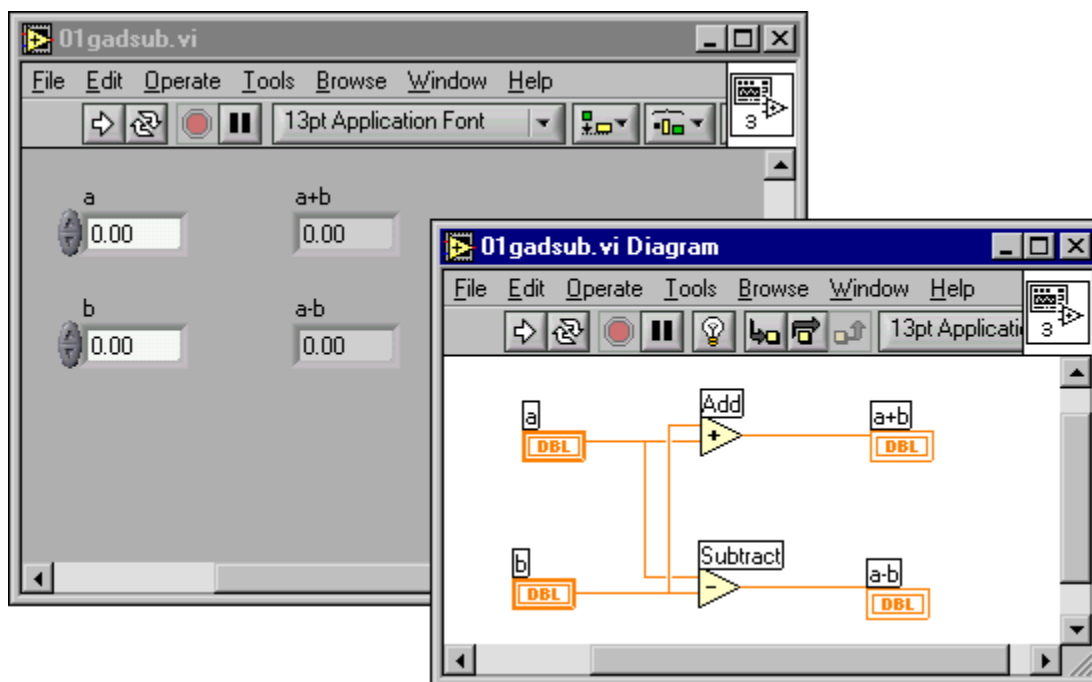
Muitos VI's e primitivas em LabView são polimorfos pois sua funcionalidade se adapta aos tipos de dados que recebem. O programador também pode construir os seus próprios VI's polimorfos. No entanto consistem numa coleção de vários VI's com diferentes tipos de dados, entradas e saídas (CHOUDER et al. 2013).

O Painel frontal do LabView oferece ao programador um ambiente de fácil utilização para construção de programas com uma boa interface gráfica evitando que o mesmo escreva inúmeras linhas de código. A apresentação gráfica dos processos aumenta a facilidade de leitura e de utilização.

Almeida, R. G. Estratégia de controle para um processo de flotação por ar dissolvido (FAD) de separação água / óleo.

A utilização deste instrumento virtual oferece uma grande vantagem em relação às linguagens baseadas em texto é a facilidade com que se cria componentes que se executam paralelamente (CHATTOPADHYAY et al. 2013).

**Figura 1.19 - Painel Frontal do Labview e seu Diagrama de Bloco correspondente.**





Almeida, R. G. Estratégia de controle para um processo de flotação por ar dissolvido (FAD) de separação água / óleo.

## 1.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMINI, Eiman et al. Influence of turbulence kinetic energy on bubble size in different scale flotation cells. **Minerals Engineering**, v. 45, p. 146-150, 2013.

ASSEMI, S.; NGUYEN, A.V.; MILLER, J.D. Direct measurement of particle-bubble interaction forces using atomic force microscopy. **International Journal of Mineral Processing**, v. 89, n. 1-4, p. 65-70, 2008.

ÅSTRÖM, Karl J.; HÄGGLUND, Tore. PID controllers: theory, design, and tuning. **Instrument Society of America, Research Triangle Park, NC**, 1995.

ÅSTRÖM, Karl J.; WITTENMARK, Björn. **Adaptive control**. Courier Dover Publications, 2013.

ATTARD, P. Nanobubbles and the hydrophobic attraction. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 104, n. 1-3, p. 75-91, 2003.

BEHIN, J.; BAHRAMI, S. Modeling an industrial dissolved air flotation tank used for separating oil from wastewater. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, 2012.

BENNETT, S. **A history of control engineering 1800-1930**. London: Peter Peregrinus, 1979.

BIANCHINI, Karina et al. GESTÃO DA ANÁLISE DE RESÍDUOS PRESENTES NA ÁGUA GERADA DA LAVAGEM DOS GASES ORIUNDOS DO PROCESSO DE REDUÇÃO DA CASSITERITA A ESTANHO EM ALTO-FORNOS, EM UMA EMPRESA MINERO-METALURGIA DO MUNICÍPIO DE ARIQUEMES, RONDÔNIA. **Revista Monografias Ambientais**, v. 14, n. 2, p. 3911-3918, 2014.

BUSINESS WEEK. **Texaco closes the loop**. New York: McGraw-Hill. 4 abr. 1959.

CALGAROTO, S.; WILBERG, K. Q.; RUBIO, J. On the nanobubbles interfacial properties and future applications in flotation. **Minerals Engineering**, v. 60, p. 33-40, 2014.

CHA, Minji et al. Deriving High-Performance Real-Time Multicore Systems Based on Simulink Applications. In: **Dependable, Autonomic and Secure Computing (DASC), 2011 IEEE Ninth International Conference on**. IEEE, 2011. p. 267-274.

CHATTOPADHYAY, Subrata; ROY, Ganesh; PANDA, Mrutyunjaya. Simple Design of a PID Controller and Tuning of Its Parameters Using LabVIEW Software. **Sensors & Transducers (1726-5479)**, v. 129, n. 6, 2011.

CHEN, G. Electrochemical technologies in wastewater treatment. **Separation and Purification Technology**, v. 38, n. 1, p. 11-41, 2004.

CHO, Y.S.; LASKOWSKI, J.S. Effect of flotation frothers on bubble size and foam stability. **International Journal of Mineral Processing**, v. 64, n. 2-3, p. 69-80, 2002.

Almeida, R. G. Estratégia de controle para um processo de flotação por ar dissolvido (FAD) de separação água / óleo.

CHOUDEUR, Aissa et al. Monitoring, modelling and simulation of PV systems using LabVIEW. **Solar Energy**, v. 91, p. 337-349, 2013.

CLARK, K. B.; WHEELWRIGHT, S. C. *Managing new product and process development: text and cases*. New York: The Free Press, 1993.

CORIOLOANO, A. C. C. **Voz sobre IP: Implementação e Teoria. Monografia**. Universidade Federal de Goiás. Goiás: 2003.

COSTELLO, Sean. PID Controller using an Arduino microcontroller and LabVIEW. **Bulletin of the American Physical Society**, v. 58, 2013.

CUNHA, Ananda Helena Nunes et al. Reuso de Água no Brasil. **VIII Seminário de Iniciação Científica e V Jornada de Pesquisa e Pós-graduação, Universidade Estadual de Goiás**. Disponível em: [http://www.prp.ueg.br/sic2010/apresentacao/trabalhos/pdf/agrarias/seminario/reuso\\_de\\_agua\\_no\\_brasil.pdf](http://www.prp.ueg.br/sic2010/apresentacao/trabalhos/pdf/agrarias/seminario/reuso_de_agua_no_brasil.pdf) Acesso em: 15 Janeiro 2013.

