



CNEN/SP

**ipen** Instituto de Pesquisas  
Energéticas e Nucleares

AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE  
DE SÃO PAULO

## DETERMINAÇÃO DE VAZAMENTOS EM PLACAS DE REFRIGERAÇÃO DE ALTOS FORNOS

HÉCTOR CARLOS CAMILO ROCCA

Dissertação apresentada como parte  
dos requisitos para obtenção do Grau  
de Mestre em Ciências na Área de  
Tecnologia Nuclear.

**Orientador:** Dr. Valdir Sciani

São Paulo

1994

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**DETERMINAÇÃO DE VAZAMENTOS EM PLACAS DE  
REFRIGERAÇÃO DE ALTOS FORNOS**

**Héctor Carlos Camilo Rocca**

Dissertação apresentada como parte  
dos requisitos para obtenção do grau  
de "Mestre em Ciências na Área de  
Tecnologia Nuclear".

**Orientador: Dr. Valdir Sciani**



**São Paulo**

**1994**

**COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP - IPEN**

Ao Eng<sup>o</sup>. Antonio Carlos G. Castagnet,  
Coordenadoria de Aplicações na Engenharia e na Indústria.

Ao Eng<sup>o</sup>. Calistrato Cardoso,  
Companhia Siderúrgica Paulista

Aos demais colegas da Supervisão de Aplicações de Radioisótopos

nossos agradecimentos.

## SUMÁRIO

	página
<b>Resumo</b>	1
<b>Abstract</b>	2
<b>Capítulo 1</b> - Introdução	3
1.0 - Aspectos gerais	3
1.1 - Alto forno	6
1.2 - Objetivos	8
1.3 - Considerações preliminares	10
1.3.1 - Traçador	10
1.4 - Planejamento	17
<b>Capítulo 2</b> - Materiais e métodos	18
2.0 - Métodos utilizados	18
2.1 - Diluição radioisotópica	18
2.2 - Método do tempo de trânsito	21
2.3 - Método dos detectores líquidos de cintilação	25
2.3.1 - Aplicação do método	25
2.3.2 - Processo de detecção em soluções cintiladoras	26
2.3.3 - Detecção	27
2.3.4 - Contagem e análise da altura dos pulsos	29
2.3.5 - Radiação de fundo	31
2.3.6 - Eficiência de contagem	34
2.3.7 - Equipamento utilizado	40
2.4 - Determinação da umidade do gás de saída do alto forno	44
<b>Capítulo 3</b> - Resultados	48
3.0 - Estudo dos parâmetros	48
3.1 - Valor mínimo da relação de vazões	50
3.2 - Proteção radiológica	52
3.3 - Cálculo do erro	54
3.4 - Injeção de traçador	58
3.4.1 - Sistema inicial	58

## SUMÁRIO

(Continuação)

	página
3.4.2	- Sistema final 60
3.4.3	- Injeção do traçador brometo 62
3.5	- Ensaios realizados 64
3.5.1	- Ensaio Nº 1 68
3.5.1.1	- Calibração do rotâmetro 68
3.5.1.2	- Atividade total injetada 68
3.5.1.3	- Determinação do valor de $Q_0$ 68
3.5.1.4	- Saída de gás no topo do alto forno 70
3.5.1.5	- Preparação do padrão de trítio 71
3.5.1.6	- Cálculo do erro 71
3.5.2	- Ensaios posteriores 74
<b>Capítulo 4</b>	- Conclusões 76
<b>Capítulo 5</b>	- Referências bibliográficas 78
<b>Anexo</b>	84

## ÍNDICE DE FIGURAS

	página
1.1 - Esquema de um alto forno	7
1.2 - Localização das placas de refrigeração	9
2.1 - Esquema de determinação do tempo de trânsito	23
2.2 - Exemplo de um espectro beta do trítio	30
2.3 - Diagrama do espectrômetro	42
2.4 - Percentagem de água no Insta-Gel	43
2.5 - Curva psicrométrica	47
3.1 - Nomenclatura adotada para o estudo do processo	49
3.2 - Sistema de injeção inicial	59
3.3 - Sistema de injeção final	61
3.4 - Injeção do traçador de brometo	63
3.5 - Registro da atividade	67
3.6 - Registro do método do tempo de trânsito	69

## DETERMINAÇÃO DE VAZAMENTOS EM PLACAS DE REFRIGERAÇÃO DE ALTOS FORNOS

### RESUMO

As paredes dos altos fornos são refrigeradas por placas de cobre, inseridas no material refratário, através das quais circula água. Quando, por causa da corrosão ocasionada pela descida da carga de material, alguma destas placas começa a vazar, as condições locais de temperatura podem ser alteradas, com implicações importantes sobre a homogeneidade de descida do material em processo de fundição e, conseqüentemente, sobre o controle do alto forno.

Para verificar a eventual existência de vazamentos nas placas, foi montado um sistema que injeta uma solução de água tritiada na tubulação de alimentação das placas e determina, por cintilação líquida, a concentração de trítio nos gases de saída do topo do alto forno.

A vazão de água de refrigeração foi determinada, em cada ensaio mediante a aplicação do método do tempo de trânsito, utilizando  $^{82}\text{Br}$  como traçador.

O sistema foi provado sob diversas condições de funcionamento do alto forno, permitindo detectar e medir vazamentos maiores do que 0,5 litros/minuto. Os ensaios confirmaram tanto as suspeitas sobre a presença de vazamentos, como os resultados satisfatórios obtidos após as ações de manutenção corretiva.

## ABSTRACT

Blast furnace walls are cooled by the circulation of water through copper plates inserted into the blast furnace refractory lining. Plates are fed by circular pipelines, called distribution rings, installed at different levels of the reactor. Because of normal corrosion, plates wear away and can eventually perforate, allowing the leakage of cooling water inside the blast furnace.

A system has been designed and installed in order to confirm the eventual occurrence of leakages in the cooling plates of a blast furnace refractory lining. The system injects a solution of tritium into the feeding pipeline and determines, by means of liquid scintillation counting, the concentration of tritium in the exhausting gases at the top of the blast furnace. The system was tested under different blast furnace operating conditions, and allowed the detection and determination of leakages greater than 0.5 l/min. Following necessary maintenance, the system also confirmed the satisfactory results of the corrective actions.

## CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO

### *1.0 - ASPECTOS GERAIS*

A aplicação de radioisótopos na indústria teve seu início no fim da década de 40, incentivada pela disponibilidade de nuclídeos artificiais produzidos por reatores nucleares, sendo a indústria petrolífera a primeira a se beneficiar de sua utilização, em estudos da produção de poços de petróleo, como mostram Mott e Dempsey<sup>[33]</sup>.

A ferramenta oferecida pelos isótopos radioativos demonstrou ter um enorme potencial econômico nos estudos das características operacionais e o diagnóstico de falhas de processos, por não requerer a paralisação da produção para obter os resultados desejados, nem alterar as condições de funcionamento, fornecendo informações precisas de parâmetros reais.

A aplicação de radioisótopos experimentou um significativo aumento nas décadas de 60 e 70 como conseqüência, em parte, da construção de grandes instalações de produção, nas quais foi realizado um amplo investimento de tempo e recursos em técnicas para lograr o controle "on-line" e a identificação de falhas operacionais, entre as quais os métodos com traçadores demonstraram ser os mais versáteis.

Mais recentemente, o maior impulso na aplicação de radioisótopos deve ser creditado ao contínuo avanço dos micro-processadores, que permitiram grandes progressos nos processos de aquisição e processamento de dados. Hoje é possível realizar serviços que antigamente seriam descartados por impraticáveis, em razão das limitações existentes, no passado, nas velocidades de acesso e processamento dos dados.

Atualmente, a utilização de radioisótopos na solução de problemas da engenharia de processos é uma técnica bem estabelecida na qual não se vislumbram mudanças radicais nos próximos anos, mas que, por sua versatilidade, estimulará o estudo e implementação de novas aplicações potenciais de custo relativamente baixo.

Um estudo amplo da metodologia desenvolvida no uso de traçadores em diferentes campos de aplicação pode ser visto no trabalho de Margrita<sup>[32]</sup>.

Exemplos das aplicações de traçadores na indústria podem ser encontrados em inúmeros trabalhos publicados. Alguns deles, como os de Easey<sup>[13-14]</sup>, descrevem experimentos realizados com radioisótopos para analisar o comportamento de processos de relevante importância industrial e econômica.

Na mesma linha, Charlton<sup>[7]</sup> mostra, por meio de exemplos, como uma instalação pode ser estudada e o processo modificado, sob condições dinâmicas de funcionamento, com a finalidade de melhorar a eficiência de produção ou verificar as causas que a limitam. Ljunggren<sup>[30]</sup> faz um estudo dos métodos da avaliação dos parâmetros que determinam o fluxo de materiais num processo complexo.

Rao<sup>[39]</sup> dá exemplos da utilização de traçadores de forma qualitativa (métodos de tipo "sim ou não") e quantitativa (métodos de medição de fluxo ou balanço de massas). A Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA)<sup>[20]</sup> organizou uma reunião onde se fez uma retrospectiva das diferentes técnicas nucleares utilizadas para as aplicações mais importantes.

Ainda dentro das publicações genéricas das aplicações na indústria, Thyn<sup>[46]</sup> faz um estudo de métodos de otimização de processos, classificando-os em dois grupos: os que respondem a estímulos, usados em equipamentos que funcionam de forma contínua ou periódica, e os que avaliam as mudanças de concentração em função do tempo. Quando se trata de otimizar processos completos, em certos casos, é mais econômico trabalhar em uma planta piloto do que na instalação real. O valor econômico deste tipo de estudo foi posto em evidência pelo mesmo autor, calculando a relação custo-benefício de sua aplicação na indústria química<sup>[47]</sup>.

A obtenção de determinados resultados em estudos com traçadores em plantas industriais exige a disponibilidade de compostos marcados de uma ampla variedade de propriedades químicas e físicas. Como a oferta de compostos marcados comerciais é limitada, o pesquisador deve conhecer os métodos para preparar um certo número de traçadores necessários para determinadas aplicações. Alguns destes métodos são estudados por Otto<sup>[36]</sup> e permitem preparar compostos marcados na forma de soluções, gases ou aerossóis.

A indústria siderúrgica foi uma das primeiras a se beneficiar das vantagens oferecidas pelas técnicas nucleares, especialmente na área de controle de processos, e como exemplo de um dos muitos apanhados das técnicas com radioisótopos utilizadas neste campo, pode-se mencionar o realizado por Easey<sup>[15]</sup>, que trata

especialmente dos tempos de mistura de ligas, das características de fluxo e dos tempos de residência para materiais em processo de produção.

As vantagens econômicas da aplicação de traçadores na indústria siderúrgica, incluindo comparação de custos com técnicas alternativas e benefícios derivados do aumento da produção por redução de interrupções de processo, foram analisadas por Eapen e colaboradores<sup>[12]</sup>, enquanto que André e colaboradores<sup>[1]</sup> fizeram um estudo da aplicação de traçadores visando reduzir a poluição ambiental que esta indústria origina.

No caso específico de altos fornos, a grande maioria dos trabalhos publicados referem-se ao estudo dos fluxos de materiais no seu interior. Wiblin<sup>[48]</sup>, por exemplo, utiliza vários nuclídeos para determinar as características de vazão e tempos de residência do ferro fundido e da escória.

Os mesmos traçadores,  $^{198}\text{Au}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{46}\text{Sc}$  e  $^{140}\text{La}$ , foram utilizados por Carrard<sup>[5]</sup> em um trabalho similar e Gauje e colaboradores<sup>[19]</sup>, depois de realizar medições em um alto forno definido, aplicaram modelos matemáticos com o intuito de otimizar o funcionamento e que permitiram, por exemplo, determinar a existência de caminhos preferenciais para o fluxo do metal, o que diminui a capacidade de produção.

Libralesso e colaboradores<sup>[29]</sup> utilizaram cápsulas com xenônio para localizar isotermas dentro do alto forno e aplicaram um modelo matemático que divide o reator em duas zonas: uma em que a carga de massa desce tipo pistão e outra na qual o núcleo tem comportamento de misturador. Isto permitiu estabelecer relações entre a transferência de calor e as condições de operação do alto forno, por exemplo, a distribuição heterogênea de gases e sólidos no raio do reator com a eficiência das reações gás-sólido, com a aerodinâmica do alto forno e com as condições térmicas das paredes.

Enfim, a eficiência de operação dos altos fornos não depende somente das propriedades dos materiais, mas também das condições de contato entre diferentes fases. Os traçadores radioativos permitem obter novas informações sobre o movimento de gases, sólidos e líquidos dentro do reator.

O IPEN, através da Coordenadoria de Aplicações na Engenharia e na Indústria (antigo Departamento de Aplicações de Radioisótopos e Radiações na

Engenharia e na Indústria), tem realizado numerosos e importantes trabalhos nas maiores siderúrgicas do país.

### 1.1 - ALTO FORNO

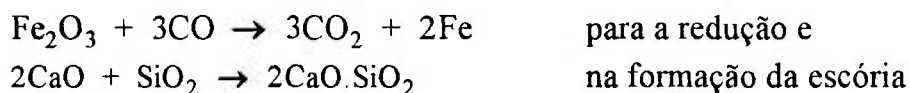
O alto forno é um forno vertical destinado à redução do minério de ferro e sua transformação em gusa<sup>[31]</sup>. Sua seção transversal não é constante ao longo da altura do forno; na parte superior, onde existe fricção entre as paredes do reator e a carga, o diâmetro aumenta gradativamente à medida que os materiais descem (Figura 1.1).

Na parte inferior, quando a carga já está mole, a inclinação das paredes se inverte, diminuindo a seção para ajudar a descida, evitando simultaneamente que os materiais passem rapidamente de uma região à outra, dando tempo a que se completem os processos químicos.

Na região das ventaneiras, ou região de fusão, a seção transversal é a menor de todo o forno, para assegurar que a combustão seja rápida e eficiente.

A carga é feita pela parte superior e consiste dos seguintes materiais: minério de ferro a reduzir, coque ou carvão de lenha (para fornecer o calor e o CO necessários à redução) e um fundente (calcário) para fluidificar as impurezas e formar uma escória mais fundível.

Na parte inferior, logo acima do cadinho, é injetado ar quente a 675°C aproximadamente, para causar a combustão parcial do carvão que passa principalmente a CO. Este gás, arrastado pela corrente forçada ascendente, reduz o óxido a metal. Das reações que se dão:



resultam os seguintes produtos: o gusa, que goteja dentro do cadinho, a escória, que flutua sobre o gusa, e gases. Os dois primeiros são retirados por orifícios adequados e os gases, que são ricos em CO, saem pela parte superior e são recolhidos para sua reutilização como combustível.

Logo depois que os gases saem do alto forno, e antes de serem destinados a

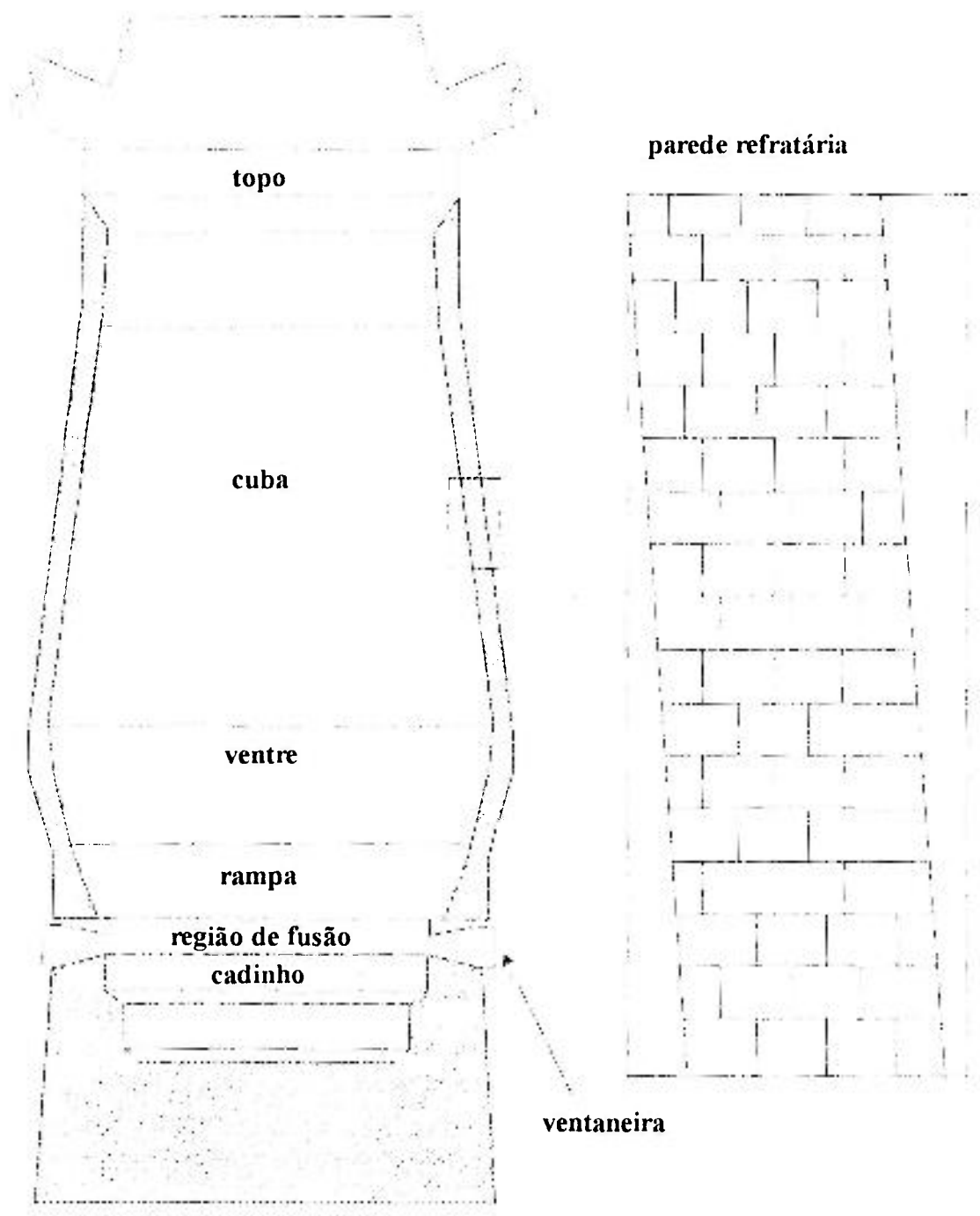


Figura 1.1 - Esquema de um alto forno

qualquer fim, passam por uma instalação purificadora que lhes retira as poeiras.

A enorme quantidade de ar a ser aquecido e insuflado (4.000m<sup>3</sup> aproximadamente por tonelada de gusa produzido) bem como o volume de gases combustíveis e utilizáveis que saem do alto forno (6.000m<sup>3</sup> por tonelada de gusa) dão uma idéia das dimensões do aparelhamento acessório para manipulação de ar e de gases.

O ar insuflado é aquecido em recuperadores cilíndricos verticais cujo interior é constituído por uma câmara de combustão e uma câmara de recuperação formada por um empilhamento de tijolos refratários. Uma parte dos gases do alto forno é queimada nesses recuperadores para aquecê-los. Quando um deles está quente, insufla-se em sentido contrário o ar destinado às ventaneiras, que assim se aquece. Nesse ínterim, procede-se ao aquecimento de um segundo recuperador.

Outra parte dos gases do alto forno é utilizada para fornecer a energia que aciona as máquinas soprantes, fornos de aço e outros equipamentos e o excedente, se houver, pode ser recolhido em um gasômetro.

