



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE RECURSOS HUMANOS DA AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO



Monografia

EVAPORAÇÃO SOLAR DE ÁGUA PRODUZIDA DE PETRÓLEO

Bolsista: *Rogério Pitanga Santos (GRA)*

Orientador(a): *Prof. Osvaldo Chiavone Filho*

Agosto/2008

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – SISTEMA SOLAR.....	7
2.1. Destilação Solar.....	7
2.1.1. Balanço energético.....	8
2.1.2. Construção do destilador.....	10
2.1.2.1. Tanque.....	10
2.1.2.2. Suportes.....	10
2.1.2.3. Cobertura.....	10
2.1.2.4. Canaleta de coleta.....	11
2.1.2.5. Componentes auxiliares.....	11
2.1.2.6. Outros.....	12
2.2. Coletor solar.....	12
2.2.1. Placa absorvedora.....	13
2.2.2. Eficiência térmica dos coletores.....	13
2.3. Reservatório térmico (boiler).....	14
2.4. Aquecedor solar.....	15
3. METODOLOGIA.....	16
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
5. CONCLUSÕES.....	22
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	23

1. INTRODUÇÃO

O petróleo é a principal fonte de energia do mundo. Assim sendo, a indústria do petróleo cresce a cada dia mais, e surge a necessidade da mesma de se adequar às necessidades sociais e ambientais do mundo moderno. No que concerne às necessidades ambientais, destaca-se o destino dos rejeitos dessa indústria, que estão presentes em grandes quantidades e são geralmente prejudiciais ao meio ambiente. O rejeito de maior volume em todo o processo de produção e exploração de petróleo são as águas de produção (Azevedo, 1998, citado por Bezerra, 2004). Denomina-se água de produção toda a água produzida junto com o petróleo, seja esta a água de formação ou a água de injeção, usada para estimular a produção de um poço. Em campos maduros, a produção de água pode chegar a mais de 90% da produção total (Thomas et al., 2001, citado por Bezerra, 2004). Além dos problemas logísticos causados pelo grande volume de água, essa água está contaminada, já que tende a formar emulsões estáveis com o óleo, e não pode ser descartada sem tratamento prévio. Esses tratamentos são muitas vezes dispendiosos, e mesmo assim a água não é reutilizada, mas descartada. Em um país onde muitas regiões não têm acesso à água de boa qualidade, tanto para uso na agricultura como para consumo humano, esse desperdício de água torna-se absurdo. Além disso, mesmo que a água não atinja requisitos tão rígidos quanto o da potabilidade, esta pode ser empregada em processos industriais, entre outros. Ou seja, soluções para esse problema são necessárias.

Entre várias soluções possíveis, o uso da energia solar se configura como uma alternativa interessante, já que utiliza uma fonte de energia gratuita e abundante, não gera poluição e é eficaz no tratamento de águas. Existem várias formas de utilizar a energia solar no tratamento de águas, sendo a principal delas o aproveitamento da radiação solar como energia térmica em um destilador solar, para evaporação e posterior condensação da água poluída, obtendo ao final do processo água destilada, em um processo que imita, em pequena escala, o ciclo natural da água. Esse método, apesar de eficaz na purificação da água, encontra algumas limitações, destacando-se a sua baixa produtividade e eficiência energética. A eficiência energética de um destilador solar se encontra na faixa entre 38% e 43%, podendo chegar no máximo a 60%. A baixa eficiência deve-se, principalmente, às perdas energéticas típicas em um destilador solar. Assim, contando com um valor típico de energia solar incidente como de 4 a 5 kWh/m² dia, o valor típico de produção para esses números serão de apenas 2 a 2,7 Kg/m² dia de água (Maluf, 2005).

Assim sendo, a destilação solar dificilmente é empregada para tratamento de grandes volumes de água poluída, sendo utilizada principalmente para abastecer pequenas comunidades que não têm fácil acesso à água potável. O uso de destiladores solares no tratamento de águas de produção seria apenas parcialmente eficiente, já que, apenas para citar um exemplo, a vazão de água de produção na UTPF (Unidade de Tratamento e Processamento de Fluidos) de Guamaré era de 60000 m³/dia no ano de 2002 (Silva, 2002, citado por Bezerra, 2004), e é ainda maior atualmente. Esse volume de água é muito grande para ser tratado por um destilador solar de área pequena.

Logo, o desafio é encontrar uma maneira de utilizar a energia solar no tratamento de maiores volumes de água de produção. É importante observar que a energia solar ainda se configura como uma fonte alternativa, sendo utilizada em conjunto com outros tratamentos mais comuns, mas não isoladamente. Mesmo assim, é importante estudar meios de aumentar a produtividade e eficiência de sistemas que utilizem energia solar, mantendo, porém, suas vantagens intrínsecas, como o baixo custo. Uma das alternativas, talvez a mais promissora, seja utilizar sistemas híbridos ou compostos, como um dessalinizador solar híbrido utilizado por Lopes (2004). O uso de um coletor solar para pré-aquecer a água de entrada do destilador é um bom exemplo de um sistema composto. E como também se pode usar a energia solar para produção de energia elétrica (através de painéis fotovoltaicos), esta pode ser utilizada para aquecimento da água, utilizando uma resistência elétrica.

A forma de pré-aquecimento de água que parece mais promissora é o aproveitamento do sistema de aquecimento solar de água utilizado em residências (também chamado de aquecedor solar), que é formado basicamente por coletores solares e reservatório térmico. Esse sistema pode então ser acoplado ao destilador solar, formando um sistema de aquecimento-destilação solar de água que chamaremos de sistema solar. O projeto consiste em estudar esse sistema e sua melhor configuração para tratamento de

vazões moderadas de água de produção, que alie alta produtividade, boa eficiência energética e baixo custo. Assim, pretende-se otimizar o aproveitamento energético da radiação solar na destilação, com o objetivo de aumentar a taxa de evaporação do destilador e, conseqüentemente, a produtividade do sistema como um todo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA - SISTEMA SOLAR

Como já citado, um dos objetivos do projeto é utilizar o aquecedor solar para realizar o pré-aquecimento da água, acoplando esse sistema ao destilador solar. Assim, é de fundamental importância conhecer como funciona o aquecedor solar, bem como cada um de seus elementos constituintes. Além disso, o conhecimento do destilador solar é imprescindível para a correta operação do sistema solar.

Na operação do sistema, também é importante monitorar certas variáveis, das quais se destacam a temperatura e a radiação solar. O monitoramento da radiação solar requer o uso de um equipamento chamado piranômetro, ou pode ser feito indiretamente através de dados fornecidos pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Foi então realizada uma pesquisa bibliográfica, e nos próximos tópicos serão abordados primeiramente os elementos constituintes do sistema e depois o aquecedor solar.

2.1. Destilação solar

A destilação há muito é considerada uma maneira de transformar água salgada em água potável. Já no século IV a.C., Aristóteles descreveu um método para evaporar água imprópria e então condensá-la para poder ser ingerida. Em 1593, o navegador “Sir” Richard Hawkins já usava a destilação solar para obter água potável do mar em suas viagens aos mares do sul.

O primeiro destilador solar moderno foi construído em Las Salinas (Chile), em 1872, por Charles Wilson. Ele consistia de 64 tanques de água (num total de 4.459 m²) feitos de madeira pintada de negro com coberturas inclinadas de vidro. Essa instalação foi utilizada para suprir 20 mil litros por dia de água potável para animais que trabalhavam nas minas. Após a abertura da região pela chegada da ferrovia, a instalação foi sendo deteriorada até o fim de sua operação em 1912, 40 anos após sua construção. A maioria dos destiladores solares que vieram depois deste seguem basicamente seu desenho (Duffie, 1991, citado por Maluf, 2005).

Durante a década de 1950, o interesse na destilação solar foi reavivado, e o objetivo era construir grandes destiladores centralizados. Porém, algum tempo depois, os cientistas perceberam que a destilação solar para grandes demandas era demasiadamente custosa se comparada com outros tipos de destilação. Assim, a pesquisa voltou-se para sistemas de destilação de pequeno porte. Mas atualmente, com o aumento do preço dos combustíveis fósseis, aliado à demanda ambiental, é provável que haja um crescimento do número de destiladores solares para instalações de médio e grande porte.

A destilação solar feita via destilador solar do tipo tanque raso é uma tecnologia simples que imita um processo natural: a radiação solar aquece a água contida em um recipiente raso de concreto revestido por uma cobertura negra, a água se transforma em vapor, o vapor se condensa na cobertura de vidro (que tem uma temperatura mais baixa) e a lâmina de água destilada é então coletada em um duto meia-cana localizado na parte lateral do destilador. A energia solar fica aprisionada dentro da câmara, pois o vidro comum é transparente para a radiação solar, mas opaco para a radiação térmica emitida pela água (efeito estufa). Quando a água evapora, as impurezas são deixadas para trás na água contaminada.

A cobertura de vidro fica em posição inclinada, de modo a evitar que as gotas d'água caiam de volta para o reservatório de água contaminada. O destilador deve ter um grande comprimento no sentido leste-oeste, com o objetivo de maximizar o ganho solar.

A operação desses destiladores é muito simples e não requer alto custo de manutenção ou trabalhadores especializados, apesar de que uma correta manutenção seja imprescindível para o bom funcionamento. O destilador deve ser limpo regularmente, para evitar acúmulo de impurezas. Além disso, o uso de bons selantes e vedadores (como o silicone) é importante para evitar a perda de eficiência devido aos vazamentos de calor. Além disso, o vidro deve estar sempre limpo e sem trincas que podem levar a uma perda extra de calor. Em seu trabalho, Maluf faz uma completa descrição do destilador solar,

discutindo aspectos referentes à construção, dimensões, operação, manutenção, pontos fracos e pontos fortes, entre outros. Alguns tópicos de seu trabalho, no que concerne à construção do destilador, serão aqui discutidos, pois são importantes para o projeto. Bezerra (2004) descreve outros tipos de destilador solar, como o destilador solar do tipo filme capilar e o destilador solar do tipo mecha.

As perdas típicas em um destilador solar do tipo tanque raso são causadas pela reflexão da radiação incidente no vidro (cerca de 10% da energia total), absorção no vidro (10%), perdas por radiação da cobertura de vidro para o céu (3,7%), perdas por convecção do vidro para o ambiente (12,2%), perdas por condução da base do reservatório para o solo (16%, mas com o uso de um bom isolante térmico pode cair para 5%) e outras perdas menores devido aos vazamentos de calor (9,7%). Esses valores foram tirados de experimentos feitos na Índia (McCracken, 1985, citado por Maluf, 2005).

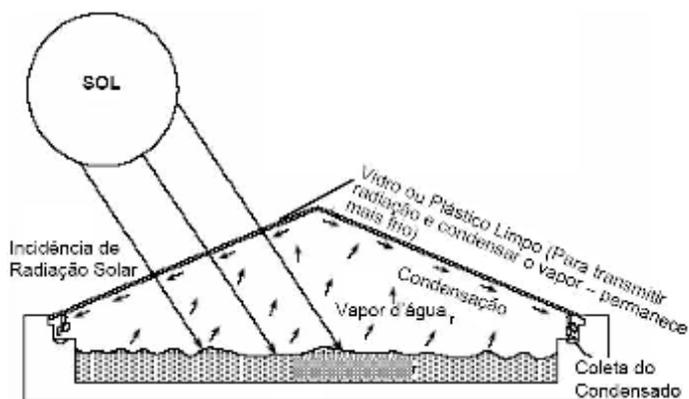


Figura 1. Esquema de destilador solar. Retirado de Soares (2004)



Figura 2. Foto de destilador solar

2.1.1. Balanço energético

Ao se estudar destiladores solares, é de fundamental importância conhecer o balanço energético envolvido na operação desses equipamentos. Duffie (1991, citado por Pina, 2004) descreve bem essa parte teórica. A figura 3 mostra os fluxos de energias num destilador, quando está em funcionamento. Sempre que é projetado um destilador, visa-se maximizar o q_e , calor que está relacionado ao transporte do vapor de água do tanque até a superfície inferior da cobertura, onde é condensado. A energia de evaporação (q_e) é diretamente proporcional à produtividade do destilador.

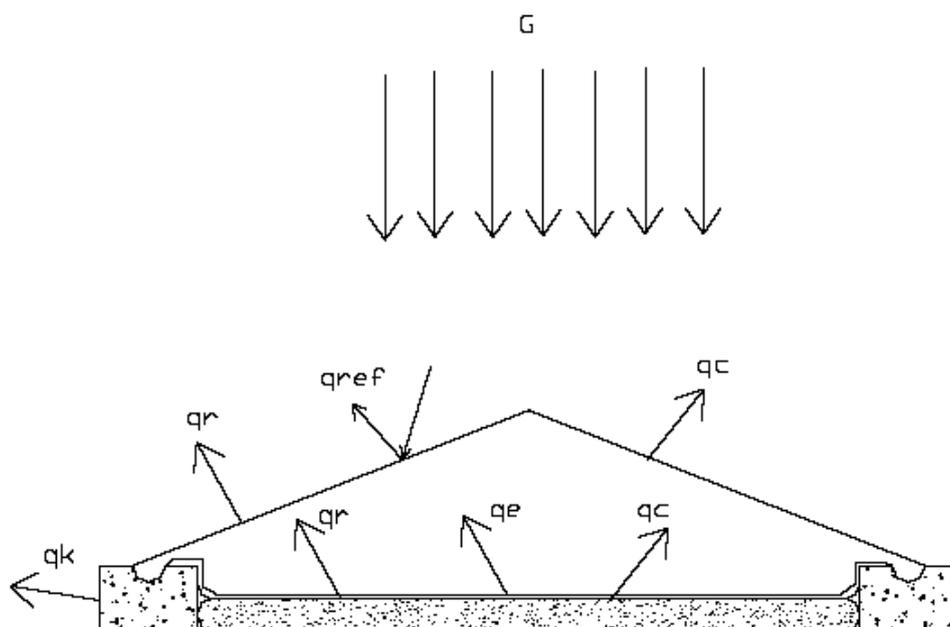


Figura 3. Fluxos de energia de um destilador solar. Retirado de Pina (2004)

Na figura 4, está representado um circuito, onde as resistências correspondem aos fluxos energéticos de um destilador.

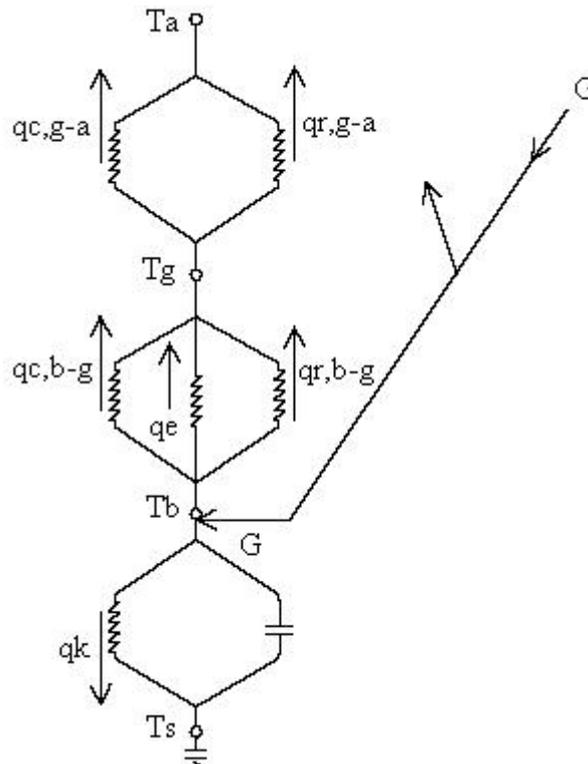


Figura 4. Fluxos energéticos em um destilador solar. Retirado de Pina (2004)

Segundo Duffie, o balanço energético do destilador requer que o total da energia solar absorvida seja igual à energia transferida da cobertura, $q_{c, g-a}$ e $q_{r, g-a}$, mais as perdas pelo fundo e pelas bordas do destilador, q_k , mais a energia armazenada dentro do sistema. O termo correspondente à energia útil, q_e , o que é diretamente proporcional à produção da água, é parte da energia transferida da cobertura para o ar exterior. A máxima produção do destilador ocorre quando a energia de evaporação de uma quantidade de água seja igual à energia solar incidente sobre o destilador.

Para uma unidade de superfície de um destilador solar, a uma intensidade de radiação solar G , com uma cobertura transparente e um tanque de água, o balanço energético na água (em conjunto com o tanque), por unidade de área do tanque, pode ser escrito do seguinte modo:

$$G\tau\alpha = q_e + q_{r, b-g} + q_{c, b-g} + q_k + (dT_b / dt) (m C_p)_b \quad (I)$$

em que os sub-índices e , r , c e k representam evaporação-condensação, radiação, convecção e condução, respectivamente. Os sub-índices b e g referem-se ao tanque e cobertura (vidro). τ representa a transmitância da cobertura, e α a absorvância.

Levando em conta que a capacitância do vidro é normalmente inferior do que a da água e do tanque, então é aceitável desprezar a energia solar absorvida pelo vidro. Assim, considerando aproximadamente a mesma área da cobertura e do tanque, o balanço de energia na cobertura pode, por sua vez ser escrito por:

$$q_e + q_{r, b-g} + q_{c, b-g} + q_k = q_{c, g-a} + q_{r, g-a} \quad (II)$$

A eficiência do destilador é definido como sendo a relação entre o calor transferido pela evaporação-condensação e a radiação que chega no destilador:

$$\eta_i = q_e / (AG) \quad (III)$$

Integrando esta equação num período (dia, mês ou ano), tem-se o desempenho do destilador. A partir de resultados experimentais pode-se chegar na eficiência efetiva do sistema, que inclusive levará em conta algumas perdas (gotas que caem diretamente no tanque, vazamentos nas canaletas) utilizando a seguinte equação:

$$\eta_i = (m_p h_{fg}) / (AG) \quad (IV)$$

onde m_p é a taxa de destilado produzido pelo destilador (valor medido) e h_{fg} é o calor latente de vaporização.