DA COSTA, M.N. A diferença entre os instrumentos do princípio da precaução e da prevenção utilizando o estudo de impacto ambiental e a certificação ambiental iso 14001. Monografia Jurídica apresentada à banca examinadora do Centro de Ensino Superior do Amapá – CEAP como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Direito, p. 91, 2008.

DANTAS, M. **Redes Locais -INE 5344**. Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina: 2002. Notas de Aula.

DESBOROUGH, L; MILLER, R. *Increasing customer value of industrial control performance monitoring - Honeywell's experience*. **AIChE Symposium Series**, n. 326, pp. 169-189, 2002.

DIAS, Vânia de Sousa et al. Estudo de monitoramento de reservatório. **Anuário da Produção de Iniciação Científica Discente**, v. 14, n. 26, p. 09-18, 2014.

DOS SANTOS, Edson et al. MODELAGEM E CONTROLE EM UM SISTEMA FAN & PLATE. **Revista de Controle e Automação**, v. 1, n. 1, 2013.

FORMENTIN, Simone; CAMPI, Marco C.; SAVARESI, Sergio M. Virtual Reference Feedback Tuning for industrial PID controllers\*. In: **19th IFAC World Congress, Cape Town, South Africa**. 2014.

GRAU, R.A.; LASKOWSKI, J.S.; HEISKANEN, K. Effect of frothers on bubble size. **International Journal of Mineral Processing**, v. 76, n. 4, p. 225-233, 2005.

HAYES, Mark J. **Dissolved Air Flotation System with Improved White Water Injection System**. U.S. Patent Application 13/029,783, 17 fev. 2011.

HAYES, Mark J.; ANDERSON, Joey M. **Dissolved air flotation system with bubble separation system and method of use**. U.S. Patent n. 8,431,027, 30 abr. 2013.

Almeida, R. G. Estratégia de controle para um processo de flotação por ar dissolvido (FAD) de separação água / óleo.

HERNANDEZ-AGUILAR, J.R.; CUNNINGHAM, R.; FINCH, J. A test of the tate equation to predict bubble size at an orifice in the presence of frother. **International Journal of Mineral Processing**, v. 79, n. 2, p. 89-97, 2006.

HOLMES, Robert M. et al. Climate change impacts on the hydrology and biogeochemistry of Arctic rivers. **Climatic Change and Global Warming of Inland Waters: Impacts and Mitigation for Ecosystems and Societies**, p. 3-26, 2013.

JENG, Jyh-Cheng; TSENG, Wan-Ling; CHIU, Min-Sen. A one-step tuning method for PID controllers with robustness specification using plant step-response data. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 92, n. 3, p. 545-558, 2014.

JENSEN, Mark B.; TALLMAN, Dennis E. A LabVIEW-based virtual instrument for simulation and analysis of SECM approach curves. **Journal of Solid State Electrochemistry**, v. 17, n. 12, p. 2999-3003, 2013.

JUGEND, Daniel.; SILVA, S. L.; TOLEDO, J. C. Esforço inovador presente em empresas de base tecnológica de pequeno e médio porte: a perspectiva do setor de automação industrial. In: XI Seminário Latino – Iberoamericano de Gestão Tecnológica (ALTEC): Innovación Tecnológica, Cooperación y Desarrollo - Salvador, BA, 26 a 28 out. 2005. *Anais*.

KATSUHIKO, O. Engenharia de Controle Moderno, São Paulo, SP, ed. 2009.

KIENLE, Achim; SOMMER, Steffen; NGUYEN, Hoang N. Auto-tuning of multivariable PI/PID controllers using iterative feedback tuning: design examples. In: **24 European Symposium on Computer Aided Process Engineering**. 2014. p. 721-726.

LIU, Jinping et al. Recognition of the operational statuses of reagent addition using dynamic bubble size distribution in copper flotation process. **Minerals Engineering**, v. 45, p. 128-141, 2013.

LIU, Shu et al. The effect of different types of micro-bubbles on the performance of the coagulation flotation process for coke waste-water. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 87, n. 2, p. 206-215, 2012.

MENEZES, Carlyle TB et al. Replacing synthetic with microbial surfactants as collectors in the treatment of aqueous effluent produced by acid mine drainage, using the dissolved air flotation technique. **Applied biochemistry and biotechnology**, v. 163, n. 4, p. 540-546, 2011.

MISHCHUK, N.; RALSTON, J.; FORNASIERO, D. Influence of very small bubbles on particle/bubble heterocoagulation. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 301, n. 1, p. 168-175, 2006.

NIKAČEVIĆ, Nikola M. et al. Opportunities and challenges for process control in process intensification. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 52, p. 1-15, 2012.

Almeida, R. G. Estratégia de controle para um processo de flotação por ar dissolvido (FAD) de separação água / óleo.

OLAVE, M. E. L. *As PMES de automação industrial na dinâmica empresarial*: possibilidades de formação de redes de cooperação no Estado de São Paulo. São Paulo, 2003, 219p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Escola Politécnica de São Paulo, Universidade de São Paulo.

OLIVEIRA, Cristiane; RUBIO, Jorge. A short overview of the formation of aerated flocs and their applications in solid/liquid separation by flotation. **Minerals Engineering**, v. 39, p. 124-132, 2012.

PARK, S. C. et al. An Effect of the Micro Bubble Formation Depending on the Saturator and the Nozzle in the Dissolved Air Flotation System. **Journal of Korean Society of Environmental Engineers**, v. 35, n. 12, p. 929-936, 2013.

PAUL, Pubali Mitra; DEY, Chanchal; MUDI, Rajani K. An online dynamic set point weighting scheme for PID controller. In: **Students' Technology Symposium (TechSym), 2014 IEEE**. IEEE, 2014. p. 188-192.

PILTAN, Farzin et al. PUMA-560 Robot Manipulator Position Computed Torque Control Methods Using MATLAB/SIMULINK and Their Integration into Graduate Nonlinear Control and MATLAB Courses. **International Journal of Robotics and Automation**, v. 3, n. 3, p. 167-191, 2012.

PIRES, S. R. I. *Gestão estratégica da produção*. Piracicaba: Ed. Unimep, 1995.

PUGET, F. P.; MELO, M. V.; MASSARANI, G. Comparative study of flotation techniques for the treatment of liquid effluents. **Environmental technology**, v. 25, n. 1, p. 79-87, 2004.

RALSTON, J.; DUKHIN, S.S.; MISHCHUK, N.A. Wetting film stability and flotation kinetics. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 95, n. 2-3, p. 145-236, 2002.

RAMASAMY, SUDHA et al. A novel and pedagogical approach to teach PID controller with LabVIEW signal express. In: **Engineering Education: Innovative Practices and Future Trends (AICERA), 2012 IEE International Conference on**. IEE, 2012. p. 1-8.

RHINEHART, R. R.; SHINSKEY, F. G.; WADE, H. L. 2.3 **Control Modes—PID Variations**, 2006.

ROBERTS, G. *Trends in marine control systems*. **Annual Reviews in Control**, n. 32, pp. 263-269, 2008.

RODRIGUES, Rafael Teixeira; RUBIO, Jorge. DAF—dissolved air flotation: Potential applications in the mining and mineral processing industry. **International Journal of Mineral Processing**, v. 82, n. 1, p. 1-13, 2007.