O funcionamento do alto forno é contínuo durante meses ou mesmo anos e o ferro e a escória são retirados, em estado líquido, diversas vezes em cada 24 horas. Esta operação consiste em desobstruir um orifício apropriado a certa altura do cadinho por onde sai a escória e, em seguida, abre-se o orifício próximo ao fundo do cadinho, por onde escorre o ferro.

Este produto, chamado de primeira fusão, é escoado em canaletas até vagões tanques especiais (torpedos) para ser transportado até os fornos de refino ou conversores, nos quais é transformado em aço.

As paredes dos altos fornos para produção de aço são refrigeradas por placas de cobre inseridas no material refratário através das quais circula água (Figura 1.2). Estas placas são alimentadas por tubulações anelares, chamadas anéis de distribuição, que encontram-se localizadas a diferentes níveis do alto forno e o circundam totalmente.

## **1.2 - OBJETIVOS**

Como consequência de processos de corrosão, algumas placas de refrigera-

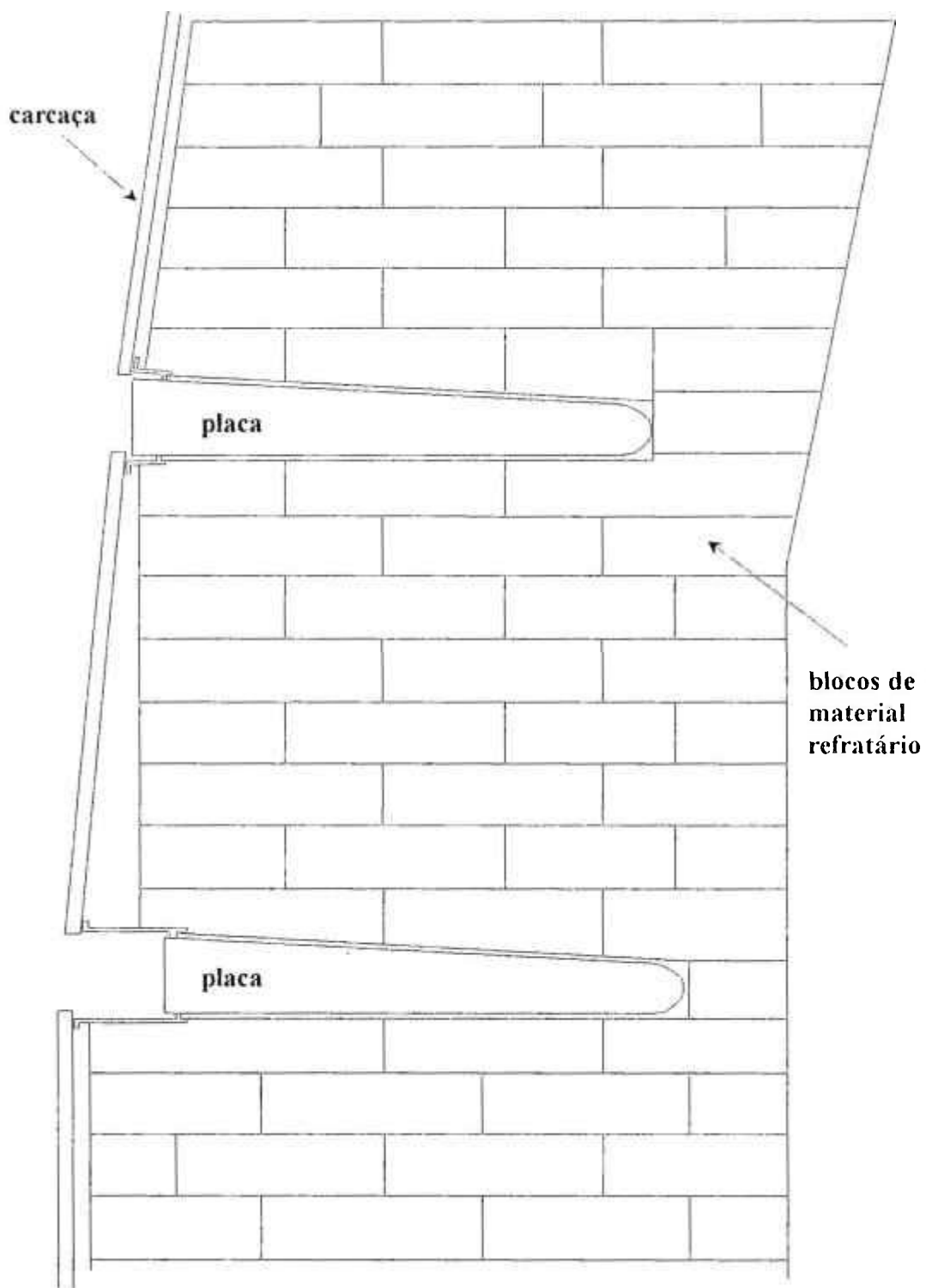


Figura 1.2 - Localização das placas de refrigeração

ção da parede de material refratário podem chegar a se perfurar, vazando água dentro do alto forno e alterando localmente a temperatura.

Para evitar que volumes importantes de água possam entrar em contato com a carga de material em processo de fundição, o que origina diferenças de temperatura ao longo de um determinado nível do alto forno que, por sua vez, criam problemas de controle do reator (especialmente a falta de homogeneidade na descida da carga gera regiões mais frias onde o processo de fundição é retardado), é conveniente contar com um método que permita detectar a perfuração de uma placa nos estágios iniciais e medir a magnitude de tal evento.

O sistema proposto consiste, fundamentalmente, na injeção contínua de um traçador radioativo, neste caso água tritiada, no anel de distribuição. Em virtude das condições de circulação, o traçador mistura-se homogeneamente com o fluido de refrigeração antes de alcançar o reator. Uma coleta de amostras de água condensada dos gases de exaustão no topo do alto forno, em intervalos definidos, e sua análise com detectores apropriados, permitiu detectar o vazamento no alto forno.

O sistema foi provado sob diversas condições de funcionamento do alto forno, permitindo detectar e medir vazamentos maiores do que 0,6 litros/min, sem prejudicar a produção normal de ferro gusa.

### *1.3 - CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES*

As condições reinantes no funcionamento de um alto forno e o fato de seu interior ser inacessível durante todos os anos de operação, limitam drasticamente o número e tipo de métodos passíveis de serem utilizados quando deseja-se realizar a determinação de algum parâmetro.

Para o estudo de vazamentos de água no interior do alto forno o método que melhor se adapta a estas condições críticas é o do traçador radioativo.

Diversos fatores são fundamentais para a implementação do método, desde a escolha do traçador adequado até o sistema de medição.

#### *1.3.1 - Traçador*

Em processos industriais, quando é necessário conhecer:

- a) o caminho seguido por uma determinada substância em um processo;
  - b) o tipo de reação que sofre;
  - c) em que percentagem reage;
  - d) o tempo que demora em um processo;
  - e) a quantidade que existe no sistema;
- etc., o método mais simples e cômodo é utilizar um traçador.

Em tal sentido, o traçador deverá ser alguma substância que acompanhe o mais corretamente possível o comportamento do elemento sob estudo. Os resultados obtidos serão mais confiáveis e corretos quanto mais as moléculas do traçador se assemelhem às da matéria de interesse.

Os materiais podem ser classificados, segundo diversos pontos de vista, em isótopos, elementos, íons, moléculas, microagregados, macroagregados, etc., e pode-se definir cada uma destas classes como o conjunto de membros que tem características comuns, o que leva ao conceito de população.

As populações são passíveis de evolução (variações no número, espaço e tempo) e interagem com outras populações (mistura, reações químicas, etc.). Os estudos com traçadores tem geralmente como objetivo conhecer a magnitude e o tipo destas modificações.

Um traçador pode ser interpretado, então, como uma subpopulação de elementos detectáveis que estão, naturalmente ou por meios artificiais, associados com a população principal (a que se encontra sob estudo) e da qual se espera possa fornecer informação.

A confiabilidade do resultado inferido para a população sob estudo dependerá principalmente do grau de semelhança ou representatividade que a subpopulação medida (o traçador) tenha com ela.

Em outras palavras, se a informação sobre a vazão de uma população é obtida através de medições de vazão na subpopulação "traçador", é evidente que uma relação entre essas duas populações foi estabelecida ou suposta.

Existem mais duas condições para concretizar a definição de traçador:

- a) variações na concentração da subpopulação não devem afetar o comportamento da população principal;

- b) variações na concentração devem ser mensuráveis.

Se fosse possível marcar algumas moléculas do material sob análise, de forma que permitisse individualizá-las em todo momento, sem que elas percam nenhuma de suas características físicas, químicas ou de comportamento, estas moléculas se converteriam no traçador ideal. Estas condições são inteiramente satisfeitas quando se utilizam substâncias radioativas como traçador.

Os traçadores radioativos, comparados aos traçadores clássicos (corantes, eletrólitos, materiais magnéticos, etc.) apresentam algumas vantagens adicionais:

- a) propriedades químicas e físicas idênticas, quando são estudadas moléculas não degradáveis no processo;
- b) sensibilidade muito alta, o que significa possibilidade de detecção em concentrações baixas;
- c) permitem medição "in situ", geralmente através das paredes de tubulações ou reatores;
- d) pode ser empregado em diversas formas químicas sem que se modifique a sensibilidade da medida.

Como o número de elementos da subpopulação é grande (mesmo sendo muito pequeno com relação à população principal), a todo momento alguns núcleos estão se desintegrando e a radiação emitida pode ser seguida por detectores apropriados.

Com os traçadores podem-se obter dois tipos de informações:

- a) informação do tipo "sim-não", que indica se existe uma ligação entre as populações (intersecção);
- b) informação analógica, que estabelece a relação quantitativa entre as duas populações.

Nos casos em que se estuda cinética de reações químicas, solubilidades, pressão de vapor, difusão de átomos e moléculas etc., o traçador deve ser quimicamente idêntico à substância de interesse (radiotraçador químico). Quando não se requer a identidade química do traçador com o composto sob estudo, o traçador só deve reunir um número de condições não muito rígidas (radiotraçador físico).

A escolha do traçador apropriado para cada tipo de estudo deve estar baseada nas condições da experiência e no tipo de informação que se deseja obter<sup>118</sup>. As principais variáveis são:

- a) elemento;
- b) meia-vida;
- c) tipo de radiação;
- d) sensibilidade de detecção;
- e) dose permitida (limite de incorporação anual);
- f) existência de carregador, etc.

O tipo de radiação mais conveniente para usos industriais de traçadores é a gama, porque sendo uma radiação eletromagnética tem, frente às partículas carregadas, a vantagem de uma maior penetrabilidade. A consequência óbvia é que muitas medições, mesmo as de tipo contínuo, podem ser realizadas sem nenhuma alteração das instalações, já que basta colocar o detector na parte externa da tubulação, sem contato físico.

A radiação beta não pode ser medida através das paredes de uma tubulação porque é totalmente absorvida, e necessita da utilização de métodos de medição mais complicados que, geralmente, exigem a modificação da tubulação para inserção de um detector separado do fluxo por uma janela fina, ou a medição descontínua de amostras num sistema de detecção externo.

A sensibilidade de detecção está relacionada (além do radioisótopo) com o detector utilizado.

As características de desintegração e a forma como é metabolizado, faz com que cada radioisótopo tenha um determinado índice de periculosidade para os seres humanos, o que foi levado em consideração para o cálculo dos limites primários anuais de incorporação no organismo. Com base nestes últimos, podem estabelecer-se limites derivados de concentração (no ar e na água) em função das condições de trabalho.

Um traçador deve seguir o material de um sistema sem ser absorvido, precipitado ou de qualquer outra forma removido do meio. Como os detectores de radiação são muito sensíveis, os traçadores radioativos são utilizados em concentrações muito baixas, nas quais os processos de adsorção são realçados. É

necessário, então, utilizar um carregador, que aumenta a concentração sem aumentar os riscos de manipulação ou de agressão ao meio ambiente.

Se existirem vários radiotraçadores possíveis para uma pesquisa definida, deverá ser escolhido aquele que tiver:

- a) a menor meia-vida;
- b) a melhor sensibilidade de detecção;
- c) o maior limite de incorporação anual (LIA) permitido<sup>[9]</sup>.

O primeiro passo no planejamento de uma experiência com radiotraçadores é definir claramente os objetivos da pesquisa e selecionar as técnicas apropriadas. Os objetivos determinarão a duração das medidas, o número de experimentos e a precisão desejada.

Estes fatores exigirão decisões sobre:

- a) a quantidade de atividade que será utilizada;
- b) se as medições serão realizadas em forma contínua ou por amostragem;
- c) o sistema de detecção e sua eficiência;
- d) a dispersão do traçador no sistema e sua disposição final;
- e) as medidas de proteção necessárias.

Analise cada item separadamente:

*Atividade utilizada:*

A atividade utilizada tem um limite inferior estabelecido pelo nível de erro tolerável no estudo, já que a estatística de contagem (diretamente relacionada com a atividade) é geralmente a maior causa de incerteza nos resultados.

O limite superior da atividade é imposto por considerações de Proteção Radiológica. As normas internacionais exigem que as autoridades competentes de cada país só autorizem o uso de material radioativo quando existe um benefício que o justifique. As exposições deverão ser o mais baixas possíveis, levando em consideração fatores econômicos e sociais<sup>[21]</sup>.

A atividade total utilizada deve ser compatível, também, com o número de experimentos que se deseja realizar.

### *Tipo de medições:*

Existem dois tipos possíveis de medições: contínuas e por amostragem.

Em geral, as medições contínuas ("on-line") são utilizadas para monitorizar a resposta do processo para uma injeção de tipo pulso e, conseqüentemente, embora o dispositivo de injeção seja relativamente simples, são necessários sistemas elaborados de medição. As medições por amostragem executam-se, normalmente, nos casos de injeção contínua: nelas o sistema de injeção tende a ser complexo, mas o de medição resulta muito mais simples.

As principais vantagens do método "on-line" são:

- a) sistema de injeção relativamente simples, onde não é necessário conhecer com precisão a atividade injetada;
- b) resultado imediato;
- c) não requer manipulação do traçador depois da injeção;
- d) os ensaios podem ser repetitivos, dando origem a uma boa estatística de medição;
- e) é necessário somente um ponto de acesso ao sistema;
- f) pode-se utilizar traçadores de meia-vida curta;
- g) não é necessário manipular líquidos tóxicos ou perigosos.

As vantagens da técnica por amostragem são:

- a) sistema de amostragem geralmente simples;
- b) maior sensibilidade de detecção dado que as medições são feitas no laboratório;
- c) menor atividade específica e mais precisão;
- d) podem ser utilizados emissores beta com maior facilidade;

### *Sistema de detecção:*

Para aplicações "on-line" o traçador poderá ser, preferencialmente, um emissor gama e o detector, em estes casos, provavelmente será escolhido entre os tubos Geiger-Müller e os detectores de cintilação.

A maior eficiência de contagem e o menor "tempo morto" do detector de cintilação fazem com que, sempre que possível, a escolha recaia neste equipamento de medição.

No caso de amostragem, existe maior variedade na definição do traçador, sendo que a forma física e a atividade específica do material processado também poderão influenciar na seleção do sistema de medição.

Para emissores gama, na forma líquida ou sólida, a contagem por cintilação é a técnica óbvia, restando somente por definir se será realizada de forma "interna" ou "externa" ao cristal de cintilação. Se a amostra é de volume pequeno, o sistema mais eficiente de contagem é o "interno" que utiliza um detector de tipo poço ("well-counting") que fornece uma geometria de medição maior que  $2\pi$ .

#### *Dispersão do traçador:*

A diluição que o traçador sofrerá no sistema deve ser determinada na etapa de planejamento da experiência. Mesmo quando o fator de diluição for justamente o parâmetro que se deseja medir, será necessário contar com um valor nominal ou de projeto, para realizar os cálculos preliminares com um certo grau de precisão.

Nesta etapa é importante considerar todos os possíveis caminhos que o traçador possa seguir, especialmente nos casos de estudo de vazamentos.

Se o traçador utilizado não pode ser removido do sistema (por separação ou decaimento) e aparece no produto final, deverão ser tomadas as devidas precauções para que o grau de contaminação permaneça abaixo dos valores estabelecidos como toleráveis para consumo da população. Este nível deverá ser controlado por medições<sup>[9]</sup>.

#### *Medidas de segurança:*

Em todos os casos em que são utilizadas atividades consideradas de certo risco, deverá ser realizado um estudo supondo a possibilidade de um acidente e estabelecido um procedimento para situações de emergência.

Os princípios básicos de proteção radiológica em que todos os estudos estão baseados são<sup>[23, 21]</sup>:

- a) evitar exposições desnecessárias;
- b) as operações de controle deverão respeitar o princípio de menor dose possível;
- c) não ultrapassar as doses limites para cada nuclídeo.

A escolha do traçador passível de ser utilizado neste caso em particular, não oferece maiores opções. Em razão de ser água a substância que deve ser marcada e da temperatura existente no interior do alto forno, só pode ser utilizado trítio (T ou  $^3\text{H}$ ) na forma de água tritiada. Qualquer elemento radioativo solúvel em água, como consequência das mudanças de fase que necessariamente acontecerão, se constituiria em um radiotraçador físico, que não pode ser aplicado neste caso.

#### ***1.4 - PLANEJAMENTO***

O trítio é um nuclídeo de meia-vida 12,33 anos, que decai por emissão de partículas beta de energia máxima igual a 18,6keV<sup>[28]</sup>.

O baixo valor desta energia impede a medição direta da atividade do traçador em amostras de água com instrumentos portáteis, ou que possam ser facilmente transportados para uma instalação industrial. Sua medição deve ser realizada em laboratório e o método que mais se adapta as condições deste trabalho, do ponto de vista da sensibilidade e da facilidade de operação, é o dos detectores líquidos de cintilação<sup>[34]</sup>.

Este fato determina que o tipo de medição deva ser por amostragem, e que as amostras obtidas tenham que ser levadas ao laboratório de análise para seu acondicionamento e contagem.

## CAPÍTULO 2 - MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.0 - MÉTODOS UTILIZADOS

Neste estudo, para a determinação do vazamento no alto forno, foram utilizados diferentes métodos analíticos, baseados em técnicas que utilizam traçadores radioativos e métodos físico-químicos, para a determinação de parâmetros experimentais.

O primeiro deles, que é a base do cálculo das vazões de perda obtidas em cada uma das experiências, é o método da diluição radioisotópica. As vazões de alimentação do anel de arrefecimento, como será visto mais adiante, foram avaliadas utilizando o método dos dois picos, e as medições da atividade das amostras de traçador foram realizadas com detectores líquidos de cintilação.

Finalmente, para a determinação da umidade remanescente em um gás, utilizou-se o método das curvas psicrométricas.

### 2.1 - DILUIÇÃO RADIOISOTÓPICA

A medição da diluição de um traçador em um dado material pode ser utilizada para determinar o volume ou massa total do material no sistema.

O princípio de diluição é a base de métodos de balanço de material em sistemas descontínuos ou contínuos, para a determinação da eficiência de separação, ou para avaliar a fração de material que recircula em sistemas contínuos.

Normalmente este método é utilizado em sistemas onde não existe instrumentação convencional, onde o volume a ser determinado consiste de muitos volumes menores interconectados, ou o acesso é difícil ou impossível para a instalação de instrumental. Um exemplo de aplicação pode ser visto no trabalho de Campbell<sup>[4]</sup>.