2.1.2. Construção do destilador

Ao contrário de outros equipamentos do sistema solar, como o coletor solar e o reservatório térmico, que já podem ser comprados prontos, o destilador solar deve ser construído. Por isso, a correta montagem desse equipamento é crítica, já que um erro pode levar todo o sistema a ser ineficiente, pois se trata do elemento mais importante do sistema. Assim, uma revisão bibliográfica das partes constituintes de um destilador solar é imprescindível, a fim de permitir a escolha dos melhores materiais e a melhor forma de montagem. Nesse sentido, o trabalho de Maluf (2005) provou-se fundamental na descrição dessa etapa, e foi a principal referência utilizada na montagem do equipamento.

2.1.2.1. Tanque

O tanque contém a água de alimentação, normalmente água salobra ou salina, e no caso específico, a água de produção. Logo, este deverá ser a prova d'água e pintado de uma cor escura, para que possa absorver melhor a radiação incidente e transformá-la em calor. Além disso, a superfície deve ser limpa, para facilitar a limpeza.

No trabalho de Maluf, ele destaca alguns fatores que pesam na escolha do material: durabilidade, custo, disponibilidade, limpeza, portabilidade e toxicidade. Na tese, o material recomendado é o concreto, pela simplicidade e baixo custo. Porém, decidiu-se que esse material não seria o mais aconselhado para os propósitos do projeto, já que é propenso ao surgimento de trincas.

Maluf também destaca que metais não são a melhor escolha para o tanque, pois são facilmente danificados. Ele cita como exemplos o cobre, o ferro galvanizado e o alumínio anodizado, todos eles com pouco tempo de vida útil. Uma sugestão dada é o uso de alumínio revestido com borracha de silicone, que tem uma boa durabilidade. Porém, o trabalho afirma que fibra de vidro não é um bom material para o tanque, quando na verdade já foram feitas experiências com tanques de fibra de vidro na UFRN com bons resultados. Logo, este material também deverá ser considerado.

2.1.2.2. Suportes

Os suportes para a cobertura de vidro são geralmente feitos com metal, como o alumínio e o aço galvanizado. Apesar destes estarem sujeitos à corrosão, eles irão durar bastante se devidamente protegidos. O silicone de vedação adere bem ao alumínio, o que torna esse material mais apropriado à confecção dos suportes.

2.1.2.3. Cobertura

A cobertura é o componente mais importante do destilador solar. Deve transmitir o máximo de radiação dentro da faixa do espectro solar e manter o calor gerado dentro do destilador. Devido à exposição à radiação ultravioleta, o material deve ser resistente a ela, e como as temperaturas podem ser altas (próximas a 100° C), o material deve suportar seu próprio peso nessas temperaturas e não expandir muito, o que poderia danificar a vedação. Além disso, o material deve ser resistente, podendo resistir a ventos e chuvas, e deve permitir a condensação do vapor e conseqüente formação de uma lâmina de água que escorrerá sob ele, em vez de gotas de água (uma propriedade conhecida em inglês como *wettability*, ou “molhabilidade”, em uma tradução aproximada para o português).

Considerando todos esses fatores, o melhor material é o vidro, que apresenta melhor *wettability*. O plástico, a princípio, poderia ser utilizado, mas a maioria dos plásticos se deteriora sob altas temperaturas e têm uma ruim *wettability*, o que os torna impróprios para o uso.

Lopes (2004), em seu trabalho, relaciona alguns tipos de vidro com suas respectivas propriedades, quando recebem calor normal à superfície. A tabela é reproduzida a seguir:

Propriedades	Tipos de vidro		
	Vidro comum	Vidro Lima	Vidro cristal/branco
Óxido de ferro	0,1 – 0,13	0,05	0,01
Índice de refração	1,52	1,51	1,50
Transmitância normal %	81 - 85	85 - 87	90,50
Espessura (pol)	0,175 – 0,1875	0,125 – 0,1875	0,1875
Perdas por reflexão %	8,0 – 8,2	8,0 – 8,1	8,0
Perdas por absorção %	6,8 – 11,0	4,9 – 7,0	1,50

Tabela 1. Propriedades de certos tipos de vidro. Retirada de Lopes (2004)

É fácil observar, pela tabela, que quanto maior a porcentagem de óxido de ferro (Fe_2O_3) presente no vidro, maior serão as perdas por absorção e menor a porcentagem de radiação transmitida, ou seja, o vidro é menos transparente. Esse é um fator importante a ser observado na escolha do vidro.

2.1.2.4. Canaleta de coleta

Como já mostrado, as canaletas de coleta ficam localizadas na base da cobertura de vidro e servem para coletar a água condensada e levá-la ao tanque de armazenamento. Estas devem ser pequenas, para não provocar sombreamento no tanque. Segundo Maluf, o material mais indicado é o aço inoxidável. Porém, o alumínio e o PVC também são opções viáveis.

2.1.2.5. Componentes auxiliares

Os principais componentes auxiliares são o isolamento térmico e os vedadores (ou selantes).

O isolamento térmico serve para evitar perdas de calor para o ambiente, aumentando a eficiência do destilador, e é geralmente utilizado por baixo do tanque. Maluf afirma que o uso de areia na base serve para diminuir as perdas de calor, pois ela serve como um armazenador, que acumula calor durante o dia e o devolve para o tanque à noite, mantendo o processo de destilação após o pôr-do-sol. Já Bezerra (2004) utilizou resíduo de lã com bons resultados, e enfatiza que o isolamento usado em seu trabalho (0,01 m) é bem inferior ao recomendado na literatura (Al-Hinai et.al., 2002), que seria de 0,10 m. Lopes (2004), por sua vez, relaciona propriedades de vários materiais isolantes. A tabela é reproduzida a seguir:

Material isolante	Densidade (kg/m ³)	Condutibilidade térmica (Kcal/m·h·° C)	Temperatura (° C)
Cortiça	160	0,037	30
Lã de vidro	200	0,037	20
Lã de vidro	200	0,060	200
Madeira (pinho)	377	0,091	30
Madeira (carvalho)	610 – 800	0,15 – 0,18	80
Mica	1900 – 2300	0,43	50
Lã de rocha	180	0,031	20
Lã de rocha	180	0,052	200
Algodão (tecido)	81	0,048	30
Algodão (tecido)	80	0,051	20
Vidro (placa)	2700	0,66	20
Borracha	920 - 1230	0,12 – 0,14	20

Tabela 2. Propriedades de materiais isolantes. Retirado de Lopes (2004)

A vedação é importante principalmente para manter o ar quente preso dentro da estrutura, evitando perda de calor. Além disso, uma vedação ineficiente pode permitir a entrada de água de chuva e insetos no tanque. Maluf afirma que a melhor opção é o silicone moldado *in loco*.

É importante frisar que, no contexto do sistema solar, onde a água entrará já pré-aquecida no destilador, o isolamento térmico e a vedação são de extrema importância, já que deve-se evitar ao máximo a perda de calor da água, caso contrário o sistema de pré-aquecimento não terá grande contribuição.

2.1.2.6. Outros

Além das partes já descritas, ainda existem mais dois detalhes importantes a serem observados na construção e operação de destiladores: a inclinação da cobertura de vidro e a altura de lâmina de água no tanque.

Quanto ao ângulo de inclinação da cobertura, sabe-se que este tem influência na quantidade de radiação solar que entra no destilador. Quanto mais ortogonal à superfície do vidro for esse ângulo de incidência, melhor. Ou seja, quanto menor o ângulo de inclinação, mais radiação irá ser transmitida pelo vidro. Baseando-se no trabalho de Bezerra (2004), escolheu-se o ângulo de 20° como ideal, já que permite uma boa transmissão de radiação solar, o que equivale a altas taxas de evaporação.

Quanto à profundidade da água, a literatura recomenda que a mesma deva estar entre 1,5 cm e 2,5 cm (Al-Hayek, 2004, e McCracken, 1985, citados por Maluf, 2005). De modo geral, quanto mais raso o tanque, melhor. Porém, se o tanque for raso demais, poderá haver depósitos de sal, o que não é interessante. Assim, uma profundidade de água de 2 cm é a mais promissora para se trabalhar. Porém, é importante, com o sistema já em operação, testar outras profundidades de água, para observar como o sistema se comporta.

2.2. Coletor solar

No sistema, o coletor solar é o responsável pelo pré-aquecimento da água que entra no destilador solar, garantindo assim uma maior produtividade de água destilada. Depois do destilador, ele é o elemento mais importante do sistema, e seu funcionamento e operação merecem atenção especial.

Existem três principais tipos de coletores solares: planos, coletores concentradores e CPC (coletores concentradores parabólicos).

Os coletores solares planos são os mais comumente utilizados no aquecimento solar da água. Os elementos constituintes são: placa metálica absorvedora, tubos (serpentina), aletas, cobertura de vidro, caixa e isolamento térmico. O coletor funciona, em resumo, da seguinte maneira: os raios de sol atravessam o vidro da tampa, esquentam a placa absorvedora e as aletas (de cobre ou alumínio, e pintadas com tinta escura que ajuda na absorção da radiação solar), e o calor passa para os tubos ou serpentina (geralmente de cobre), esquentando a água que está dentro da serpentina.

Segundo Esteban (2000) e Lopes (2004), os coletores solares podem ser utilizados em conjunto com o destilador solar para melhorar a eficiência deste, através do pré-aquecimento da água.

O coletor solar, ao contrário do destilador solar, será comprado já pronto da empresa Soletrol. Mas, ainda assim, é importante o estudo dos coletores solares, a fim de permitir o melhor aproveitamento do equipamento. Lopes descreve os principais aspectos de um coletor solar plano. O autor descreve detalhes da construção do coletor, materiais utilizados e balanço energético. Alguns dos elementos que constituem o coletor, como a cobertura de vidro e o isolamento térmico, já foram discutidos no tópico sobre destiladores, sendo as mesmas considerações válidas para o coletor. Assim, o único elemento do coletor a ser discutido com detalhes é a placa absorvedora. Além disso, um balanço energético será feito para o coletor, baseado no trabalho de Lopes.

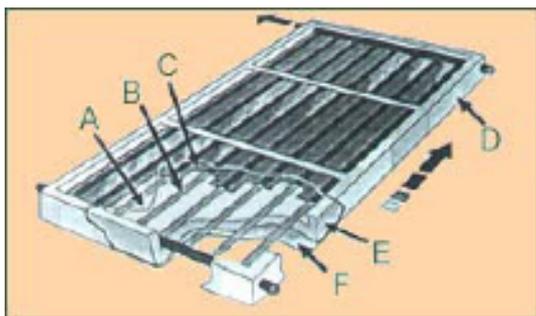


Figura 5. Esquema de coletor solar plano

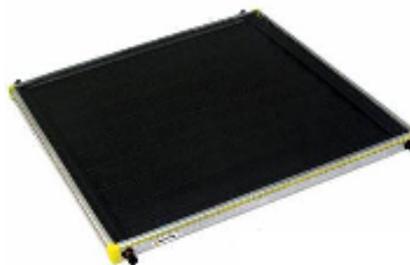


Figura 6. Coletor solar comercial.
Retirado do site www.soletrol.com.br

2.2.1. Placa absorvedora

No conjunto do coletor solar, a placa absorvedora (em conjunto com as aletas) é o item mais importante. Por isso sua construção deve obedecer a critérios rígidos quanto a estanqueidade e aderência, já que a placa é constituída do conjunto chapa-tubo, formando uma única peça.

O cobre e o alumínio são os materiais mais utilizados na construção da placa absorvedora. O uso do alumínio reduz sensivelmente os custos de fabricação. A única desvantagem do alumínio em relação ao cobre é que sua corrosão é normalmente maior que a do cobre.

Lopes, em seu trabalho, compara algumas características do alumínio e do cobre. A tabela é reproduzida a seguir:

Propriedades	Alumínio	Cobre
Massa específica (g/cm ³)	2,7	8,92
Temperatura de fusão sob pressão atmosférica (°C)	660	1083
Condutividade térmica entre 25 e 100° C (cal/s·m·°C)	49	92
Resistividade a 20° C (Ω.m)	2,8 x 10 ⁻⁸	1,7 x 10 ⁻⁸
Coefficiente de temperatura da resistividade (°C)	390	390
Coefficiente de dilatação linear a 25° C (1/°C)	23 x 10 ⁻⁶	17 x 10 ⁻⁶

Tabela 3. Propriedades do alumínio e do cobre. Retirado de Lopes (2004)

2.2.2. Eficiência térmica dos coletores

Para que os coletores solares ofereçam vantagens significativas, algumas precauções básicas devem ser consideradas:

- A cobertura deve possuir alta transparência para a radiação solar e alta absorvidade para radiação infravermelha;
- A placa absorvedora deve ser preta para garantir maior absorção de energia e possuir alta condutividade térmica para transferir esta energia ao fluido;
- A caixa do coletor solar plano deve ter um excelente isolamento térmico na parte lateral e na parte inferior, que minimize as perdas de calor para o ambiente, e possuir uma eficiente vedação para impedir a entrada de umidade.

As características acima contribuem para que o rendimento do coletor seja satisfatório, embora o cálculo do rendimento dos coletores solares envolva uma série de outros parâmetros e certa complexidade experimental.

Em suma, o rendimento de um coletor solar é dado pela equação seguinte:

$$\eta = \frac{\int_{t_1}^{t_2} Q_U dt}{A_c \int_{t_1}^{t_2} G_T dt} \quad (\text{V})$$

Onde η é o rendimento, Q_U é a energia transferida ao fluido de trabalho, G_T é a radiação solar incidente no plano do coletor e A_c é a área do coletor.

Em regime permanente, a energia transferida ao fluido de trabalho é definida pela diferença entre a energia solar absorvida pelo coletor e as perdas térmicas:

$$Q_U = A_c \left[S - U_L (T_P - T_a) \right] \quad (\text{VI})$$

Onde S é a radiação solar absorvida, U_L é o coeficiente global de perdas térmicas do coletor, T_P é a temperatura média da placa absorvedora e T_a é a temperatura ambiente.

A simplicidade desta equação é apenas aparente, pois na prática a temperatura média da placa absorvedora é de difícil obtenção, pois está relacionada com a radiação incidente, com as condições de entrada do fluido (vazão e temperatura) e com as características de construção do coletor.

Devido a essa complexidade, a equação pode ser reformulada, sendo expressa em termos da temperatura de entrada do fluido e de um fator denominado fator de remoção de calor F_R .

F_R é definido como a razão entre a energia útil real retirada do coletor e a energia útil que poderia ser retirada se toda a superfície absorvedora estivesse à temperatura de entrada do fluido. Este fator pode ser representado matematicamente pela equação seguinte:

$$F_R = \frac{m C_p (T_0 - T_i)}{A_c [S - U_L (T_i - T_a)]} \quad (\text{VII})$$

Onde m é a vazão mássica do fluido, C_p é o calor específico do fluido, T_0 é a temperatura de saída do fluido e T_i é a temperatura de entrada do fluido.

A radiação absorvida S depende dos materiais empregados na construção do coletor e do ângulo de incidência da radiação solar.

Da equação (I), e da consideração admitida para a radiação solar absorvida S , pode-se escrever a equação (IV), que é a equação utilizada para análise de coletores solares. Como pode se observar, a energia útil é calculada em função da temperatura de entrada do fluido, uma grandeza facilmente mensurável e de fácil controle.

$$Q_U = A_c F_R [G_T (\tau \alpha) - U_L (T_i - T_a)] \quad (\text{VIII})$$

De modo geral, na realização dos testes de rendimento, os coletores são expostos à radiação solar para a determinação da energia transferida ao fluido de trabalho (Q_U). Para determinação direta dessa energia, é necessário o conhecimento das seguintes grandezas: radiação solar incidente no coletor, vazão mássica do fluido que circula no coletor e as temperaturas do fluido na entrada e saída do coletor.

Para cada temperatura de entrada do fluido no coletor é obtido um valor da eficiência instantânea (η_i), definido pelas equações (V) e (VI):

$$\eta_i = \frac{Q_U}{A_c G_T} = \frac{m C_p (T_0 - T_i)}{A_c G_T} \quad (\text{IX})$$

$$\eta_i = F_R (\tau\alpha) - \frac{U_L (T_i - T_0)}{A_C G_T} \quad (X)$$

O fator F_R é da ordem de 0,9 (seu valor varia ente 0 e 1,0) para coletores usando líquido. Os valores de coeficiente U são também determinados experimentalmente e sua faixa de valores está na tabela 4:

Tipo de envidraçamento	U (W/m ² · K)
Sem cobertura	13 – 15
Simples	6 – 7

Tabela 4. Valores de U para coletores solares. Retirado de Lopes (2004)

2.3. Reservatório térmico (boiler)

O boiler é como uma caixa d'água especial que mantém quente a água que passou pelo coletor solar. Assim, ele garante água quente mesmo nas horas em que a insolação é muito baixa ou inexistente (depois do pôr-do-sol).

Para manter a água aquecida, o boiler deve contar com um baixo coeficiente de trocas térmicas com o ambiente, usar materiais que sejam resistentes à corrosão, que tenham uma boa rigidez estrutural e suportem temperaturas próximas a 100° C. A união destes requisitos acaba levando ao uso do aço inoxidável. No entanto, devido ao custo deste, outros metais, como o cobre, também são utilizados.