ROMAGNOLI, Jose A.; PALAZOGLU, Ahmet. **Introduction to process control**. CRC Press, 2012.

SALMI, Tarak et al. Matlab/simulink based modeling of photovoltaic cell. **International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)**, v. 2, n. 2, p. 213-218, 2012.

Almeida, R. G. Estratégia de controle para um processo de flotação por ar dissolvido (FAD) de separação água / óleo.

SARROT, V.; GUIRAUD, P.; LEGENDRE, D. Determination of the collision frequency between bubbles and particles in flotation. **Chemical Engineering Science**, v. 60, n. 22, p. 6107-6117, 2005.

SEGOVIA, V.R.; THEORIN, A. **History of control: history of PLC and DCS.**

Disponível em

<[http://www.control.lth.se/media/Education/DoctorateProgram/2012/HistoryOfControl/Vanessa\\_Alfred\\_report.pdf](http://www.control.lth.se/media/Education/DoctorateProgram/2012/HistoryOfControl/Vanessa_Alfred_report.pdf)>. Acessado em 21 Agosto. 2013.

SEGOVIA, V. Romero; HÄGGLUND, Tore; ÅSTRÖM, Karl Johan. Measurement noise filtering for PID controllers. **Journal of Process Control**, v. 24, n. 4, p. 299-313, 2014.

SENAI. *Controladores Lógico Programáveis*. Araraquara: SENAI, 2011. (material para o curso de C. L. P.).

SHERIDAN, Thomas B. Adaptive automation, level of automation, allocation authority, supervisory control, and adaptive control: Distinctions and modes of adaptation. **Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on**, v. 41, n. 4, p. 662-667, 2011.

SIMONSEN, A.C.; HANSEN, P.L.; KLÖSGEN, B. Nanobubbles give evidence of incomplete wetting at a hydrophobic interface. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 273, n. 1, p. 291-299, 2004.

SIVAMOHAN, R. The problem of recovering very fine particles in mineral processing - a review. **International Journal of Mineral Processing**, v. 28, n. 3-4, p. 247-288, 1990.

SOUZA, André Eduardo Batistel de; BATISTA, Fernanda Rodrigues; LIMA JUNIOR, Marcos Sérgio Pacheco dos Santos. Desenvolvimento de um sistema supervisor e de controle para planta piloto de escoamento multifásico. 2013.

SOUZA, C. P. and COSTA FILHO, J. T. **Controle por computador**: desenvolvendo sistema de aquisição de dados. São Luís: Edufma, 2001.

TAO, D.; YU, S.; ZHOU, X.; HONAKER, R.Q.; PAREKH, B.K. Picobubble column flotation of fine coal. **International Journal of Coal Preparation and Utilization**, v. 28, n. 1, p. 1-14, 2008.

UNESCO. The 4th edition of the UN World Water Development Report. Disponível em: <http://www.unesco.org/new/en/naturalsciences/environment/water/wwap/wwdr/wwdr4-2012/>. Acesso em: 10 Abril 2014

VIEIRA, L. A. **LabView Aplicado a Aquisição de Dados**. National Instruments. Belém, 2005. Notas de Aula.

WALI, W. A. et al. Intelligent PID Controller for Real Time Automation of Microwave Biodiesel Reactor. **International Journal of Computer and Information Technology**, v. 2, n. 4, p. 809-814, 2013.

Almeida, R. G. Estratégia de controle para um processo de flotação por ar dissolvido (FAD) de separação água / óleo.

XU, Canhui et al. Flotation process fault detection using output PDF of bubble size distribution. **Minerals Engineering**, v. 26, p. 5-12, 2012.

YANG, J.; DUAN, J.; FORNASIERO, D.; RALSTON, J. Very small bubble formation at the solid-water interface. **Journal of Physical Chemistry B**, v. 107, n. 25, p. 6139-6147, 2003.

YANG, Liwei et al. Visualized study on the interaction between single bubbles and curved solid surface in flotation separation process. 2014.

YANG, Yang et al. Development of building automation and control systems. **IEEE Design & Test of Computers**, v. 29, n. 4, 2012.

YAP, R. K. et al. Hydrophobically-associating cationic polymers as micro-bubble surface modifiers in dissolved air flotation for cyanobacteria cell separation. **Water Research**, 2014.

YULONG, Shi et al. Study on the mechanism of the micro bubble formation of pressure dissolved air flotation and application. **Industrial Water Treatment**, v. 2, p. 006, 2012.

HAN, M. Y.; KIM, T. I. Dissolved Air Flotation Development, Application, and. **Handbook on Particle Separation Processes**, p. 117, 2011

ZHANG, X.H.; QUINN, A.; DUCKER, W.A. Nanobubbles at the interface between water and a hydrophobic solid. **Langmuir**, v. 24, n. 9, p. 4756-4764, 2008.

ZHAO, Lu et al. Fault condition recognition based on multi-scale co-occurrence matrix for copper flotation process. In: **World Congress**. 2014. p. 7091-7097.

ZHU, Jianyong et al. Probability Density Function of Bubble Size Based Reagent Dosage Control for Flotation Process. **Asian Journal of Control**, v. 16, n. 3, p. 765-777, 2014.

## **CAPÍTULO II**

## **ARTIGO**

### **Strategy for Controlling the Level in a Dissolved Air Flotation Chamber**



# **Estratégia de Controle de Nível em uma Câmara de Flotação por Ar Dissolvido**

**Rodrigo Almeida Galdino<sup>1,4</sup>, Alex Elton de Moura<sup>2,4</sup>, Valdemir Alexandre dos Santos<sup>3,4</sup>, Leonie Asfora Sarubbo<sup>3,4</sup>**

<sup>1</sup>Programa de Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil

<sup>2</sup>Centro de Tecnologia e Geociência, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil

<sup>3</sup>Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil

<sup>4</sup>Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação, Recife, Pernambuco, Brasil

**Correspondence:** Leonie Asfora Sarubbo (leonie@unicap.br), Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Católica de Pernambuco, Rua do Príncipe, n. 526, Boa Vista, CEP 50050-900, Recife, Pernambuco, Brasil

## **Abstract**

O objetivo deste trabalho foi implantar uma estratégia eficiente de controle do nível da interface efluente-espuma oleosa, em uma câmara de flotação por ar dissolvido (FAD) de um protótipo em escala piloto. A técnica de FAD tem sido utilizada com sucesso no tratamento de águas oleosas, um dos principais problemas ambientais em vários tipos de instalações industriais. Além de importantes parâmetros operacionais, como o tamanho das microbolhas e a razão de refluxo, a estratégia de controle escolhida para a automação das câmaras de FAD pode ser uma importante ferramenta para sua eficiência. O controle do nível foi a estratégia escolhida para auxiliar a melhoria da eficiência de separação em um protótipo piloto de FAD, utilizando-se uma supervisão através de um programa computacional em LabVIEW. Os resultados obtidos demonstram que a partir da aplicação de técnicas de controladores clássicos PID, foi possível manter o nível do líquido em um valor de referência estabelecido pelo usuário a partir do software. Com a adoção da referida ferramenta de controle, a eficiência de separação água-óleo na câmara de flotação do protótipo piloto ficou próximo a 98 %, validando a estratégia de controle adotada.