A técnica baseia-se no fato que se uma quantidade  $q$  (g) ou volume  $v$  (ml) conhecidos, de atividade específica ou concentração de atividade  $C_0$  (Bq/g ou Bq/ml), é agregada ao material a ser avaliado, depois de alcançada a homogeneização se terá:

$$q C_o = C (q + Q) \quad \text{ou} \quad v C_o = C (v + V) \quad (2.1)$$

onde:  $C$  = concentração de atividade do material depois da homogeneização (Bq/g ou Bq/ml);

$Q$  = massa no sistema (g);

$V$  = volume no sistema (ml).

Reordenando a equação (2.1):

$$Q = q \left( \frac{C_o}{C} - 1 \right) \quad \text{ou} \quad V = v \left( \frac{C_o}{C} - 1 \right) \quad (2.2)$$

Como as taxas de contagens, sob as mesmas condições de geometria, tempo morto, etc, são proporcionais à concentração do traçador ou à concentração de atividade, neste caso, pode-se escrever:

$$Q = q \left( \frac{N_o - F}{N - F} - 1 \right) \quad \text{ou} \quad V = v \left( \frac{N_o - F}{N - F} - 1 \right) \quad (2.3)$$

onde:  $N_o$  = taxa de contagens original (c/min);

$N$  = taxa de contagens depois da homogeneização (c/min);

$F$  = taxa de contagens da radiação de fundo (c/min).

Para poder realizar estas medições nas condições exigidas pela equação (2.3) é necessário realizar uma diluição da concentração de atividade primária ( $C_o$ ), de forma que seu valor seja o mais próximo possível de  $C$ . Esta diluição, que fará com que os erros de medição sejam iguais em ambas amostras, deverá ser feita, logicamente, com o mesmo material inativo sob estudo.

A equação (2.3) ficará, então, como:

$$Q = q \left( \frac{(N'_o - F)/r}{N - F} - 1 \right) \quad \text{ou} \quad V = v \left( \frac{(N'_o - F)/r}{N - F} - 1 \right) \quad (2.4)$$

onde:  $N'_o$  = taxa de contagens depois da diluição (c/min);

$r$  =  $m_t/(m_t + m_m)$  = fator de diluição;

$m_t$  = massa do traçador (g);

$m_m$  = massa do material (g).

Nos casos práticos na indústria, as diluições utilizadas são muito grandes, de forma que  $r$  é várias ordens de grandeza menor que a unidade. Por esta razão a equação (2.4) pode ser reduzida, sem erro apreciável, a:

$$Q = \frac{q}{r} \left[ \frac{N'_o - F}{N - F} \right] \quad \text{ou} \quad V = \frac{v}{r} \left[ \frac{N'_o - F}{N - F} \right] \quad (2.5)$$

Logicamente, é muito importante que o traçador utilizado seja fisicamente compatível com o fluido em estudo.

Além dos cuidados nas medições de  $N'_o$  e  $N$ , a exatidão do método exige que a homogeneização seja total, devendo-se dedicar especial atenção à verificação de que isto realmente aconteça.

Em alguns casos, quando os sistemas não são fechados, ao invés de realizar uma injeção pontual, utiliza-se uma injeção contínua.

A equação que descreve este processo é também a equação (2.1), onde  $q$  (Bq/min) é agora a vazão de injeção contínua do traçador e  $Q$  (ml/min) é a vazão de material que circula pelo sistema.

São semelhantes também as equações (2.2) à (2.5), sempre considerando  $q$  e  $Q$  como vazões e não mais como massas.

Durante a realização de um ensaio deste tipo, a concentração do traçador em um ponto do sistema onde a homogeneização do material já é total, começará a aumentar com um certo retardamento em relação ao início da injeção.

Esta concentração aumentará até um certo valor, que permanecerá constante até pouco tempo depois do fim da injeção. É nesta parte plana da curva concentração em função do tempo que devem ser tomadas as amostras utilizadas para o cálculo da vazão total.

A condição essencial para uma boa exatidão é uma perfeita mistura do traçador com o material antes do ponto de amostragem. Utilizando como injetor uma bomba de tipo diafragma ou peristáltica, podem ser obtidos resultados com uma precisão de aproximadamente 1%<sup>[22]</sup>.

Como a diluição da solução de injeção para a preparação do padrão de comparação é normalmente da ordem de  $10^6$  a  $10^8$  vezes, para diminuir os erros é realizada em duas etapas de diluição de  $10^3$  a  $10^4$  vezes. Para aumentar o grau de confiabilidade são preparados vários padrões que são posteriormente comparados e calculado o valor médio.

A quantidade de traçador injetada e o tempo de contagem devem ser ajustados de forma que o erro estatístico da medição seja compatível com os requisitos do ensaio.

## 2.2 - MÉTODO DO TEMPO DE TRÂNSITO

O fluxo de um líquido dentro de um duto pode ser laminar ou turbulento. Diz-se que um fluxo é laminar quando as linhas da trajetória do fluido são fixas no espaço e representam a trajetória real das partículas, que parecem deslizar por camadas. Quando as velocidades de transporte são baixas os fluidos reais movem-se de forma laminar e sem redemoinhos.

Em tubulações cilíndricas a distribuição das velocidades ao longo de um diâmetro tem forma de parábola, com a velocidade máxima no centro e sendo seu valor igual ao dobro da velocidade média<sup>[25]</sup>.

Quando as partículas do fluido seguem trajetórias aleatórias e que variam continuamente o fluxo é chamado de turbulento. Este tipo de movimento favorece drasticamente a homogeneização, em toda a seção do duto, de qualquer substância agregada à corrente.

Uma medida das condições cinéticas do deslocamento de um fluido pode ser obtida com o número de Reynolds<sup>[42]</sup>, que é um número adimensional definido por:

$$N_{Re} = \frac{\bar{v} l}{\nu} = \frac{\bar{v} l \rho}{\mu} \quad (2.6)$$

onde:  $\bar{v}$  = velocidade média do escoamento (m/min);

$l$  = comprimento característico do canal ou conduto (m);

$\nu$  = viscosidade cinemática do fluido (cp.g/cm<sup>3</sup>);

$\mu$  = viscosidade do fluido (cp);

$\rho$  = densidade do fluido (g/cm<sup>3</sup>).

Quando  $N_{Re}$  é menor que 2.100 o fluxo é laminar estável e quando é maior que 3.000 o fluxo é turbulento. Para valores compreendidos entre os indicados coexistem o fluxo laminar, perto das paredes do conduto, com o turbulento, localizado no centro.

O método do tempo de trânsito, também chamado dos dois picos, é utilizado para medir vazões em condutos fechados, onde a área da seção é conhecida, tendo sido empregado por Taylor<sup>[44,45]</sup> já em 1953. Se o conduto é uma tubulação cilíndrica, o  $l$  do número de Reynolds toma o valor de  $D$ , diâmetro interno da tubulação, sendo então:

$$N_{Re} = \frac{\bar{v} D \rho}{\mu} \quad (2.7)$$

O princípio deste método é o seguinte: tendo sido instalados dois detectores na tubulação que transporta o fluido, cuja vazão se quer determinar, e estando eles separados por uma distância  $d$ , injeta-se um traçador no fluxo na forma de um pulso curto (Figura 2.1). O ponto de injeção deve estar localizado a uma distância tal do primeiro detector que assegure que o traçador esteja perfeitamente homogeneizado com o fluido quando alcançar esta posição. Quando o traçador estiver bem misturado em toda a seção de tubulação, sua velocidade será a mesma da velocidade média do fluido<sup>[16]</sup>. A concentração do traçador é então monitorada pelos dois detectores e as informações transmitidas a um registrador gráfico de dois canais. A partir do gráfico assim obtido é possível determinar o valor do tempo de trânsito do pulso de traçador radioativo entre os dois pontos de controle.

Como o valor do volume contido na tubulação entre os dois pontos de medição é conhecido, o cálculo da vazão, para o caso normal de ser a seção constante entre esses pontos, é simplesmente:

$$Q = \frac{V}{\Delta t} = \frac{S d}{\Delta t} \quad (2.8)$$

onde:  $V$  = volume da tubulação (ml);

$S$  = seção da tubulação (cm<sup>2</sup>);

$d$  = distância entre os detectores (cm);

$t$  = tempo de trânsito do pulso (s).

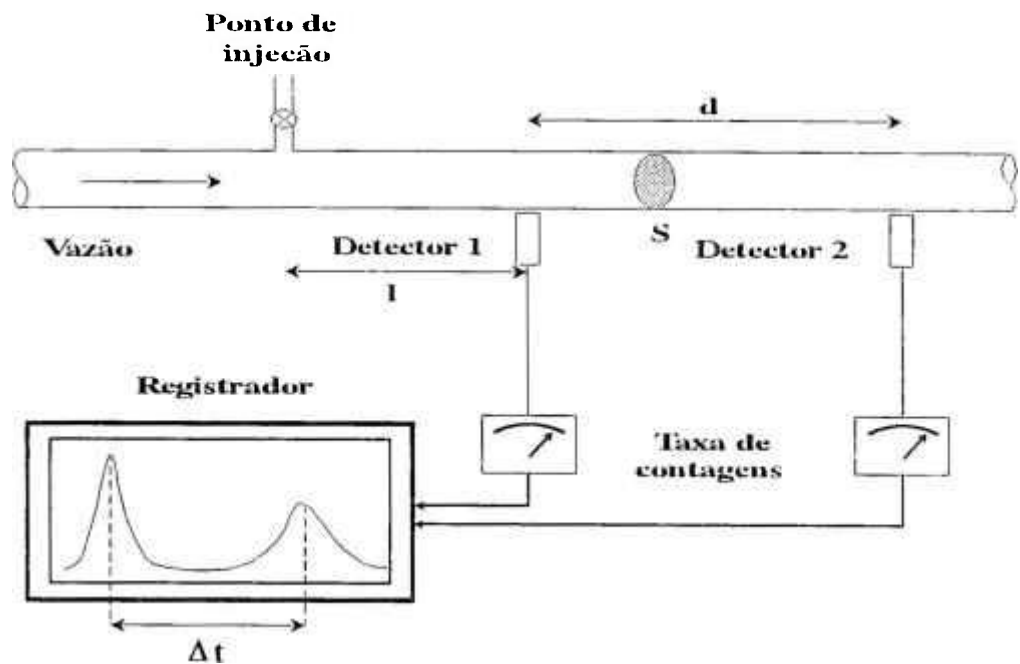


Figura 2.1 - Esquema de determinação do tempo de trânsito

O valor de  $\Delta t$  é obtido como a diferença entre os centróides das duas curvas de concentração em função do tempo.

As condições que devem ser preenchidas para obter uma boa precisão são:

- Mistura completa do traçador em toda a seção da tubulação na posição do primeiro detector, o que requer que o fluxo na tubulação seja turbulento. Um nível de precisão de 1% exige uma distância de 100 a 150 diâmetros de tubulação reta entre o ponto de injeção e o primeiro detector. Esta distância diminui sensivelmente caso existam no trajeto cotovelos, válvulas ou outros acessórios que facilitem a mistura<sup>[8]</sup>.
- A distância  $d$  entre os detectores deve ser suficientemente grande para reduzir a imprecisão na determinação do tempo de trânsito e depende do equipamento utilizado, fundamentalmente da velocidade do papel do registrador. Se  $d$  é da ordem de 10-20 diâmetros da tubulação, o registro dos pulsos deve ser feito na forma digital<sup>[27]</sup>.

- c) Deve ser possível determinar com exatidão o volume da tubulação compreendido entre os dois detectores. Isto implica a necessidade de se medir cuidadosamente a distância  $d$  e conhecer o valor da seção  $S$ .

Na prática, a exatidão está limitada exatamente por esta determinação do volume. Utilizando-se simplesmente o valor nominal do diâmetro interno da tubulação pode-se obter uma exatidão de 1 a 2%.

A determinação do volume por simples cálculo pode dar origem a um erro significativo se existirem depósitos ou incrustações na tubulação, cuja presença é difícil de avaliar em toda a extensão de uma linha industrial.

- d) A introdução do traçador não deve alterar as condições do fluxo. A idéia é introduzir o traçador como um pulso instantâneo. Porém, qualquer processo de injeção leva um tempo finito e distorce, em algum grau, o perfil de velocidade do fluido. Assim, os sistemas de injeção devem ser projetados de modo a minimizar o tempo de injeção sem impor à corrente do fluido uma alteração significativa.

O método permite alcançar uma precisão de 0,1 a 0,2%<sup>[22]</sup>, mas necessita-se para isso um alto grau de mistura, baixos erros na determinação do tempo de trânsito e no volume, além de uma vazão perfeitamente constante durante a experiência.

O traçador mais apropriado para este tipo de análise deve ser um emissor gama, de energia suficientemente alta para permitir sua detecção através das paredes de aço das tubulações, o que simplifica extraordinariamente as operações, e deve ter uma meia-vida de poucas horas, o que permite repetir o ensaio se for necessário e diminuir os riscos do ponto de vista da proteção radiológica. A forma química deve ser escolhida de forma a permanecer em solução no fluido cuja vazão se quer determinar.

A tabela 2.1 apresenta as energias gama e as abundâncias relativas para os traçadores mais comumente utilizados em aplicações industriais.

Se a vazão é de água, a primeira escolha recai sobre o  $^{82}\text{Br}$  que tem sobre o  $^{24}\text{Na}$  a vantagem de, sob a forma de brometo, sofrer muita menor adsorção nos materiais com que interage. Outra opção, quando o tempo de trânsito é da ordem de dias, é o  $^{131}\text{I}$ . O  $^{198}\text{Au}$  também pode ser utilizado mas requer a formação de um complexo solúvel, o que aumenta o custo do ensaio.

Tabela 2.1 - Traçadores radioativos

Elemento	Meia-vida	Modo de decaim.	Energias gama principais e abundâncias relativas keV	
$^{24}\text{Na}$	15,03h	$\beta^-$	1368,6 (100%)	2754,1 (100%)
$^{42}\text{K}$	12,36h	$\beta^-$	1524,6 (100%) 899,7 (0,28%)	312,6 (1,9%) 1920,8 (0,3%)
$^{51}\text{Cr}$	27,7d	C.E.	320,1 (100%)	
$^{82}\text{Br}$	35,34h	$\beta^-$	776,5 (100%) 606,3 (35,0%) 827,8 (28,7%)	554,3 (84,8%) 698,3 (34,3%) 1317,4 (32,2%)
$^{131}\text{I}$	8,04d	$\beta^-$	364,5 (100%) 284,3 (7,5%)	636,9 (8,9%) 722,9 (2,2%)
$^{198}\text{Au}$	2,696d	$\beta^-$	411,8 (100%)	675,9 (1,11%)

### 2.3 - MÉTODO DOS DETECTORES LÍQUIDOS DE CINTILAÇÃO

O método dos detectores líquidos de cintilação é um meio de detectar radioatividade de emissores beta ou alfa, que utiliza uma solução de cintilador e um fototubo. A solução converte em fótons de luz parte da energia liberada no seu interior pela partícula primária emitida pela fonte radioativa e o fototubo responde a essa luz, produzindo um pulso de carga que pode ser amplificado e contado em um circuito de medição.

#### 2.3.1 - Aplicação do método

A maior aplicação da contagem por detectores líquidos se dá na medição da atividade de emissores beta de baixa energia, embora existam métodos que permitem utilizá-la para outros isótopos.

Em qualquer método de detecção de radiação, a eficiência de contagem (a razão das contagens observadas em relação às desintegrações sofridas pela fonte) é

tanto maior quanto maior o número de partículas emitidas que alcança o detector e interage com ele. Perdas da eficiência se produzem quando as partículas emitidas pela fonte não atingem o detector ou são absorvidas por outros mecanismos que não resultam em uma resposta do detector.

As partículas beta, quando passam através da matéria, perdem sua energia muito mais rapidamente que os raios X ou gama de energia comparável e, conseqüentemente, seu alcance é muito menor. A absorção da partícula emitida, dentro da própria fonte e no caminho entre a fonte e o detector, é maior para as partículas betas de baixa energia. Para evitar estas perdas e realizar contagens com alta eficiência esta distância deve ser reduzida ao máximo.

Esta é a grande vantagem da contagem por detectores líquidos de cintilação, já que, em geral, a substância radioativa é colocada em contato com a solução cintiladora por dissolução, por suspensão ou por imersão. O termo "detectores líquidos" é também utilizado nos casos em que o cintilador encontra-se na forma de solução sólida ou sólido puro disperso em uma fase líquida não miscível, que contém o material radioativo.

Em casos especiais, uma amostra radioativa sólida pode estar separada de uma solução cintiladora por uma janela fina, mas isto resulta em perda de eficiência. Grandes esforços foram realizados no desenvolvimento de métodos para solubilizar amostras radioativas nas mais eficientes soluções cintiladoras<sup>[2, 43]</sup>.

Quando uma amostra é dissolvida na própria solução cintiladora, não somente se reduz a absorção indesejada mas também se minimiza o escape de partículas betas do detector. A espessura do material detector necessária para deter todas as partículas beta é pequena para radiação beta de baixa energia. Pode ter lugar o escape de partículas beta de uma camada superficial fina, sendo isto minimizado escolhendo-se uma forma geométrica com grande relação volume/superfície.

### *2.3.2 - Processo de detecção em soluções cintiladoras*

Quando um material radioativo que deve ser contado é dissolvido em uma solução cintiladora ou é completamente molhado por ela, recebe o nome de amostra "interna". A amostra de contagem completa consiste, então, do material radioativo, o solvente e a substância (ou substâncias) cintiladora.

Os solventes são chamados de primário ou secundário, dependendo da sua relativa abundância e compõem a maior parte da amostra de contagem. Os cintiladores são denominados de primário ou secundário, de acordo com a sua função no processo de cintilação.

O processo pode ser descrito nos seguintes passos:

- 1 - A energia da partícula primária é transferida para o solvente (a quantidade de energia transferida diretamente para o cintilador é desprezível) na forma de energia de ionização ou de excitação das moléculas do solvente. É a energia de excitação eletrônica do solvente a que mais contribui para a eventual formação do fóton de luz. Só aproximadamente 5% da energia total absorvida aparece como luz, sendo a restante dissipada como calor ou consumida em trocas químicas.
- 2 - A energia de excitação do solvente é transferida para as moléculas do soluto primário, que é o cintilador, num período de tempo da ordem de  $10^{-9}$  segundos<sup>[35]</sup>.
- 3 - As moléculas excitadas do soluto fluorescente retornam ao seu estado de menor nível de energia emitindo fótons de luz na região do visível ou ultravioleta próximo.
- 4 - No caso de existir um soluto secundário, este pode absorver a luz emitida pelo primário e reemití-la em um comprimento de onda maior. O motivo da introdução deste soluto é aumentar a sensibilidade do detector, fazendo com que o espectro de energia emitido coincida melhor com a resposta espectral do fotocatodo.

### **2.3.3 - Detecção**

Os fótons de luz que entram na fotomultiplicadora produzem elétrons, emitidos por uma camada fotossensível na parte interna do tubo, que recebe o nome de fotocatodo, com uma eficiência quântica de aproximadamente 20-30%. Esta eficiência quântica está definida como a relação entre os fotoelétrons emitidos e o número de fótons incidentes.