Para garantir um bom isolamento térmico, o tanque metálico é normalmente recoberto por um bom material isolante (lã de vidro e poliuretano), com coeficientes de condução térmica na ordem de 0,03 a 0,04 W/mK. Um encapsulamento de aço galvanizado ou alumínio garante um bom acabamento e certa rigidez ao sistema.



Figura 7. Reservatório térmico. Retirado do site www.soletrol.com.br

2.4. Aquecedor solar

Um sistema básico de aquecimento solar de água é constituído basicamente de coletores solares planos e reservatório térmico (boiler), e pode ser representado pela figura a seguir, onde são mostrados em detalhes a caixa d'água (fonte de água fria, e no caso específico desse projeto, poluída), os coletores solares e o reservatório térmico, com as devidas conexões:

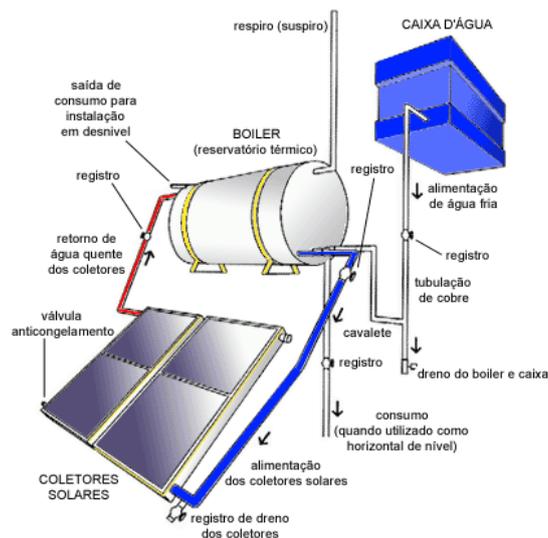


Figura 8. Esquema de aquecedor solar de água. Retirado do site www.soletrol.com.br

O seu funcionamento é bastante simples, e utiliza o princípio de circulação natural, denominado termossifão, que se baseia no fato de que, quanto maior a temperatura da água, menor sua densidade (ou seja, mais leve é a água). Esse princípio pode ser melhor visualizado no esquema mostrado a seguir:

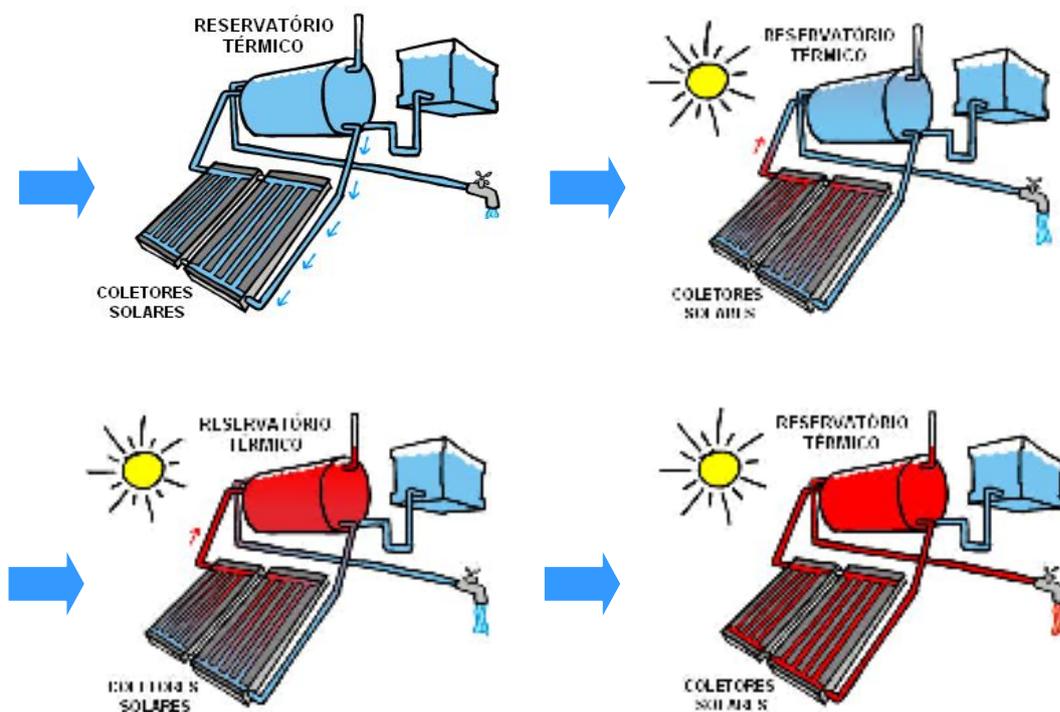


Figura 9. Esquema de funcionamento de aquecedor solar com termossifão. Retirado do site www.soletrol.com.br

Como se pode observar pelo esquema, o boiler está em um nível mais alto que os coletores, e por gravidade, a água passa do boiler para os coletores. O sol então aquece a água que está nos coletores, que fica mais quente e menos densa, e tem a tendência de subir para o boiler e “empurrar” a água fria do boiler para os coletores, que é então aquecida, gerando um ciclo que provoca a circulação natural da água. Como se pode ver na Figura 4 do esquema, quando há necessidade de água quente, ela é retirada do boiler, e a água fria da caixa d’água completa o volume do boiler, de modo que este esteja sempre cheio de água. A água fria da caixa esfria a água do boiler, o que dá continuidade ao processo de circulação.

Esse sistema pode ser facilmente acoplado ao destilador solar, de modo que, quando o registro (ou válvula) é aberto, a água quente do boiler seja conduzida ao destilador, onde será destilada.

3. METODOLOGIA

No primeiro semestre do projeto, foi desenvolvida uma rotina de familiarização com métodos e equipamentos na área de Termodinâmica do Equilíbrio, no estudo do Equilíbrio Líquido-Vapor do sistema gasolina-álcool-água. Concluída essa fase inicial, o projeto com energia solar começou a ser efetivamente executado.

O primeiro passo nesse sentido foi realizar uma revisão bibliográfica dos usos da energia solar e de sua aplicação no tratamento de águas. O principal objeto de estudo foi o destilador solar, principalmente a teoria envolvida no processo de destilação. Foi dada ênfase ao estudo de otimização de sistemas solares para tratamento de águas, com o objetivo de chegar a uma configuração que permitisse o tratamento de vazões moderadas de água produzida mantendo as características intrínsecas dos destiladores solares, como o baixo custo. Foi realizada uma pesquisa sobre equipamentos que poderiam ser utilizados junto ao destilador solar no sistema, como o coletor solar plano.

O próximo passo foi a cotação dos equipamentos úteis ao projeto, como piranômetro, coletor solar, reservatório térmico (boiler) e o próprio destilador solar. Essa cotação foi feita junto às empresas da área, através de visitas aos websites das próprias e contato via e-mail, e através de dissertações que continham análise de custos, como o trabalho de Maluf (2005).

Após a cotação dos equipamentos, foi possível efetuar a aquisição de alguns, de acordo com os objetivos e recursos do projeto. O reservatório térmico e o coletor solar plano foram adquiridos, e a instalação dos mesmos realizada. O destilador solar foi construído junto ao departamento de Engenharia Mecânica. O piranômetro e o datalogger, por sua vez, não foram adquiridos, devido às dificuldades envolvidas no processo de importação. Nos experimentos realizados, foram utilizados dados de radiação solar adquiridos junto ao INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Os dados de temperatura foram adquiridos utilizando termorresistências Pt-100.

Foram elaboradas também malhas de controle para o sistema, de modo a avaliar e mesmo prever como o sistema se comportará. A elaboração de malhas de controle é necessária pelo fato de que o sistema operará de forma contínua, e carece de mecanismos de controle para um bom funcionamento. Além disso, através das malhas, pode-se tirar conclusões preliminares à montagem do sistema, como, por exemplo, a necessidade do reservatório térmico, que não havia sido considerado no início do projeto.

No caso do sistema solar, a variável que deve ser controlada é o nível de água no destilador. Além da questão de segurança (evitar transbordamento), o controle de nível é necessário para manter o nível ótimo de água no tanque do destilador. Ou seja, o controle de nível também é importante para aumentar a eficiência do processo. Esse controle é bastante simples, necessitando basicamente de um sensor de nível e de uma válvula solenóide. Porém, é importante notar algumas particularidades do destilador, como a pequena lâmina de água e a alta temperatura do fluido, o que dificulta a obtenção de um sensor de nível que se adapte a essa situação. Justamente devido a essa dificuldade é que se decidiu, a princípio, realizar o controle manual dessa variável, através de uma válvula posicionada entre o aquecedor e o destilador solar.

Outra variável que pode ser controlada é a temperatura da corrente que entra no destilador. Esse controle é interessante, pois faria o sistema mais estável, o que é uma vantagem significativa. Porém, esse controle é mais complexo que o controle de nível. O modo de controle mais fácil é o controle de vazão de água que passa pelo coletor. Seria um controle *feedback*, em que seria medida a temperatura da corrente que sai do coletor, e através de um controlador, ajustada a vazão da corrente de entrada, já que, pela lei

geral da calorimetria ($Q = m C_p \Delta T$), a vazão é inversamente proporcional ao diferencial de temperatura (diferença entre a temperatura de saída e a de entrada). Esse tipo de controle necessitaria de uma válvula de ajuste fino e de um controlador mais complexo. Como se trata de um controle não necessário para o funcionamento do sistema, este será inicialmente desconsiderado, podendo vir a ser implementado em um momento futuro, se mostrar-se necessário e/ou viável.

A seguir, serão detalhadas algumas das malhas de controle elaboradas para o sistema.

A primeira malha de controle elaborada para o sistema tinha controle da temperatura da corrente que entrava no destilador. Para esse controle, a corrente passava pelo coletor solar e era encaminhada ao reservatório térmico, onde a temperatura era medida. Caso a temperatura fosse inferior à temperatura de *set point*, haveria o reciclo da corrente para um misturador localizado antes do coletor, de modo que a corrente passasse de novo pelo coletor, e assim continuasse até atingir a temperatura desejada. Não se entrará em detalhes sobre essa malha pelo fato de que ela foi logo descartada, já que o uso de reciclo é bastante complexo e essa malha exigiria mais equipamentos, como um tanque de reciclo.

A segunda malha de controle (malha de controle II) conta com controle de nível e de temperatura. O controle de temperatura é do tipo *feedback*, controlando a temperatura através do controle da vazão, como já explicado anteriormente. A malha, representada de modo simplificado em diagrama de blocos, é mostrada a seguir:

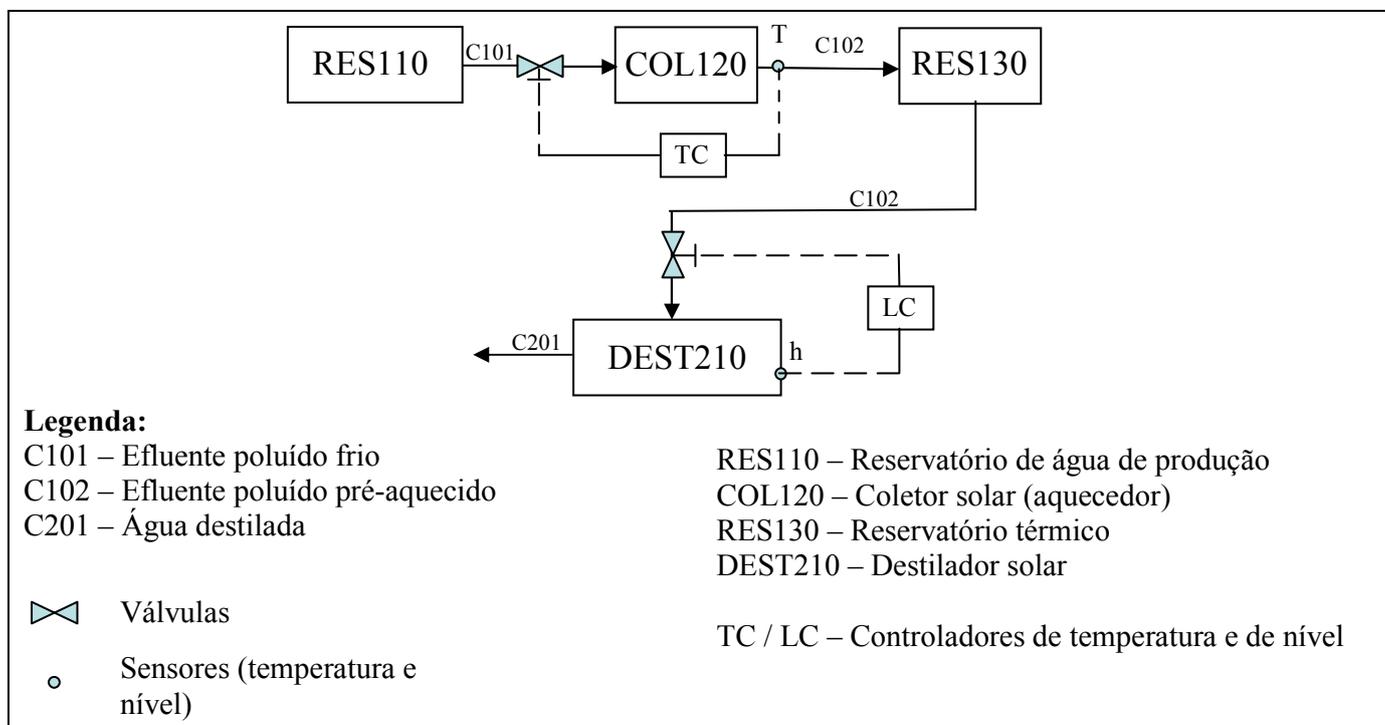


Figura 10. Malha de controle II

Como se pode observar, essa malha de controle não aproveita a configuração normal do aquecedor solar, invertendo a posição do boiler e do coletor solar (ver tópico 2.6). Com isso, esse sistema não permite a circulação natural (termossifão), necessitando de circulação por gravidade (diferença de nível) ou através do uso de bombas. Observado esse fato, deu-se então preferência a malhas que mantivessem a configuração normal do aquecedor solar, utilizando circulação natural. Isso não impede que, no futuro, essa malha de controle seja considerada, podendo inclusive revelar-se a melhor opção para operação e controle.

Foram elaboradas duas malhas para o aquecedor solar em sua configuração normal. A primeira contava com o controle de temperatura, através de um controle de razão. Porém, essa malha é também deveras complexa, pois envolve a mistura de proporções exatas de correntes de água fria e de água quente, e esse controle só serve para temperaturas acima da temperatura de *set point*, ou seja, é pouco útil. Por isso, deu-se preferência a abandonar, pelo menos inicialmente, o controle de temperatura, e manter o aquecedor solar com sua configuração normal, acoplado ao destilador solar, com o controle de nível da água no

destilador realizado por um sensor de nível (localizado no tanque do destilador) e uma válvula solenóide (localizada na saída do reservatório térmico, ou na tubulação de consumo, conforme ilustrações do tópico 2.6). Essa malha de controle, apesar de não possuir controle de temperatura e ser, portanto, menos estável, supre as necessidades do sistema, tendo as vantagens de manter a configuração do aquecedor solar e ser mais simples. Vale salientar, mais uma vez, que apesar dessa última malha de controle ter sido a escolhida, isso não significa que no futuro outras malhas não possam ser testadas, sempre buscando a maior eficiência do sistema. Como já citado, atualmente o controle de nível do destilador é feito de modo manual, através da manipulação de uma válvula localizada entre o aquecedor e o destilador solar. A obtenção do medidor de nível e da válvula solenóide permitirá o controle automático do nível.

Há de se salientar também que foram realizados alguns testes de destilação solar com um protótipo de destilador desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Mecânica, mas esses testes não foram muito úteis devido a alguns problemas com o destilador, como isolamento ineficiente e trincas no vidro. De todo modo, esses experimentos foram úteis na familiarização com os métodos de destilação, tanto que há um desejo de montar um destilador solar rústico que possa ser usado para experimentos preliminares, com medidas de temperatura, radiação solar e nível de água, o que forneceria dados importantes para a operação do sistema. Esses experimentos poderiam ser considerados experimentos de bancada, cuja importância está no fato de se ter maior liberdade para testar novas configurações sem alterar o sistema diretamente. O ideal é, em um momento futuro, construir um sistema solar “caseiro”, até mesmo para comparar a eficiência de ambos os sistemas e avaliar viabilidade econômica.



Figura 11. Fotos de destilador solar “caseiro”

Atualmente, estão sendo realizados experimentos com o aquecedor e o destilador solar em separado. Nos experimentos com o aquecedor solar, o boiler é cheio com o fluido a ser aquecido e este fica circulando entre o boiler e o coletor solar, sendo aquecido pela radiação solar incidente. Nestes experimentos, foram medidas a temperatura ambiente e a temperatura no boiler. A temperatura no boiler é medida próxima a tubulação de consumo, onde o fluido está aquecido. Dados de radiação solar foram obtidos junto ao INPE. Desse modo, é possível fazer uma relação entre a radiação solar incidente e o aumento de temperatura do fluido. Nos experimentos iniciais, o fluido utilizado foi água comum, e posteriormente foram realizados experimentos utilizando solução aquosa salina (1000 ppm de Cloreto de Sódio). A solução salina é representativa da água de produção no que concerne a quantidade de sais. Como o objetivo da destilação solar é justamente a remoção de sais, os experimentos com solução salina podem ser considerados representativos, apesar de haver a necessidade de se realizar experimentos com a água de produção e verificar se os outros componentes da mesma influenciarão no aquecimento e na destilação solar.