**Keywords:** FAD, Controle de nível, LabVIEW, PID, Separação líquido-líquido.

## 1 Introdução

As legislações ambientais são cada vez mais rigorosas e para seu cumprimento não basta simplesmente retirar, de uma água oleosa, o óleo que está presente na forma livre. É necessária também a remoção da quase totalidade do óleo que se encontra presente na forma emulsionada [1]. Para o caso mais geral, onde a água oleosa contém óleo livre e óleo emulsionado, o processo de tratamento dessas águas deve compreender as seguintes etapas principais [2]:

- Decantação - para a remoção de parcela de óleo livre, sendo aplicável toda vez que essa parcela seja significativa, evitando um maior consumo de produtos químicos na etapa seguinte;
- Tratamento físico-químico - para a quebra da emulsão, coagulação e floculação das gotículas de óleo e;
- Flotação: para a separação da fase oleosa, floculada da água tratada.

A técnica de separação por flotação ocorre quando há inserção de bolhas de ar no meio aquoso, seguida de adsorção de partículas sólidas ou líquidas dispersas no meio aquoso, as quais são arrastadas para a superfície do líquido. Na maioria das vezes essas partículas são tornadas hidrofóbicas pela adição de produtos químicos apropriados [3].

A flotação por ar dissolvido (FAD) é um processo de separação no qual as bolhas de ar, produzidas pela despressurização de uma corrente aquosa saturada com ar em uma pressão acima da pressão atmosférica, são utilizadas para capturar as partículas [1-3]. A separação do óleo por flotação tem sido considerada como a melhor alternativa para o tratamento de águas oleosas, esteja o óleo livre ou emulsionado, pois é de baixo custo (equipamentos compactos), fácil operação e muito eficiente, garantindo o cumprimento das exigências ambientais e, muitas vezes, permitindo o reuso da água [4].

Como em todo processo produtivo, um equipamento para ser inserido deve ser automatizado para que o sistema seja mantido em estado estacionário, durante sua operação [5]. Diante dessa necessidade de controle de mistura de fluidos e manutenção do nível da interface espuma-líquido no interior da câmara de flotação, o desenvolvimento de estratégias para atender tais necessidades, deve estar associado às condições para elevação da eficiência de separação em uma câmara de flotação [6].

É possível manter o nível de líquido, dentro da câmara de FAD, em consonância com os valores de referência estabelecidos previamente, através da utilização de sistemas de controle de processos, bem como, do desenvolvimento de controladores [7, 8]. Os sistemas de controle são compostos basicamente por elementos de medida (sensores), elementos de controle lógico (controladores) e elementos de atuação (válvulas). Estes elementos são responsáveis por realizar uma série de operações de medida, comparação, cálculo e correção de desvios do processo [9].

Entre os tipos de controladores o proporcional integral derivativo (PID) é um mecanismo de controle que calcula o erro entre um valor medido e um valor que se quer obter [10]. Esse tipo de controlador é aplicado quando se deseja uma ação de correção que possa ajustar determinado processo, fazendo assim com que, este sinal de erro seja minimizado pela ação proporcional, zerado pela ação integral e obtido antecipadamente pela ação derivativa [11, 12]. Este mecanismo é baseado na resposta da modelagem matemática de uma malha de processo a ser controlada [13]. Os ajustes dos mecanismos de controle podem ser testados virtualmente antes de serem postos em prática com auxílio de uma interface gráfica. Isso pode ser realizado utilizando-se a ferramenta LabVIEW® (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) da National Instruments. Essa ferramenta é composta por um ambiente de desenvolvimento de instrumentos virtuais. Através dessa interface gráfica, os resultados do controle de nível no processo FAD podem ser mostrados, testando-se as variáveis a serem controladas em função do tempo de resposta do controlador[14].

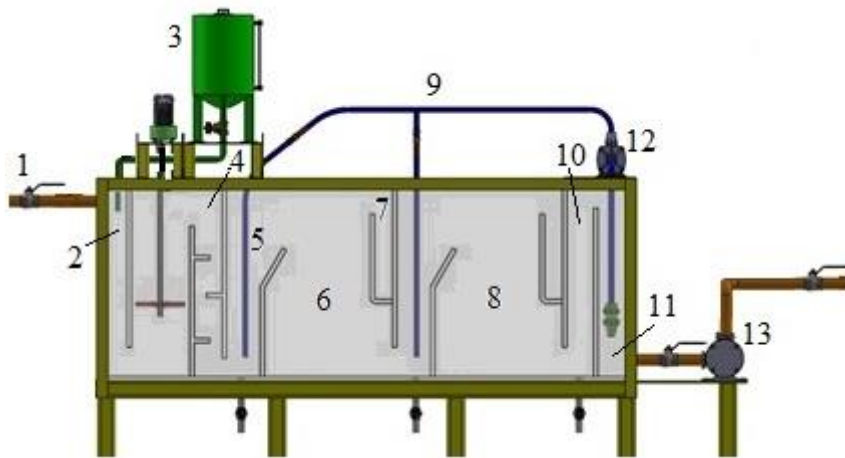
Neste sentido, este artigo descreve uma estratégia de controle, baseada na utilização de técnicas de controle de processo, bem como, de interface gráfica através do software LabVIEW com o objetivo de avaliar a variação do nível de líquido dentro de uma câmara de FAD, e mantê-lo em um valor de referência estabelecido previamente, ao mesmo tempo em que se avalia a influência desse tipo de controle na eficiência do processo.

## **2 Experimental**

### **2.1 Protótipo de FAD**

O desenvolvimento de estratégias de controle em câmaras de flotação por ar dissolvido foi realizado em um protótipo composto de duas câmaras de FAD, em série, com paredes confeccionadas em placas de acrílico transparente e suportadas por uma estrutura em cantoneira de aço. A (Fig. 1) apresenta uma vista lateral do protótipo piloto de flotação por ar dissolvido utilizado para testes experimentais de operação antes e após a implantação de uma estratégia de automação e controle. Observa-se na referida figura, da esquerda para a direita, o duto de entrada de água oleosa (1). O fluxo desse afluyente é então obrigado a passar por uma câmara com agitador estático (2), misturando-se preliminarmente a um fluxo de substância auxiliar de floculação contida em um tanque auxiliar (3). Deste ponto a mistura pré-floculada passa para uma segunda câmara munida de um agitador mecânico do tipo palhetas (4), acionado por um motor elétrico. Com um grau de mistura satisfatório, a mistura água-óleo, entra em contato com um fluxo de microbolhas que saem de um difusor (5), em uma câmara de flotação preliminar (6). A mistura do afluyente floculado com as microbolhas produzem uma espuma oleosa, a qual por diferença de densidade com a água, flota e é recolhida em um coletor (7), com auxílio do transbordamento dessa espuma na câmara. A água livre de grande parte do óleo passa para uma

segunda câmara de flotação (8), onde o processo de interação com um novo fluxo de microbolhas reinicia-se.



**Figura 1. Esquema com disposição dos componentes do protótipo de FAD.**

Os fluxos de microbolhas chegam às câmaras de flotação por dutos de distribuição (9) dos mesmos. A água tratada que sai da segunda câmara de flotação é induzida a passar por duas câmaras em série (10 e 11). Na última dessas câmaras, uma bomba centrífuga (12) recircula parte dessa água para produção de microbolhas. Na base dessa câmara um duto (13) libera a água tratada.

