

# *Monografia de Graduação*

**Construção de novo ebuliômetro Othmer e  
Desenvolvimento de módulo supervisorío**

**Rafael Hernandez Damascena dos Passos**

**Natal, dezembro de 2009**

## SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS-----	3
ÍNDICE DE TABELAS -----	3
1. INTRODUÇÃO-----	4
2. REVISÃO DA LITERATURA -----	4
2.1. TERMODINÂMICA -----	4
2.2. CONTROLE DE PROCESSOS -----	7
3. METODOLOGIA -----	9
3.1. DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO APARATO -----	12
3.2. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS -----	12
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES -----	14
4.1. ANÁLISE DINÂMICA DO PROCESSO -----	14
4.2. MÉTODO ZIEGLER-NICHOLS EM MALHA FECHADA -----	16
5. CONCLUSÃO -----	18
6. REFERÊNCIAS -----	19

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: ESQUEMA DE CONTROLE <i>FEEDBACK</i> . -----	8
FIGURA 2: ESQUEMA DE CONTROLE <i>FEEDFORWARD</i> . -----	8
FIGURA 3: ESQUEMA DE CONTROLE EM MALHA ABERTA. -----	9
FIGURA 4: EBULIÔMETRO OTHMER. -----	9
FIGURA 5: DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO DO EQUILÍBRIO LÍQUIDO-VAPOR. -----	10
FIGURA 6: NOVO EBULIÔMETRO OTHMER. DIMENSÕES EM MILÍMETROS. -----	11
FIGURA 7: ESQUEMA DE AUTOMAÇÃO DA CÉLULA DE EQUILÍBRIO.-----	11
FIGURA 8: GRÁFICO DA TEMPERATURA PARA PERTURBAÇÃO DEGRAU NO SISTEMA COM ÁGUA BIDEDESTILADA. ----	15
FIGURA 9: GRÁFICO DA PRESSÃO PARA PERTURBAÇÃO DEGRAU NO SISTEMA COM ÁGUA BIDEDESTILADA. -----	15

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1: RELAÇÃO DE EQUIPAMENTOS E EMPRESAS. -----	12
TABELA 2: FÓRMULAS DE ZIEGLER-NICHOLS PARA AJUSTE PELO MÉTODO DO PERÍODO CRÍTICO. -----	16
TABELA 3: VALORES DOS PARÂMETROS DO CONTROLADOR. -----	17

## 1. INTRODUÇÃO

Na exploração do petróleo, a água proveniente dos poços de petróleo, também conhecida como água de produção, é removida em grandes quantidades se tornando um efluente potencialmente agressivo ao meio ambiente. A água de produção é um efluente aquoso contaminado com sais, metais pesados e hidrocarbonetos, o que a torna um poluente de difícil descarte, pois ao ser lançada ao meio ambiente sem que haja um prévio tratamento, pode ocasionar danos ao ecossistema local.

O desenvolvimento de métodos adequados ao tratamento deste efluente tem sido constantemente estudado para o futuro reuso da água na agricultura. O objetivo deste trabalho consiste na determinação de dados de equilíbrio líquido-vapor (ELV) de uma série inicial de misturas sintéticas e da própria água de produção a partir de um ebuliômetro do tipo Othmer modificado contendo um módulo supervisor. Estes dados propiciarão uma análise mais detalhada tanto do processo de evaporação da água de produção quanto de qualquer sistema ELV.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. Termodinâmica

O estudo de fases em equilíbrio é um dos principais tópicos da termodinâmica de soluções. Tal importância se deve à sua incidência na indústria química, no que concerne a processos de separação, como a destilação. O conhecimento do equilíbrio de fases é fundamental para eliminar operações onerosas no desenvolvimento industrial, e assim economizar energia e capital.

Para que duas ou mais fases estejam em equilíbrio, algumas condições devem ser satisfeitas: as pressões das fases devem ser iguais (equilíbrio mecânico), assim como as temperaturas (equilíbrio térmico) e os potenciais químicos (equilíbrio termodinâmico dos constituintes). O potencial químico de uma espécie  $i$  em uma mistura é definido pela relação matemática que se segue (Van Ness *et al.*, 2000):

$$\mu_i \equiv \left[ \frac{\partial(nG)}{\partial n_i} \right]_{T,P,n_{j \neq i}} \quad (1)$$

Onde  $G$  é energia livre de Gibbs e  $n$  é o número de moles. O subscrito fora do colchete especifica as propriedades mantidas constantes, nesse caso, a temperatura, a pressão, e o número de moles de todas as espécies exceto a espécie  $i$ .

Porém, costuma-se trabalhar com a fugacidade ao invés do potencial químico para a resolução dos problemas de ELV, por ter uma equivalência física, i.e., pseudo-pressão. Como explicitado pela equação (1), o potencial químico é função da energia livre de Gibbs, que por sua vez é definida em relação à energia interna e à entropia, duas grandezas fundamentais para as quais valores mensuráveis diretos são desconhecidos. Logo, não há valores mensuráveis diretos para o potencial químico.