Quanto ao destilador solar, o mesmo foi testado, porém devido a alguns problemas de vazamento, experimentos efetivos ainda não puderam ser realizados no mesmo. Assim que este estiver em condições de operação, serão realizados experimentos no próprio, em modo batelada, tanto com água comum quanto com solução salina (e se possível com água de produção). Só então o aquecedor solar será conectado ao destilador, permitindo que o sistema opere em modo semi-contínuo. Desse modo, podem-se comparar os volumes de destilado e os percentuais de remoção de sais obtidos em cada modo de operação.



Figura 12. Aquecedor solar



Figura 13. Detalhe do poço para termorresistência no boiler



Figura 14. Destilador solar

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como já citado, foram realizados experimentos no aquecedor solar. Os fluidos utilizados foram a água comum de torneira e uma solução salina de 1000 ppm de NaCl.

Foram realizados, ao todo, oito experimentos de aquecimento solar de água comum. Foram analisados três experimentos do total, ou seja: 26 de Maio de 2008, 30 de Maio de 2008 e 03 de Junho de 2008.

O primeiro experimento, realizado em 26 de Maio de 2008, ocorreu entre 08:54 e 14:06. A Tabela 5 mostra os valores máximos e médios da temperatura da água do “boiler”, da temperatura do ar e da radiação solar nos dias em que foram realizados os experimentos. É importante ressaltar que os valores de radiação solar obtidos foram os valores médios, ou seja, a cada minuto, é obtido o valor médio da radiação incidente.

A figura 15 mostra o perfil de temperatura da água do “boiler” e do ar para os experimentos analisados, enquanto a figura 16 mostra o perfil da radiação solar global. Como se pode observar no gráfico, a temperatura da água no reservatório térmico no dia 26 é crescente, enquanto a temperatura do ar e a radiação solar são variáveis. Isso mostra a importância do reservatório térmico, já que o mesmo conserva a água quente mesmo quando a radiação solar diminui. Quanto à radiação solar, pode-se observar que essa variável cresce até meados de 12:00 (180 minutos), quando então começa a diminuir, o que é lógico, já que, por volta de 12:00, o sol atinge sua máxima potência. A temperatura do ar, por sua vez, sofre oscilações ao longo do dia, já que essa variável não depende apenas da radiação solar incidente, mas também dos ventos, da umidade do ar, entre outros fatores. Nota-se que a temperatura do “boiler” não sofre tantas oscilações. Não houve precipitação pluviométrica no período do experimento.

Já no experimento do dia 30 de Junho de 2008, apesar do valor máximo de radiação solar ter sido maior que o máximo do dia 26 de Junho, o valor médio de radiação solar no período do experimento foi menor, como se pode ver na Tabela 5. Além disso, ocorreram precipitações pluviométricas durante o experimento. Essa variabilidade com certeza influenciou no desempenho do aquecedor solar, o que mostra a influência da radiação solar no aquecimento. Porém, é importante destacar que as precipitações pluviométricas não provocaram uma grande queda de temperatura da água no “boiler”, o que demonstra a

eficácia do mesmo em manter a temperatura alta da água. Os dados estão representados nas Figuras 15 e 16.

No experimento realizado em 03 de Julho de 2008, as medidas só foram iniciadas às 12:26, com a água do reservatório térmico já quente, com temperatura inicial de 59,4 °C. Apesar da eventual queda da radiação solar, no período da tarde, a temperatura do reservatório térmico permaneceu acima de 60 °C até o final do experimento, às 18:23, o que mostra que, uma vez que a água atinja temperaturas elevadas (devido à radiação solar), o reservatório térmico é eficaz em mantê-la alta mesmo quando a radiação solar diminui ou cessa (nesse experimento, a radiação solar é nula a partir das 18:00). Os dados estão representados nas Figuras 15 e 16.

Data	Valor máximo da temperatura da água do boiler (°C)	Valor médio da temperatura da água do boiler (°C)	Valor máximo da temperatura do ar (°C)	Valor médio da temperatura do ar (°C)	Valor máximo da radiação solar (W/m ²)	Valor médio da radiação solar (W/m ²)
26 de Maio	66,5	62,3	30	28,7	926	822,16
30 de Maio	53,9	50,3	28,9	26,9	1040	411,06
03 de Junho	65	64	28,8	27,4	888	365,6

Tabela 5. Valores máximos e médios da temperatura da água do boiler, da temperatura do ar e da radiação solar

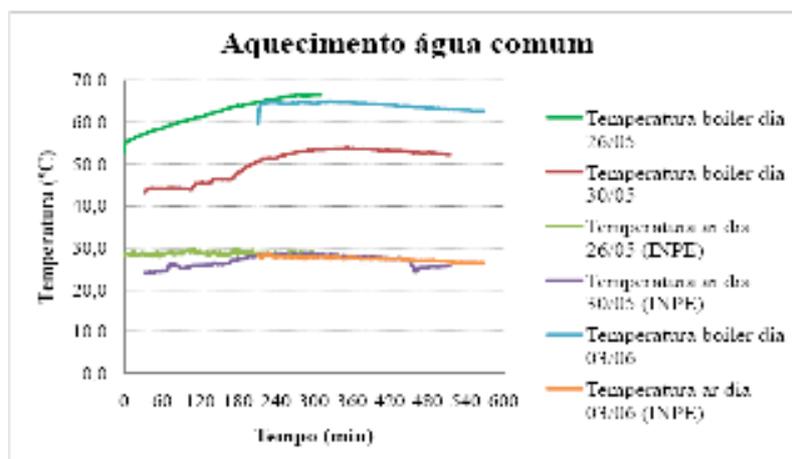


Figura 15. Temperatura da água no “boiler” e temperatura do ar (aquecimento água comum)

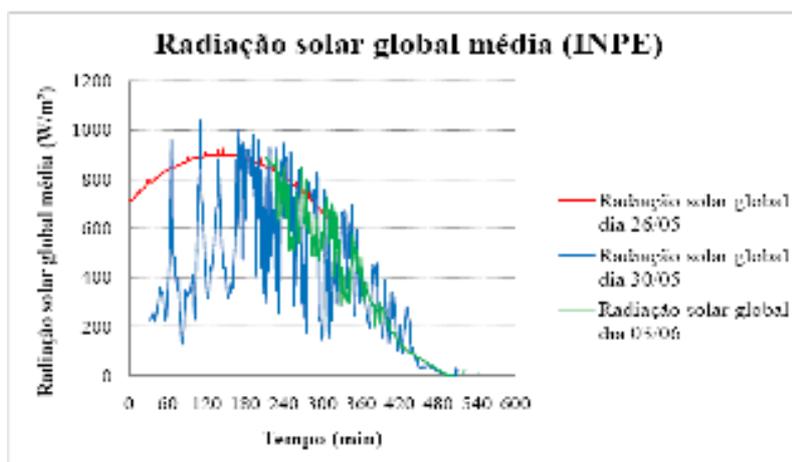


Figura 16. Radiação solar global média nos experimentos com água comum

Para comprovar a eficácia do “boiler”, realizou-se um experimento de dois dias seguidos. As medidas foram iniciadas às 09:42 do dia 10 de Julho de 2008, e finalizadas às 16:52 do dia 11 de Julho de 2008. O interesse era observar a queda de temperatura da água no “boiler” entre as 18:00 do dia 10, quando cessou a radiação solar, e as 06:00 do dia seguinte. Às 18:00 do dia 10, a água do “boiler” estava a 57,8 °C, e às 06:00 do dia seguinte, estava a 52,5 °C, ou seja, a queda de temperatura foi um pouco maior que 5 °C, o que é excelente, considerando um período de 12 horas em que praticamente não houve radiação solar. É interessante quantificar a queda de temperatura quando a água chegar a temperaturas próximas a 70 °C, porém em nenhum dos experimentos em dias seguidos essas temperaturas foram atingidas.

Por fim, realizou-se um experimento de dias seguidos utilizando uma solução aquosa salina, que ocorreu nos dias 18 e 19 de Junho de 2008, começando às 09:47 do dia 18 e terminando às 17:33 do dia seguinte. Nas Figuras 17 e 18, estão representados os dados de temperatura e radiação solar durante o experimento, que mostram que foram atingidas temperaturas bastante satisfatórias com a solução salina (temperatura máxima igual a 65,5 °C e temperatura média igual a 53,7 °C). A temperatura da água às 18:00 do dia 18 era 53,4 °C, e às 06:00 do dia seguinte era 48,7 °C, ou seja, uma queda de temperatura menor que 5 °C, o que também é bastante satisfatório. Isso mostra que o aquecimento solar para solução salina é tão eficiente quanto para a água comum.

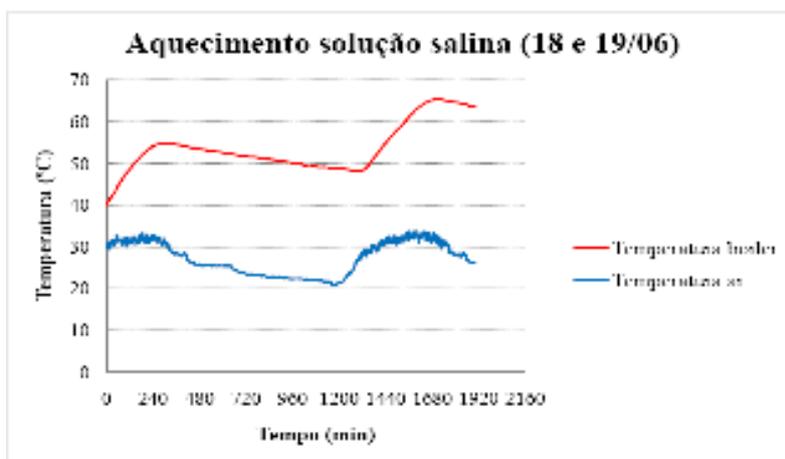


Figura 17. Temperatura da água no “boiler” e do ar (aquecimento de solução salina)

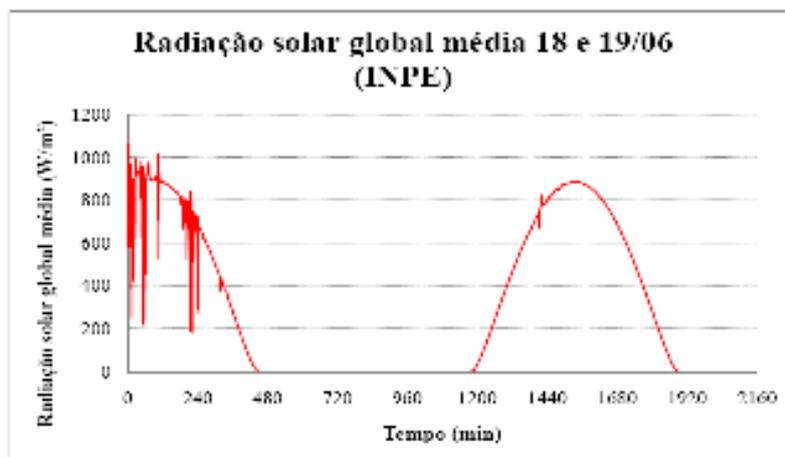


Figura 18. Radiação solar global média nos experimentos com solução salina

5 – CONCLUSÕES

Os experimentos com o aquecedor solar demonstraram que o mesmo é eficiente no aquecimento de água, seja esta água comum ou solução aquosa salina, com o fluido atingindo temperaturas próximas a 70 °C nos dias de maior radiação solar, e temperaturas próximas a 50 °C em dias com pouca radiação solar.

Dentro do contexto do projeto para dessalinização de água produzida da UFRN, o aquecedor tem o papel de pré-aquecer a água que entra no destilador, aumentando assim sua produtividade. A faixa de temperaturas atingidas pelo aquecimento é satisfatória nesse sentido, já que a faixa de temperaturas na destilação solar se encontra entre 40 a 70 °C. O pré-aquecimento viabiliza a operação semi-contínua do destilador, com controle do nível da água. Os resultados obtidos são bastante promissores, já que a maioria dos destiladores solares opera em batelada, e a adoção de um regime semi-contínuo sem pré-aquecimento não seria eficiente, pois o sistema seria continuamente abastecido com água fria, o que prejudicaria a evaporação. Com o pré-aquecimento, a alimentação do destilador estará sempre aquecida, o que aumenta a eficiência do destilador, e viabiliza um aumento de escala, para atender a maiores vazões de água de produção.

A aquisição de mais dados experimentais permitirá fazer análises de eficiência do aquecedor, e o mesmo será acoplado ao destilador, onde se poderá mensurar o ganho na produtividade do destilador com o pré-aquecimento da água de produção.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Duffie, John A., Beckham, William A., 1991. “Solar Engineering of Thermal Processes”. 2ª Edição, J. Wiley, New York.

Magna Angélica dos Santos Bezerra, “Desenvolvimento de um destilador solar para tratamento de águas de produção de petróleo com vistas a sua utilização na agricultura e geração de vapor”, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN, 2004.

J. R. Saglietti, J. F. Escobedo, L. A. Silva, “Coletor solar de polietileno – uma alternativa de baixo custo”, IB/UNESP, SP, 1997.

Carlos Henrique Fiche de Carvalho, “Projeto de um sistema de aquecimento solar de água para pousadas”, Universidade Federal de Lavras, MG.

Paper intitulado “Energia Solar”, de Maurício Motta (ano desconhecido)

Alexandre Prata Maluf, “Destiladores Solares no Brasil”, Universidade Federal de Lavras, MG, 2005.

Clarissa Soares, “Tratamento de água unifamiliar através da destilação solar natural utilizando água salgada, salobra e doce contaminada”, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

Antonio Victor Vaz de Pina, “Dessalinização solar no abastecimento de água para uma família no arquipélago de Cabo Verde”, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, 2004.

Carmen Esteban, Judith Franco, Amilcar Fasulo, “Distilador solar assistido con coletor solar acumulador”, Universidad Nacional de San Luis, 2000.

Joaquim Teixeira Lopes, “Dimensionamento e Análise Térmica de um Dessalinizador Solar Híbrido”, Universidade Estadual de Campinas, SP, 2004.

<http://www.kippzonen.com>

<http://www.campbellsci.com>

<http://www.soletrol.com.br>

<http://www.inpe.br>

ANEXO I
PUBLICAÇÃO



AQUECIMENTO SOLAR DA ÁGUA PRODUZIDA DE PETRÓLEO

Rogério Pitanga Santos, Osvaldo Chiavone-Filho², Juliana Bregenski Schuhli³,
Magna A. Santos Bezerra⁴, Josette Lourdes Sousa de Melo⁵, Jackson Araújo
de Oliveira⁶, Vívian Tavares de Andrade⁷, Rafael E. Moura Ramos⁸

Copyright 2008, Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2008*, realizada no período de 15 a 18 de setembro de 2008, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas na sinopse submetida pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho Técnico, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, seus Associados e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais da *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2008*.

Resumo

No presente trabalho foram levantados dados experimentais de aquecimento solar para água comum e solução salina. O aquecedor solar é constituído de um coletor plano e de um reservatório térmico isolado ("boiler"). O objetivo é quantificar a variação de temperatura dos fluidos ao longo dos experimentos, relacionando-a com as variáveis ambientais, especialmente a radiação solar. Assim, é possível prever como se dará o aquecimento solar da água de produção, meta de longo alcance. O aquecedor solar faz parte de um sistema de tratamento de água de produção, e sua função é pré-aquecer o fluido que entra em um destilador solar, aumentando assim a produtividade de água destilada. Foi utilizada uma solução aquosa salina de cloreto de sódio (NaCl), 1000 mg/L, simulando concentrações encontradas em água produzida. Os experimentos mostraram que o sistema de aquecimento é capaz de aquecer o fluido a temperaturas próximas a 70 °C, atingindo temperaturas maiores que 50 °C mesmo em dias com pouca radiação solar. Além disso, o sistema coleta energia especificamente para promover maior taxa de aquecimento e através do reservatório térmico mantém a temperatura, aspectos importantes para integração com a destilação solar.

Abstract

In this work, experimental data of solar heating for common water and saline solution were measured. The solar heater is formed by a flat-plane collector and a thermal reservoir ("boiler"). The objective is to quantify the variation of fluids' temperature, and correlate it to environment variables, especially solar irradiation. Thereby, it is possible to estimate the solar heating of produced water of petroleum. The solar heater is part of a system of treatment of produced water, and its function is to pre-heat the fluid that enters into the solar distiller, increasing the productivity of distilled water. A saline solution that represents produced water was used in the experiments, using sodium chloride (1000 ppm). The experimental data demonstrates that the solar heater is capable to heat the fluid to temperatures close to 70°C, reaching temperatures close to 50 °C even during cloudy days with low solar radiation. Furthermore, the solar collector energy system provides a higher rate of heating and trough of the thermal reservoir the temperature can remain longer. These are important aspects to the integration with solar distillation.

Graduação, aluno de Engenharia Química - UFRN

² PhD, professor de Engenharia Química – UFRN

³ Mestre, Engenheira Química – CENPES

⁴ Mestre, Doutoranda em Engenharia Química - UFRN

⁵ Doutora, professora de Engenharia Química – UFRN

⁶ Doutor, professor de Engenharia Química – UFRN

⁷ Mestre, Engenheira Química – CENPES

⁸ Graduação, aluno de Engenharia Química - UFRN



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO

CHEMTECH – A SIEMENS COMPANY

PROJETO PDAI LABORATÓRIOS

Rogério Pitanga Santos

**Profa. Ana Lúcia de
Medeiros Lula da
Mata**

NATAL

07 de Novembro de 2008

Agradecimentos

Ao meu Senhor e Salvador Jesus Cristo. Sem Ele nada sou.

À minha família, que é responsável pela pessoa que sou hoje, especialmente aos meus pais, pelo exemplo na vida pessoal e profissional.

Aos professores e colegas de curso que diretamente ou indiretamente me ajudaram a sobreviver ao curso.