## 2.2 Estratégia de Controle Adotada

Esquemáticamente a Fig. 2 ilustra a estratégia de controle de nível adotada para implantação no protótipo de FAD. Na referida figura tem-se:

$\bar{Q}$  - vazão através do protótipo de FAD em regime permanente;

$\bar{H}$  - altura da coluna d'água na câmara de FAD do protótipo;

$q_i$  - pequena variação na vazão de entrada;

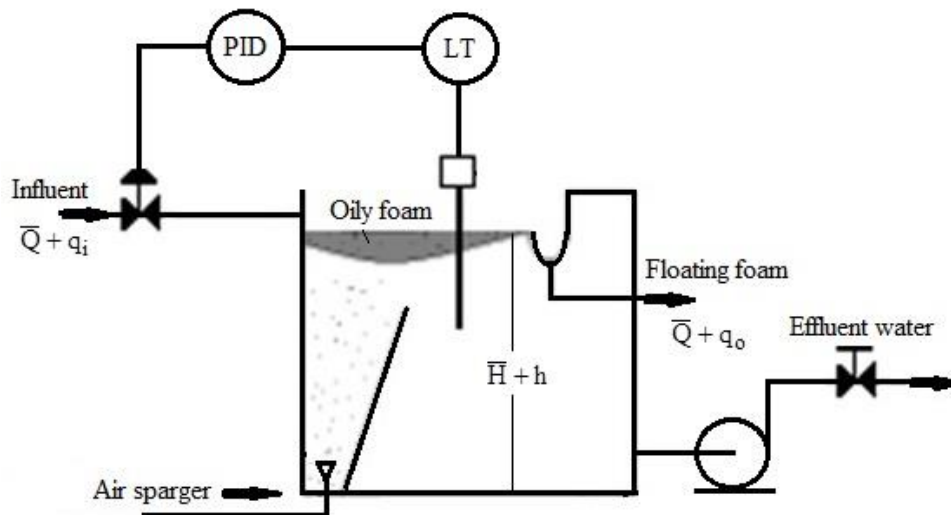
$q_o$  - pequena variação na vazão de saída;

$h$  - pequena variação na altura da coluna d'água  $\bar{H}$ .

A hipótese principal desta análise foi a de que um sistema linearizado em torno das posições de equilíbrio (regime permanente) produziu  $\bar{Q}$  e  $\bar{H}$ . Admitiu-se então que a vazão de saída em regime permanente era:

$$Q = k\sqrt{H} \quad (1)$$

Em que  $k$  era uma constante de proporcionalidade.



**Figura 2. Esquema utilizado na modelagem da função de transferência da estratégia de controle de nível no protótipo de FAD.**

A resistência  $R_T$  do escoamento para o fluxo turbulento era

$$R_T = \frac{dH}{dQ} \quad (2)$$

A partir da Equação (1) chegou-se a:

$$\frac{dH}{dQ} = \frac{2 \cdot \sqrt{H}}{k} = \frac{2H}{Q}$$

Dessa forma,

$$R_T = \frac{2 \cdot H}{Q} \quad (3)$$

No sistema de nível de líquido a relação para a válvula de restrição, na saída de água tratada, era:

$$R = \frac{h}{q_o} \quad (4)$$

E a capacitância  $C$  do reservatório, foi definida como a variação da quantidade de líquido armazenada, necessária para causar uma mudança unitária na altura da coluna de líquido na câmara de flotação. Então:

$$C \cdot \frac{dh}{dt} = q_i - q_o \quad (5)$$

Aplicando Laplace às equações (4) e (5):

$$R = \frac{H(s)}{Q_o} \Rightarrow Q_o = \frac{H(s)}{R}$$

$$C \cdot s H(s) = Q_i(s) - Q_o(s)$$

$$C \cdot s H(s) = Q_i(s) - \frac{H(s)}{R} \Rightarrow H(s) \left[ C \cdot s + \frac{1}{R} \right] = Q_i(s)$$

E a função de transferência obtida foi:

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{R}{R \cdot C \cdot s + 1} \quad (6)$$

### 2.3 Software de Controle

O software LabVIEW apresenta-se como uma ferramenta versátil para se trabalhar em diferentes ambientes e/ou plataformas, como por exemplo: Windows e Linux, não havendo incompatibilidade nos recursos. Pode-se utilizar o LabVIEW em aplicações de simulação, aquisição de dados e controle, automação de laboratório e monitoramento de processos. Este software permite atuações na área de controle de processos, com um alto grau de confiabilidade, diferenciando-se das outras linguagens por utilizar seu próprio código de programação e apresentação denominado Linguagem G (Graphics) [15].

A implementação do controle PID foi realizada no ambiente do LabVIEW, onde foram utilizados Instrumentos Virtuais (VI's) necessários para a construção do Diagrama de Bloco (Fig. 3), que são as estruturas de programação e fluxo de informações das entradas e saídas do sistema [16]. Além disso, foram desenvolvidos o programa principal e o sistema supervisorio para o controle de nível na unidade FAD.

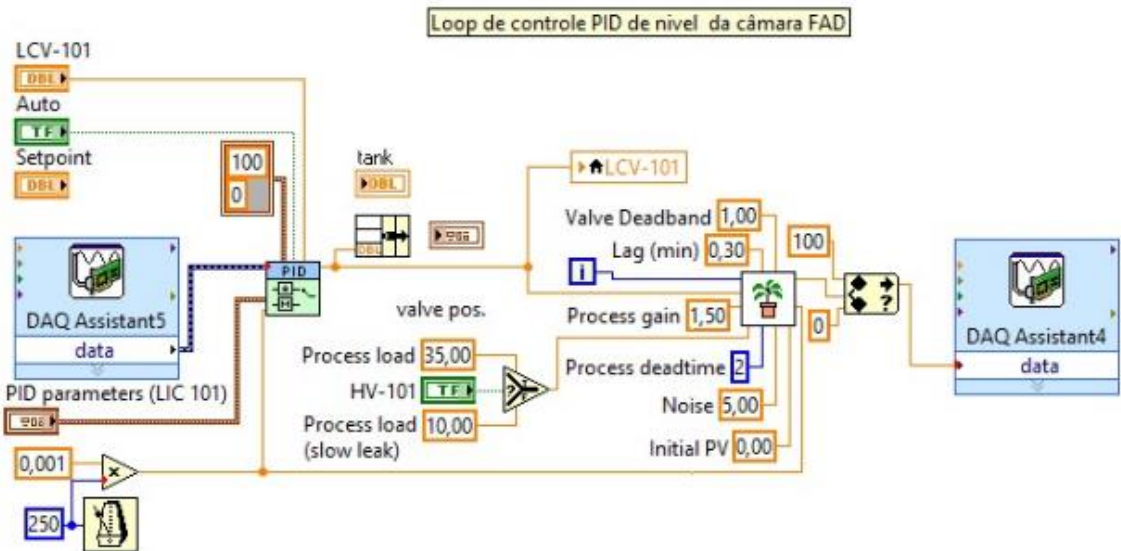


Figura 3. Diagrama de bloco para controle de nível.

## 2.4 Sistema de Aquisição de Dados

Para a realização dos ensaios de controle de nível foi utilizado um sistema de aquisição de dados constituído de placa de aquisição de dados DAQ / USB6008 (Data Acquisition) da National Instruments. A placa permitia manipular sinais de entrada e saída analógicos e digitais utilizando como interface o LabVIEW [17]. Este módulo foi conectado a uma placa de interface, que inclui circuitos eletrônicos utilizados na medição das variações de nível de líquido dentro da câmara de FAD e condicionamento dos sinais (Fig. 4).



Figura 4. Placa de comando e aquisição de dados do sistema de controle.