A origem do conceito de fugacidade vem da seguinte equação, válida somente para espécies puras no estado de gás ideal:

$$G_i^{gi} = \Gamma_i(T) + RT \ln P \quad (2)$$

Para um fluido real, pode-se escrever a equação análoga:

$$G_i = \Gamma_i(T) + RT \ln f_i \quad (3)$$

Na equação (3) a pressão é substituída pela fugacidade, termo corretivo para pressão devido a não idealidade do sistema, que possui unidades de pressão. A fugacidade no estado de gás ideal da espécie pura  $i$  é igual à sua pressão:

$$f_i^{gi} = P \quad (4)$$

As fugacidades podem ser determinadas através de coeficientes de fugacidade ( $\phi$ ), preferencialmente para a fase vapor com uma equação de estado, ou de coeficientes de atividade ( $\gamma$ ), usado para a fase líquida. Então, em uma abordagem gama-phi, a equação de isofugacidade para o ELV, pode ser escrita como:

$$y_i \hat{\phi}_i^V P = x_i \gamma_i P_i^{sat} \phi_i^{sat} \exp\left[\frac{V_i^L (P - P_i^{sat})}{RT}\right] \quad (5)$$

Onde  $y_i$  é a fração molar do componente  $i$  na fase vapor,  $\hat{\phi}_i^V$  é o coeficiente de fugacidade na fase vapor do componente  $i$ ,  $x_i$  é a fração molar do componente  $i$  na fase líquida,  $P_i^{sat}$  é a pressão de vapor do componente  $i$  puro,  $\phi_i^{sat}$  é o coeficiente de fugacidade do vapor do componente  $i$  puro,  $V_i^l$  é o volume do líquido saturado do componente  $i$  puro, e  $R$  é a constante universal dos gases. O termo exponencial é chamado fator de Poynting, e expressa os desvios da fase líquida devido ao efeito da pressão. Para pressões baixas, ou próximas à pressão de vapor, esse termo pode ser desprezado.

O coeficiente de fugacidade do componente puro ou de misturas pode ser calculado por equações de estado.

Quanto ao coeficiente de atividade da fase líquida, a prática usualmente empregada para o seu cálculo faz uso de modelos derivados de expressões dadas para a energia livre de Gibbs em excesso  $G^E$ , que relacionam-se com a composição e a temperatura através da expressão:

$$\ln \gamma_i = \frac{1}{RT} \left( \frac{\partial G^E}{\partial n_i} \right)_{T,P,n_j} \quad (6)$$

Existem vários modelos para a energia livre de Gibbs em excesso na literatura. A certa temperatura, a energia livre de Gibbs em excesso é função da composição do sistema, e em menor grau, da pressão, sendo que para pressões baixas e moderadas, a dependência da pressão pode ser desprezada. Assim, os modelos adotados para a representação do coeficiente de atividade da fase líquida ficam em função da temperatura e composição do sistema. Esses modelos levam em conta a energia de interação entre as moléculas, expressa na forma de parâmetros binários, bem como a organização das mesmas na mistura. Alguns exemplos de modelos são Wilson, NRTL, UNIQUAC e UNIFAC.

Quanto à pressão de vapor, existem várias correlações na literatura para o cálculo da mesma. A correlação utilizada neste trabalho foi a equação de Antoine, que é visualizada da seguinte forma:

$$\log P^{sat} (mmHg) = A - \frac{B}{T(^{\circ}C) + C} \quad (7)$$

As constantes de Antoine  $A$ ,  $B$  e  $C$  podem ser determinadas a partir de um conjunto de dados experimentais de pressão de vapor e temperatura tanto para um componente puro como uma mistura.

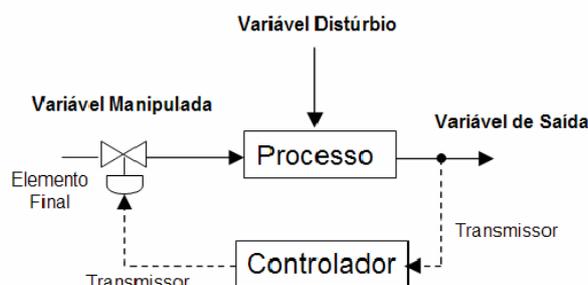
## 2.2. Controle de processos

O sistema de controle de processos é a entidade que tem a responsabilidade de monitorar as variáveis envolvidas no sistema, fazer decisões sobre como melhor manipulá-las para obter o comportamento de saída desejado e efetivamente operar tais decisões no processo.

Quando tais tarefas são realizadas por um operador, tem-se um sistema de controle manual. No entanto, quando tais tarefas são realizadas por uma máquina, tem-se um sistema de controle automático. No caso do sistema de controle automático, o mesmo é constituído pelos seguintes elementos:

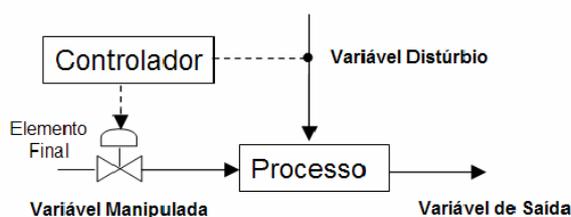
- *Sensores*: são os dispositivos usados para adquirir informações das variáveis do processo, principalmente das variáveis de saída. Na maioria das aplicações de controle de processos os sensores são para medir pressão (transdutores de pressão), temperatura (termopares e termoresistências), nível (sensores de nível por pressão diferencial), vazão (fluxímetro, rotâmetros), composição (cromatografia, espectrofotometria, densimetria) etc.
- *Controladores*: são os dispositivos responsáveis pela tomada de decisão de quanto mudar as variáveis manipuladas. São geralmente equipamentos eletrônicos com rotinas de decisão. Podem ser computadores ou equipamentos similares com capacidade de processamento.
- *Transmissores*: são dispositivos que transmitem os sinais dos sensores e dos controladores. Podem ser eletrônicos (quando transmitem sinais padrões de 4 a 20 mA ou 1 a 5 Vcc) ou pneumáticos (quando o sinal transmitido é um fluxo de ar com pressão padrão de 3 a 15 psi).
- *Elementos finais de controle*: são os dispositivos com a tarefa de implementar no processo o comando de mudança enviado pelo controlador. Podem ser válvulas de controle, relés, bombas, ventiladores, resistências elétricas, alarmes, etc.

A configuração do sistema dependendo da estrutura do processo de tomada de decisão em relação à reunião de informação e da implementação das decisões, um sistema de controle de processo pode ser configurado conforme um controle *Feedback* que opera de forma que a informação de saída do processo é sentida antes do controlador, conforme pode ser visto na Figura 1. É importante apontar a natureza intuitiva desta estrutura de controle. As decisões do controlador são tomadas “após o fato acontecido”.



**Figura 1:** Esquema de controle *feedback*.

Em um controle do tipo *Feedforward*, como mostra a Figura 2, a informação da variável de entrada distúrbio é obtida e enviada para o controlador, tal que a decisão do controlador é tomada com base na informação de entrada, antes do processo ser afetado pelo distúrbio. A principal característica desta configuração é a escolha de medir a variável de distúrbio em vez da variável de saída que se deseja controlar. Apesar das vantagens deste controlador em relação à ação antecipatória, um inconveniente nesta configuração é o fato de que o controlador não tem informação sobre as condições de saída do processo e, portanto, não é hábil para determinar a precisão da compensação aos distúrbios pelo processo.



**Figura 2:** Esquema de controle *feedforward*.

Na estrutura de controle em Malha Aberta, a decisão do controlador não está baseada em qualquer informação (medida) do processo (Figura 3). A ação é implementada a partir de situações predefinidas. Um exemplo comum para este tipo de configuração de controle são os semáforos de trânsito. O tempo de abertura e fechamento dos semáforos não é uma resposta de controle baseada na medida de fluxo de carros, mas sim uma resposta baseada num tempo predefinido de abertura e fechamento.

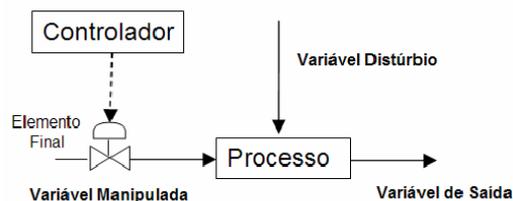


Figura 3: Esquema de controle em Malha Aberta.

### 3. METODOLOGIA

O ebulliômetro Othmer é um excelente dispositivo para aquisição de dados de equilíbrio líquido-vapor e de equilíbrio líquido-líquido-vapor, no entanto, a tomada de dados no laboratório onde está instalado o ebulliômetro é demorada devido ao isolamento do sistema que ocasionalmente apresenta vazamento de pressão levando a imprecisão dos dados de equilíbrio. Para se ter uma medida confiável é necessário esperar muito tempo para que o sistema estabilize, são questões de horas para que se obtenha um ponto da curva de equilíbrio, contudo, são necessários vários pontos para termos uma curva que represente bem o estado de equilíbrio termodinâmico de um sistema. A nossa proposta que tem como objetivo otimizar a determinação dos dados experimentais diminuindo o tempo de obtenção das mesmas e monitorando os parâmetros do processo em tempo real adquirindo assim medidas contínuas de temperatura e pressão do sistema. Atualmente, se faz medidas discretas no tempo.

O ebulliômetro do tipo Othmer (Fig. 4) modificado disponível no laboratório de Equilíbrio de Fases (Foteq) é constituído de uma célula de circulação com dispositivos de medição da temperatura e pressão, e dispositivos auxiliares tais como manifold, traps, tanque pulmão, bomba de vácuo, agitador magnético, regulador de voltagem e fita de aquecimento (Oliveira *et al.* 2003).