À Chemtech, por ter me dado a oportunidade do estágio.

À equipe técnica do projeto PDAI Laboratórios: ao Leandro, por ser sempre um líder atencioso; à Érica, por ser uma ótima companheira de viagens; ao Tiago, pelas risadas; ao Fabiano, por sempre terminar suas opiniões com a pergunta “O que vocês acham?”, mostrando que um bom profissional é antes de tudo um bom ouvinte.

À Igreja do Nazareno Central de Natal e à Igreja da Barroca de Belo Horizonte, pois são minha família em Cristo.

A Wesley, Vittor, Graciele, Ívis, Chaveirinho, Renato, Miguel, Eloíza, Glênio, Mary, Deborah, Ariel, Rafaele e Amanda, de quem eu sinto muita falta, mas que estão sempre comigo em oração.

Sumário

Agradecimentos	2
Resumo	5
Identificação	6
Identificação	6
Responsabilidades pelas informações	8
Termos de Compromisso do Aluno	8
Termos de Compromisso dos Supervisores.....	9
1 – Introdução.....	11
2 - Histórico da Empresa.....	13
3 – Fundamentação teórica	16
3.1 – Processo de beneficiamento de minério.....	16
3.2 – Laboratório de mineração	20
4 - Atividades Realizadas.....	27
4 - Atividades Realizadas.....	27
4.1 – Atuação junto ao setor comercial.....	27
4.1.1 – Pesquisa sobre simulação de processos de mineração	27
4.1.2 – Pesquisa sobre Sistemas de Informação e Robotização em Laboratórios.....	31
4.2 - CENTECH – Curso de formação de Engenheiros Chemtech	32
4.3 - Projeto PDAI Laboratórios	33
4.3.1. Matriz de Maturidade	34

4.3.2. Levantamento de campo e elaboração dos relatórios de levantamento	43
4.3.3. Próximas etapas	45
5 – Conclusões.....	46
6 - Referências Bibliográficas	48

Resumo

O estágio supervisionado do curso de Engenharia Química foi realizado na Chemtech Serviços de Engenharia e Software Ltda., no escritório de Belo Horizonte. A duração do estágio foi de quatro meses, e a principal atividade desenvolvida foi o projeto PDAI (Plano Diretor de Automação e Informação) dos laboratórios da Vale. Outras atividades desenvolvidas foram: atuação junto ao setor comercial da Chemtech e participação no curso de formação da Chemtech, o CENTECH.

Identificação

Do Aluno:

Nome: Rogério Pitanga Santos

Data de Nascimento: 02/09/1986

Identidade: 1851316

Órgão Emissor: SSP/RN

CPF: 061.366.464-71

Endereço: Rua Professor José Gurgel, 2963

CEP: 59078-450

Bairro: Capim Macio

Município: Natal

UF: RN

Telefone: (84) 3207-9711 / (31) 8762-5611

Curso: Engenharia Química

Período: 2008.2

Da Empresa:

Razão Social: Chemtech Serviços de Engenharia e Software Ltda.

CNPJ: 30.127.872/0001-86

Ramo de Atividade: Serviços

Endereço: Avenida do Contorno, 5919. 4º Andar

CEP: 20011-030

Município: Belo Horizonte

UF: MG

Representante: Alexander Cramer Von Clausbruch

Cargo: Gerente de escritório

Supervisores de Estágio:

Giancarlo Smith da Silva

Cargo: Gerente de Projetos

Leandro Russo de Araújo

Cargo: Líder de Projetos

Do Supervisor de Estágio

Nome: Universidade Federal do Rio Grande do Norte

CNPJ: 24.365.710/0001-83

Endereço: Avenida Senador Salgado Filho

CEP: 59072970

Bairro: Campus Universitário

Município: Natal

UF: RN

Supervisor de Estágio: Ana Lúcia de Medeiros Lula da Mata

Telefone / Coordenador: (84) 3215-3769

E-mail: anadamata@eq.ufrn.br

Do Estágio

Duração do Estágio: 4 meses Setor de estágio: Projeto PDAI Laboratórios

Carga horária semanal: 40 horas

Período de estágio: 07/Julho/2008 a 07/Novembro/2008

Responsabilidades pelas informações

Termos de Compromisso do Aluno

Eu, Rogério Pitanga Santos, assumo um termo de compromisso e me responsabilizo pela veracidade de cada informação contida neste relatório. Os conhecimentos aqui relatados são resultado da dedicação e experiência adquirida no projeto "PDAI Laboratórios", da empresa Chemtech – A Siemens Company, escritório Belo Horizonte.

Devo salientar que as informações aqui contidas possuem total embasamento teórico e prático.

Rogério Pitanga Santos

Estagiário

Termos de Compromisso dos Supervisores

Eu, Giancarlo Smith da Silva, assumo um termo de compromisso e me responsabilizo pela veracidade de cada informação contida neste relatório. Todos os conhecimentos aqui expostos são frutos de dedicação e aprendizado no projeto PDAI Laboratórios. Devo salientar que as informações aqui contidas possuem total embasamento teórico e prático.

Giancarlo Smith da Silva

Gerente de Projetos – Chemtech BH

Carimbo do supervisor

Eu, Leandro Russo de Araújo, assumo um termo de compromisso e me responsabilizo pela veracidade de cada informação contida neste relatório. Todos os conhecimentos aqui expostos são frutos de dedicação e aprendizado no projeto PDAI Laboratórios. Devo salientar que as informações aqui contidas possuem total embasamento teórico e prático.

Leandro Russo de Araújo

Líder de Projetos

1 – Introdução

O estágio foi iniciado em um processo seletivo patrocinado pela Chemtech chamado de “Trilha do Sucesso”. Neste processo, não ocorre apenas a seleção para contratação, é também ministrado um curso de autoconhecimento profissional e pessoal e capacitação para processos seletivos. Após ser aprovado no processo seletivo, fui contratado pelo escritório de Belo Horizonte.

Os objetivos principais ao ingressar no estágio foram: consolidar os conhecimentos adquiridos no curso de graduação de Engenharia Química através da aplicação prática dos mesmos; conhecimento de novas áreas relacionadas à Engenharia Química; e aprendizado em diferentes áreas fora do âmbito da Engenharia Química que permitissem uma formação profissional mais completa.

Como objetivo secundário, pode ser citado: adquirir experiência no mercado de trabalho, através da vivência de situações do dia-a-dia do trabalho de engenharia.

No estágio, passei por diferentes experiências. Inicialmente, auxiliei o setor comercial da Chemtech, participando da elaboração de apresentações comerciais e pesquisando sobre as áreas em que a empresa atua e planeja atuar. Após esse período, tive oportunidade de participar do curso de formação da Chemtech, o CENTECH, onde o funcionário recebe treinamentos nas diversas áreas de atuação da empresa. Por fim, fui alocado no projeto “PDAI Laboratórios”, onde pude avaliar laboratórios da Vale quanto ao seu nível de automação e pesquisar soluções de automação e robótica para os mesmos, objetivando aumentar a confiabilidade das análises realizadas e a segurança e saúde da mão-de-obra.

Com atuação em diferentes áreas, além do curso de formação promovido pela Chemtech, pude expandir meus horizontes, me tornando um profissional mais completo, capaz de atuar em áreas não diretamente relacionadas à Engenharia Química.

2 - Histórico da Empresa

A Chemtech foi fundada com 100% de capital nacional em 1989 por três engenheiros químicos recém-formados no IME (Instituto Militar de Engenharia). O nome Chemtech vem de “Chemical Technology”, inicialmente uma empresa de consultoria no ramo da Engenharia Química. Em 2001 passou a fazer parte do grupo Siemens, porém mantendo sua autonomia. A Chemtech é uma empresa de consultoria e prestação de serviços em engenharia e TI (Tecnologia da Informação). Possui um vasto conhecimento em soluções tecnológicas e atua em grandes indústrias. Atualmente a Chemtech é líder brasileira no fornecimento de soluções de otimização para as indústrias de processos, e atua em diversos países, como Alemanha, Estados Unidos, Rússia, Japão, Cingapura, Tailândia, Arábia Saudita, França, África do Sul, Canadá e Espanha. Atualmente ganhou a concorrência de dois projetos de grande porte da Petrobras, a RNEST e o COMPERJ, dois dos maiores projetos de engenharia do país. A Figura 1 apresenta alguns clientes da Chemtech.



Figura 1 – Clientes Chemtech

Possui escritórios em Salvador, Vitória, São Paulo, Porto Alegre, Rio de Janeiro e Belo Horizonte. A empresa passou recentemente por um aumento no

seu quadro de funcionários, atingindo a marca dos 1000. O escritório de Belo Horizonte é o que mais cresce atualmente e atualmente compõe um quadro de mais de 100 funcionários. Está mais voltado para clientes do ramo da mineração como Vale, Samarco, CSN, Votorantim Metais, entre outros. Para tais clientes, são vendidos projetos de Sintonia de malhas de controle, PIMS (Plant Information Management System), MES (Manufacturing Execution System), Automação de processos, Gerenciamento de Alarmes, PDAI (Plano Diretor de Automação e Informação), Revitalização, eficiência energética, entre outros. A empresa está sempre buscando novas tecnologias e novos desafios, procurando manter-se atualizada e em sintonia com o mercado. A Figura 2 mostra as principais áreas de atuação da Chemtech.

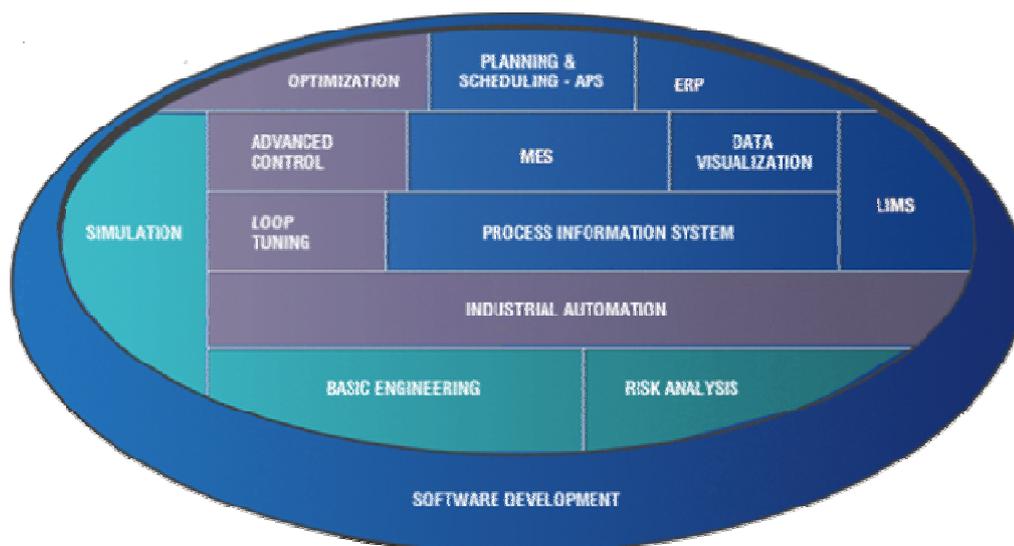


Figura 2 – Áreas de atuação da Chemtech

Recentemente a Chemtech se destacou na mídia por receber o título de “Melhor empresa para se trabalhar na América Latina” e conquistar o bicampeonato de “Melhor empresa para se trabalhar no Brasil” de acordo com o GTPW (Great Place to Work). Fora esses prêmios, vários outros já foram

conquistados. A Figura 3 mostra alguns prêmios e certificados conquistados pela empresa.

(Figura 3)

Figura 3 – Prêmios e certificados conquistados pela Chemtech

3 – Fundamentação teórica

No desenvolvimento das atividades do estágio, foi necessário o conhecimento sobre o processo de beneficiamento de minério e sobre o laboratório de mineração. Os conhecimentos obtidos nesses dois assuntos são descritos nos tópicos a seguir.

3.1 – Processo de beneficiamento de minério

O beneficiamento do minério consiste em uma série de operações com o objetivo de separar as espécies valiosas das espécies não-valiosas do minério. Mineral-minério é o mineral que contém o metal ou substância útil do minério, por exemplo, a hematita (Fe_2O_3). A ganga são os minerais não aproveitáveis do minério, por exemplo, o quartzo (SiO_2).

O processo de beneficiamento é dividido nas seguintes etapas: cominuição; classificação; concentração; desaguamento; e operações auxiliares.

A cominuição consiste na redução do tamanho das partículas do minério (granulometria), visando principalmente: produção de partículas com tamanho e formato pré-requeridos; liberação dos minerais úteis passíveis de concentração; e incrementação da superfície específica, habilitando para processos químicos subseqüentes. Os processos de cominuição são normalmente divididos em duas classes: britagem (cominuição inicial) e moagem (cominuição final).

O termo britagem se aplica quando a redução de tamanho visa à obtenção de produtos com granulometria superior a 10 milímetros. A britagem se desenvolve em estágios subseqüentes denominados britagem primária, secundária, terciária e quaternária. Os mecanismos envolvidos compreendem

basicamente impacto, compressão e cisalhamento. Os equipamentos comumente utilizados são britadores giratórios, de mandíbulas, cônicos, de rolos e de impacto.

O termo moagem é utilizado para redução de granulometria abaixo de 10 milímetros, e essa operação também se desenvolve em estágios subseqüentes. Os mecanismos envolvidos são os mesmos da britagem, e os equipamentos comumente utilizados são moinhos tubulares rotativos (bolas e barras), vibratórios, de rolos e de impacto.

A classificação, de uma forma geral, consiste na separação de partículas com base nas dimensões físicas da mesma. Os processos de classificação são divididos em peneiramento e classificação propriamente dita.

O peneiramento é um processo mecânico de separação de partículas que se utiliza de uma superfície perfurada para tal. As partículas com dimensões superiores à da abertura da tela tendem a ficar retidas na superfície, e as com dimensões inferiores tendem a atravessar a mesma. Os mecanismos envolvidos compreendem estratificação e segregação, e os equipamentos comumente utilizados são as peneiras vibratórias, rotativas e estáticas.

A classificação propriamente dita é o processo de separação que se baseia na velocidade de sedimentação das partículas imersas em um meio fluido, sendo os fluidos mais utilizados a água e o ar. A utilização desses fluidos resulta, respectivamente, nos processos de hidroclassificação e aereoseparação. Na hidroclassificação, os equipamentos mais utilizados são os cones estáticos, os hidrociclones e os classificadores espirais. Já na aereoseparação, são utilizados ciclones e aereoseparadores dinâmicos.

A etapa de concentração tem por objetivo a recuperação dos minerais-minério contidos no minério na forma mais concentrada possível. A seleção do método de concentração depende da natureza do minério e das diferentes propriedades dos minerais a serem separados. Dentre essas propriedades, se

destacam o tamanho relativo das partículas, cor, densidade, susceptibilidade magnética, condutividade elétrica, molhabilidade superficial e solubilidade. Dentre os métodos utilizados, se destacam a separação gravimétrica, a separação por meio denso, a separação magnética e a flotação.

A separação gravimétrica se baseia na diferença de densidade existente entre os minerais presentes, utilizando-se de um meio fluido (água ou ar) para efetuar a separação. Os equipamentos normalmente utilizados são os jiques, mesas vibratórias, espirais, cones e "sluices".

A separação por meio denso se baseia também na diferença de densidade entre os minerais presentes. A diferença é que neste método é utilizado em fluido com densidade intermediária à dos minerais considerados. Esse meio é obtido pela dissolução de sais em água ou pela dispersão em água de partículas finas de material com elevada densidade, como ferro silício. Os equipamentos mais usados são tambores, cones e centrifugadores.

Na separação magnética, a propriedade determinante é a suscetibilidade magnética. Os minerais podem ser divididos em três grupos de acordo com seu comportamento quando submetidos a um campo magnético: ferromagnéticos (forte atração); paramagnéticos (média e fraca atração); diamagnéticos (nenhuma atração). Os processos podem ser desenvolvidos via úmida ou via seca, e os equipamentos mais utilizados são correias, rolos, carrosséis e filtros.

A flotação atualmente é o processo dominante no tratamento de quase todos os tipos de minério, devido à sua grande versatilidade e seletividade. O processo se baseia na modificação seletiva da "molhabilidade" das superfícies de minerais de modo a permitir que uma fração das partículas minerais possa aderir a bolhas de ar presentes no sistema e assim serem carregadas preferencialmente para a superfície. Quanto à "molhabilidade", os minerais podem ser hidrofílicos (afinidade com a água) ou hidrofóbicos (repulsão à água). A utilização de reagentes específicos como coletores, depressores e

modificadores provoca a modificação da “molhabilidade” natural de alguns minerais, permitindo a adsorção dos mesmos em bolhas de ar. Os equipamentos normalmente utilizados são células de flotação e colunas de flotação.

No desaguamento o objetivo é a retirada de água do minério, que deve ser realizada a partir de certo ponto para permitir obtenção de produtos com baixa umidade. Os principais métodos utilizados para o desaguamento são a sedimentação, filtração, centrifugação e secagem.

A sedimentação se baseia exclusivamente na força da gravidade. Pode ser dividida em duas classes: espessamento e clarificação. O espessamento visa uma concentração efetiva de sólidos, enquanto a clarificação visa à remoção de partículas sólidas presentes em uma solução diluída. A utilização de reagentes específicos, denominados floculantes, favorece a operação de sedimentação. Os equipamentos usados são cones, espessadores e classificadores.

A filtração consiste na passagem forçada de uma suspensão aquosa através de um elemento filtrante que retém as partículas sólidas na sua superfície. Os equipamentos mais utilizados são os filtros a vácuo (tambor, disco, etc.) e os filtros-prensa.