Os elétrons produzidos são acelerados por uma diferença de potencial de aproximadamente 100 volts na direção de um eletrodo (primeiro dinodo), onde cada fotoelétron libera de 3 a 4 elétrons secundários. Estes últimos são acelerados para colidir com o segundo dinodo e acontece nova multiplicação da corrente. As fotomultiplicadoras normalmente utilizam de 10 a 14 dinodos, que correspondem ao mesmo número de estágios de multiplicação. O ganho em cada dinodo ( $\delta$ ) pode ser representado por:

$$\delta = \frac{\text{número de elétrons secundários}}{\text{número de elétrons primários}} \cong 4$$

e o ganho do fototubo (G) será:

$$G = \alpha \delta^n \quad (2.9)$$

onde  $\alpha \cong 1$  e  $n =$  número de dinodos. Se a fotomultiplicadora tiver 10 dinodos, tem-se:

$$G \cong 4^{10} = 10^6$$

A corrente final coletada no ânodo é convertida em um pulso de voltagem que pode ser contado por um escalímetro. Esta contagem corresponde à centelha de luz produzida na solução por uma única partícula primária. A carga total  $Q$ , produzida por um evento será:

$$Q_t = \int_0^{\infty} i(t) dt \quad (2.10)$$

sendo:  $i(t) =$  variação da corrente do pulso em função do tempo;

e a altura do pulso gerado pode ser expressa por:

$$V(t) = \frac{1}{\left(\lambda - \frac{1}{RC}\right)} \frac{\lambda Q_t}{C} \left(e^{-t/RC} - e^{-\lambda t}\right) \quad (2.11)$$

onde:  $R =$  resistência;

$C =$  capacitância do circuito equivalente;

$\lambda =$  constante de decaimento do estado excitado do cintilador.

O tempo requerido pela partícula para atravessar a solução e ser absorvida é muito menor que o tempo de decaimento do estado excitado da molécula do cintilador e, também, que o tempo de resolução do tubo fotomultiplicador.

Qualquer outro evento que produza fótons de luz na solução da amostra pode, similarmente, ser detectado pelo fototubo, por exemplo: fluorescência do próprio material radioativo, ou fosforescência do vidro dos frascos de contagem ou da janela da fotomultiplicadora.

A eficiência do fotocátodo é da ordem de 20%, ou seja, para cada cinco fótons que chegam a ele, na média, um fotoelétron pode ser emitido.

#### *2.3.4 - Contagem e análise da altura dos pulsos*

A contagem por detectores líquidos de cintilação é um método de contagem proporcional, ou seja, a intensidade do sinal de saída do detector é proporcional à energia liberada pela partícula primária no detector. Especificamente, se uma partícula é totalmente detida na solução cintiladora (o que realmente acontece no caso de emissores beta de baixa energia), a altura do pulso de voltagem produzido pela fotomultiplicadora deve ser proporcional à energia inicial da partícula.

Este pulso é então amplificado e chega até um analisador de altura de pulsos, que o compara com voltagens de referência. Um circuito discriminador deixa passar o sinal se sua altura se encontra num canal entre dois níveis de voltagem selecionados. O nível superior pode ser fixado em valores muito altos ou ser totalmente eliminado, para permitir a contagem de todos os pulsos que superam o nível inferior.

Contagens realizadas num canal definido, estabelecendo-se para o discriminador inferior qualquer nível e deixando o superior livre (ou infinito), são conhecidas como "contagens integrais". Contagens realizadas em uma janela entre dois discriminadores fixos são chamadas de "contagens diferenciais".

Os equipamentos de contagem por cintilação líquida, ou espectrômetros, utilizam três canais simultâneos. Uma vantagem da contagem proporcional e análise de altura de pulso é a possibilidade de discriminar entre sinais produzidos pela amostra e aqueles oriundos da radiação de fundo, com base nos diferentes espectros de energia. Um espectro típico de uma fonte beta pode ser visto na Figura 2.2. Os

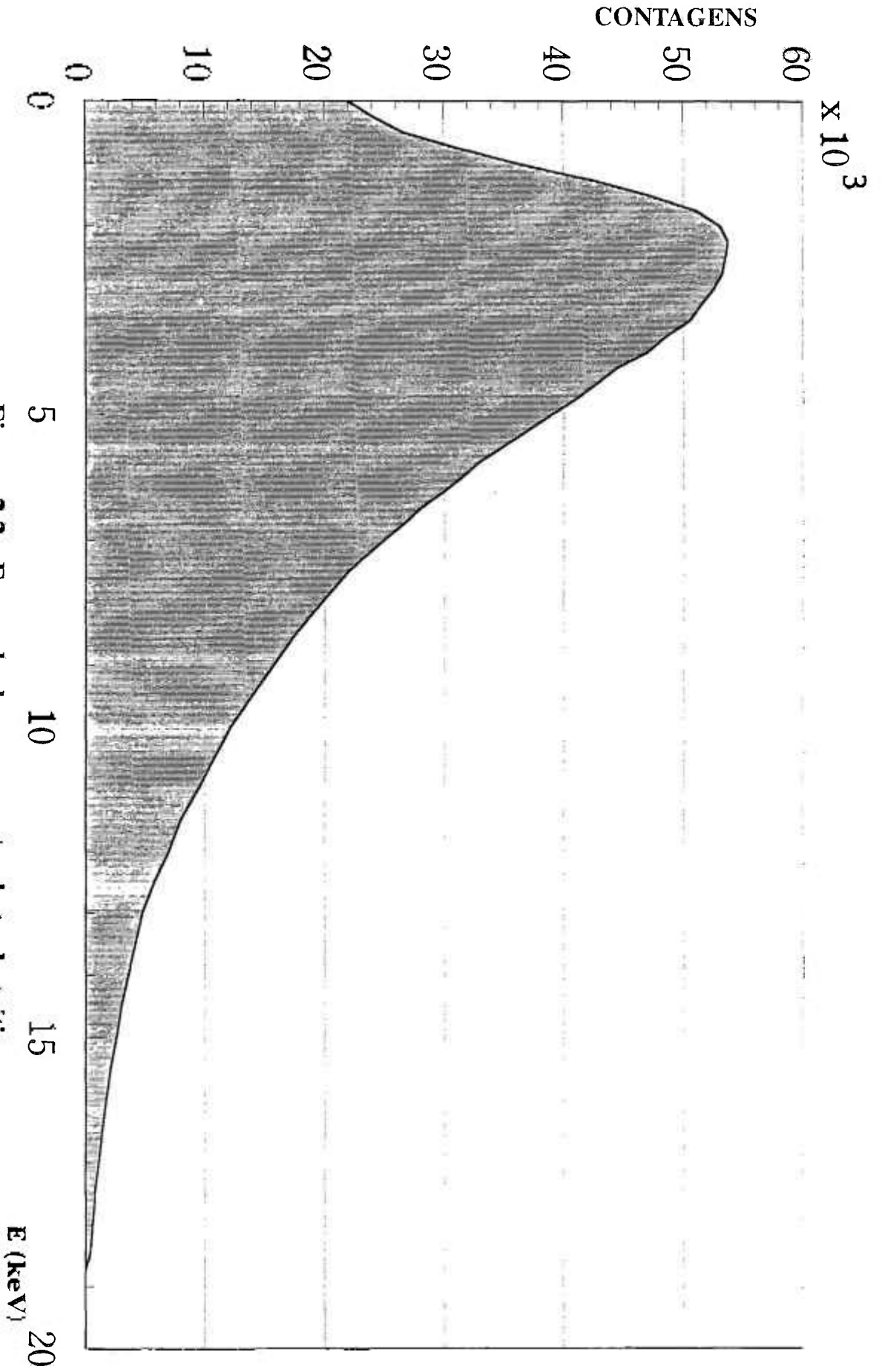


Figura 2.2 - Exemplo de um espectro beta do trítio

discriminadores que definem um dos canais podem ser ajustados de forma a incluir somente a região do espectro que permite otimizar a relação radiação da amostra-radiação de fundo.

Quando a amostra contém só um emissor beta, o segundo canal de contagem pode ser utilizado para verificar a supressão ("quenching").

Uma segunda vantagem da análise de altura de pulsos é a possibilidade de contar dois ou três isótopos simultaneamente se os espectros de energia são suficientemente diferentes, por uma escolha apropriada dos níveis dos canais.

### 2.3.5 - Radiação de fundo

A radiação de fundo deve ser subtraída da contagem da amostra que está sendo analisada, para obter a contagem líquida. Esta radiação de fundo é observada quando se conta uma amostra da mesma composição química e da mesma massa da amostra de interesse, porém sem material radioativo.

As fontes da radiação de fundo são:

- 1 - Radioisótopos naturais existentes nos materiais do sistema de medição, no recipiente que contém a amostra e na própria amostra:

Os materiais que compõem o sistema de medição são cuidadosamente escolhidos de forma a gerar a mínima atividade possível. Os recipientes para as amostras mais comumente utilizados são construídos de um tipo especial de vidro de borossilicato de baixo teor de potássio, já que a abundância natural do  $^{40}\text{K}$  é da ordem de 0,01%<sup>[28]</sup>. Como o preço destes recipientes não é alto, uma prática correta para evitar contaminações é eliminar os já utilizados, evitando a reutilização.

A radiação de fundo não é tão baixa nestes recipientes, como nos de quartzo ou polietileno, mas os primeiros são muito caros e os últimos são permeáveis à maioria das soluções cintiladoras. Existem também recipientes de nylon que não são permeáveis ao tolueno ou solventes similares, mas apresentam um efeito de "softening", quando usados com algumas misturas álcool-água<sup>[40]</sup>.

Outra contribuição à radiação de fundo pode ser dada pelo  $^{14}\text{C}$  presente em amostras orgânicas contemporâneas, na ordem de 15dpm por grama. Como os solventes utilizados são extraídos do petróleo, não existe nenhum problema quanto ao seu emprego, já que devido a sua meia-vida de 5.730 anos, o  $^{14}\text{C}$  estará totalmente decaído depois de aproximadamente 57.000 anos de formada a molécula, não influenciando, portanto, na medição.

## 2 - Raios cósmicos:

Os raios cósmicos reagem com o ar e outros materiais para produzir mésons de alta energia, elétrons, raios gama e raios X que bombardeiam o contador em todas as direções<sup>[24]</sup>. Além de excitar a solução cintiladora pelos processos normais, estas partículas podem produzir pequenas quantidades de luz visível, por efeito Cerenkov. Uma blindagem com material de alta densidade ao redor da câmara de contagem serve para diminuir os efeitos da radiação cósmica, mas não podem elimina-los totalmente, já que grande parte desta radiação encontra-se na região de maior energia do espectro.

## 3 - Fosforescência:

Este termo é aplicado à emissão retardada de luz posterior a uma excitação, enquanto que fluorescência se refere à emissão quase imediata. Em ambos tipos de emissão a intensidade decai exponencialmente com o tempo. A meia-vida da fluorescência é da ordem de  $10^{-9}$  a  $10^{-7}$  segundos, e a da fosforescência pode se estender por horas.

O material potencialmente importante deste ponto de vista é o vidro dos recipientes de contagem e do extremo do tubo fotomultiplicador. O vidro é excitado por certas frequências na luz natural ou dos tubos fluorescentes de iluminação e, mesmo sendo o rendimento desta excitação bastante baixo, esta fonte é relativamente intensa em relação à luz produzida na amostra<sup>[3]</sup>.

Para contagem de baixas atividades, quando a radiação de fundo é uma fração significativa da atividade da amostra, é recomendável colocar as amostras nos recipientes de medição em salas iluminadas unicamente com luz incandescente. Considerando que a fotomultiplicadora deve permanecer na escuridão total enquanto estiver com a alta tensão aplicada, para evitar a destruição do catodo, a câmara de contagem é normalmente protegida contra a

entrada de luz durante a operação do aparelho. Se o tubo fotomultiplicador for exposto à luz, apresentará um ruído eletrônico que decai lentamente com o tempo<sup>[24]</sup>.

As amostras também podem conter alguma substância fosforescente desconhecida; e é esta uma das razões para preparar um "branco" de composição química idêntica à da amostra.

Os fótons produzidos em eventos isolados de fosforescência são emitidos temporalmente ao acaso, em contraste com o grupo de fótons originados por múltiplas excitações ocasionadas na solução cintiladora por uma desintegração radioativa. O pulso originado por um único fóton pode ser rejeitado fixando-se o valor do discriminador inferior acima do nível de altura de pulso que resulte da emissão de um único elétron no fotocatodo. Se a taxa de fosforescência é muito alta, muitos fótons podem alcançar o fotocatodo dentro do tempo de resolução do detector, dando origem a pulsos de altura razoável.

Uma discriminação adicional para eventos ocasionados em um único fototubo se consegue com a utilização de duas fotomultiplicadoras funcionando em coincidência. O sistema de análise computa a contagem somente quando são produzidos pulsos simultaneamente em ambos fototubos, o que significa que somente eventos que originam dois ou mais fótons podem ser contados.

#### 4 - Ruído do fototubo

O fotocatodo é uma camada extremamente fina de material sensível à luz que normalmente contém césio ou antimônio. Como estes materiais têm uma função de trabalho baixa, a energia necessária para liberar um elétron é relativamente pequena. Desta forma, além da luz visível, também o calor pode ocasionar a emissão de elétrons, dando origem ao efeito conhecido como emissão termoiônica. Um fototubo de duas polegadas de diâmetro, no escuro, pode emitir da ordem de  $10^5$  elétrons por segundo à temperatura normal. Pode-se reduzir este efeito por um fator 2 por cada  $13^\circ\text{C}$  esfriando o sistema<sup>[26]</sup>.

Pode existir também a emissão termoiônica nos dinodos, mas o fator de multiplicação para este tipo de eventos é pequeno de forma que a altura dos pulsos formados não supera o valor do discriminador inferior, não sendo, portanto, contados.

A emissão termoiônica no catodo resulta principalmente em pulsos ocasionados por um único elétron mas pulsos maiores podem aparecer por bombardeio do catodo por íons positivos, produzidos por ionização de gás residual no fototubo. Estes íons positivos podem arrancar vários elétrons secundários do catodo dando origem a pulsos de maior altura que podem ser contados caso não se tenha um sistema de coincidência.

Outra fonte de ruído no tubo fotomultiplicador são os fótons produzidos na recombinação de íons.

Com dois tubos trabalhando em coincidência, qualquer pulso de ruído originado em um dos tubos não será contado a menos que estatisticamente dois pulsos diferentes sejam produzidos, um em cada fotomultiplicador, dentro do tempo de resolução do circuito.

Se devem ser contados pulso pequenos será necessário considerar que em certos tipos de catodos o ruído termoiônico é o maior componente da radiação de fundo quando se trabalha a temperatura ambiente. A decisão de quando um determinado sistema pode ser utilizado a temperatura ambiente deve estar baseada no nível de atividade das amostras, na energia da radiação medida, na possibilidade de existência de reações quimioluminescentes e na concentração de oxigênio.

### *2.3.6 - Eficiência de contagem*

A relação entre a taxa líquida de contagens (taxa de contagem da amostra menos taxa de contagem da radiação de fundo) e a taxa de desintegração real da amostra é dependente de todas as variáveis que afetam a altura dos pulsos, já que as perdas no sistema são acumulativas e todo pulso que sofrer degradações sucessivas na sua energia não será contado. Algumas destas variáveis são dependentes do sistema de contagem e outras seguem as leis das flutuações estatísticas. Se todas as partículas primárias tem a mesma energia, a altura do pulso deve mostrar uma distribuição estatística com relação a um valor médio.

As variáveis mais importantes que afetam a altura de pulso são:

- 1 - Fração da energia da partícula primária absorvida na solução cintiladora:

Este processo depende da relação volume-superfície da amostra, que é alta nos recipientes normais de medição de 20ml. O alcance de partículas betas de baixa energia é pequeno comparado às medidas dos recipientes de medição.

2 - Eficiência de conversão da solução cintiladora:

Uma boa solução cintiladora converte aproximadamente 5% da energia da partícula beta em luz. A eficiência é função da concentração do cintilador.

3 - Reabsorção da luz pela solução cintiladora:

Os solventes utilizados são transparentes na região do visível e no ultravioleta próximo. Os cintiladores devem ter o espectro de absorção suficientemente deslocado do espectro de emissão para se ter uma transmissão aceitável. Construindo-se um gráfico da altura de pulso em função da concentração do cintilador, a curva primeiro aumenta com o incremento na concentração; depois, se o cintilador é suficientemente solúvel, estabiliza-se quando a transferência de energia do solvente para o soluto não está mais limitada pelo número de moléculas do cintilador acessíveis. Um aumento posterior da concentração resulta numa diminuição da altura do pulso, devido à auto-absorção da luz. Existem também outros tipos de auto-supressão ("self-quenching") que não são totalmente compreendidos<sup>[17]</sup>.

4 - Coincidência de espectros entre cintilador e fototubo:

Se o máximo de emissão do soluto primário (cintilador) acontece a um comprimento de onda menor que a região de maior eficiência para fótons do fototubo, pode ser utilizado um soluto secundário com a finalidade de deslocar o máximo do espectro, ou seja, deslocar o comprimento de onda.

5 - Supressão ("quenching") dos fótons emitidos pela própria amostra radioativa:

Este efeito pode acontecer por supressão de cor (absorção na região visível por substâncias coloridas presentes na amostra) ou por uma variedade de mecanismos que interferem de alguma maneira com o processo de cintilação.

As moléculas de cintilador podem perder seu excesso de energia se moléculas estranhas presentes absorvem sua energia de excitação durante o

tempo em que a molécula fica no estado excitado, antes de emitir o fóton de luz. As moléculas do solvente podem perder seu excesso de energia se esta é transferida às moléculas do soluto que não são cintiladoras e que se degradam por outros mecanismos que não emitem luz. Neste sentido, as moléculas do soluto que não são cintiladoras produzem supressão: se não contribuem ao processo de cintilação, então atuam como diluentes do sistema de cintilação.

Dois dos mais importantes supressores são o oxigênio (dissolvido nas soluções das amostras) e a água. Mesmo sendo possível obter um importante aumento na eficiência removendo o oxigênio gasoso das amostras, na prática, este processo não é utilizado em razão da possibilidade de vazamentos na selagem das amostras.

Em materiais biológicos são encontrados muitos tipos de supressores e, na contagem de amostras de composição química heterogênea, deve ser feita uma série de ensaios para verificar os tipos de supressão presentes em cada amostra.

#### 6 - Temperatura da amostra:

Tem sido observado que ocorre um pequeno aumento na taxa de contagem quando existe uma diminuição na temperatura, da ordem de décimos por cento por grau. Isto pode ser ocasionado por mecanismos de transferência de energia, supressão e deslocamento do espectro.

#### 7 - Volume da amostra:

Quando a taxa de contagem não é proporcional ao volume de uma solução de concentração de atividade fixa, provavelmente trata-se de um efeito geométrico na ótica do sistema. Para muitos tipos de amostras, no entanto, a eficiência é relativamente independente do volume. Quando a taxa de contagem não é constante com a variação de um volume que contenha sempre a mesma atividade, este comportamento pode ser causado por efeitos óticos ou concentração de agentes de supressão.

#### 8 - Eficiência de coleta de luz:

Se não existirem perdas de fótons no sistema, ou seja, se todos os fótons seguirem seu caminho até um dos dois fototubos num sistema em coincidência

e produzirem um pulso, a probabilidade de uma contagem em coincidência (de um evento que produz dois fótons) será de  $1/2$ . Se o evento produz  $n$  fótons a probabilidade será  $2^{1-n}$ . Perdas de contagens por coincidência são apreciáveis só quando existem poucos fótons, como no caso de energia da radiação muito baixa, ou quando a supressão é excessiva<sup>[11]</sup>.