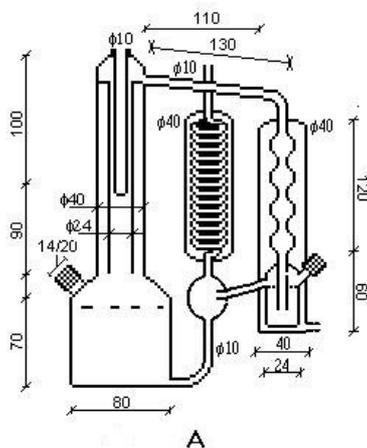
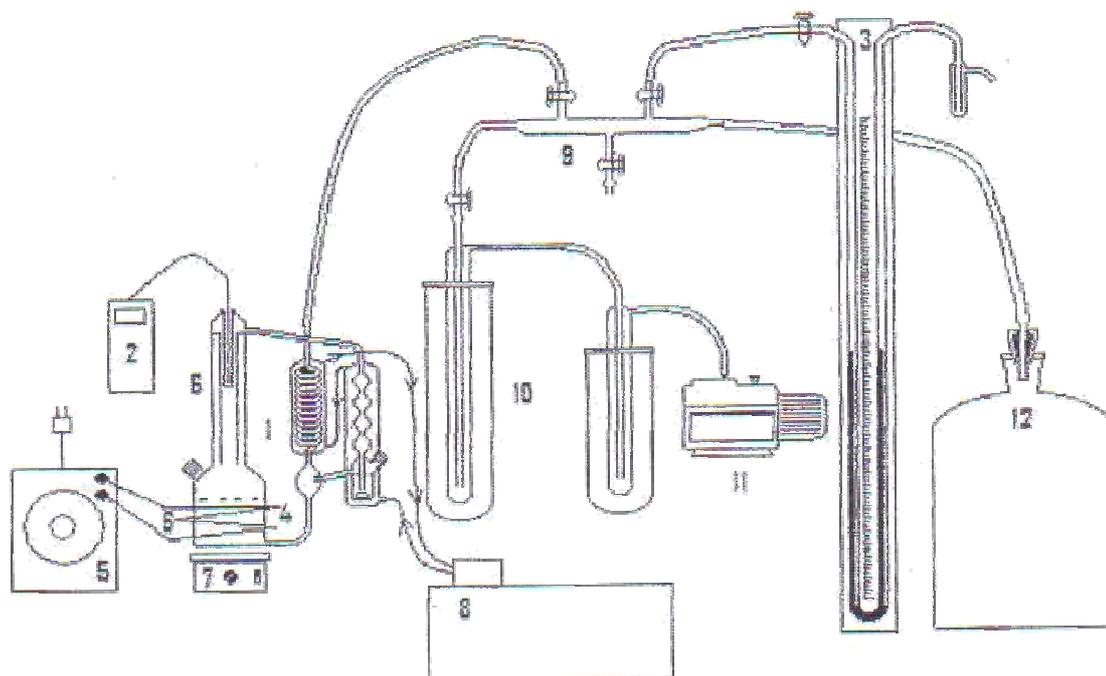


Figura 4: Ebulliômetro Othmer.

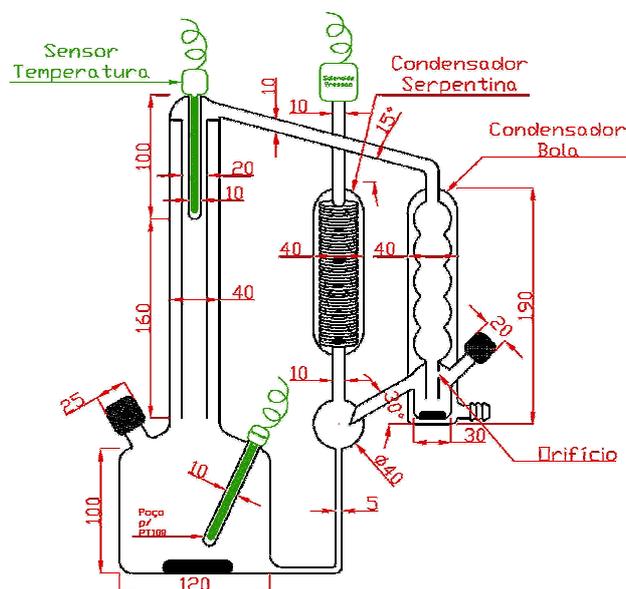
O ebulliômetro é equipado como um termômetro digital com sensor de platina (PT 100 modelo.  $\pm 0,1$  K; n° WT 389 faixa de  $-50$  a  $260$  °C) imerso no poço, localizado no topo, contendo óleo mineral, um agitador magnético Fisatom (100x100 mm, modelo. 752 A, potência. 650 W<sub>máx</sub>, 230-Brasil) foi usado no refervedor do ebulliômetro para misturar a fase líquida e um outro agitador Tecnal para a fase vapor condensada. O monitoramento visual da ebulição, realizado para controlar a condensação parcial ou eventual superaquecimento do sistema, requer um controle no transformador variador de voltagem (Variac – STP-ATV-215 M, 6,3<sup>a</sup>, 60Hz, 1,5KWA, circuito monofásico).