A centrifugação consiste na utilização de um dispositivo rotativo que induz uma sedimentação forçada sob a ação de uma aceleração elevada. As centrífugas são normalmente utilizadas quando a sedimentação gravitacional é insuficiente para promover a separação de partículas muito finas, ou quando se requer baixos níveis de umidade no produto final. As centrífugas se classificam em dois tipos básicos: centrífugas espirais decantadoras e centrífugas de cesto vibratório.

A secagem consiste na retirada de água através da evaporação da mesma por ação do calor. É utilizado quando se requer nível de umidade

bastante baixo, e é um processo relativamente caro. Os equipamentos mais utilizados são os secadores rotativos, de bandejas e de leito fluidizado.

3.2 – Laboratório de mineração

O conhecimento do laboratório de mineração foi necessário no desenvolvimento do projeto PDAI (Plano Diretor de Automação e Informação) de laboratórios da Vale. O termo “laboratório de mineração” será utilizado no texto para se referir aos laboratórios localizados em minas, cujas características são diferentes de laboratórios comerciais.

Um laboratório de mineração é normalmente dividido em dois laboratórios: o laboratório físico e o laboratório químico. O laboratório físico é responsável pela recepção das amostras, preparação de amostras para envio ao laboratório químico e realização das análises físicas (análise de umidade e análise granulométrica). O laboratório químico é responsável pela realização das análises químicas para determinação da composição química do minério.

As amostras que chegam ao laboratório físico provêm de várias fontes. Predominantemente, são amostras de produção, de carregamento, de embarque, de geologia e de testes.

As amostras de processo são aquelas retiradas diretamente do processo de beneficiamento de minério. A análise dessas amostras é útil para monitoramento do processo de beneficiamento, e esse é o tipo de amostra que chega em maior quantidade ao laboratório, geralmente com frequência horária. As amostras de carregamento e de embarque são, respectivamente, as amostras que são carregadas nos trens e embarcadas nos navios para envio para os clientes. A análise dessas amostras é utilizada na emissão de certificados de qualidade. As amostras de geologia são aquelas analisadas para estudo geológico de certa região. Já as amostras de testes, também chamadas de amostras de pesquisa, são amostras enviadas ao laboratório por

órgãos de controle de qualidade, cujo objetivo é avaliar a qualidade dos procedimentos realizados no laboratório. As amostras de produção, carregamento e embarque são consideradas amostras de rotina, pois as suas características são conhecidas. As amostras de geologia e de testes são consideradas amostras extra-rotina, pois suas características não são conhecidas, e por essa razão a análise das mesmas é mais difícil.

Toda amostra que chega ao laboratório físico (amostra primária) passa por uma operação chamada "Preparação Primária", que consiste na homogeneização e quarteramento da amostra. A homogeneização consiste em agitar e misturar a amostra de modo a garantir a homogeneidade da mesma. O quarteramento é o processo de divisão da amostra em partes menores, gerando alíquotas que são encaminhadas às diferentes análises realizadas no laboratório. Como o próprio nome já sugere, no quarteramento a amostra é dividida em quatro partes iguais, porém também podem ser realizadas divisões com diferente número de frações, que por costume também são chamadas de quarteramento. Geralmente, a amostra primária é dividida em quatro alíquotas: uma para análise de umidade, uma para análise granulométrica, uma para envio ao laboratório químico e uma para reserva, que será utilizada caso ocorra a necessidade de uma segunda análise da mesma amostra. Algumas vezes é obtida uma quinta fração, que é a fração de descarte. As alíquotas devem ser representativas da amostra primária, razão pela qual o quarteramento é uma operação crítica. É importante citar ainda que, além do quarteramento, as alíquotas podem sofrer divisões subseqüentes para redução da massa, e nesse caso vale também o cuidado em garantir que as alíquotas menores sejam representativas da alíquota original.

Geralmente a homogeneização e o quarteramento são realizados simultaneamente. Nos laboratórios da Vale, são utilizadas três formas para realização dessas operações: operação manual no chão, sobre uma lona,

utilizando pá; operação manual em bancada, utilizando cone invertido; e operação utilizando divisores rotativos, ou RSD's (*Rotative Sample Dividers*). O divisor rotativo é um equipamento relativamente simples, que consiste em uma correia transportadora e um carrossel com várias canecas. Quando o equipamento é ligado, a amostra é colocada na correia que conduz a amostra ao carrossel, que se encontra em um nível mais baixo. O carrossel está continuamente girando, de modo que a amostra é distribuída nas várias canecas, permitindo a obtenção de várias frações representativas da amostra original. A Figura 4 mostra o divisor rotativo.

Figura 4 – Divisor rotativo

Uma vez realizado o quarteamento, cada alíquota tem um destino diferente. A alíquota que será submetida à análise de umidade é levada à balança para pesagem da massa úmida. Após essa operação, é levada à estufa (ou chapas térmicas) para secagem, por um período pré-determinado. Após a secagem, a alíquota é novamente levada à balança para pesagem da massa seca, e a diferença entre as massas é utilizada no cálculo do teor de umidade.

A alíquota que será submetida à análise granulométrica é levada às chapas térmicas (ou estufa) para secagem. Após secagem, é conduzida ao vibrador de peneiras. Nos laboratórios da Vale é prática corrente dividir a operação de peneiramento em duas séries, série macro e série micro. Na primeira série, são utilizadas peneiras de *mesh* menor (aberturas de telas maiores), e na série micro, peneiras de *mesh* maior (aberturas de telas menores). Assim, a alíquota é primeiramente levada à série macro, e a fração mais fina obtida nessa operação é conduzida às peneiras da série micro. Após o peneiramento, cada peneira é levada à balança para pesagem das frações

retidas, e os resultados de distribuição granulométrica são obtidos a partir das massas das frações. A Figura 5 mostra um vibrador de peneiras suspenso para peneiras série micro.

Figura 5 – Peneirador suspenso

A alíquota destinada para envio ao laboratório químico deve primeiramente ser preparada. Essa preparação consiste nas operações de cominuição, divisão, pulverização e, em alguns casos, prensagem. A cominuição consiste em diminuir a granulometria das partículas da alíquota até o tamanho indicado para a pulverização, que geralmente é de 1 milímetro (1 mm). Essa operação é realizada em britadores e moinhos. Os britadores utilizados são britadores de mandíbulas, e os moinhos podem ser moinhos de rolos ou moinhos cônicos. A alíquota passa por uma série desses equipamentos que vão reduzindo aos poucos sua granulometria, até atingir o tamanho desejado. O número e tipo de equipamentos pelo qual a alíquota passará depende da granulometria e da massa inicial da mesma. A Figura 6 mostra moinhos utilizados na cominuição.

Figura 6 – Moinhos utilizados na cominuição de amostras

Após cominuição, a alíquota é dividida de modo a diminuir sua massa para pulverização. Geralmente a massa utilizada é 60 gramas. Essa divisão deve ser feita de modo a garantir que a alíquota reduzida seja representativa da alíquota original, para isso a amostra precisa ser homogeneizada. O equipamento mais utilizado para essa operação é o divisor tipo Riffles, mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Divisor tipo Riffles

Após a divisão, a alíquota é levada à pulverização, onde sua granulometria vai ser ainda mais reduzida. Geralmente, a granulometria atingida ao final da pulverização é de 45 micrômetros, necessária para as análises químicas. A principal análise química é a espectrometria Raios-X. Através dessa técnica podem ser analisadas pastilhas prensadas e pastilhas fundidas, sendo a primeira mais fácil de preparar, enquanto a segunda fornece resultados mais precisos. Depois da pulverização, a amostra pode ser levada à prensa para confecção de pastilha prensada para análise de espectrometria de Raios-X. Se a alíquota for submetida a outras análises químicas, esta não é prensada, e a alíquota pulverizada é colocada em envelopes e enviada ao laboratório químico para análise. A Figura 8 mostra pulverizadores e prensa.

Figura 8 – Pulverizadores e prensa

A alíquota de reserva é guardada em envelopes ou sacos plásticos em uma sala destinada especialmente para este fim. O tempo de armazenamento da alíquota depende do tipo da amostra primária, sendo que passado esse tempo a alíquota é descartada. Caso essa alíquota seja utilizada para segunda análise, geralmente esta é descartada assim que a análise é finalizada.

As amostras que chegam ao laboratório químico podem ser submetidas a várias análises, sendo as mais comuns: espectrometria de Raios-X, espectrometria de plasma, titrimetria e análise termogravimétrica (PPC – Perda Por Calcinação). Dessas, a espectrometria de Raios-X é atualmente a mais realizada, por ser rápida e precisa. A espectrometria de plasma, por outro lado, é cada vez menos utilizada, sendo em muitos laboratórios utilizada apenas para amostras extra-rotina e para calibração da curva do espectrômetro de Raios-X.

A análise de titrimetria é utilizada para determinação de Ferro Total e Óxido de Ferro (FeO), e ainda é bastante comum, apesar de bastante trabalhosa. A análise de PPC também é muito utilizada para determinar quantidade de compostos orgânicos na alíquota.

Como já citado, para análise de espectrometria de Raios-X podem ser utilizadas pastilhas prensadas ou fundidas. As pastilhas prensadas são preparadas no laboratório químico, e são relativamente simples de se preparar. As pastilhas fundidas são preparadas no laboratório químico através do procedimento de fusão. A preparação dessas pastilhas é mais complexa, porém os resultados da análise são mais precisos, pois o efeito de matriz, que ocorre em pastilhas prensadas, é eliminado. A Figura 9 mostra as pastilhas prensadas e pastilhas fundidas.

Figura 9 – Pastilhas prensadas e fundidas

O procedimento de fusão consiste em pesar uma quantidade definida de amostra e de fundente. O fundente é um sólido que facilitará a fusão da amostra. Fundentes comumente utilizados são o tetraborato de Lítio e o tetraborato de Sódio. Essa mistura é colocada em cadinho de platina e levada ao forno ou máquina de fusão, onde permanece a uma temperatura de 1000 °C por cerca de 10 minutos. Após fusão, o conteúdo do cadinho é virado em moldes para resfriamento, originando a pastilha fundida, que é então levada para análise no espectrômetro de Raios-X. A fusão é também realizada para análise de espectrometria de plasma e titrimetria, mas nesse caso não é gerada a pastilha fundida. Após a fusão, normalmente realizada em fornos mufla, o conteúdo do cadinho (amostra fundida) é solubilizado em ácido para preparação da solução. Essas análises são chamadas análises em via úmida, pois são feitas em soluções, o que implica em maior complexidade, pois é

necessário o preparo dessas soluções. A Figura 10 mostra uma máquina de fusão.

Figura 10 – Máquina de fusão utilizada na preparação de pastilhas fundidas

A análise de PPC (Perda Por Calcinação) é realizada da seguinte maneira: a amostra é pesada, colocada em cadinho de porcelana e levada ao forno mufla, onde permanece durante uma hora à temperatura de 1000 °C. Passado esse tempo, a amostra é retirada do forno e novamente pesada. A diferença entre as massas permite o cálculo do valor de PPC, que está relacionado à quantidade de matéria orgânica presente na amostra.

4 - Atividades Realizadas

O período de estágio pode ser dividido em três etapas: o período de atuação junto ao setor comercial; o curso de formação da Chemtech, o CENTECH; e o projeto PDAI Laboratórios. Cada um desses períodos é descrito em detalhes a seguir.

4.1 – Atuação junto ao setor comercial

Os estagiários e engenheiros contratados pela Chemtech normalmente passam por treinamentos antes de começar a exercer suas atividades na empresa, no curso de formação da Chemtech, o CENTECH. Como a minha chegada à empresa ocorreu uma semana antes do início do curso, fui inicialmente alocado para atuar junto ao setor comercial com os engenheiros Rafael Teixeira e Daniel Dominguete. Duas atividades foram desenvolvidas nessa etapa: pesquisa sobre simulação de processos de mineração e pesquisa sobre sistemas de informação e robotização em laboratórios.

4.1.1 – Pesquisa sobre simulação de processos de mineração

A primeira tarefa era ajudar o engenheiro Rafael Teixeira a elaborar uma apresentação técnica sobre simulação computacional de processos de mineração. Foi uma tarefa difícil, devido tanto ao curto prazo para execução quanto à complexidade da tarefa. Para poder efetuar a pesquisa, primeiramente foi necessário conhecer o processo de mineração, de modo que pudesse identificar simuladores que atendessem às necessidades específicas dessa indústria. Como na indústria de mineração há equipamentos relativamente diferentes daqueles normalmente encontrados na indústria química, os simuladores de mercado mais conhecidos e estudados na

graduação não atendem tão bem às necessidades desse processo. Por essa razão, a pesquisa foi direcionada a soluções específicas, concebidas exclusivamente para a área de mineração. Além disso, deveria ainda fazer um levantamento dos benefícios técnicos e econômicos advindos da simulação de processos, tarefa também bastante desafiadora.

Após ler vários artigos que explicam o processo de mineração, tive um entendimento melhor sobre o processo e as operações unitárias, e com isso pude me concentrar na pesquisa de simuladores. As soluções encontradas referem-se tanto à simulação de operações unitárias isoladas quanto à simulação do processo como um todo.

As soluções encontradas para simulação de operações unitárias são, em sua maioria, baseadas no conceito de CFD (Computacional Fluid Dynamics). As principais operações que podem ser simuladas são: cominuição, classificação, concentração e desaguamento.

Na simulação da operação de classificação realizada no ciclone, o artigo *Numerical Study of Gas-Solid Flow In a Ciclone Separator* mostra que é possível a representação da malha numérica e visualização da trajetória de partículas de um ciclone, que permite estudar os efeitos das variáveis relacionadas a condições operacionais, geometria do ciclone e propriedades das partículas. A Figura 11 mostra algumas simulações realizadas.

Figura 11 – Simulação da operação de classificação realizada em ciclones

Na cominuição há vários estudos de simulação da operação dos moinhos utilizados para este fim. A simulação dessa operação permite estudar os efeitos das propriedades das partículas e do equipamento. A Figura 12 mostra algumas simulações realizadas.

Figura 12 – Simulação da operação de cominuição do minério realizada em moinhos

Na concentração, foram feitas simulações de células de flotação, que podem ser utilizadas para investigação do design e operação das células. A Figura 13 mostra exemplos de simulações.

Figura 13 – Simulação da operação de concentração realizada em células de flotação

Finalmente, alguns estudos de simulação também foram conduzidos para a operação de desaguamento, realizada em espessadores. Uma das simulações foi realizada com modelo que descreve floculação, o que dá a oportunidade de otimizar o design de espessadores para assegurar floculação adequada. A Figura 14 mostra exemplos dessa simulação.

Figura 14 – Simulação da operação de desaguamento realizada em espessadores

Também foi abordada na apresentação a simulação do processo como um todo. Foi dado destaque a um software de simulação desenvolvido no Canadá e a um software comercial, o Arena. O Arena é capaz de gerar animações em 3D que permitem melhor visualização do problema, além de várias outras funcionalidades. A Figura 15 mostra algumas imagens dos softwares citados.

Figura 15 – Softwares de simulação de processos de mineração

Por fim, a apresentação também deveria abordar os benefícios advindos da simulação de processos. Nesse sentido, o artigo de Hollocks (1992) intitulado "A well-kept secret? Simulation in manufacturing industry reviewed" mostra uma pesquisa realizada com 65 empresas do Reino Unido, onde foi questionado quais seriam os principais benefícios obtidos pelo uso da simulação computacional. O resultado da pesquisa é mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Benefícios advindos do uso da simulação de processos

Benefício	Porcentagem de empresas que citaram o benefício
Redução de risco	80%
Melhor entendimento do processo	75%
Redução dos custos operacionais	72%
Redução do tempo em processo	72%
Mudanças mais rápidas da planta	52%
Redução dos custos de capital	48%

Além disso, foram citados também exemplos de vantagens de ordem econômica, dos quais se destaca o caso em que a simulação computacional foi utilizada em uma das maiores operações de mineração do mundo, localizada em Northern Ontario, no Canadá. Nesse caso, estima-se que o gerente economizou \$10 milhões baseados nos resultados do simulador.

Com todos esses dados levantados, a apresentação foi repassada para o Engenheiro Rafael, que fez algumas correções e adições para elaboração da

versão final, que seria utilizada na apresentação de propostas comerciais.

4.1.2 – Pesquisa sobre Sistemas de Informação e Robotização em Laboratórios

Terminada a primeira tarefa, o Engenheiro Rafael me incumbiu de mais uma pesquisa e mais uma apresentação a ser feita, dessa vez sobre Sistemas de Informação e robotização em laboratórios. Logo de início, fui apresentado ao LIMS (Laboratory Information Management System), e tomei conhecimento que é uma das áreas em que a Chemtech atua, e que a apresentação serviria para mostrar a potenciais clientes as vantagens de se implantar esse sistema.

O LIMS, como o próprio nome já indica, é um Sistema de Gerenciamento de Informações para Laboratórios. Na pesquisa realizada, pude conhecer as várias funcionalidades do LIMS, e os benefícios advindos da utilização deste, cujos principais são: automação de procedimentos e da captura dos dados; melhoria na identificação das amostras analisadas; gerenciamento centralizado de todo o fluxo do laboratório; controle e interligação com equipamentos; redução do tempo gasto nas análises; ferramentas para análise de resultados; geração de relatórios internos; informação em tempo real para toda a empresa; e aumento da confiabilidade das informações fornecidas aos clientes.

A apresentação também abordava as razões para automação de laboratórios. Dentre as razões levantadas, destaca-se o fato de que o trabalho administrativo no laboratório no registro de informações de rastreabilidade e elaboração de relatórios tomam até 60% do tempo total dos analistas.