Deve ser evitado que a luz alcance o fototubo depois de múltiplas reflexões nas paredes da câmara de contagem, o que resultaria em perdas de fótons. Os fótons que incidem nas paredes internas do recipiente de medição com um ângulo maior que o crítico serão totalmente refletidos e não escaparão; os que conseguirem, podem ser perdidos na câmara por múltiplas reflexões nas paredes ou na face de entrada da fotomultiplicadora. Para reduzir a absorção na câmara utilizam-se paredes com reflexão difusa de alta reflexibilidade na região espectral de interesse.

Somente os fótons que atingem a face sensível do fototubo, em um ângulo menor que o crítico, podem atravessá-la e ser contados.

#### 9 - Eficiência de conversão do fotocatodo:

Além de ser dependente do comprimento de onda, a eficiência depende da espessura da camada sensível e do ângulo de incidência do fóton, que terá a probabilidade de gerar elétrons em função dessas duas variáveis.

Existe também um pequeno coeficiente de temperatura, que para longitudes de onda na faixa de  $4200\text{Å}$  permite eficiências de 15 a 25%.

#### 10- Amplificação do sinal:

Dependendo da voltagem aplicada ao tubo fotomultiplicador podem ser obtidos fatores de multiplicação de  $10^4$  até  $10^6$ . Geralmente obtém-se uma amplificação posterior utilizando amplificadores fixos ou variáveis.

#### 11- Discriminadores:

A máxima eficiência é obtida quando se escolhe uma janela que inclua todo o espectro de energia emitido pela amostra mas nem sempre esta condição será a

melhor, sendo que, na prática, a janela representará um compromisso entre a necessidade de uma contagem razoável e uma radiação de fundo mínima.

Evidentemente, é necessário que a eficiência de contagem seja constante, ou individualmente determinável, para todas as amostras que devam ser comparadas. Se a eficiência não é calculada pelos fatores mencionados anteriormente, o que não é prático nem preciso, deverá ser feita por comparação da amostra desconhecida com outra de atividade conhecida que tenha sido medida nas mesmas condições.

Se todas as amostras têm volume e composição química uniformes ou se não existem efeitos de diluição ou supressão ao modificar a composição, as contagens serão proporcionais à atividade específica e as atividades absolutas poderão ser determinadas preparando uma amostra similar, de atividade conhecida.

A situação mais freqüentemente encontrada é aquela em que a composição varia só com a concentração do componente que contém o radioisótopo. Como a eficiência depende da concentração, deve ser utilizada uma curva de calibração, supondo que a concentração é conhecida independentemente.

Freqüentemente, a composição da amostra não é bem conhecida e a eficiência de contagem deve ser determinada individualmente. Uma forma de conseguir isto é adicionando à amostra uma quantidade conhecida do mesmo isótopo, de forma que não adicione efeito de supressão, e voltar a medir; este método é conhecido como "padrão interno".

A atividade adicionada geralmente é maior que a da amostra, para dar uma boa estatística de contagem, mas não muito maior como para que a soma das atividades possa introduzir erros de perda por coincidência. A eficiência (E) é determinada segundo:

$$E = (AP - A) / I \quad (2.12)$$

onde: AP = contagem da amostra mais padrão interno;

A = contagem da amostra;

I = atividade de padrão interno agregada.

A atividade líquida da amostra é:

$$A' = (A - BG) / E \quad (2.13)$$

onde: BG = contagem da radiação de fundo.

O método só é válido quando o agregado não modifica a eficiência de contagem da amostra, o que obriga a adicionar volumes da solução de padrão interno muito pequenos, para não diluir a amostra significativamente. Ao mesmo tempo, este volume não deve ser tão pequeno, de modo a introduzir erros devidos à precisão com que se mede, sendo que esta será a medida da atividade agregada.

Uma condição básica que deve ser cumprida é que o padrão interno deve estar na mesma fase química que o radionuclídeo de interesse. Isto significa que, em amostras que são soluções homogêneas, o padrão interno deve ser solúvel e não adsorvido pelas paredes do recipiente de medição, o que pode acontecer com soluções de alta atividade específica ou íons inorgânicos. Em amostras heterogêneas a distribuição nas diversas fases deve ser a mesma para a amostra e para o padrão interno.

Outro método para determinar a eficiência de contagem é o da diluição. Nele se preparam três ou mais diluições da amostra radioativa na solução de contagem que, depois de medidas, são representadas num gráfico como logaritmo da taxa de contagem por mililitro em função da concentração da amostra. A curva é posteriormente extrapolada para o caso de diluição infinita, onde não existe supressão.

Este método é adequado quando a concentração de atividade da amostra é suficientemente alta, para que sejam obtidas taxas de contagem estatisticamente aceitáveis depois das diluições necessárias.

Existem dois métodos puramente instrumentais de se obter a eficiência de contagem que não requerem a preparação de diversas amostras: o método da relação de canais e o do padrão externo. No primeiro deles, a eficiência é determinada por uma comparação indireta da amostra desconhecida com uma série de amostras padrão, do mesmo isótopo, através de uma curva de calibração. A curva é construída com padrões de atividade conhecida variando-se o grau de supressão dentro da faixa de concentração esperada para a amostra.

No método da relação de canais são escolhidos dois canais de forma que, juntos, abranjam a maior parte da distribuição de altura de pulsos da amostra com menor supressão: quando a supressão aumenta, a relação de contagens nos dois canais muda com a eficiência de contagem. A curva é construída representando-se graficamente as eficiências em função da relação de canais e, uma vez medida a amostra, sua relação de canais é utilizada para definir a eficiência<sup>[11]</sup>.

O método do padrão externo utiliza o fato de que a solução cintiladora detecta fótons gama provenientes de uma fonte próxima através do efeito Compton, que gera elétrons que são detectados da mesma forma que a radiação beta, com uma eficiência dependente do grau de supressão.

A taxa de contagem da fonte gama depende de vários fatores: supressão, posição exata com relação ao recipiente de medição, espessura do recipiente, volume da amostra e densidade eletrônica do material da amostra. Para minimizar os erros e o número de curvas de calibração que seriam necessárias, a taxa de contagem absoluta da fonte gama pode ser substituída pela relação de canais quando da construção da curva.

Para utilizar o método de padrão externo são necessárias somente duas medições: com e sem exposição à fonte gama. A principal vantagem com relação ao método da relação de canais é a redução do tempo de contagem para amostras de baixa atividade.

### *2.3.7 - Equipamento utilizado*

Como foi indicado no item 1.2, o método proposto para determinar o vazamento de água nas placas de refrigeração do alto forno inclui a medição de concentração de trítio em amostras de água condensada dos gases de exaustão. Estas medições foram realizadas com o método dos detectores líquidos de cintilação.

O espectrômetro utilizado para esta finalidade foi um LKB-WALLAC, modelo 81.000

Este aparelho conta com três analisadores de altura de pulso, com discriminadores totalmente independentes para cada um deles, o que permite analisar três setores do espectro de energias beta em cada medição.

Para diminuir a importância relativa da radiação de fundo nas medições, o equipamento possui dois tubos fotomultiplicadores e um circuito de coincidência. A amostra é automaticamente colocada em uma posição central, estando os dois fototubos colocados frente a frente (Figura 2.3), de forma que somente serão contados aqueles eventos que produzam pulsos simultaneamente em ambos fototubos, ou seja, dentro de um intervalo de  $3$  a  $8 \times 10^{-8}$  segundos.

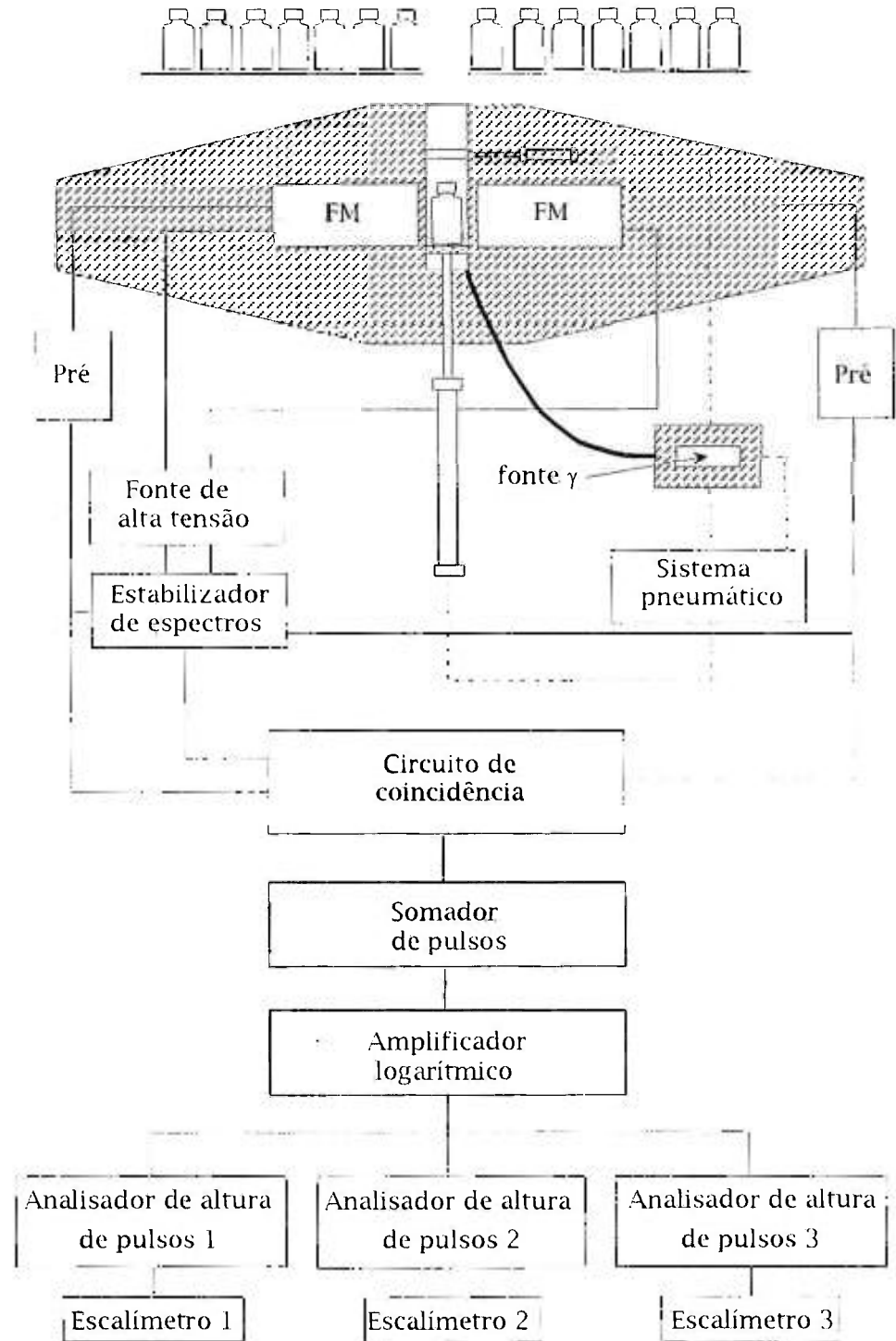
O sinal eletrônico, proporcional à energia dos fótons, é amplificado e conformado por um amplificador logarítmico na escala de  $1$  a  $2000$  keV. O sistema permite trabalhar da temperatura ambiente até  $-10^{\circ}\text{C}$  e seu trocador automático tem capacidade para  $200$  amostras.

O aparelho dispõe também de uma fonte gama para a correção da eficiência de contagem nos casos de existência de efeitos de supressão. A fonte gama é colocada junto ao recipiente de medição contendo a amostra, mediante um sistema pneumático. Os fótons gama, ao interagirem com a amostra, liberam elétrons Compton que, por sua vez, produzem fótons de luz pelo mesmo mecanismo que a radiação beta de amostra, mas, sendo a energia destes elétrons superior, seu espectro aparece em uma região diferente.

Como o sistema não pode distinguir a origem dos fótons, os produzidos pela radiação da fonte externa sofrerão os mesmos efeitos daqueles originados pelo decaimento beta da amostra. Se forem escolhidos dois canais de medição na região em que aparece o espectro da fonte, a relação de contagens entre eles será função do grau de extinção, que também se aplica à amostra. Este método de determinação do grau de extinção é conhecido como curva de extinção ou de padronização.

Como solução cintiladora utilizou-se o Insta-Gel (marca registrada da Packard Instruments Company, Inc.) que é um líquido cintilador universal, pronto para uso, que contém cintilador, agente gelificante e solvente, para contagens eficientes de amostras de água ou aquosas.

Frente aos sistemas preparados nos laboratórios, normalmente misturas de PPO (2,5-difeniloxazol), POPOP [1,4-bis-2-(5-feniloxazol)]-benzeno, naftaleno e 1,4-dioxano, que podem conter um máximo de  $20\%$  em peso de água, a solução utilizada tem a vantagem de incorporar grandes volumes de água mantendo uma alta

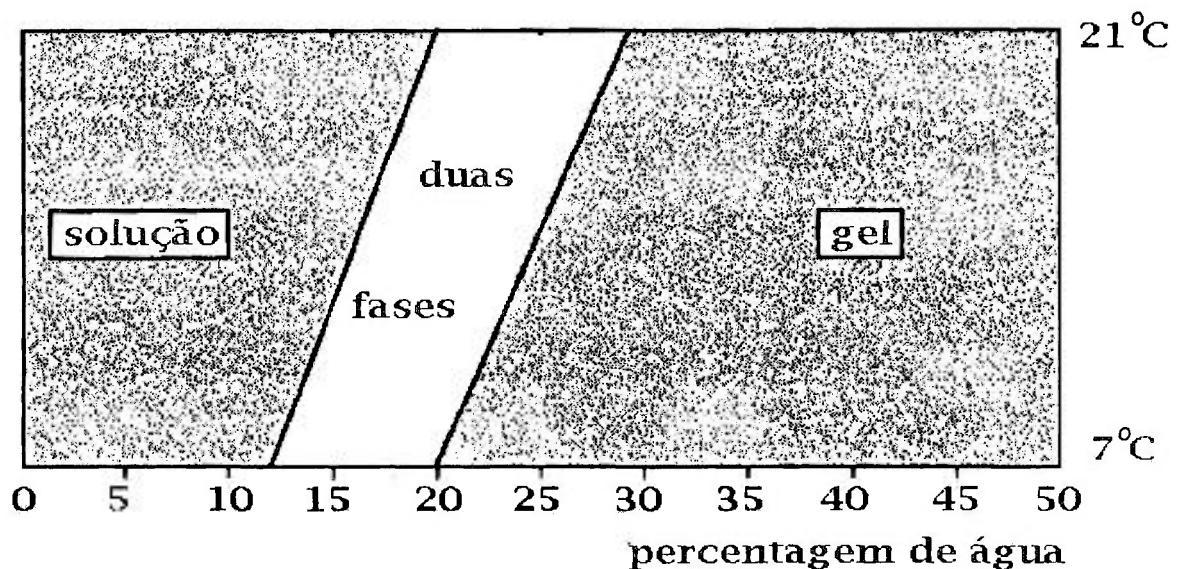


**Figura 2.3 - Diagrama do espectrômetro**

eficiência de contagem, já que possui uma alta eficiência de transferência da energia da radiação para o cintilador.

A preparação de amostras de água é feita simplesmente misturando-se água e Insta-Gel com agitação vigorosa. Para alcançar a necessária reprodutibilidade, requer-se uma distribuição homogênea da atividade na amostra, o que nem sempre é conseguido com soluções cintiladoras contendo álcool ou dioxano porque causam precipitação quando agregadas a amostras aquosas. O Insta-Gel dá uma distribuição uniforme da atividade em praticamente toda a faixa de mistura até 50% de água.

O diagrama da Figura 2.4 mostra a percentagem de água que pode ser utilizada para ótimo resultado, sob temperatura ambiente ( $18^{\circ}\text{C}$  -  $27^{\circ}\text{C}$ ) e temperaturas inferiores artificialmente controladas ( $5^{\circ}\text{C}$  -  $14^{\circ}\text{C}$ )<sup>[37]</sup>.



**Figura 2.4 - Percentagem de água no Insta-Gel**

Indica-se também a zona de discontinuidade que representa um área de separação de fases que deve ser evitada.

O gel formado com soluções aquosas é estável na temperatura ambiente, sendo que a estabilidade aumenta em temperaturas de  $15^{\circ}\text{C}$  ou menores, alcançando o máximo na faixa de  $5^{\circ}\text{C}$  a  $10^{\circ}\text{C}$ <sup>[41]</sup>.

As amostras foram preparadas misturando-se 10ml de Insta-Gel e 10ml de água, com agitação intensa. As medições começaram, no mínimo, 30min depois da preparação, para permitir a estabilização com a temperatura de trabalho, que foi de 10°C, e a extinção dos efeitos de fosforescência.

#### **2.4 - DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DO GÁS DE SAÍDA DO ALTO FORNO**

A desumidificação de um gás é o processo da condensação do vapor de água nele contido e depende da transferência do vapor de água da massa principal do gás à camada de vapor em contato com o líquido, sob efeito de um gradiente de pressão parcial.

Simultaneamente, produzem-se variações da temperatura do líquido e do gás em virtude da troca de calor entre os fluídos e ao calor latente retirado do vapor.

Na desumidificação por condensação, a superfície do líquido está mais fria que o ponto de orvalho da mistura de gás e vapor e, conseqüentemente, tanto o calor latente do vapor transferido como o calor sensível transmitido têm que ser absorvidos pela superfície da água.

A velocidade ou fluxo com que se transfere o vapor depende da diferença média das pressões parciais do vapor no gás e no líquido, enquanto que o fluxo de transmissão de calor sensível do gás depende da diferença média de temperatura entre o gás e o líquido.

Sendo a umidade absoluta (H) a massa de vapor de água contida em uma massa definida de ar seco (kg/kg; pound/lb; etc) e supondo comportamento de gases ideais, tem-se:

$$H = \frac{M_w p}{[M_a (P - p)]} \quad (2.14)$$

onde:  $M_w$  = peso molecular da água (g);

$M_a$  = peso molecular do ar (g);

$p$  = pressão parcial do vapor da água (atm);

$P$  = pressão total (atm).

Quando  $p$ , a uma dada temperatura, é igual à pressão de vapor da água,  $p_s$ , à mesma temperatura, o ar está saturado e a umidade absoluta é chamada de umidade de saturação ( $H_s$ ).

Nos higrômetros que utilizam termômetros de bulbo úmido e bulbo seco, o ponto de orvalho é a temperatura na qual uma mistura dada de vapor da água e ar está saturada de vapor da água e a temperatura de bulbo úmido é a temperatura do equilíbrio dinâmico alcançada por uma superfície de água, quando a velocidade de transferência de calor para a superfície, por convecção, é igual à velocidade de transferência de massa que deixa a superfície.

A temperatura do bulbo úmido pode ser medida fazendo-se passar ar sobre o bulbo de um termômetro coberto por um tecido saturado de água. Se não se entrega nem se retira do tecido outro calor que não o de evaporação adiabática, o tecido e o bulbo atingem rapidamente a temperatura do bulbo úmido que, para o sistema ar-água, é igual à temperatura de saturação adiabática (como pode demonstrar-se experimentalmente).