Para a detecção e controle da variação de nível dentro da câmara de FAD, foi utilizado um conjunto sensor / válvula apresentados na (Fig. 5). O sensor de nível eletrônico LK3122



determinou o nível de fluídos de acordo com o princípio de medição capacitiva. A unidade informava o nível atual e gerava uma saída analógica de sinal, de acordo com o respectivo nível. A saída analógica era configurável, como corrente elétrica de 4 a 20 mA ou tensão de saída de 0 a 10 V. Analogamente foi utilizada uma válvula LR24SR, a qual funcionava como um atuador proporcional, ou seja, quando a água dentro da câmara de flotação atingia um nível considerado máximo, essa válvula fechava-se progressivamente, diminuindo a vazão de recirculação dentro da câmara FAD, para evitar transbordamento.

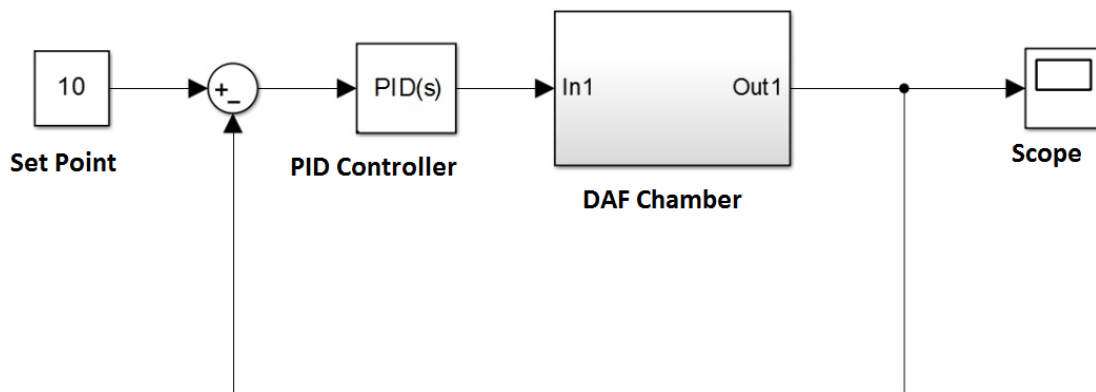


**Figura 5. Elementos de controle (conjunto sensor / válvula).**

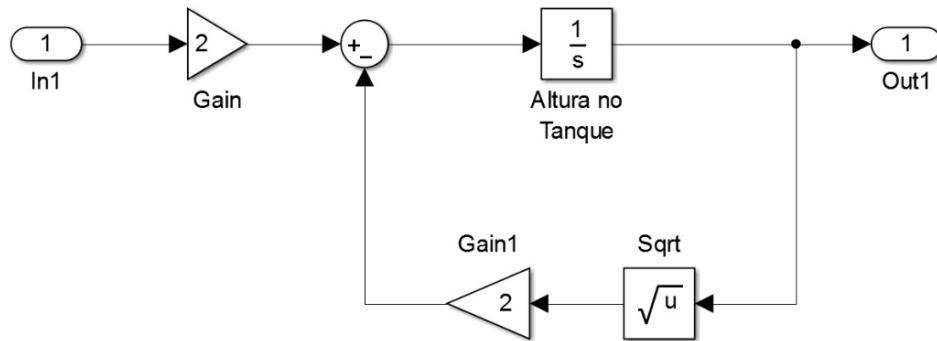
### 3 Resultados e Discussão

#### 3.1 Controle PID

Para implementar o controle de nível na câmara FAD, foi desenvolvido no software LabVIEW um programa com o bloco de função PID e seu respectivo subprograma (Fig. 6-7), para obtenção dos parâmetros ganho proporcional ( $K_p$ ), tempo integral ( $T_i$ ) e tempo derivativo ( $T_d$ ). As oscilações e/ou perturbações geradas no sistema tem como referência, um valor de Set Point (SP) definido pelo usuário [18].

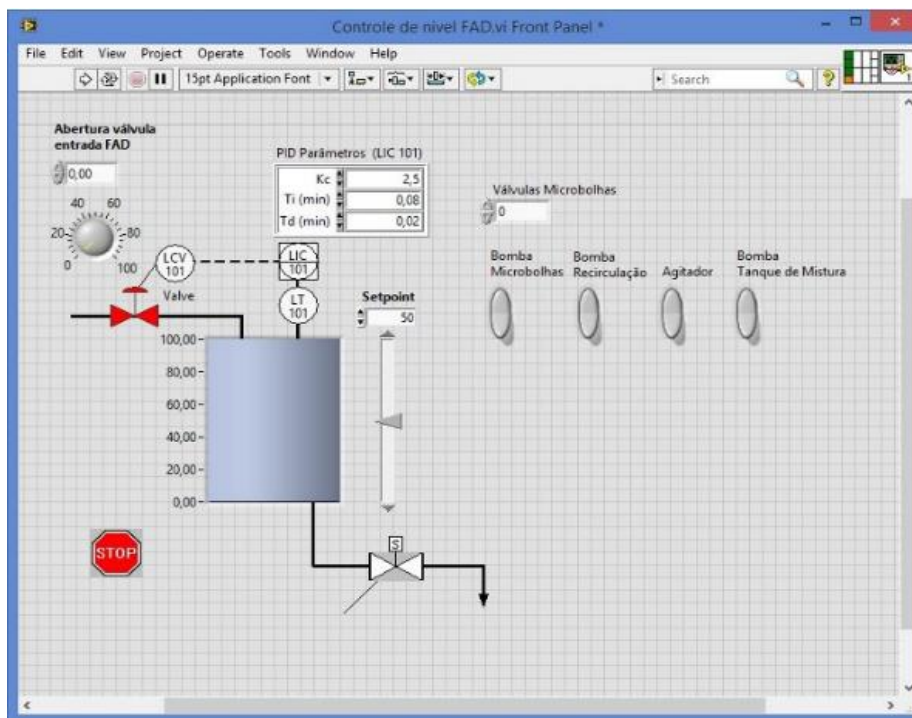


**Figura 6. Programa principal desenvolvido para controle de nível.**

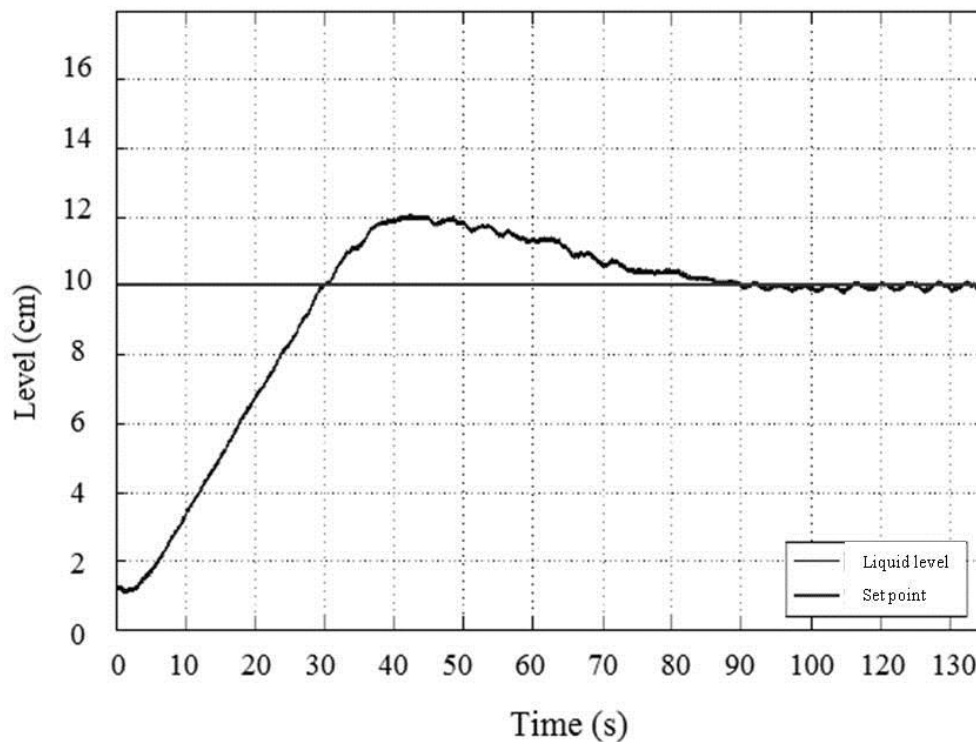


**Figura 7.** Subprograma desenvolvido para controle de nível.

Foi escolhido como Set Point o valor de 10 cm, como sendo o nível ideal de líquido dentro da câmara FAD. A partir daí, foram realizadas simulações com o auxílio do sistema supervisor e foi obtido o gráfico resposta (Fig. 8-9) para avaliar a atuação do controlador.