Na pesquisa também foram levantadas algumas soluções de mercado referentes ao LIMS, das quais se destacam o LABWARE LIMS e LABSOFT myLIMS, que são utilizados por grandes empresas como Petrobras, V&M (Vallourec & Mannesmann Tubes), laboratórios Labor 3, entre outros. Além disso, foi mostrada a experiência da Chemtech no desenvolvimento de softwares LIMS, como o

sistema LIMS MBR, desenvolvido para a mineradora MBR (Minerações Brasileiras Reunidas S.A.) e o Sistema LIMS desenvolvido para a CSN (Companhia Siderúrgica Nacional).

A segunda parte da apresentação deveria tratar de robotização em laboratórios, um assunto bem mais complexo e pouco difundido no Brasil. Nesse sentido, foi necessário pesquisar em sites internacionais, achando algumas aplicações principalmente no chamado "Liquid Handling", ou manuseio de líquidos. A robotização é utilizada principalmente onde é escassa a mão-de-obra, onde há problemas de insalubridade ou em tarefas repetitivas e perigosas, condições que em geral acontecem nos laboratórios da Vale. Apesar de estar consciente disso, não sabia que essa pesquisa seria a base do projeto em que seria alocado mais tarde, já que a Vale identificou a necessidade de automação e robotização de seus laboratórios para aumentar a confiabilidade das análises e a segurança e saúde de seus funcionários. A Figura 16 mostra algumas aplicações de robótica em laboratórios.

Figura 16 – Aplicações de robótica em laboratórios

4.2 - CENTECH – Curso de formação de Engenheiros Chemtech

Após a atuação junto ao setor comercial, no dia 15 de Agosto iniciava-se a 2ª edição do CENTECH, uma série de treinamentos sobre os mais diversos assuntos, como: Introdução à automação, OPC (Ole for Process Control), CLP (Controladores Lógicos Programáveis), Instrumentação, Redes, Qualidade, etc. Os palestrantes eram profissionais da própria empresa e profissionais externos, alguns deles professores de Universidades de Minas Gerais. Esse curso foi de grande importância para os novos funcionários, pois situava os alunos nas áreas de atuação da Chemtech. Isso é essencial porque os funcionários contratados têm diferentes formações, e na Chemtech muitas vezes atuarão em áreas que

não estão diretamente relacionadas às suas respectivas formações. Por isso, essa introdução a assuntos tão diversos é imprescindível para que o funcionário já tenha uma idéia de cada área de atuação da Chemtech. Dessa forma, o funcionário novato já ingressa na empresa com bastante conhecimento agregado e com uma ótima visão das áreas de negócio que a empresa atua.

Como se isso não bastasse, a Chemtech investe parte de seu lucro em treinamentos, permitindo que os funcionários estejam constantemente aprendendo novas tecnologias e aperfeiçoando sua capacidade profissional.

4.3 - Projeto PDAI Laboratórios

Após o CENTECH, os funcionários são alocados em diversos projetos pelo setor de planejamento. No meu caso, fui alocado no projeto "PDAI Laboratórios".

O objetivo do projeto é desenvolver o Plano Diretor de Automação e Informação (PDAI) dos laboratórios da Vale, contemplando a automação de processos manuais, a instrumentação e o fluxo de informações. O projeto visa o estudo de verificação de aplicabilidade de tecnologias habilitadoras para suportar os cenários previstos conforme estratégia da gerência de laboratórios da Vale.

Os objetivos do projeto são: reduzir a dependência de mão-de-obra para realização de tarefas rotineiras; aumentar a eficiência das atividades realizadas no laboratório (aumento de produtividade); aumentar a confiabilidade das análises realizadas no laboratório; e aumentar a saúde e segurança dos funcionários do laboratório.

Após a elaboração do Plano de Projeto e do Cronograma Detalhado, foi realizada a reunião de "kick-off" do Projeto, que contou com a presença da equipe técnica Chemtech, dos gerentes de projeto (da Chemtech e da Vale) e de supervisores de laboratórios da Vale. A equipe técnica Chemtech contava

com cinco pessoas, sendo um líder de projetos (Engenheiro de Controle e Automação), três engenheiros de controle e automação e um engenheiro químico. Nessa reunião foi realizada a apresentação do workshop, explicando o projeto para os funcionários da Vale. Foram discutidas idéias para o projeto e acertadas as condições e premissas para desenvolvimento do mesmo.

As etapas do projeto, definidas no cronograma, são: elaboração da Matriz de Maturidade; visitas de campo para levantamento de dados e elaboração dos relatórios de levantamento para cada laboratório; elaboração do relatório de levantamento de soluções; elaboração do Sumário Executivo; elaboração de fichas de negócio e fichas de projeto para as ações definidas; e apresentação final. As etapas desenvolvidas até o presente momento foram as duas primeiras, que serão mais detalhadas a seguir.

4.3.1. Matriz de Maturidade

Após a reunião de “kick-off”, a Matriz de Maturidade é o primeiro documento a ser elaborado no projeto. Este é um documento de referência, pois será utilizado como base para os relatórios de levantamento de cada laboratório e para o relatório de levantamento de soluções. Por essa razão, a elaboração da Matriz é um dos pontos críticos do projeto, já que interfere diretamente na elaboração de todos os documentos subseqüentes.

A Matriz de Maturidade contém premissas para classificação das áreas de estudo em um dos quatro níveis de automação, onde o Nível 1 é o nível mais baixo e o Nível 4 é o nível mais alto de automação. Para isso, definem-se requisitos para classificação em cada nível de automação. Os objetos de estudo são classificados como Dimensão ou Subdimensão. Para o estudo de processos, por exemplo, podem-se considerar como dimensões cada etapa do processo, e como subdimensões as operações unitárias ou equipamentos relacionados a cada etapa. Para o estudo de laboratório, que é um objeto de

estudo mais limitado, considerou-se como dimensão o próprio laboratório e como subdimensões as tarefas realizadas no mesmo. Não há uma regra estabelecida para a classificação em dimensões e subdimensões, mas geralmente é considerada como subdimensão a menor subdivisão possível para certo objeto de estudo, nesse caso o laboratório. Uma vez que sejam definidas as subdimensões, devem-se definir as tecnologias que podem ser aplicadas a cada uma, o que permite diferenciar os níveis de automação.

Para definição das subdimensões e das tecnologias são necessários, respectivamente, um estudo teórico do laboratório de mineração para conhecimento da rotina e das práticas de tal laboratório e um estudo das tecnologias desenvolvidas e até mesmo de tecnologias ainda não existentes que possam ser aplicadas a cada subdimensão, o que inclui pesquisa de fornecedores de soluções.

Inicialmente foi realizado um estudo da rotina de um laboratório de mineração, que se deu principalmente através da consulta a supervisores de laboratórios da Vale. Os objetivos desse estudo eram definir as subdimensões da Matriz de Maturidade e elaborar um fluxograma geral para laboratórios de mineração, que serviria de base para a elaboração dos fluxogramas dos laboratórios visitados. O resultado desse estudo é descrito no tópico 3.2 desse relatório.

Concluído esse estudo, foi elaborado o fluxograma geral dos laboratórios da Vale, que seria utilizado como base para elaboração dos fluxogramas de cada laboratório contemplado no laboratório. O Fluxograma é mostrado na Figura 17.

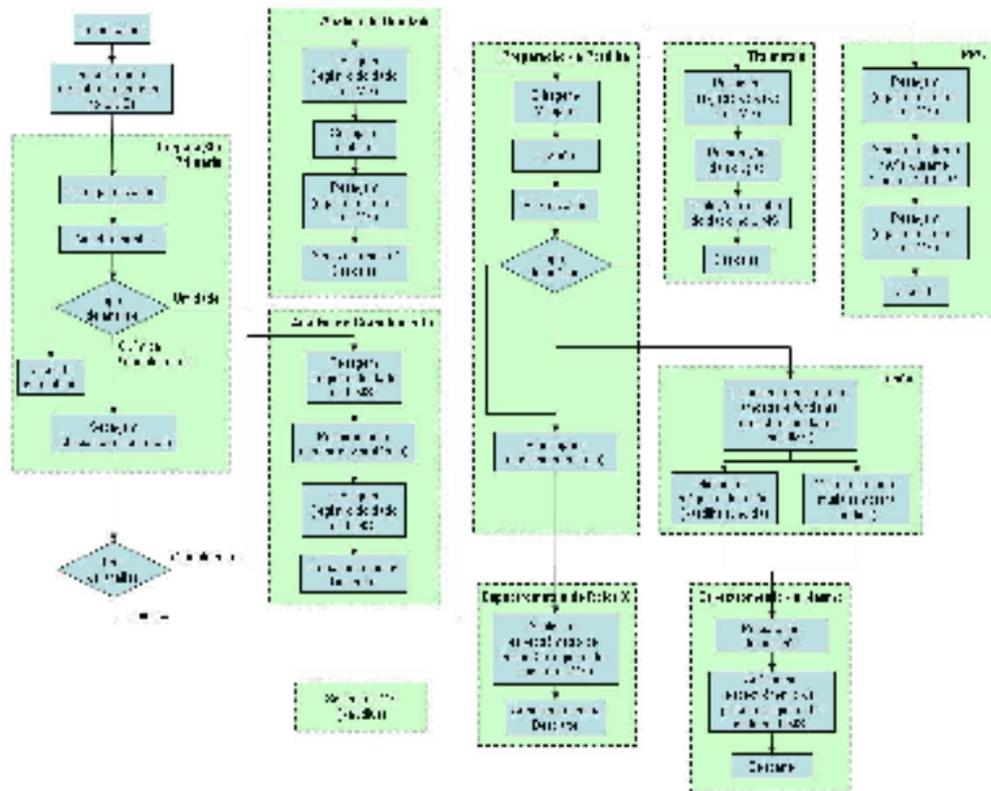


Figura 17 – Fluxograma geral dos laboratórios da Vale

O fluxograma foi elaborado considerando a divisão do laboratório (Dimensão) em subdimensões. Assim as subdimensões foram definidas: Sistemas (de informação); Preparação Primária; Análise de Umidade; Análise Granulométrica; Preparação de Pastilha (prensada); Fusão; Titrimetria (titulação); PPC; Espectrometria de Plasma; e Espectrometria de Raios-X.

Definidas as subdimensões, a próxima etapa era definir tecnologias aplicáveis a cada subdimensão, que seriam contempladas na Matriz de Maturidade. Essa tarefa exigiu uma pesquisa extensa sobre tecnologias e soluções de automação existentes no mercado para laboratórios de mineração. A maioria dos fornecedores de soluções desse tipo foi encontrada fora do Brasil, já que há várias aplicações de automação em laboratórios de

mineração ao redor do mundo, especialmente na Austrália, onde a mão-de-obra é mais cara e os laboratórios localizados em locais mais isolados. Não foram contatados apenas fornecedores, mas também usuários de soluções de automação, com o objetivo de aproveitar a experiência dos mesmos para identificar as melhores soluções. A Figura 18 mostra alguns fornecedores contatados nessa etapa.

Figura 18 – Fornecedores contatados

É importante destacar que as soluções utilizadas na Austrália não necessariamente se adaptam aos laboratórios da Vale, devido às diferentes características do minério. Na Austrália, o minério é predominantemente seco, enquanto no Brasil é geralmente bastante úmido, o que dificulta o processo de limpeza e descontaminação dos equipamentos, especialmente no início do processo. Esse fato constituiu-se em mais um desafio do projeto, pois a equipe Chemtech deveria avaliar se as soluções poderiam ser utilizadas para o minério do Brasil, e em caso negativo, se poderiam ser adaptadas, ou até mesmo desenvolvidas soluções específicas para este minério.

As tecnologias levantadas se referiam às funcionalidades esperadas em um Sistema LIMS, à movimentação de amostras e soluções e a tecnologias relacionadas aos equipamentos, como temporizadores, sistemas de controle e possibilidade de interface com o LIMS para envio automático de dados. É importante destacar que as tecnologias levantadas foram tecnologias de ponta, considerando um caso ideal de laboratório totalmente automatizado, levando em contas as tecnologias existentes e possíveis de serem desenvolvidas.

Uma vez definidas as subdimensões e levantadas as tecnologias aplicáveis, foi possível iniciar a elaboração da Matriz de Maturidade. Logo de início surgiu

uma dificuldade de definir de modo claro quais seriam os requisitos que diferenciariam os níveis de automação. Por exemplo, para a subdimensão “Análise de Umidade”, era bastante difícil definir o que seria considerado “Nível 2” e o que seria considerado “Nível 3”, e essa dificuldade aconteceu em praticamente todas as subdimensões. Assim, era necessário estabelecer um critério que permitisse a classificação de cada subdimensão de forma menos subjetiva. A Figura 19 mostra uma imagem da primeira versão da Matriz de Maturidade.

Item	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4	Itens	Justificativa
Análise de Umidade

Figura 19 – Primeira versão da Matriz de Maturidade

Para solucionar esse problema, surgiu a idéia de listar as tecnologias aplicáveis para cada subdimensão, e então conferir pesos a cada uma delas, baseados em pilares que refletiriam os principais objetivos do projeto. Desse modo, seriam definidos os pesos de cada tecnologia, e a existência ou não dessas tecnologias em cada laboratório definiriam os níveis das subdimensões. Isso tornaria a avaliação do nível de cada subdimensão menos subjetiva e mais completa.

Os pilares definidos para a Matriz de Maturidade foram: Mão-de-Obra; Eficiência; Confiabilidade; Aderência Tecnológica; e Saúde e Segurança Ocupacional.

O pilar “Mão de Obra” define o quanto a tecnologia impacta na utilização da mão-de-obra, de modo que quanto menor o peso, maior a necessidade de

mão-de-obra para realização da tarefa. O pilar “Eficiência” define o quanto a tecnologia impacta na eficiência da realização de determinada tarefa, o que tem reflexo na produtividade do laboratório. O pilar “Confiabilidade” define o quanto a tecnologia impacta na confiabilidade das análises realizadas no laboratório. O pilar “Aderência Tecnológica” define a aderência tecnológica da tecnologia, ou seja, a classifica conforme critério de desenvolvimento tecnológico. O pilar “Saúde e Segurança Ocupacional” define o quanto a tecnologia impacta na saúde e segurança dos funcionários do laboratório.

Depois de uma consulta a alguns supervisores de laboratório da Vale, foi decidido que alguns pilares teriam mais peso que outros, considerando os objetivos principais do projeto. Assim os pilares “Mão de Obra”, “Confiabilidade” e “Saúde e Segurança Ocupacional” têm mais peso que os pilares “Eficiência” e “Aderência Tecnológica”, por refletirem os principais objetivos do projeto.

Para cada pilar, foram definidos quatro níveis de impacto da tecnologia: muito baixo (a tecnologia não tem impacto no pilar, por exemplo, na mão-de-obra); baixo (a tecnologia tem pouco impacto no pilar); médio (a tecnologia tem médio impacto no pilar); alto (a tecnologia tem grande impacto no pilar). Para os pilares com mais peso descritos acima, os pesos para cada impacto foram: peso 0 (zero) para impacto muito baixo; peso 2 para impacto baixo; peso 4 para impacto médio; e peso 6 para impacto alto. Para os pilares “Eficiência” e “Aderência Tecnológica”, os pesos foram: peso 0 (zero) para impacto muito baixo; peso 1 para impacto baixo; peso 2 para impacto médio; e peso 3 para impacto alto. Com essa diferenciação foi possível traduzir para a Matriz as prioridades do projeto. A Figura 20 mostra a tela de definição de pilares na Matriz.

VALE		chemtech A Siemens Company		PROJETO PDAI LABORATÓRIOS	
PLANO DIRETOR DE AUTOMAÇÃO E INFORMAÇÃO DE LABORATÓRIOS		18 000001 0001		P&ID	
DIAP		18 000001 0001		P&ID	
PREMISSAS		18 000001 0001 0001		P&ID	
PILARES DE MENSURA DE DESEMPENHO PARA CADA PILAR					
NO. AV	Descrição do Item	Impacto no Peso	Descrição de Classificação	Peso	Exemplos
180 de Obra	Especificação e qualificação de equipamentos para laboratório. Quando necessário, material de consumo para laboratório. Descrição de hardware. O impacto de MTO de Obra será considerado em função da inclusão de resultados de fabricação de laboratório em sistemas de laboratório.	4000	Atenção a nível de impacto de resultados de equipamentos para laboratório.	0	Grata com sistema de controle de laboratório de resultados de equipamentos para laboratório.
		3000	Atenção a nível de impacto de resultados de equipamentos para laboratório de 2 a 5 pessoas.	2	Atenção de controle de laboratório de resultados de equipamentos para laboratório de 2 a 5 pessoas.
		2000	Atenção a nível de impacto de resultados de equipamentos para laboratório de 2 a 5 pessoas.	4	O nível de impacto de laboratório de resultados de equipamentos para laboratório de 2 a 5 pessoas.
		1000	Atenção a nível de impacto de resultados de equipamentos para laboratório de 2 a 5 pessoas.	6	Atenção a nível de impacto de resultados de equipamentos para laboratório de 2 a 5 pessoas.
Eficiência	Especificação e qualificação de equipamentos para laboratório. Quando necessário, material de consumo para laboratório. Descrição de hardware. O impacto de MTO de Obra será considerado em função da inclusão de resultados de fabricação de laboratório em sistemas de laboratório.	4000	Atenção a nível de impacto de resultados de equipamentos para laboratório.	0	Grata com sistema de controle de laboratório de resultados de equipamentos para laboratório.
		3000	Atenção a nível de impacto de resultados de equipamentos para laboratório de 2 a 5 pessoas.	1	O nível de impacto de laboratório de resultados de equipamentos para laboratório de 2 a 5 pessoas.
		2000	Atenção a nível de impacto de resultados de equipamentos para laboratório de 2 a 5 pessoas.	2	Atenção de sistema de laboratório de resultados de equipamentos para laboratório de 2 a 5 pessoas.
		1000	Atenção a nível de impacto de resultados de equipamentos para laboratório de 2 a 5 pessoas.	3	Atenção de sistema de laboratório de resultados de equipamentos para laboratório de 2 a 5 pessoas.
Contabilidade	Especificação e qualificação de equipamentos para laboratório. Quando necessário, material de consumo para laboratório. Descrição de hardware. O impacto de MTO de Obra será considerado em função da inclusão de resultados de fabricação de laboratório em sistemas de laboratório.	4000	Atenção a nível de impacto de resultados de equipamentos para laboratório de 2 a 5 pessoas.	0	O nível de impacto de laboratório de resultados de equipamentos para laboratório de 2 a 5 pessoas.
		3000	Atenção a nível de impacto de resultados de equipamentos para laboratório de 2 a 5 pessoas.	2	Sistema de sistema de laboratório de resultados de equipamentos para laboratório de 2 a 5 pessoas.
		2000	Atenção a nível de impacto de resultados de equipamentos para laboratório de 2 a 5 pessoas.	4	Atenção de sistema de laboratório de resultados de equipamentos para laboratório de 2 a 5 pessoas.