No equilíbrio, quando praticamente não existe mudança na temperatura do bulbo seco, o balanço de calor na superfície é<sup>[38]</sup>:

$$k_g \lambda (p_s - p) = h_c (t - t_w) \quad (2.15)$$

onde:  $k_g$  = coeficiente de transferência de massa [lb / (h ft<sup>2</sup> atm)];  
 $\lambda$  = calor latente de vaporização (Btu / lb);  
 $p_s$  = pressão de vapor da água à temperatura do bulbo úmido (atm);  
 $p$  = pressão de vapor parcial da água no entorno (atm);  
 $h_c$  = coeficiente de transferência de calor [Btu / (h ft<sup>2</sup> °F)];  
 $t$  = temperatura da mistura ou temperatura do bulbo seco (°F);  
 $t_w$  = temperatura do bulbo úmido (°F).

Sob condições normais, a pressão parcial e a pressão de vapor são pequenas em relação à pressão total e a equação (2.15) pode ser escrita em termos das diferenças de umidade:

$$H_s - H = \frac{h_c}{\lambda k'} (t - t_w) \quad (2.16)$$

onde:  $k' = (M_a/M_w) k_g = 1,6 k_g$

Com base nestas definições foram construídas as chamadas curvas psicrométricas (Figura 2.5) que, entre outros dados, permitem obter o teor de umidade de um gás, com base nas temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido.

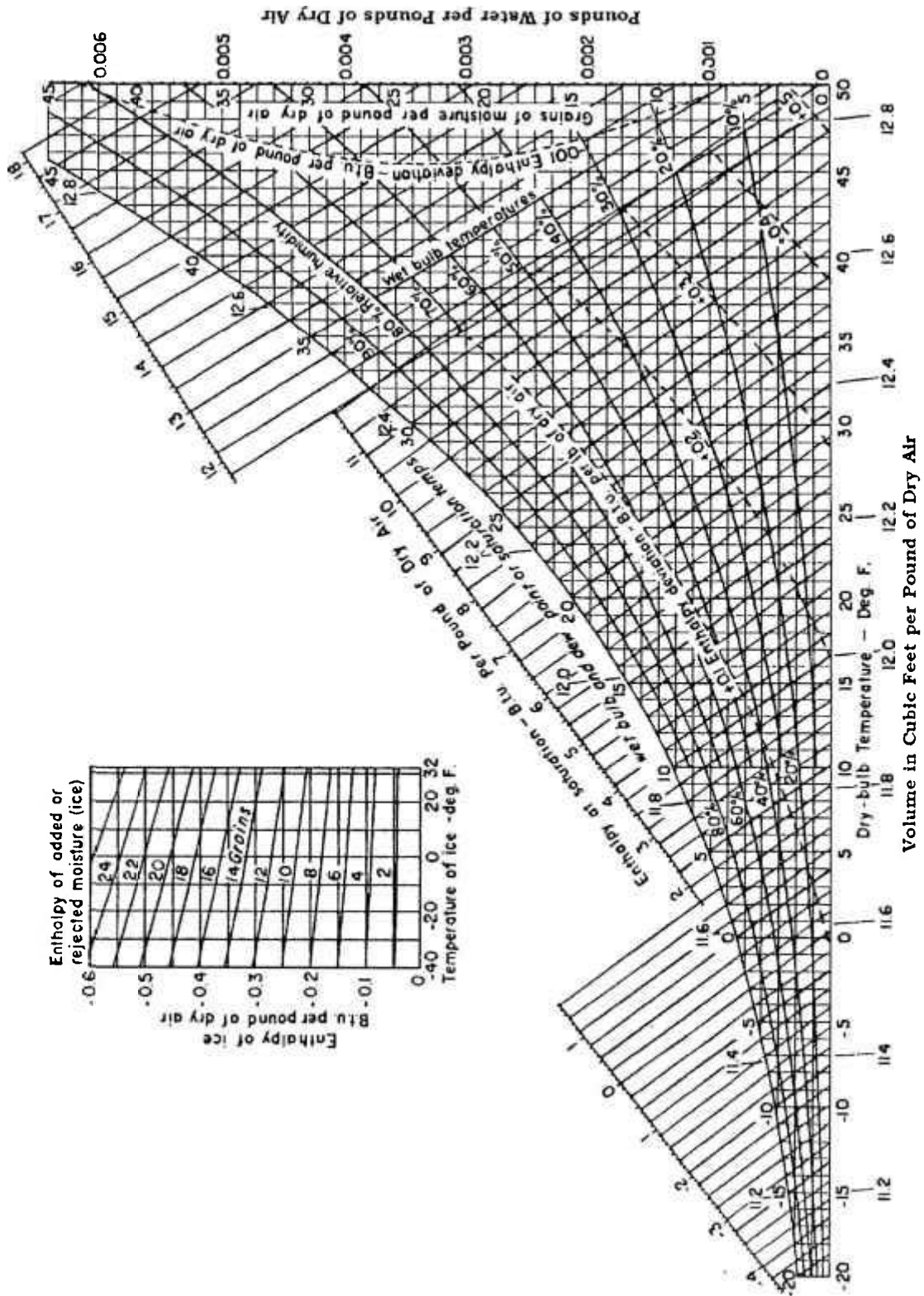


Figura 2.5 - Curva psicrométrica

## CAPÍTULO 3 - RESULTADOS

### 3.0 - ESTUDO DOS PARÂMETROS

A Figura 3.1 mostra um diagrama esquemático do processo que se desenvolve no alto forno.

Utilizando a nomenclatura indicada nesse esquema, a taxa de injeção da atividade de trítio no sistema de arrefecimento será:

$$A' = q_0 C_0 \quad (3.1)$$

onde:  $A'$  = atividade injetada por unidade de tempo (Bq/min);  
 $q_0$  = vazão de injeção do traçador (ml/min);  
 $C_0$  = concentração de atividade do traçador na água injetada (Bq/ml).

que, ao se misturar com a água do sistema modificará o valor da concentração de atividade, de forma que:

$$A' = (Q_0 + q_0) C \quad (3.2)$$

onde:  $Q_0$  = vazão da água no sistema de arrefecimento (ml/min);  
 $C$  = concentração de atividade da solução no sistema de arrefecimento (Bq/ml).

Das equações (3.1) e (3.2), levando-se em consideração que a atividade que entra por unidade de tempo deve ser igual à que sai no mesmo intervalo, calcula-se a concentração de atividade da diluição resultante, que poderá ser escrita como:

$$C = \frac{q_0 C_0}{Q_0 + q_0} \quad (3.3)$$

Esta equação pode ser simplificada, considerando-se o fato de que o valor de  $q_0$  é desprezível frente a  $Q_0$ , tomando então a forma:

$$C \cong \frac{q_0 C_0}{Q_0} = r_0 C_0 \quad (3.4)$$

onde:  $r_0 = \frac{q_0}{Q_0}$  (3.5)

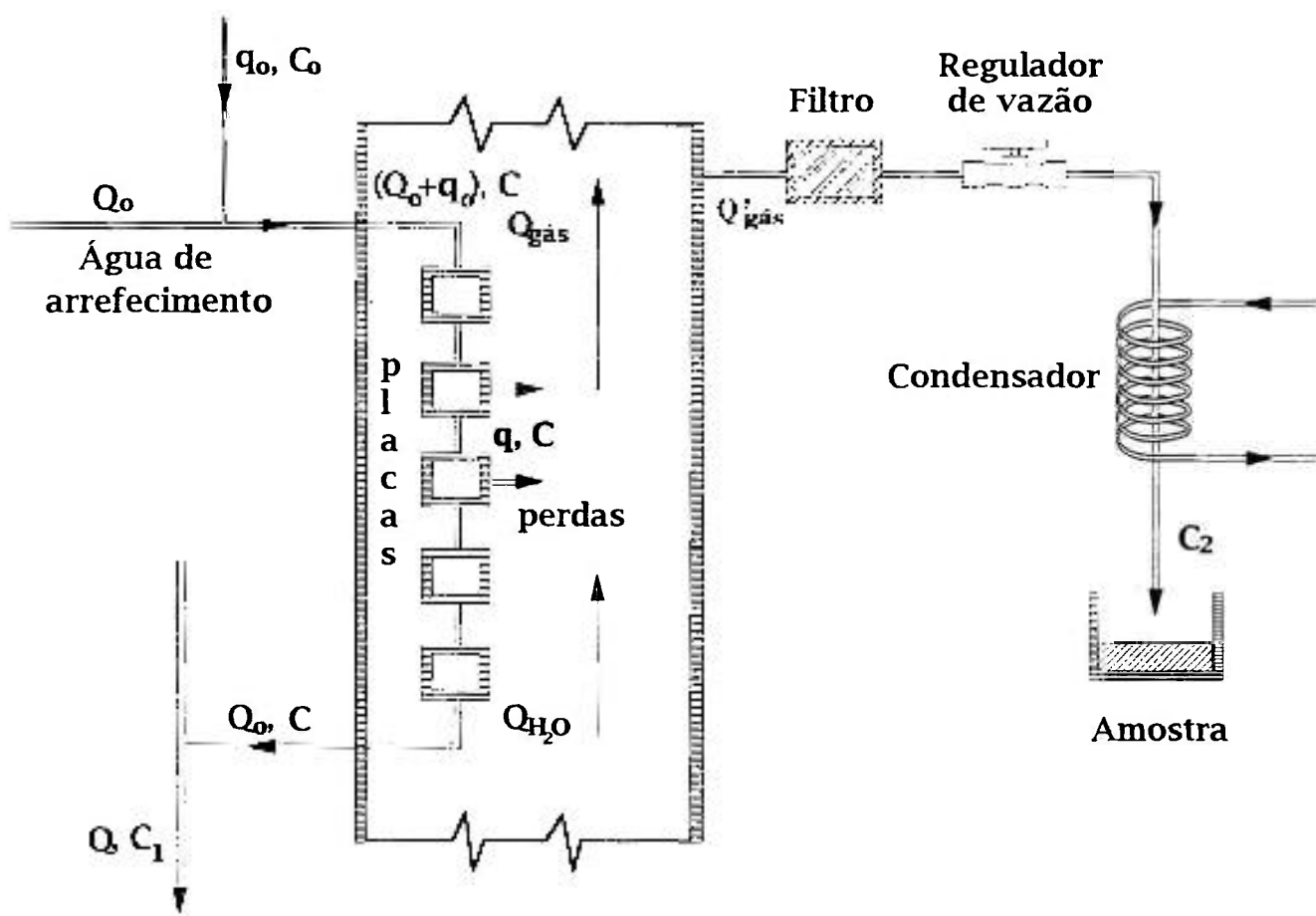


Figura 3.1 - Nomenclatura adotada para o estudo do processo

A atividade total que vaza para o forno num período de tempo  $\Delta t$  será:

$$A = q C \Delta t = q r_o C_o \Delta t \quad (3.6)$$

onde:  $q$  = vazão de perda da placa (ml/min)

e esta atividade se mistura com um volume

$$V = Q_{H_2O} \Delta t \quad (3.7)$$

onde:  $Q_{H_2O}$  = vazão de vapor de água no alto forno (ml/min)

A concentração de atividade no vapor de água na saída do alto forno será, então:

$$C_2 = \frac{A}{V} = \frac{q r_o C_o \Delta t}{Q_{H_2O} \Delta t} = r_o r C_o \quad (3.8)$$

onde:  $r = \frac{q}{Q_{H_2O}}$  (3.9)

Das equações (3.5) e (3.8) deduz-se que a expressão que permite calcular a vazão de perda das placas será:

$$q = \frac{C_2 Q_{H_2O} Q_o}{q_o C_o} = \frac{C_2 Q_{H_2O}}{r_o C_o} \quad (3.10)$$

### 3.1 - VALOR MÍNIMO DA RELAÇÃO DE VAZÕES

O mínimo valor que a relação de vazões  $r$  deve ter pode ser calculado com base nas premissas que seguem.

Por causa do erro estatístico das medições, a contagem líquida mínima de trítio que pode ser acumulada,  $A_m$ , considerando medições de 20 minutos, é a correspondente a 600 desintegrações, ou seja, supondo 50% de eficiência do detector:

$$A_m = \frac{600d}{20\text{min } 0,5} = 60\text{dpm}$$

e como o volume de água  $V_a$  medido é de 10 ml em virtude da capacidade do recipiente de medição, a concentração mínima,  $C_{2min}$ , é:

$$C_{2min} = \frac{A_m}{V_a} = \frac{60dpm}{10ml} = 6dpm / cm^3 = 0,1dps / cm^3$$

que em unidades de concentração de atividade corresponde a:

$$C_{2min} = 0,1Bq / cm^3 = 3,7 \cdot 10^{-3} pCi / cm^3$$

o que, pelas equações (3.9) e (3.10), nos conduz a:

$$r_{min} = \frac{q_{min}}{Q_{H_2O}} = \frac{C_{2min}}{r_o C_o}$$

Como sabemos que a concentração de atividade na solução injetada no anel de alimentação das placas do alto forno é  $C_o$  (Bq/ml), a atividade  $A_o$  (Bq) contida no volume  $V_o$  (ml) injetado durante o intervalo  $\Delta t$  (s), deverá satisfazer a relação:

$$C_o = \frac{A_o}{V_o} = \frac{A_o}{q_o \Delta t}$$

também expressa, com base na equação (3.5), por:

$$C_o = \frac{A_o}{r_o Q_o \Delta t}$$

chegando-se, por substituição de  $C_o$  pelo valor dado na equação (3.8), a:

$$r_{min} = \frac{C_{2min} Q_o \Delta t}{A_o}$$

Se, por exemplo, fossem adotados os valores práticos seguintes:

$$A_o = 4 Ci = 1,48 \cdot 10^{11} Bq \text{ (atividade total injetada no ensaio)}$$

$$\Delta t = 180min \text{ (duração da injeção)}$$

$$Q_o = 8 \cdot 10^6 cm^3/min \text{ (vazão de água no anel)}$$

então:

$$r_{\min} = \frac{0,1\text{Bq/cm}^3 \cdot 8 \cdot 10^6 \text{cm}^3 / \text{min} \cdot 180\text{min}}{1,48 \cdot 10^{11} \text{Bq}} = 9,73 \cdot 10^{-4}$$

Isto significa que a mínima vazão de perda de água dentro do alto forno, supondo uma vazão de vapor de água da ordem de  $6 \cdot 10^3$  l/h, deverá ser:

$$q_{\min} = r_{\min} Q_{\text{H}_2\text{O}} = 9,73 \cdot 10^{-4} \cdot 6 \cdot 10^6 \text{cm}^3 / \text{h} = 5,8 \text{ l/h}$$

### 3.2 - PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

Para saber se, em razão das limitações estabelecidas nas normas de proteção radiológica, é possível utilizar a quantidade de trítio necessária para alcançar a sensibilidade desejada, deve ser efetuado o seguinte cálculo:

$$C = r_o C_o = \frac{C_{2\min} r_o C_o}{C_{2\min}} = \frac{C_{2\min}}{r_{\min}}$$

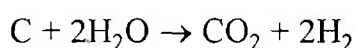
$$= \frac{0,1\text{Bq/cm}^3}{9,73 \cdot 10^{-4}} = 1,03 \cdot 10^2 \text{Bq/cm}^3$$

Considerando que a água que circula pelo anel de arrefecimento é misturada a uma vazão da ordem de  $10^3 \text{m}^3/\text{h}$  provenientes de outros setores da empresa, a concentração  $C_1$  de trítio no efluente será:

$$C_1 = \frac{Q_o C}{Q} = \frac{8 \cdot 10^6 \text{cm}^3 / \text{min} \cdot 1,03 \cdot 10^2 \text{Bq/cm}^3 \cdot 60 \text{min/h}}{10^3 \text{m}^3 / \text{h} \cdot 10^6 \text{cm}^3 / \text{m}^3} = 49 \text{Bq/cm}^3$$

Como o limite aceito<sup>[10]</sup> para trítio em água é de  $1,11 \cdot 10^3 \text{Bq/cm}^3$  ou  $3 \cdot 10^{-2} \mu\text{Ci/cm}^3$ , pode ser utilizada a atividade indicada inicialmente para cada ensaio.

Na região do alto forno onde está localizado o anel superior de alimentação das placas de refrigeração, as condições de operação são tais que, em virtude da reações entre o carbono e o vapor de água, pode existir até um máximo de 4% de decomposição da água com liberação de hidrogênio gasoso<sup>[6]</sup>.



A quantidade de trítio gasoso liberado por este processo deverá ser inferior aos limites máximos autorizados para descarga na atmosfera<sup>[10]</sup>, que é de  $7,4 \cdot 10^3 \text{Bq/m}^3$ .

Para saber se o ensaio será conduzido dentro das normas de proteção radiológica, pode ser feito um cálculo preliminar da possível liberação de trítio gasoso. Seja:

$$A_T = q C \quad (3.11)$$

onde:  $A_T$  = taxa de liberação do trítio no alto forno (Bq/min);

$q$  = vazão de fuga na placa (ml/min);

$C$  = concentração do traçador na água de refrigeração (Bq/ml).

Substituindo, de acordo com a equação (3.3):

$$A_T = q \frac{q_0 C_0}{Q_0} = 35 \text{ l/min} \frac{20 \text{ ml/min} \cdot 65 \text{ MBq/ml}}{5500 \text{ l/min}} = 8,27 \text{ MBq/min}$$

onde:  $q_0$  = vazão de injeção do traçador (ml/min);

$C_0$  = concentração de atividade do traçador na água injetada (Bq/ml).

Considerando que somente 4% podem ser liberados como trítio gasoso e que esta quantidade será diluída pelos gases do alto forno, escolhendo os parâmetros menos favoráveis:

$$T = \frac{0,04 A_T}{Q_{\text{gás}}} = \frac{0,04 \cdot 8,27 \text{ MBq/min}}{2500 \text{ Nm}^3/\text{min}} = 132 \text{ Bq/m}^3 \quad (3.12)$$

Por ser este valor inferior ao permitido, não existe problema em utilizar o traçador.

Finalmente, a diluição sofrida pelo  $^{82}\text{Br}$  utilizado na determinação da vazão de água no anel de refrigeração,  $Q_0$ , considerando as condições menos favoráveis, é:

$$C_0 = \frac{A}{V} = \frac{A}{Q \Delta t} = \frac{1,3 \cdot 10^9 \text{ Bq}}{7,36 \cdot 10^6 \text{ ml/min} \cdot 0,5 \text{ min}} = 353,2 \text{ Bq/ml}$$

A diluição posterior com uma vazão da ordem de  $10^3 \text{m}^3/\text{h}$  abaixa a concentração para um valor menor que o permitido ( $296 \text{Bq/ml}$ )<sup>[10]</sup>.