**Figura 8.** Tela do supervisor para controle de nível.



**Figura 9. Gráfico resposta do controle PID.**

Do gráfico resposta, é possível inferir que houve um sobrepasso (overshoot), que é um valor de pico acima do valor de referência (set point) atingido pelo sistema [19]. O overshoot ocorreu em um intervalo de 60 s até estabilizar em regime permanente, igualando o valor de processo ao valor de set point.

### 3.2 Eficiência de separação água-óleo (Resposta visual)

Para quantificar os efeitos da implantação da estratégia de controle sobre a eficiência de separação água-óleo, foram realizados experimentos de medidas dessa eficiência, envolvendo as duas situações. Dessa forma, os testes experimentais foram realizados com um efluente sintético, no qual a água recebia contaminação artificial através de uma mistura com óleo lubrificante (Série 500, API SJ 20W-50). Na primeira câmara de flotação, com a implantação da estratégia de controle adotada, o sensor de nível controlava a altura da coluna de líquido através do aumento ou redução da abertura de uma válvula de controle, na entrada do protótipo, aumentando ou diminuindo o retorno de parte desse efluente para o tanque de mistura de água e óleo lubrificante. Dentro da câmara de flotação a interação do fluxo de afluente sintético com as microbolhas podia ser ajustada, ou controlada, para resultar na produção de uma camada com maior densidade de espuma oleosa.

A água tratada na primeira câmara passava pela abertura inferior, entre as duas câmaras de flotação, para a segunda câmara. Observações visuais sobre a superfície livre da segunda câmara de flotação permitiram que se observasse uma duplicidade de efeito, em ambas as câmaras, através da estratégia de controle utilizada na primeira câmara. A interação entre o fluxo de afluente sintético contendo óleo residual na segunda câmara e um segundo fluxo de microbolhas também deu origem a uma camada espessa de espuma oleosa na segunda câmara de FAD. Na câmara de água tratada, último compartimento do protótipo de FAD, duas bombas centrífugas eram encarregadas de direcionar o efluente de protótipo. Parte dessa água recirculava para produzir microbolhas e parte recirculava para receber contaminação artificial e realimentar o protótipo de FAD.

A Fig. 10 ilustra a fotografia da superfície livre da câmara de flotação do protótipo piloto de FAD, durante testes preliminares, sem a implantação do sistema de automação e controle. Observou-se a ocorrência de uma camada sobrenadante muito pobre de espuma oleosa. Analogamente, foi possível identificar na Fig. 11, a formação de uma densa camada de espuma oleosa. Os dois ensaios, foram realizados dentro das mesmas condições experimentais, diferenciadas pela implantação da estratégia de controle.



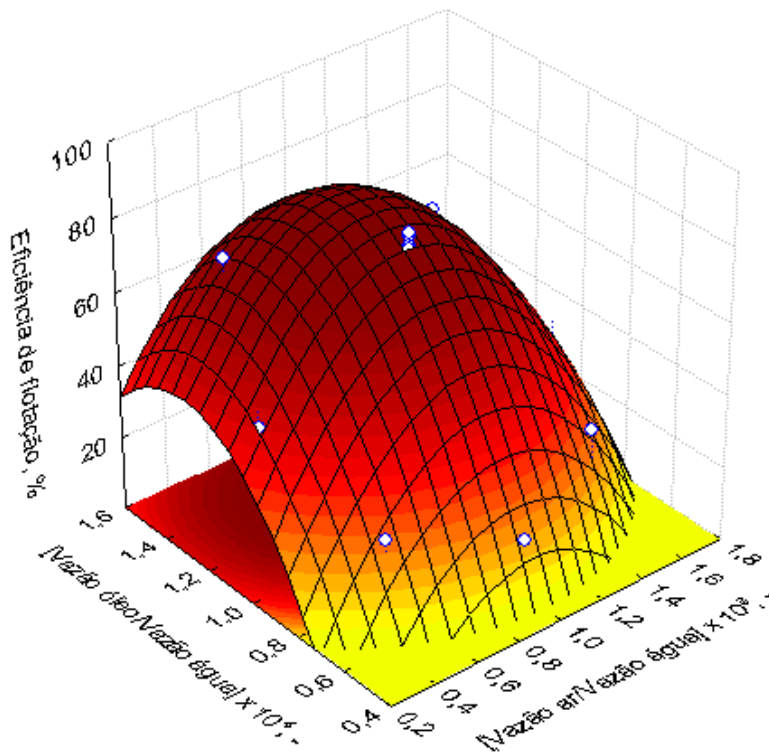
**Figura 10. Fotografia da camada de espuma oleosa formada na superfície livre da câmara de flotação antes da implantação da estratégia de controle de nível.**



**Figura 11. Fotografia da camada de densa camada de espuma oleosa formada na superfície livre da câmara de flotação após a implantação da estratégia de controle de nível.**

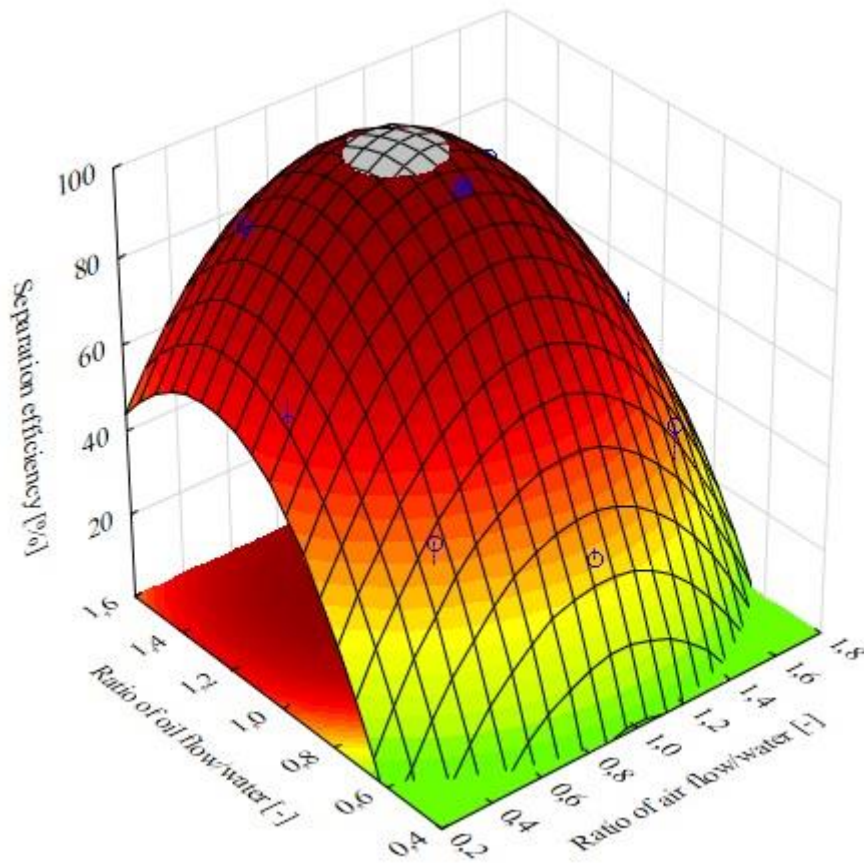
### **3.2 Análise da superfície de resposta**