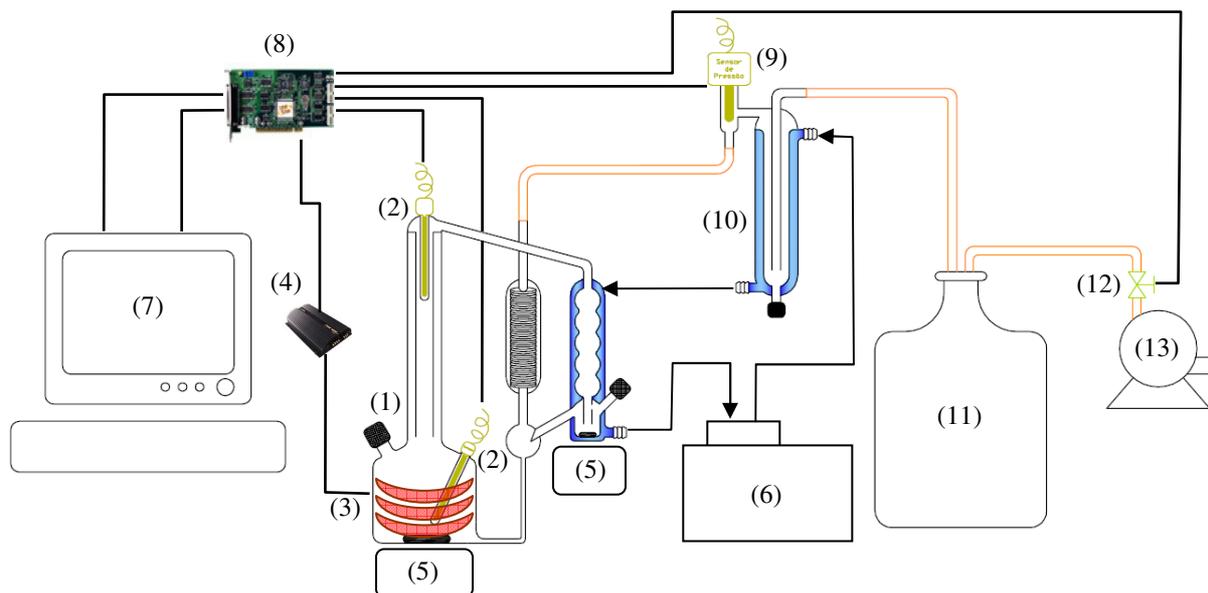
**Figura 5: Dispositivos de medição do equilíbrio líquido-vapor.** (1) Célula de equilíbrio; (2) Termômetro digital PT- 100; (3) Manômetro de mercúrio tipo tubo em U; (4) Fita de aquecimento externo; (5) Regulador de voltagem ou VARIAC; (6) Gargalo do ebulliômetro com poço para termômetro; (7) Agitador magnético; (8) Banho Termostático para refrigeração dos condensadores; (9) Manifold; (10) Traps; (11) Bomba para vácuo; (12) Tanque pulmão.

O projeto do novo ebulliômetro foi baseado no Othmer já existente com as devidas modificações necessárias para ser ter um controle maior do experimento e a melhoria dos dados, por exemplo, além da tomada de temperatura no topo da coluna que medir a valor da temperatura do vapor, teve a necessidade de medirmos a temperatura do líquido para observarmos o exato ponto do equilíbrio termodinâmico, pois quando a temperatura do vapor se iguala a temperatura do líquido, temos o indício do equilíbrio, por tanto, um poço para uma termorresistência foi projetado no fundo da coluna. Outra modificação feita foi no ângulo de declínio do tubo na saída do recipiente do condensado que foi acentuada para evita o acúmulo

de condensado na tubulação como é observado em alguns sistemas testados no ebulliômetro original. Como parte das atualizações, a célula teve seu volume útil aumentado para obtermos uma quantidade maior de amostras para análise. A figura 6 ilustra o ebulliômetro novo.



**Figura 6: Novo ebulliômetro Othmer.** Dimensões em milímetros.



**Figura 7: Esquema de automação da célula de equilíbrio.** (1) Célula de equilíbrio; (2) Termorresistências; (3) Fita de aquecimento; (4) Módulo de potência; (5) Agitadores magnéticos; (6) Banho termostático; (7) Módulo supervisor instalado em um computador; (8) Placa de aquisição de dados; (9) Sensor de Pressão; (10) Trap; (11) Tanque pulmão; (12) Válvula solenóide; (13) Bomba de vácuo.

A figura 7 mostra o sistema de apoio do novo ebulliômetro que terá dois termorresistores com sensor de platina (PT-100), uma fita de aquecimento similar a antiga, sensor de pressão, válvula solenóide, válvula reguladora, bomba de vácuo, uma placa de

aquisição de dados para fazer a interface do sistema com o módulo supervisor, um módulo de potência que acionará a fita de aquecimento conforme necessário além dos instrumentos e equipamentos de apoio que são usados no ebuliômetro antigo como tanque pulmão, agitadores magnéticos, banho termostático entre outros.

### 3.1. Descrição do funcionamento do aparato

O sistema de controle do novo ebuliômetro é aparentemente simples conforme será descrito a seguir.

Para o controle de temperatura temos a leitura da mesma pelos termorresistores instalados no topo e na base da coluna do ebuliômetro, a leitura da temperatura no topo da coluna tem caráter informativo da temperatura do vapor, este dado serve como comparação com a leitura tomada na base da coluna, pois se a leitura das duas termorresistências forem iguais ou atenderem certa tolerância, isso significa dizer que o sistema atingiu o equilíbrio termodinâmico segundo os parâmetros pré-estabelecidos. No entanto, se a temperatura no topo for maior que a temperatura na base, o equilíbrio ainda não foi atingido, por tanto, é necessário fornecer mais energia ao sistema. A detecção da temperatura inferior será interpretada pelo módulo supervisor onde será tomada uma decisão, no caso, aumentar a potência da fita de aquecimento para pode suprir essa demanda de energia, conforme a temperatura for se aproximando da igualdade, a potência fornecida para a fita será reduzida de modo a manter a temperatura estável.