### 3.3 - CÁLCULO DO ERRO

A equação que determina o valor do vazamento é:

$$q = \frac{C_2 Q_{\text{H}_2\text{O}}}{r_0 C_0} = \frac{C_2 Q_{\text{H}_2\text{O}} Q_0}{q_0 C_0} \quad (3.13)$$

e a expressão do erro relativo deste valor será:

$$\frac{\sigma^2_q}{q^2} = \frac{\sigma^2_{C_2}}{C_2^2} + \frac{\sigma^2_{Q_{\text{H}_2\text{O}}}}{Q_{\text{H}_2\text{O}}^2} + \frac{\sigma^2_{Q_0}}{Q_0^2} + \frac{\sigma^2_{q_0}}{q_0^2} + \frac{\sigma^2_{C_0}}{C_0^2} \quad (3.14)$$

O primeiro termo desta soma pode ser escrito como:

$$\frac{\sigma^2_{C_2}}{C_2^2} = \frac{\sigma^2_n}{n^2} \quad (3.15)$$

considerando somente o erro estatístico de medição, por ser muito maior que os demais erros possíveis (por exemplo medição de volume, perdas, etc). Como:

$$n = \frac{N}{t} + \frac{F}{t'} \quad (3.16)$$

onde:  $n$  = taxa de contagens líquida (c/s);

$N$  = contagens totais (c);

$F$  = contagens da radiação de fundo (c);

$t$  e  $t'$  = tempo de medição (s).

e desconsiderando o erro na medição do tempo e supondo  $t = t'$ :

$$\sigma^2_n = \sigma^2_N + \sigma^2_F = \frac{N}{t^2} + \frac{F}{t^2} = \frac{N + F}{t^2} \quad (3.17)$$

De (3.16) e (3.17) chega-se a:

$$\frac{\sigma^2_n}{n^2} = \frac{N + F}{(N - F)^2} \quad (3.18)$$

O valor de  $Q_{\text{H}_2\text{O}}$  do segundo termo da equação (3.13) calcula-se a partir de:

$$Q_{H_2O} = Q_{gás} U = Q_{gás} (C_{H_2O} + U') \quad (3.19)$$

onde:  $U$  = umidade do gás ( $g/m^3$ );

$U'$  = umidade do gás depois do amostrador ( $g/m^3$ );

$C_{H_2O}$  = condensação de água no amostrador ( $g/m^3$ ).

o erro será, então:

$$\frac{\sigma_{Q_{H_2O}}^2}{Q_{H_2O}^2} = \frac{\sigma_{Q_{gás}}^2}{Q_{gás}^2} + \frac{\sigma_{(C_{H_2O} + U')}^2}{(C_{H_2O} + U')^2} \quad (3.20)$$

O numerador do segundo fator da soma pode ser escrito como:

$$\sigma_{(C_{H_2O} + U')}^2 = \sigma_{C_{H_2O}}^2 + \sigma_V^2 = \sigma_{\left(\frac{V}{t q'}\right)}^2 + \sigma_U^2 \quad (3.21)$$

onde  $V$  = volume medido (ml);

$q'$  = vazão de gás do amostrador ( $m^3/min$ ).

O erro relativo do primeiro termo da equação (3.21) calcula-se como:

$$\frac{\sigma_{\left(\frac{V}{t q'}\right)}^2}{(V / t q')^2} = \frac{\sigma_V^2}{V^2} + \frac{\sigma_t^2}{t^2} + \frac{\sigma_{q'}^2}{q'^2} \quad (3.22)$$

O erro na medição do tempo pode ser considerado desprezível, assim:

$$\sigma_{C_{H_2O}}^2 = \left( \frac{\sigma_V^2}{V^2} + \frac{\sigma_{q'}^2}{q'^2} \right) \left( \frac{V}{t q'} \right)^2 \quad (3.23)$$

o que de (3.19) e (3.23) conduz a:

$$\sigma_U^2 = \left( \frac{\sigma_V^2}{V^2} + \frac{\sigma_{q'}^2}{q'^2} \right) \left( \frac{V}{t q'} \right)^2 + \sigma_U^2 \quad (3.24)$$

De (3.20) e (3.24) pode-se escrever:

$$\frac{\sigma_{Q_{H_2O}}^2}{Q_{H_2O}^2} = \frac{\sigma_{C_{gás}}^2}{Q_{gás}^2} + \left[ \frac{\left( \frac{\sigma_V^2}{V^2} + \frac{\sigma_q^2}{q'^2} \right) \left( \frac{V}{t q'} \right)^2 + \sigma_{U'}^2}{\left( \frac{V}{t q'} + U' \right)^2} \right] \quad (3.25)$$

O terceiro termo da equação (3.14) pode ser calculado considerando que:

$$Q_o = \frac{S d}{\Delta t} \quad (3.26)$$

onde: S = seção da tubulação (m<sup>2</sup>);  
d = distância entre detectores (m);  
Δt = tempo medido entre picos (s).

O erro relativo será, então:

$$\frac{\sigma_{Q_o}^2}{Q_o^2} = \frac{\sigma_S^2}{S^2} + \frac{\sigma_d^2}{d^2} + \frac{\sigma_{\Delta t}^2}{\Delta t^2} \quad (3.27)$$

Também neste caso o erro na determinação do tempo pode ser considerado bastante menor que os outros; por conseguinte:

$$\frac{\sigma_{Q_o}^2}{Q_o^2} = \frac{\sigma_S^2}{S^2} + \frac{\sigma_d^2}{d^2} \quad (3.28)$$

Para calcular o termo seguinte sabe-se que:

$$q_o = \frac{V'}{\Delta t} \quad (3.29)$$

onde: V' = volume de solução (m<sup>3</sup>);  
Δt = tempo de passagem (s).

a expressão do erro será:

$$\frac{\sigma_{q_o}^2}{q_o^2} = \frac{\sigma_{V'}^2}{V'^2} + \frac{\sigma_{\Delta t}^2}{\Delta t^2} \quad (3.30)$$

O último termo da equação (3.14) calcula-se considerando que é feita uma diluição da solução de injeção para eliminar problemas de medição; por

consequente:

$$C_o = \frac{P}{r} \quad (3.31)$$

onde: P = valor da medição (c);

r = fator de diluição.

O erro de  $C_o$  será:

$$\frac{\sigma_{C_o}^2}{C_o^2} = \frac{\sigma_P^2}{P^2} + \frac{\sigma_r^2}{r^2} \quad (3.32)$$

O primeiro termo desta soma tem as mesmas características do primeiro termo da equação (3.14) e, em analogia às equações (3.16) a (3.18), pode-se escrever:

$$\frac{\sigma_P^2}{P^2} = \frac{N' + F}{(N' - F)^2} \quad (3.33)$$

onde:  $N'$  = contagens totais da solução do padrão diluído (c).

A equação (3.32) será, então:

$$\frac{\sigma_{C_o}^2}{C_o^2} = \frac{N' + F}{(N' - F)^2} + \frac{\sigma_r^2}{r^2} \quad (3.34)$$

Com as expressões deduzidas em (3.18), (3.25), (3.28), (3.30) e (3.34), a equação (3.14) pode-se escrever:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_y^2}{q^2} = & \frac{N + F}{(N - F)^2} - \frac{\sigma_{Q_{gás}}^2}{Q_{gás}^2} + \left[ \frac{\left( \frac{\sigma_v^2}{V^2} + \frac{\sigma_{q'}^2}{q'^2} \right) \left( \frac{V}{t q'} \right)^2 + \sigma_{U'}^2}{(V/t q' + U)^2} \right] + \frac{\sigma_s^2}{S^2} + \frac{\sigma_d^2}{d^2} + \\ & + \frac{\sigma_v^2}{V^2} + \frac{\sigma_{\Delta t}^2}{\Delta t^2} + \frac{N' + F}{(N' - F)^2} + \frac{\sigma_r^2}{r^2} \end{aligned} \quad (3.35)$$

### 3.4 - INJEÇÃO DO TRAÇADOR

Para a injeção da solução de trítio utilizada como traçador no conduto de alimentação de água ao anel de refrigeração foi necessário achar um ponto conveniente na tubulação. Nesta posição foi instalada uma válvula e um manômetro.

A localização deste ponto é importante para cumprir com os requisitos necessários para a medição posterior da vazão de água na tubulação, como será visto mais adiante.

#### 3.4.1 - Sistema inicial

O sistema de injeção de trítio (Figura 3.2) utilizado durante a primeira experiência foi improvisado com dois cilindros metálicos pequenos. Em um deles foi preparada a solução de trítio, enquanto que no segundo foi colocado somente água.

A pressão no sistema, necessária para vencer a pressão na tubulação, foi obtida utilizando-se um cilindro de nitrogênio gasoso, com seu correspondente regulador de pressão.

Para cada cilindro foi torneada uma tampa com três dutos: um para a entrada do gás, outro para a saída do líquido e o último para a válvula de alívio da pressão. O resto do sistema foi preparado com tubos de cobre de 0,64cm de diâmetro, conexões e válvulas em latão.

O princípio de injeção é a pressurização da parte superior do recipiente, que obriga a saída do líquido. A vazão foi regulada por uma derivação, formada por um tubo parcialmente estrangulado, que permite uma vazão mínima, e uma válvula para realizar o ajuste mais preciso.

O controle da vazão foi conseguido, dentro de pequena margem de erro, com a construção de um rotâmetro robusto, capaz de suportar a pressão do sistema (que foi inicialmente estimada em 6 ou 7kg/cm<sup>2</sup>) e cujo flutuador foi ajustado de forma a permanecer no centro da janela quando a vazão for a desejada. O cone foi torneado em um cilindro de plástico acrílico, e o corpo, projetado para dar resistência ao cone, foi construído em latão, tendo sido realizado um corte em forma de janela para permitir a visualização do flutuador. Este rotâmetro suportou, sem problemas, pressões de até 8kg/cm<sup>2</sup>.

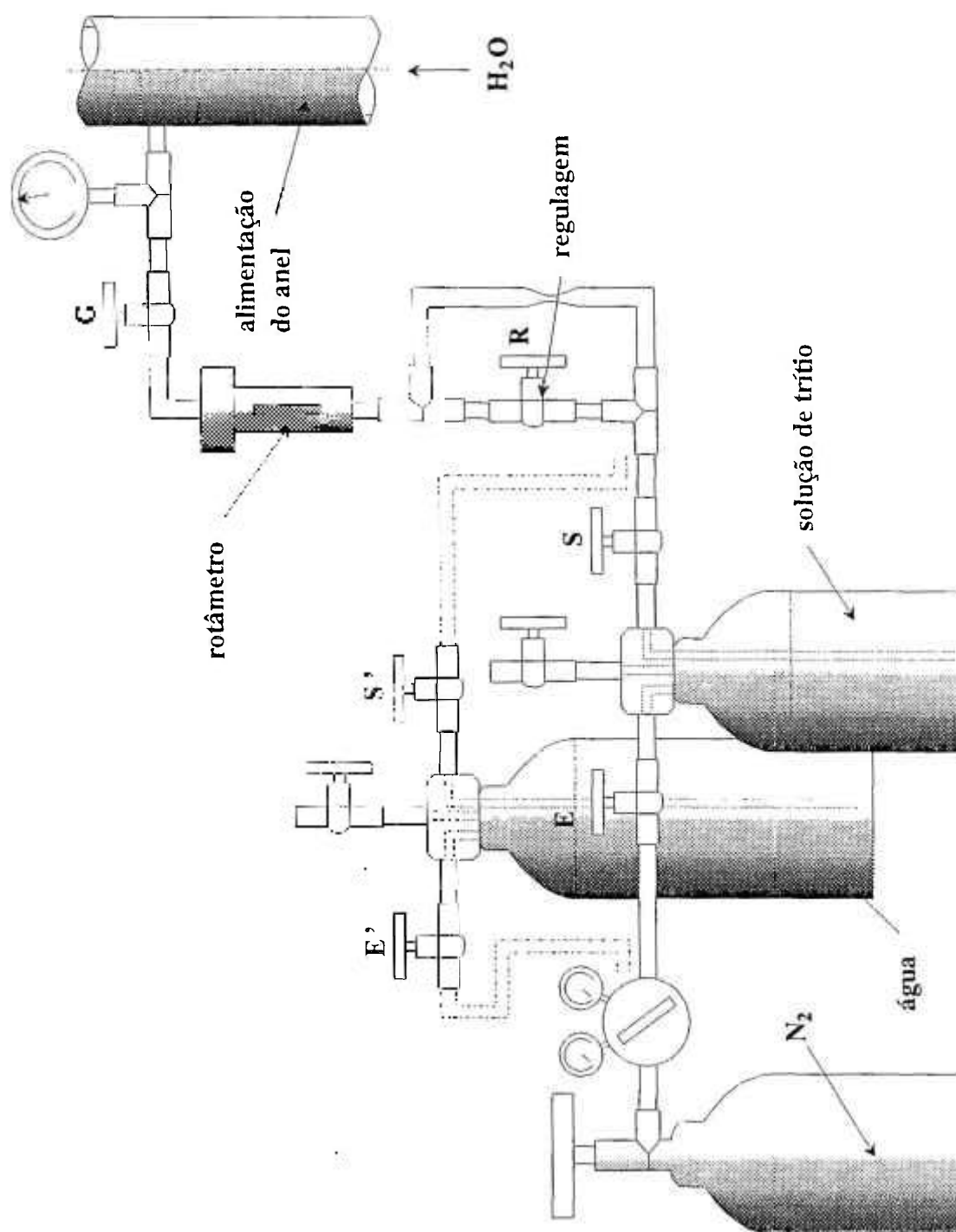


Figura 3.2 - Sistema de injeção inicial

A ordem de operações para o correto funcionamento de sistema foi a seguinte:

1. instalação do recipiente com água no sistema;
2. abertura total das válvulas E' e S';
3. pressurização com nitrogênio até obter uma vazão razoável no rotâmetro;
4. medição da vazão através do volume de água recolhido e o tempo transcorrido;
5. conexão do sistema à válvula G;
6. abertura da válvula G;
7. regulagem da vazão utilizando a válvula R;
8. leitura do valor da pressão indicado no manômetro do redutor de nitrogênio;
9. fechamento das válvulas E' e S';
10. fechamento da válvula principal do cilindro de nitrogênio;
11. liberação da pressão utilizando a válvula de alívio do cilindro de água;
12. troca do cilindro de água pelo de solução de trítio;
13. abertura total das válvulas E e S;
14. reabertura da válvula principal do cilindro de nitrogênio;
15. ajuste da pressão de nitrogênio aos valores anteriores;
16. controle da indicação do rotâmetro durante toda a injeção para corrigir eventuais mudanças na pressão da água da linha;
17. no fim da injeção, troca do cilindro de trítio pelo de água para lavagem do sistema.

#### *3.4.2 - Sistema final*

O sistema de injeção de trítio foi totalmente modificado a partir da segunda experiência. A pressurização do sistema com nitrogênio foi substituída por uma bomba dosadora tipo diafragma, capaz de trabalhar com uma pressão de  $10\text{kg/cm}^2$  e com uma capacidade de  $3,5\text{l/h}$  (Figura 3.3).

A solução de trítio foi preparada em um recipiente de plástico com tampa rosqueada e capacidade total de 10 litros. Durante a injeção foi colocada uma rolha de borracha com dois tubos de cobre: um para a saída do líquido e outro para entrada de ar.

As vantagens com relação ao primeiro sistema de injeção foram:

- a. trabalhar em sistema não pressurizado;

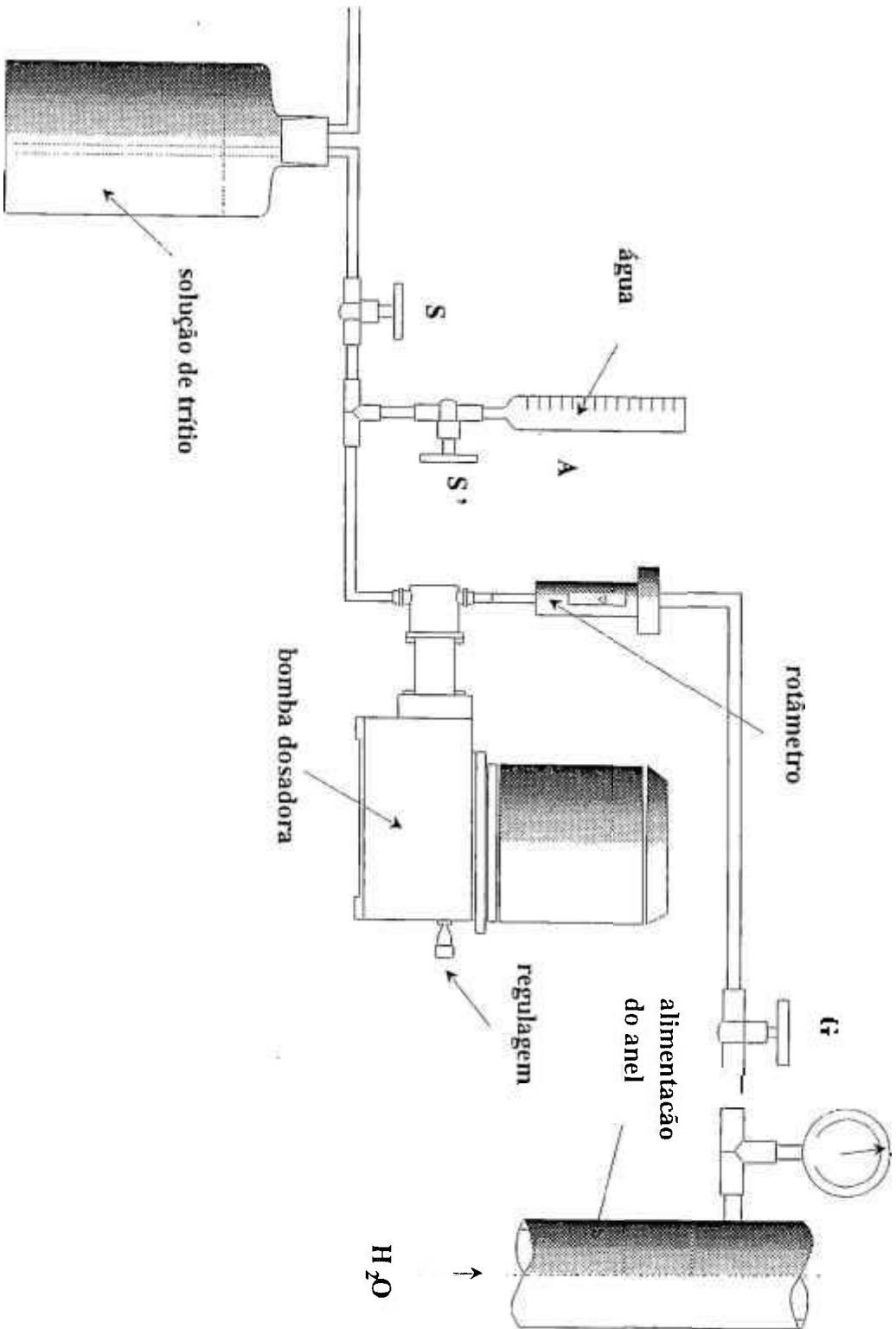


Figura 3.3 - Sistema de injeção final

- b. sistema mais leve e compacto;
- c. não é necessário montagem e desmontagem de partes durante a operação;
- d. regulação mais precisa da vazão;
- e. maior estabilidade da vazão;
- f. maior facilidade e precisão na medição da vazão.

As operações para utilização deste sistema de injeção foram executadas na ordem seguinte:

1. Colocação de água no recipiente graduado A de capacidade 50ml;
2. abertura da válvula S';
3. começo de funcionamento da bomba dosadora;
4. depois do sistema estar expurgado, conexão à válvula G;
5. abertura da válvula G;
6. regulação da vazão com o controle milimétrico da bomba;
7. medição da vazão através do volume de água em A e o tempo transcorrido;
8. fechamento da válvula S' e abertura simultânea da válvula S;
9. controle da indicação do rotâmetro durante toda a injeção;
10. no fim da injeção, fechamento da válvula S e abertura simultânea da válvula S' para lavagem do sistema;
11. nova medição da vazão para verificação da estabilidade da vazão.

### **3.4.3 - Injeção do traçador brometo**

Como a vazão de água no anel de refrigeração ( $Q_0$  na Figura 3.1) é levemente variável dia a dia, foi necessário determinar seu valor no momento da injeção da solução de trítio.

Para tal finalidade foi utilizado o método descrito em 2.2, empregando-se uma solução aquosa de brometo de potássio e medindo a radiação correspondente ao  $^{82}\text{Br}$ , de 35,34h de meia-vida.