O gráfico tridimensional da superfície de resposta do protótipo de FAD à separação água óleo, sem a implantação da estratégia de controle é mostrado pela Fig. 12. O referido gráfico representa o comportamento da eficiência de separação envolvendo as duas câmaras de flotação do protótipo em função das razões utilizadas como variáveis independentes: razão entre as vazões de ar e de água para produção de microbolhas ( $X_1$ ) e a razão entre as vazões de efluente a ser tratado e de água tratada para produção de microbolhas ( $X_2$ ) [20] . Observa-se com auxílio da referida figura que variações simultâneas dos valores de  $X_1$  e  $X_2$ , produzindo um ponto de máximo para a eficiência de separação, dando lugar a um ponto ótimo para as condições de operação do protótipo.



**Figura 12. Superfície de resposta em 3D da eficiência de separação no protótipo de FAD antes da implantação da estratégia de controle de nível.**

Um segundo gráfico tridimensional da superfície de resposta da eficiência de separação água-óleo do protótipo de FAD (Fig. 13), utilizando-se as mesmas variáveis independentes, foi obtido após a implantação da estratégia de controle de nível da câmara de flotação do protótipo. Observa-se na Fig. 13 que após a implantação da estratégia de controle do nível na primeira câmara de FAD a eficiência de separação total do sistema passou de cerca de 78% para 98%.



**Figura 13. Superfície de resposta em 3D da eficiência de separação no protótipo de FAD após a implantação da estratégia de controle de nível.**

### Símbolos usados

$\bar{Q}$  [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ] vazão;

$\bar{H}$  [m] altura;

T[s] tempo;

### Abreviações

FAD Flotação por ar dissolvido

PID Proporcional integral derivativo

SP Set point

VI's Instrumentos virtuais

DAQ Data acquisition

LabVIEW Laboratory virtual instrument engineering workbench

## Acknowledgment

Funding for this study was provided by the State of Pernambuco Foundation for the Assistance to Science and Technology (FACEPE), the Research and Development Program of the Brazilian National Electrical Energy Agency (ANEEL), the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) and the Federal Agency for the Support and Evaluation of Graduate Education (CAPES). The authors are grateful to the laboratories of the Centre for Science and Technology of the Catholic University of Pernambuco and the Centre for Technology and Innovation Management (CGTI), Brazil.

## Referências

- [1] C. Oliveira; J. Rubio, *Min. Eng.*, A short overview of the formation of aerated flocs and their applications in solid/liquid separation by flotation., **2012**, 39, 124-132. DOI:10.1016/j.mineng.2012.05.024
- [2] J. Edzwald; J. Haarhoff. *McGraw Hill Prof.*, Dissolved air flotation for water clarification, **2011**.
- [3] H. Y. Zhu; M. Zhou., *Adv. Mat. Res.* Air Flotation Method in the Treatment of Oily Wastewater Application of Its Progress **2014**, 2044-2047. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.971-973.2044
- [4] F. C. P., Da Rocha e Silva, et al. *Sep. Science and Tech.*, Effect of Biosurfactant Addition in a Pilot Scale Dissolved Air Flotation System., **2014**, DOI: 10.1080/01496395.2014.957319
- [5] L. Zhao, et al. *World Congress*, Fault condition recognition based on multi-scale co-occurrence matrix for copper flotation process, **2014**, 7091-7097.
- [6] J. B.; S. B., *Chem. Eng. and Proc.: Proc. Int.* Modeling an industrial dissolved air flotation tank used for separating oil from wastewater., **2012**, 59, 1-8. DOI:10.1016/j.cep.2012.05.004
- [7] N. M., Nikačević., et al. *Chem. Eng. and Proc: Proc. Int.* Opportunities and challenges for process control in process intensification., v. 52, p. 1-15, 2012. DOI:10.1016/j.cep.2011.11.006
- [8] Y. Yang, et al. *IEEE Design & Test of Computers*. Development of building automation and control systems., **2012**, 29, 4., DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MDT.2012.2201130>
- [9] J. A., Romagnoli.,; A., Palazoglu., *Introduction to process control.*, CRC Press, 2012.
- [10] V. R., Segovia; T., Hägglund; K. J., Åström., *Journal of Process Control* Measurement, noise filtering for PID controllers., **2014**, 24 (4), 299-313, DOI:10.1016/j.jprocont.2014.01.017
- [11] P. M., Paul; C. Dey; R. K., Mudi., *TechSym*, An online dynamic set point weighting scheme for PID controller, **2014**, 188-192. DOI: 10.1109/TechSym.2014.6808044



- [12] K. J., Åström,.; B., Wittenmark,., *Adaptive control*. Courier Dover Publications, 2013.
- [13] S., Formentin; M. C., Campi; S. M., Savaresi,., *Virtual Reference Feedback Tuning for industrial PID controllers*. 19th IFAC World Congress, Cape Town, South Africa. 2014.
- [14] M. B., Jensen; D. E. A., Tallman; *J. of Solid State Electro.*, LabVIEW-based virtual instrument for simulation and analysis of SECM approach curves., **2013**17(12), 2999-3003, DOI: 10.1007/s10008-013-2154-8
- [15] S., Chattopadhyay; G., Roy; M., Panda,., *Sensors & Transducers*, Simple Design of a PID Controller and Tuning of Its Parameters Using LabVIEW Software. **2011**, 129(6), 1726-5479,
- [16] S., Costello; *Bulletin of the American Physical Society*, PID Controller using an Arduino microcontroller and LabVIEW., **2013**, 58,.
- [17] A., Chouder; et al. *Solar Energy*, Monitoring, modelling and simulation of PV systems using LabVIEW., **2013**, 91, 337-349, DOI:10.1016/j.solener.2012.09.016
- [18] A., Kienle; S., Sommer; H. N., Nguyen,., *Auto-tuning of multivariable PI/PID controllers using iterative feedback tuning: design examples*. In: 24 European Symposium on Computer Aided Process Engineering, **2014**, 721-726.
- [19] W. A. Wali; et al. *International Journal of Computer and Information Technology*. Intelligent PID Controller for Real Time Automation of Microwave Biodiesel Reactor., **2013**, 2(4), 809-814.

## **CAPÍTULO III**

## **Conclusão**

As comparações quantitativas e qualitativas entre as eficiências de separação em uma câmara de flotação de um protótipo de FAD, demonstraram a existência de uma imprescindível contribuição que uma estratégia de controle pode dar para o sucesso dessa técnica. O processo de flotação por ar dissolvido é uma técnica que envolve muitos parâmetros relevantes, desde aqueles considerados operacionais como aqueles considerados de propriedades dos fluidos. Entre os operacionais, as razões entre as vazões de água, ar e óleo devem ser devidamente levados em conta, todas as vezes que se deseja uma alta eficiência de separação para o equipamento de aplicação.

## **ANEXO I**

### **NORMAS PARA PUBLICAÇÃO NA REVISTA CHEMICAL ENGINEERING & TECHNOLOGY**