O controle de pressão se processa da mesma forma, de acordo com a medida do sensor de pressão, o módulo supervisor manda sinais para a válvula solenóide abrir ou fechar com o intuito de manter constante a pressão pré-estabelecida no supervisor.

### 3.2. Equipamentos utilizados

Após varias cotações de equipamentos, foi definido os instrumentos a serem comprados para integrarem o sistema de automação. Para o sistema de temperatura, foram cotados seguintes equipamentos:

**Tabela 1: Relação de equipamentod e empresas.**

Empresa	Equipamentos	Descrição	Quant.
Salvi Casagrande	Termorresistências e Transmissores de Temperatura	PT-100 com Transmissores com range de 0 a 250 °C	3

Loti	Módulo de Potência e Relé de Estado Sólido	Módulo Tipo **** e Relé Z-125	1
SDC	Placa de Aquisição de Dados e Borneira	Placa PIO-821 e Borneira DB-8225	1
BOC Edwards	Sistema de Pressão	Bomba de Vácuo E-1.5, Sensor de Pressão (Barocel) e Válvula Agulha.	1
Uniluz	Materiais Elétricos	Quadro de Comando 50x40x15, Canaleta 30x30x2m, Fios 1,5mm, Trilho Metálico e Blocos de Junção.	1
Fisatom	Fita de Aquecimento	Fita Modelo 5 Standart, 1,3x240mm 220V, 400W	1
FGG	Célula de Equilíbrio (Ebuliômetro) e Trap	Confeccionados em Vidro Borossilicato	1

O sistema de temperatura foi instalado no ebuliômetro juntamente com a conexão ao computador através da borneira e a placa de aquisição de dados. O módulo supervisor foi desenvolvido em ambiente Fortran 90, seus testes preliminares estão demonstrando que as informações enviadas pelo sistema de temperatura estão sendo adequadamente interpretadas pela placa de aquisição de dados e conseqüentemente pelo módulo supervisor. Quando os testes com o sistema de temperatura forem finalizados, terá início a instalação e o desenvolvimento dos equipamentos e supervisor para o sistema de pressão onde serão instalados a bomba de vácuo, o sensor de pressão, as válvulas agulha e solenóide e conexões de mangueiras.

O sensor de pressão será acoplado ao trap de onde irá enviar as informações para a borneira e conseqüentemente será interpretada pela placa que posteriormente lança um sinal de controle para o atuador que no caso é a válvula solenóide. A ação da válvula será de abrir ou fechar a passagem do vácuo fazendo assim o controle do nível de pressão.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para qualquer mudança na entrada, a resposta do processo apresenta informação sobre a natureza intrínseca do processo em questão. Nesta mesma linha, se a natureza intrínseca é conhecida e caracterizada de forma adequada, então a resposta do processo a qualquer tipo de mudança na variável de entrada pode ser predita. É através da análise dinâmica de processos que se busca caracterizar a natureza intrínseca dos processos.

### 4.1. Análise dinâmica do processo

A análise dinâmica de processos está concentrada na análise do comportamento dinâmico (dependente do tempo) de um processo em resposta a vários tipos de entradas. É através de tais estudos que uma ampla variedade de processos reais pode ser caracterizada num número relativamente pequeno de categorias bem definidas. Portanto, o principal objetivo da análise dinâmica é investigar e caracterizar o comportamento do sistema quando um processo é submetido a vários tipos de mudanças na entrada.

O procedimento realizado para fazer a análise dinâmica do sistema foi à forma prática que consistia em realizar uma perturbação no sistema em estado estacionário para se observar o comportamento dinâmico do processo.

No sistema de automação do ebuliômetro existem duas variáveis no qual estamos interessados em controlar, eles são a temperatura e a pressão. Portanto, para fazer a análise do sistema em torno da temperatura, temos que aplicar uma perturbação quando sistema está em estado estacionário. E para a pressão será realizado o mesmo procedimento.

O ebuliômetro é preenchido com água bidestilada e a temperatura é mantida em 26°C. Nesse caso, a temperatura de 26°C (temperatura ambiente) é nossa variável manipulada no estado permanente para o tempo menor ou igual a zero ( $t \leq 0$ ). Para  $t > 0$ , o sistema sofre uma perturbação do tipo degrau, a nova temperatura em que o controlador foi configurado é 100°C e, portanto, logo imediatamente, o controlador começa a atuar no sistema para alcançar o novo parâmetro de temperatura.

É observado que existe um tempo de atraso ou tempo morto até a ocorrência de mudança na variável temperatura, ou seja, observa-se que há um intervalo de tempo entre o início da intervenção do controlador e o início da mudança da variável manipulada como pode ser observado na figura 8.