Figura 20 – Pilares da Matriz de Maturidade

Após essa definição, foi elaborada uma planilha para cada subdimensão, que listava as tecnologias aplicáveis. Em cada tecnologia, eram definidos os pesos da tecnologia para cada pilar, ou seja, o impacto da tecnologia em cada pilar. O peso final da tecnologia, utilizado no cálculo do nível da subdimensão, é a média aritmética entre os pesos de cada pilar, e é colocado no campo "Peso da Tecnologia". Desse modo, todas as tecnologias receberam pesos de acordo com a sua importância, que refletia seu impacto nos diversos

pilares definidos.

Para cada tecnologia, foi criado um campo chamado "Check" que deveria ser preenchido nas visitas aos laboratórios. Esse campo poderia ser preenchido com as respostas "Sim", "Não" ou "NA" (Não se Aplica). Se o campo fosse marcado com "Sim", significaria que o laboratório possui a tecnologia, e o peso da tecnologia seria transferido para o campo "Nota da tecnologia". Se fosse marcado "Não", o campo "Nota da Tecnologia" receberia o valor 0 (zero). Se fosse marcado "NA", ambos os campos "Peso da Tecnologia" e "Nota da Tecnologia" receberiam o valor 0 (zero), desse modo essa tecnologia não interferiria no nível da subdimensão avaliada.

Para o cálculo da subdimensão, o seguinte procedimento é seguido: é calculado o somatório do campo "Peso da Tecnologia", que é a soma do peso individual de todas as tecnologias listadas para aquela subdimensão. Então é calculado o somatório do campo "Nota da Tecnologia", que é a soma da nota individual de todas as tecnologias listadas para aquela subdimensão, e que depende do que foi marcado no campo "Check". Por fim é feita uma comparação entre os valores dos somatórios dos campos "Nota da Tecnologia" e "Peso da Tecnologia". Se o valor do campo "Nota da Tecnologia" for menor que 25% do valor do campo "Peso da Tecnologia", a subdimensão será classificada como Nível 1. Se o valor estiver entre 25% e 50%, a classificação será Nível 2. Se o valor estiver entre 50% e 75%, Nível 3. E maior que 75%, Nível 4. A Figura 21 mostra um exemplo de definição de Nível de subdimensão na Matriz de Maturidade.

Sistemas		Tecnologia		Pesos					Check	Nota	Nível da Tecnologia
M0	Finalidade	Compatibilidade	Substância Tecnológica	SGO	Peso da Tecnologia	Check	Nota	Nível da Tecnologia			
Pratificadores	Atualização de sistemas de controle de qualidade de laboratório	3	4	5	5	5	5	5	2	Nível 3	
	Atualização de sistemas de controle de qualidade de laboratório	2	1	2	2	2	2	2	2		
	Atualização de sistemas de controle de qualidade de laboratório	3	4	5	5	5	5	5	2		
	Atualização de sistemas de controle de qualidade de laboratório	2	1	0	2	2	2	2	0		
	Atualização de sistemas de controle de qualidade de laboratório	2	0	0	2	0	0	0	0		
Equipamentos	Atualização de sistemas de controle de qualidade de laboratório	2	0	2	2	0	2	2	1,4	Nível 3	
	Atualização de sistemas de controle de qualidade de laboratório	2	0	0	0	0	0	0	0		
	Atualização de sistemas de controle de qualidade de laboratório	2	0	0	0	0	0	0	0		
	Atualização de sistemas de controle de qualidade de laboratório	2	0	0	0	0	0	0	0		
	Atualização de sistemas de controle de qualidade de laboratório	2	0	0	0	0	0	0	0		

Figura 21 – Subdimensão da Matriz de Maturidade, com tecnologias e pesos

O documento foi então finalizado, e reuniões foram realizadas com supervisores de laboratórios da Vale para validar as tecnologias listadas e os pesos de cada uma delas. Após essa validação, o documento foi aprovado pela Vale. Porém, no cronograma está prevista uma revisão da Matriz de Maturidade após as visitas de campo, de modo que o documento ainda será corrigido e enviado novamente para aprovação e emissão final.

4.3.2. Levantamento de campo e elaboração dos relatórios de levantamento

Concluída a elaboração da Matriz de Maturidade, foi iniciado o levantamento de campo. Nessa etapa, os quatro componentes da equipe técnica (o quinto componente é o líder do projeto) se dividiram em duas equipes, de modo que uma ficou responsável pelas visitas aos laboratórios do Norte e a outra equipe ficou responsável pelas visitas aos laboratórios do Sudeste. Os laboratório do Norte fazem parte da Diretoria de Ferrosos Norte (DIFN) da Vale, enquanto os laboratórios do Sudeste fazem parte da Diretoria de Ferrosos Sudeste (DIFS).

Os engenheiros Tiago Marinho e Fabiano Nunes, ambos engenheiros de controle e automação, fizeram as visitas aos laboratórios da DIFN, enquanto eu e a Engenheira Érica Hott, engenheira de controle e automação, fizemos as visitas aos laboratórios da DIFS. Os laboratórios visitados na DIFS foram: laboratório da mina de Água Limpa; laboratório da mina de Brucutu; laboratório da mina de Alegria; laboratório da mina de Timbopeba; e laboratório da mina de Cauê (Itabira). Os laboratórios visitados na DIFN foram: laboratório da mina de São Luíz; laboratório da mina de Marabá; laboratório da mina de Açailândia; laboratório da mina de Carajás; e laboratório da Mina do Azul. Além disso, essa equipe posteriormente fez uma visita ao laboratório da mina de Corumbá, da DIFS.

Antes de iniciar efetivamente as visitas, foi elaborado um documento de referência com os tópicos que deveriam ser levantados nas visitas. Os tópicos são: quantidade de amostras analisadas no laboratório; quantidade de análises realizadas no laboratório; características gerais do minério analisado; planos de longo prazo do laboratório e projetos interdependentes; tipos de amostras analisadas; fluxograma de processos; número de funcionários; layout; equipamentos; e capacidade elétrica. Além desses dados, a Matriz de Maturidade seria preenchida para cada laboratório, permitindo classificar as

subdimensões em um dos quatro níveis de automação. Foi criado um tópico exclusivo para a Matriz de Maturidade, onde a classificação de cada subdimensão seria comentada em maiores detalhes, permitindo uma análise crítica do nível de automação do laboratório.

As visitas foram realizadas e em todos os laboratórios os dados foram levantados com sucesso. Os supervisores e funcionários dos laboratórios também deram várias sugestões durante as visitas sobre processos onde haveria maiores ganhos com automação e sobre as dificuldades encontradas no dia-a-dia no laboratório. Durante as visitas, foi observado que o laboratório físico apresenta mais oportunidades de automação, pois tem maior número de funcionários e as tarefas realizadas envolvem carregamento de peso e manipulação de amostras em posições desconfortáveis, o que pode gerar problemas de ergonomia. Além disso, no laboratório físico há bastante poeira e ruído, gerando um ambiente insalubre onde a presença do operador não é desejável.

No laboratório químico o maior ganho com automação seria livrar os operadores de realizar procedimentos repetitivos, no que se destaca a pesagem para a fusão. Nessa operação, devem ser pesados a amostra e o fundente com a máxima precisão, tarefa cansativa que requer muito tempo do operador.

Dentre as tarefas realizadas no laboratório físico, foi dado destaque às tarefas de pulverização e prensagem. Essas tarefas demandam um número considerável de funcionários, e a manipulação das panelas dos moinhos de pulverização é uma tarefa bastante cansativa, pois esses objetos são bastante pesados, chegando a pesar 15 quilogramas. Além disso, são tarefas bastante repetitivas, que seriam possíveis de serem automatizadas, com ganhos para saúde e segurança dos operadores.

Com base nas informações levantadas nos laboratórios da DIFS e da DIFN

e seguindo o documento de referência elaborado antes das visitas, foram elaborados os relatórios de levantamento de todos os laboratórios visitados. Com esses relatórios, é possível fazer um comparativo dos laboratórios, identificando problemas em comum e particularidades de cada um, o que permite identificar as soluções que poderão ser aplicadas em cada laboratório, de acordo com a necessidade de cada um. Além disso, esses relatórios são a base para a elaboração do relatório de soluções.

4.3.3. Próximas etapas

Após a emissão e aprovação de todos os relatórios de levantamento, será iniciada a elaboração do relatório de levantamento de soluções, que listará todas as soluções identificadas possíveis de serem aplicadas aos laboratórios da Vale, considerando o que foi levantado durante as visitas de campo. Para isso, é essencial a consulta aos relatórios de levantamento.

Também é importante voltar a contatar os fornecedores, dessa vez com um foco mais específico, considerando as características e necessidades de cada laboratório. Esse foco mais específico permite obter informações mais detalhadas sobre as soluções e avaliar se estas realmente se adequam aos laboratórios da Vale.

5 – Conclusões

O período de estágio foi uma experiência única, enriquecedora em todos os sentidos, principalmente nos âmbitos profissional e pessoal.

Os objetivos ao ingressar no estágio foram cumpridos: foram aplicados os conhecimentos adquiridos no curso, como o conhecimento das operações unitárias presentes no processo de beneficiamento de minérios e o conhecimento de certas práticas adotadas no laboratório de mineração, como a análise de titrimetria; foram obtidos novos conhecimentos relacionados à área de Engenharia Química, na área de mineração, que até então era desconhecida; e foram aprendidos vários assuntos fora do âmbito da Engenharia Química, principalmente assuntos relacionados à Engenharia de Controle e Automação, dos quais se destacam: LIMS, PIMS, MES e programação de CLP's. Esses assuntos foram aprendidos tanto durante o desenvolvimento de projetos quanto no curso de formação da Chemtech, o CENTECH.

O objetivo secundário de adquirir experiência profissional através da vivência de situações do dia-a-dia do trabalho de engenharia também foi cumprido, já que cada dia de trabalho apresentava um novo desafio que requeria criatividade e conhecimento técnico para ser superado.

Dentre as dificuldades encontradas durante o estágio, pode-se destacar: a falta de conhecimento prévio sobre o processo de mineração e a falta de domínio da língua inglesa. Quanto ao conhecimento do processo de mineração, essa dificuldade foi facilmente superada, graças aos conhecimentos de operações unitárias aprendidos no curso de graduação e à ajuda dos profissionais da Chemtech, além do treinamento oferecido pela empresa. Quanto ao domínio da língua inglesa, ele foi necessário no contato com fornecedores e na leitura de apostilas e catálogos que se encontram predominantemente nessa língua. Nesse sentido, foi fácil perceber que no ramo

de engenharia, e principalmente em uma empresa de serviços como a Chemtech, o conhecimento da língua inglesa, mesmo que em nível intermediário, é essencial para o desenvolvimento dos projetos, e esse conhecimento deve ser buscado e aprimorado.

Quanto às lições aprendidas durante o período de estágio, estas foram muitas e relacionadas tanto à área profissional quanto à área pessoal. Pode-se destacar a seguinte lição: é impossível se acomodar com os conhecimentos adquiridos na graduação, já que a engenharia em geral é um ramo dinâmico, onde sempre estão surgindo novidades e novos campos de atuação. Desse modo, é necessário estar sempre atualizado em relação às tendências do mercado de tecnologia, pois as grandes empresas que buscam os serviços da Chemtech estão inseridas em um mercado global, e para sobreviver nesse mercado é imprescindível contar com as mais avançadas tecnologias.

O curso de graduação de Engenharia Química da UFRN revelou-se um curso praticamente completo, que prepara de forma eficiente o aluno para o mercado de trabalho. Porém, é necessário que o curso ofereça mais disciplinas além das básicas, que tratem de assuntos relacionados às tendências do mercado. Para isso, é importante buscar profissionais que estejam em contato com essas tecnologias e oferecer, na medida do possível, disciplinas complementares que oferecem um diferencial na formação profissional.

Por fim, é justo afirmar que o período de estágio atendeu e até mesmo superou as expectativas, revelando-se ideal como complemento à formação acadêmica teórica e como preparação para o trabalho como engenheiro.

6 - Referências Bibliográficas

- 1- MARTINS, J., Curso da CENTECH intitulado “Beneficiamento de Minérios”, Belo Horizonte, 2008.
- 2- DUTRA, R., “Beneficiamento de Minerais Industriais”.
- 3- NETO, L. R. C., “Modelagem e Simulação da Cadeia Produtiva do Minério de Ferro”. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- 4- HOLLOCKS, B., “A well-kept secret? Simulation in manufacturing industry reviewed”, OR Insight, Warrick, v. 5, p. 12-17, Oct./Dec. 1992.
- 5- CASSELL, R.A., “Desenvolvimento de uma abordagem para divulgação da simulação no setor atacadista gaúcho”, 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.
- 6- WANG, B., XU, D. L., XIAO, G. X., CHU, K. W., YU, A. B., “Numerical Study of Gas-Solid Flow in a Ciclone Separator”. Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, Melbourne, Australia, 2003.
- 7- KOH, P. T. L., SCHWARZ, M. P., ZHU, Y., BOURKE, P., PEAKER, R., FRANZIDIS, J. P., “Development of CFD Models of Mineral Flotation Cells”. Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, Melbourne, Australia, 2003.
- 8- HEATH, A. R., KOH, P. T. L., “Combined Population Balance and CFD Modelling of Particle Aggregation by Polimeric Flocculant”. Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries,

Melbourne, Australia, 2003.

- 9- CLEARLY, P., "Axial Transport in Dry Ball Mills". Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, Melbourne, Australia, 2003.
- 10- <http://www.visual8.com/SampleSimulationCases3.pdf>, acessado em 08 de Julho de 2008.
- 11- FRIMPONG, S., ER., G. K., SZYMANSKI, J., "Computer Simulation and Animation of Large Scale Surface Mining Systems". Centre for Advanced Minerals and Energy Research, University of Alberta, Edmonton.
- 12- <http://www.automaction.com.br/Lab.htm>, acessado em 10 de Julho de 2008.
- 13- http://www.chemtech.com.br/lportal/web/guest/case/journal_content/56_INSTANCE_XC4b/10099/27055?templateId=CASE-VISUALIZAR, acessado em 10 de Julho de 2008.
- 14- <http://www.labware.com>, acessado em 10 de Julho de 2008.
- 15- <http://www.labsoft.com.br>, acessado em 10 de Julho de 2008.
- 16- http://www.chemtech.com.br/lportal/web/guest/case/journal_content/56_INSTANCE_XC4b/10099/27055?templateId=CASE-VISUALIZAR, acessado em 10 de Julho de 2008.
- 17- http://www.chemtech.com.br/lportal/web/guest/case/journal_content/56_INSTANCE_XC4b/10099/26687?templateId=CASE-VISUALIZAR, acessado em 10 de Julho de 2008.
- 18- http://www.chemtech.com.br/lportal/web/guest/noticia/journal_content/56_INSTANCE_XC4b/10099/62467?templateId=NOTICIA_EM_DETALHE,

acessado em 10 de Julho de 2008.

19-<http://www.hamiltonrobotics.com>, acessado em 11 de Julho de 2008.

20-BONVIN, D., YELLEPEDDI, R., BUMAN, A., "Applications and perspectives of a new innovative XRF-XRD spectrometer in industrial process control".
Internacional Centre for Diffraction Data 2000, Advances in X-ray Analysis, Vol. 42.

21-<http://www.horiba.com>, acessado em 25 de Agosto de 2008.

22-<http://www.sartorius.com>, acessado em 26 de Agosto de 2008.

23-<http://www.abb.com/product/us/9AAC910011.aspx?country=BR>,
acessado em 27 de Agosto de 2008.

24-<http://www.essa.com.au>, acessado em 28 de Agosto de 2008.

25-<http://www.flsmidth.com>, acessado em 29 de Agosto de 2008.

26-<http://www.herzog-maschinenfabrik.de>, acessado em 01 de Setembro de 2008.

27-<http://www.rocklabs.com>, acessado em 02 de Setembro de 2008.

28-http://www.rigaku.com/index_en.html, acessado em 03 de Setembro de 2008.

29-<http://www.claisse.com>, acessado em 04 de Setembro de 2008.

30-<http://www.engendrar.com.br>, acessado em 05 de Setembro de 2008.

31-<http://www.impgroup.com.au>, acessado em 08 de Setembro de 2008.

32-<http://www.assay.com.au>, acessado em 09 de Setembro de 2008.

33-<http://www.ultratrace.com.au>, acessado em 10 de Setembro de 2008.