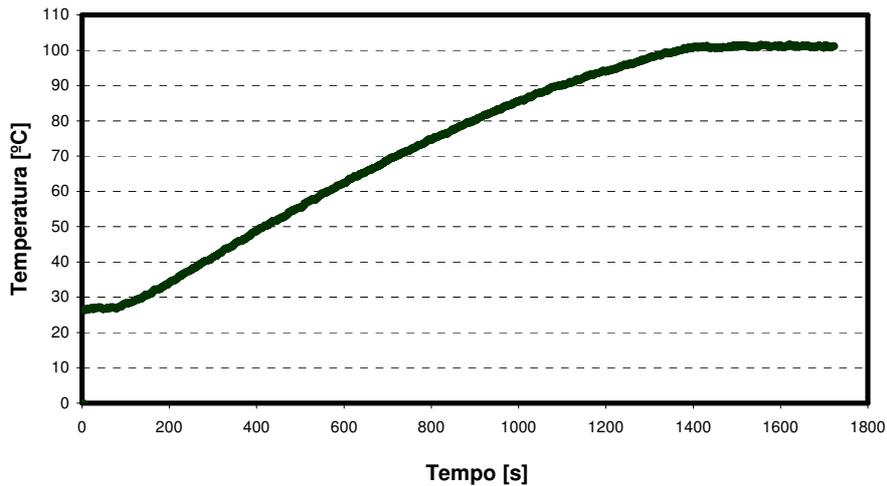


Figura 8: Gráfico da temperatura para perturbação degrau no sistema com água bidestilada.

Já para o comportamento da pressão quando o sistema é submetido a uma perturbação degrau, o processo se comporta similarmente ao comportamento dinâmico da temperatura com a exceção do tempo morto. Para  $t > 0$ , a pressão reage praticamente de imediato à ação corretiva proporcionada pelo controlador.

A figura 9 apresenta o comportamento do sistema para uma perturbação com amplitude de 25mmHg, isto é, a amplitude representa a diferença entre o valor da pressão inicial e o valor da pressão logo após a perturbação. Originalmente, o valor inicial para o presente experimento ilustrado pela figura 9 é de 600mmHg e o valor da perturbação foi de 575mmHg.

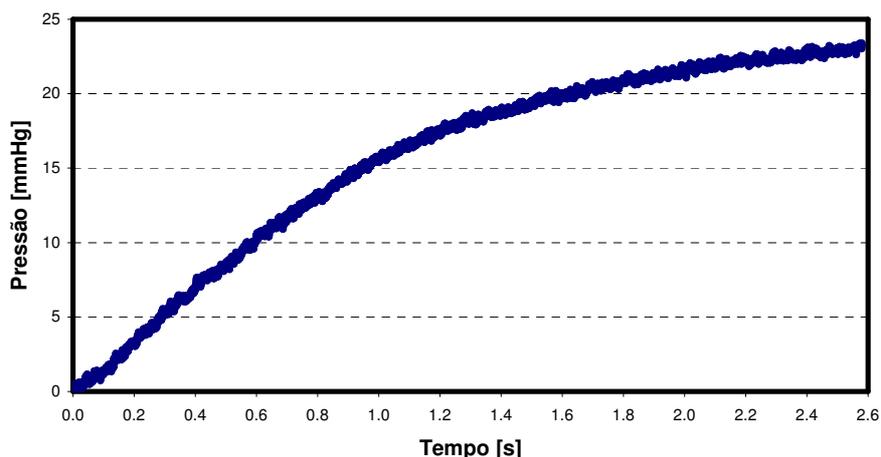


Figura 9: Gráfico da pressão para perturbação degrau no sistema com água bidestilada.

Observa-se que o sistema apresenta um *offset* entre o valor configurado e o valor atingido. O *offset* apresenta um valor de aproximadamente 2mmHg no qual tal diferença não

compromete a estabilidade e resultados obtidos, pois o offset está dentro do erro considerado para o presente sistema que é de  $\pm 5\text{mmHg}$ .

Conforme mostrado nas figuras 8 e 9, o comportamento das perturbações feitas na variáveis manipuladas da temperatura e da pressão quando as mesmas estavam no estado estacionário apresentaram um desempenho que pode ser representado por um sistema de primeira ordem. Portanto, podemos fazer a sintonia dos controladores conforme o método Ziegler-Nichols para fazermos o controle do sistema em malha fechada.

## 4.2. Método Ziegler-Nichols em malha fechada

Este método baseia-se na observação da resposta do processo e do conhecimento da estrutura do controlador. É um dos métodos que permite o cálculo das ações de controle sem a necessidade dos parâmetros do processo.

O método de Ziegler-Nichols (ZN) consiste em encontrar o melhor ganho  $K_u$ , o valor do ganho em que o sistema está no limite da estabilidade, com um controlador proporcional. O período de oscilação resultante é chamado o período final,  $T_u$  (minutos por ciclo). As configurações ZN são, então, calculados a partir de  $K_u$  e  $T_u$ , pelas fórmulas apresentados na tabela 2 para os três tipos de controladores.

Este método é indicado para processos estáveis e instáveis, mas não se adapta muito bem em malhas rápidas (por exemplo, vazão) e nos processos com tempo morto alto. O método consiste em colocar a malha de controle em oscilação. O período das oscilações e ganho crítico do controlador que ocasiona oscilações, permitem os cálculos das ações a serem fixadas no controlador. O cálculo depende da estrutura do controlador utilizado e do modo de regulação escolhido (P, PI e PID).

**Tabela 2: Fórmulas de Ziegler-Nichols para ajuste pelo método do período crítico.**

Tipo de controlador	K	$T_i$	$T_d$
P	$0,5 * K_u$	-	-
PI	$0,4 * K_u$	$0,8 * T_u$	
PID	$0,6 * K_u$	$0,5 * T_u$	$0,125 * T_u$

A regulação escolhida para os controladores é o PID (Ação Proporcional + Integral + Derivativo), pois controle proporcional associado ao integral e ao derivativo é o mais sofisticado tipo de controle utilizado em sistemas de malha fechada. A parte proporcional elimina as oscilações, a integral elimina o desvio de *offset*, enquanto a derivativa fornece ao

sistema uma ação antecipativa evitando previamente que o desvio se torne maior quando o processo se caracteriza por ter uma correção lenta comparada com a velocidade do desvio.

A partir do que foi dito anteriormente, foi possível determinar os valores de  $K_u$  e  $T_u$  que estão mostrados na tabela 3.

**Tabela 3: Valores dos parâmetros do controlador.**

K	Ti	Td
3,000	1,500	0,375

O controlador se comportou como esperado para os valores dos parâmetros encontrados para  $K_u$  aproximadamente igual a 5 e  $T_u$  aproximadamente igual a 3.

## 5. CONCLUSÃO

O objetivo parcial do trabalho foi alcançado no tocante à aquisição das instrumentações, montagem da célula de equilíbrio e determinação dos parâmetros para sintonia do controlador. Todas as etapas anteriormente mostradas foram realizadas com resultados satisfatórios. Ocorreram vários contratempos em relação chegada dos equipamentos encomendados, isso proporcionou atrasos no cronograma do projeto e desta forma, não foi possível concluir o objetivo final do projeto que consistia em validar os dados da célula de equilíbrio com dados encontrados na literatura e com isso obter dados de equilíbrio ELV da água de produção.

No entanto, fica a proposta para gerações posteriores a conclusão do objetivo final do projeto. O ebuliômetro Othmer com sistema automatizado está disponível no Laboratório de Equilíbrio de Fases e Fotoquímica (FOTEQ) localizado no Núcleo de Pesquisa em Petróleo e Gás (NUPEG).

## 6. REFERÊNCIAS

- ABRAMS, D.S. & Prausnitz, J.M., Statistical Thermodynamics of Liquid Mixtures: A New Expression for the Excess Gibbs Energy of Partly or Completely Miscible Systems. *AIChE J.*, 21, 116-128, 1975.
- CUNHA, G. M. A.; Evangelista Neto, A. A.; Chiavone Filho, O.; Silva, D. N.; Nascimento, C. A. O. Tratamento preliminar da água produzida em campos de petróleo utilizando o processo foto-fenton. In: *Rio Oil & Gas Expo and Conference*, 2006, Rio de Janeiro.
- GMEHLING, J. Dortmund Data Bank. *DDBST Software & Separation Technology*, Oldenburg, Germany, 1995.
- MOTA, A.L.N., Silva, D.N., Oliveira, J.D., Dantas, J.H.A., Oliveira, H.N.M., Chiavone-Filho, O. Determinação de solubilidade mútua e equilíbrio líquido vapor para sistemas aquosos com hidrocarbonetos. In: *1º Congresso de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás*, 2001, Natal.
- OLIVEIRA, H. N. M.; Lima, C. K. M., Mota, A. L. N.; Dantas Neto, A. A., Chiavone Filho, O. Projeto de ebuliômetros de circulação da fase vapor e testes com misturas de dodecano+tween 20 e curva de destilação de gasolina. In: *2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás*, 2003, Rio de Janeiro.
- OLIVEIRA, H. N. M. Determinação de dados de equilíbrio líquido-vapor para sistemas hidrocarbonetos e desenvolvimento de uma nova célula dinâmica. Setembro de 2003. p.163. Tese de doutorado. PPGEQ/DEQ, UFRN, Natal, 2003.
- REID, R.C.; PRAUSNITZ, J.M.; POLING, B.E. *Properties of Gases and Liquids*, 4th Edition, McGraw-Hill. 1987.
- SANDLER, S. I. *Chemical, Biochemical, and Engineering Thermodynamics*. 4th Edition. John Wiley & Sons, Inc. 2006. P489-572.
- VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M.; SMITH, J. M. *Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química*. 5ª edição. Rio de Janeiro: LTC editora, 2000. p283-452.
- LUYBEN, W. L.; LUYBEN, M. L. *Essencial of Process Control*. 1<sup>st</sup> Edition. Singapore. McGraw-Hill. 1997.
- OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. 4ª Edição. Rio de Janeiro. Editora Prentice/Hall do Brasil LTDA. 1982.
- LUYBEN, W. L. *Process Modeling, Simulation, and Control for Chemical Engineers*. 2<sup>nd</sup> Edition. McGraw-Hill. 1996.