O sistema de injeção é apresentado na Figura 3.4 e foi preparado com peças normalizadas existentes no mercado. A câmara para alojamento da solução traçadora consistiu de um "nipple", ou união comprida, de 6,35mm de diâmetro e 76,2mm de comprimento e a saída se fez através de uma válvula tipo globo, também chamada "de fecho rápido" ou esfera. A pressão necessária foi obtida com um tubo de nitrogênio gasoso.

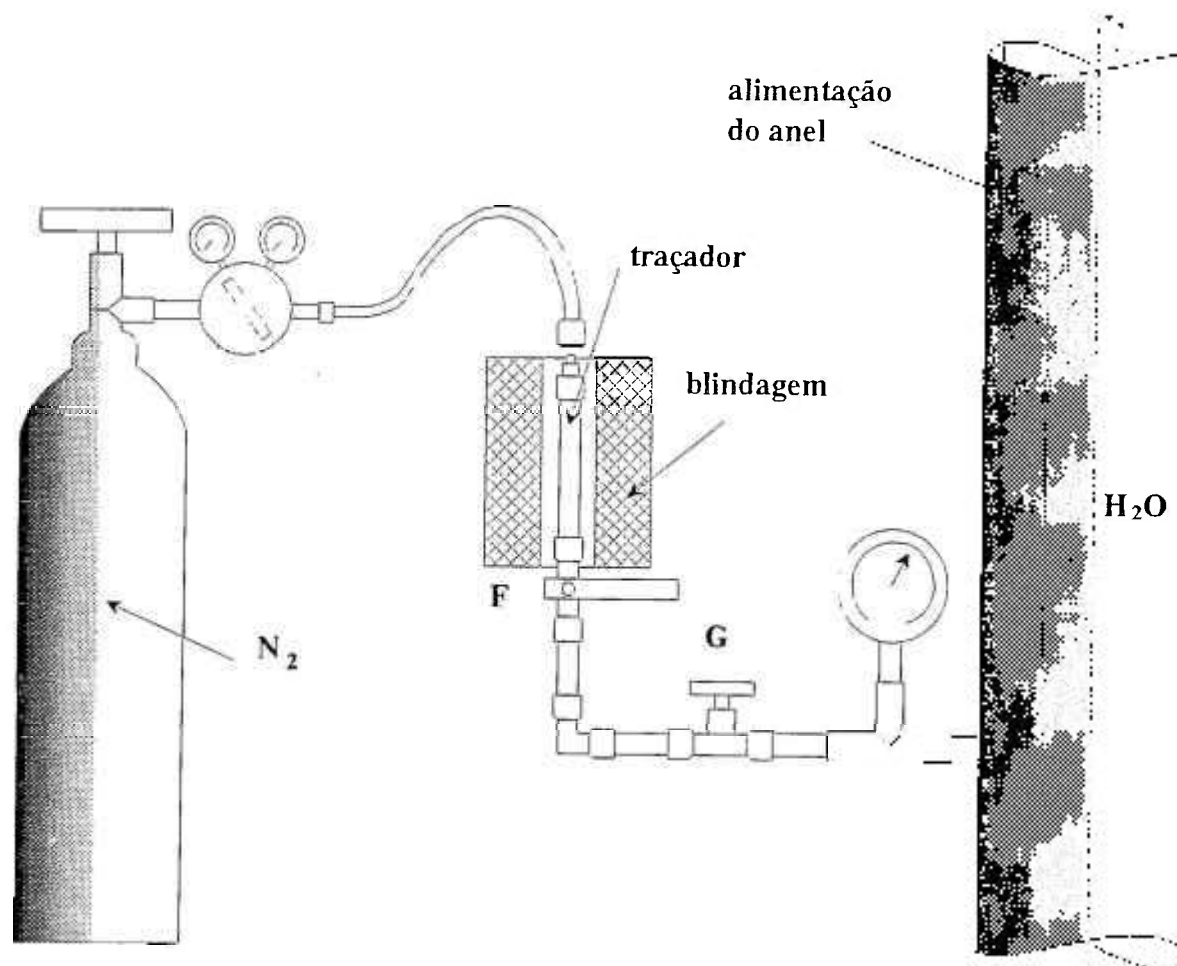


Figura 3.4 - Injeção do traçador de brometo

As operações foram realizadas na ordem seguinte:

1. conexão do sistema de injeção à tubulação;
2. com a válvula F fechada, abertura da válvula G;
3. colocação do traçador utilizando uma seringa;
4. conexão da tubulação de nitrogênio;
5. pressurização do sistema até um valor levemente superior ao indicado pelo manômetro da tubulação;
6. fechamento da válvula do tubo de nitrogênio;
7. abertura e fechamento rápidos da válvula F.

Nestas condições obtiveram-se injeções quase pontuais, o que ficou evidente pela forma estreita da curva de passagem do traçador pelo primeiro detector.

### ***3.5 - ENSAIOS REALIZADOS***

Como base para a preparação do traçador de trítio, foi utilizada uma solução de água tritiada de concentração de atividade de 79,3GBq/ml (2,14Ci/ml).

Em todos os estudos realizados as operações começaram no período da manhã, estendendo-se a injeção de traçador de água tritiada por um período de três horas.

A amostragem de vapor de água da saída do topo do alto forno foi iniciada sempre com meia hora de antecedência ao começo da injeção, para a obtenção de valores livres de trítio que permitissem a preparação de uma amostra de referência.

O sistema de amostragem dos gases de saída do topo do alto forno foi montado pela empresa siderúrgica. Consistia de uma tubulação de descida, um medidor da vazão desta tubulação, um sistema de condensação do vapor de água por resfriamento e termômetros de bulbo seco e úmido para determinar a umidade remanescente no gás.

A razão de condensação do sistema de amostragem de gases do topo do alto forno foi determinada medindo o volume de água condensado e o tempo transcorrido.

Todas as amostras de condensação do vapor de água foram sempre destiladas, para permitir uma completa separação das partículas de carbono muito finas, que interfeririam na determinação da concentração de trítio por cintilação líquida pelo efeito de supressão de fótons.

O valor da vazão total de gases do alto forno foi determinado com o equipamento normal, rotineiramente utilizado pela empresa.

Antes de dar início às injeções foi sempre realizada uma calibração do rotâmetro instalado no sistema de injeção, para conhecer a vazão da solução de traçador. Esta calibração consistia na medição do volume de água que passava pelo sistema em um tempo determinado, nas condições normais de trabalho.

Para a determinação da vazão de água na tubulação de circulação da água de resfriamento do alto forno, pelo método do tempo de trânsito, foram instaladas duas sondas equipadas com detectores do tipo Geiger-Müller, separadas por uma distância de 52m (maior distância aproveitável). O diâmetro nominal da tubulação, no setor escolhido para realizar a medição de vazão, foi de 12" (30,5cm), o que define uma seção  $S = 730,6\text{cm}^2$ . Teve-se especial cuidado em controlar que, durante toda a duração do ensaio, permanecessem fechadas todas as ramificações existentes na tubulação principal.

Para verificar se a distância entre detectores, assim como a posição do primeiro detector, são suficientes para assegurar a mistura total do traçador na seção da tubulação, foram realizados os seguintes cálculos, utilizando dados do primeiro ensaio:

$$\mu_{\text{água}} = 1,005\text{cp} = 1,005 \cdot 10^{-3} \text{Pa s} = 1,005 \cdot 10^{-2} \frac{\text{g}}{\text{cm s}}$$

$$N_{\text{Re}} = \frac{\bar{v} D \rho}{\mu} = \frac{168 \frac{\text{cm}}{\text{s}} \cdot 30,5\text{cm} \cdot 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{1,005 \cdot 10^{-2} \frac{\text{g}}{\text{cm s}}} \approx 5,1 \cdot 10^5$$

Este número indica um fluxo turbulento e, pelo visto no item 2.2, o primeiro detector deve estar a 100D, ou 30 metros do injetor. A distância real foi um pouco menor, de ordem de 25 metros, mas no trajeto existiam dois cotovelos de 90 graus que aumentam a possibilidade de mistura. Os 52 metros existentes entre as duas sondas, asseguraram uma perfeita separação dos picos de atividade, representados

no registrador.

A variação de corrente em função da atividade medida, fornecida pelas sondas, foi transformada em variação de tensão colocando-se uma resistência em série com o sinal. Esta modificação foi necessária já que o registrador de dois canais utilizado (LEEDS & NORTHRUP, modelo Speedomax 682) responde unicamente às variações de tensão. O diagrama de blocos da medição pode ser visto na Figura 3.5

Como o registrador é do tipo avanço do papel a velocidade constante e, para evitar erros originados nas possíveis alterações da voltagem de alimentação, realizaram-se várias medidas da velocidade do papel em todos os estudos.

Para a determinação do tempo transcorrido entre as passagens do traçador pelas sondas 1 e 2, foi necessário determinar, em cada uma das curvas, um valor que representasse o instante normalizado desta passagem. O valor adotado para estes casos foi o centro de massa da curva, expresso como:

$$CM = \frac{\int x y dy}{\int y dy} \quad (3.36)$$

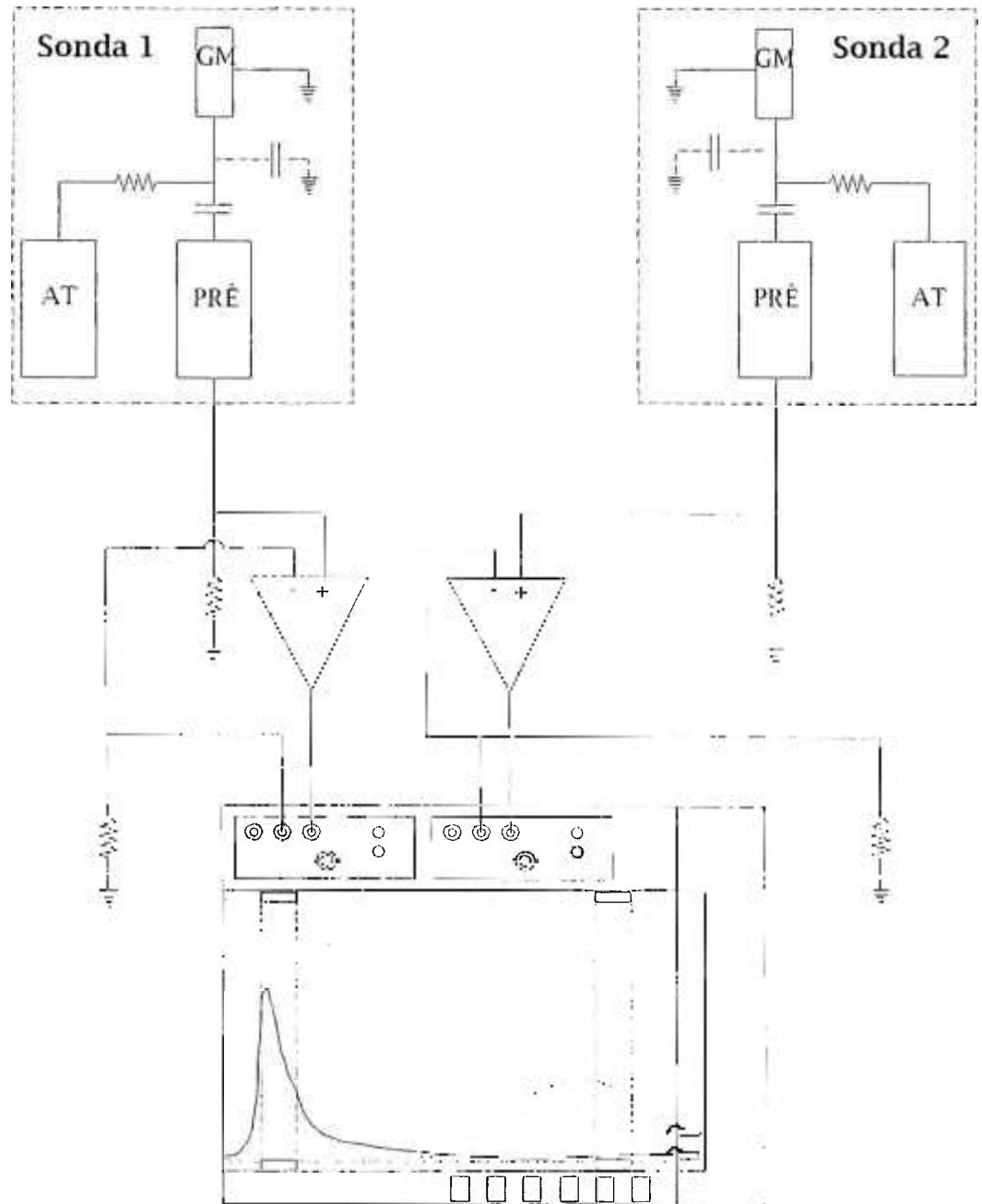
Se a curva é representada na forma de um histograma, a equação (3.36) pode ser substituída por:

$$CM = \frac{\sum xy}{\sum y} \quad (3.37)$$

No caso da passagem do traçador, a curva representa a taxa de contagens (c) em função do tempo, o que leva a:

$$CM = \frac{\sum ct}{\sum c} \quad (3.38)$$

Uma forma prática de determinar o centro de massa de uma curva, sem ter que recorrer à leitura das contagens a intervalos regulares de tempo, é transferir a curva para uma cartolina de espessura constante, recortar e determinar seu centro de gravidade pendurando-a por dois ou mais pontos. Traçando as linhas verticais correspondentes a cada posição de equilíbrio, o ponto onde as retas se interceptam



**Figura 3.5 - Registro da atividade**

define o centro de gravidade da curva e a projeção desse ponto no eixo das abscissas fornece o valor desejado.

Um exemplo das curvas obtidas pode ser visto na Figura 3.6

### 3.5.1 - Ensaio Nº 1

#### 3.5.1.1 - Calibração do rotâmetro:

Foram cronometradas várias medidas do tempo gasto para injetar 10ml de água, obtendo-se uma média de 34seg. Isto indica uma vazão de solução radioativa de:

$$q_0 = 1058,8 \text{ cm}^3/\text{h} = 17,65 \text{ ml}/\text{min}$$

#### 3.5.1.2 - Atividade total injetada:

Foram utilizados 2ml da solução de água tritiada indicada no início do item 3.5; conseqüentemente, a atividade total colocada no cilindro de injeção foi de 158,6GBq (4,28Ci).

O volume total de água no cilindro foi de 3620ml; portanto, a concentração de atividade de trítio da solução utilizada no ensaio foi:

$$C_0 = \frac{158,6 \text{ GBq}}{3,62 \cdot 10^3 \text{ ml}} = 43,9 \text{ MBq} / \text{ml}$$

Considerando que se fez uma injeção contínua durante 180min, a atividade total injetada foi de:

$$A' = C_0 \cdot q_0 \cdot \Delta t = 43,9 \frac{\text{MBq}}{\text{ml}} \cdot 1058,8 \frac{\text{cm}^3}{\text{h}} \cdot 3\text{h} = 139 \text{ GBq} (3,76 \text{ Ci})$$

#### 3.5.1.3 - Determinação do valor de $Q_0$ :

Para a realização das medições da vazão na tubulação de água de resfriamento utilizou-se o  $^{82}\text{Br}$  como traçador. A atividade injetada foi de aproximadamente 1,3GBq (35mCi) por determinação.

A velocidade de avanço do papel do registrador foi determinada pela média

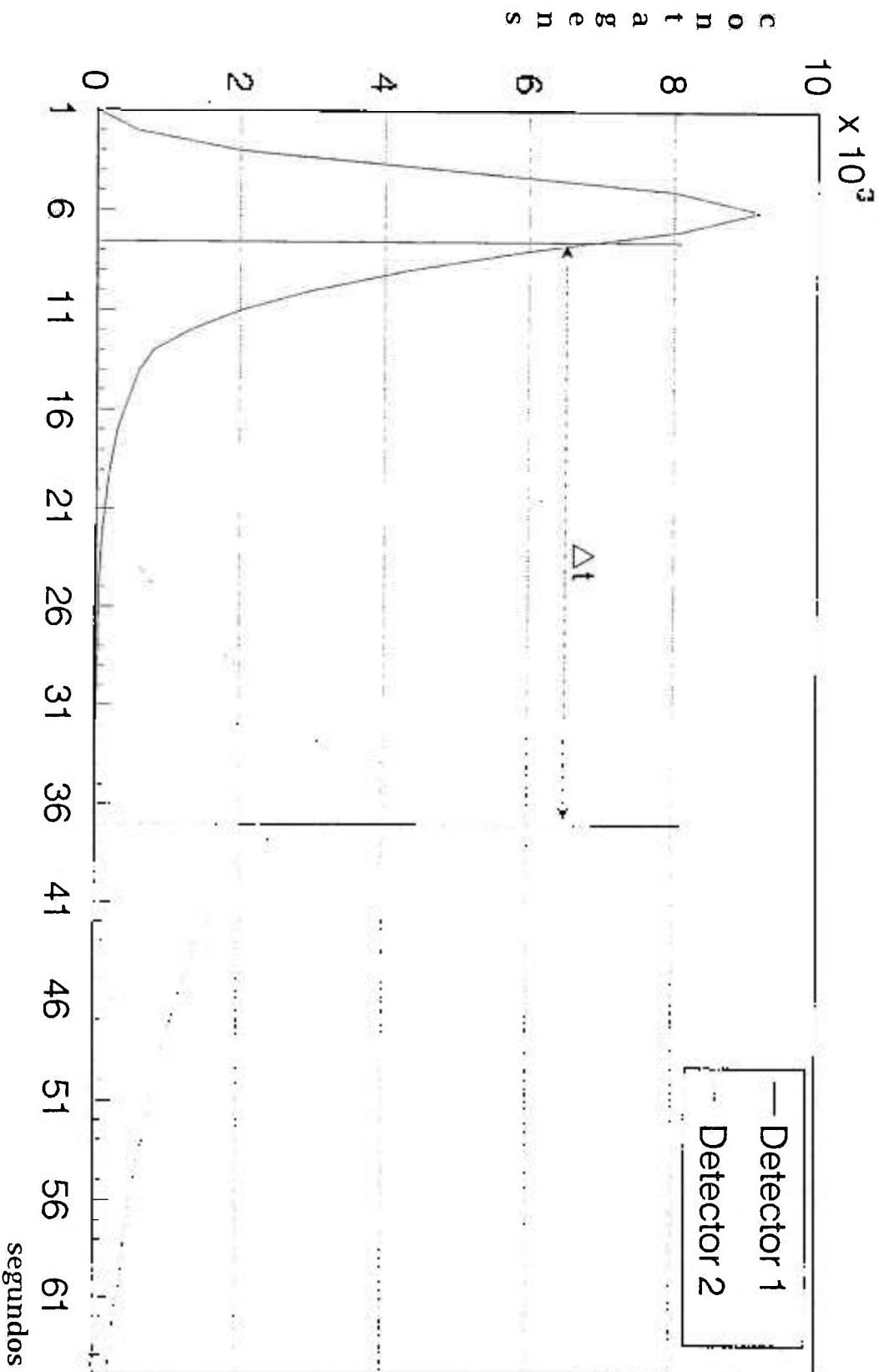


Figura 3.6 - Registro do método do tempo de trânsito

de 10 medidas, dando  $(607 \pm 3)$ mm/min, conforme tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Velocidade do papel

Medida	Valor (mm)
1	603
2	607
3	610
4	604
5	606
6	605
7	607
8	608
9	610
10	611
Média	607
Desv.pad.	3

Depois de determinado o centro de massa de ambos os picos, mediu-se com precisão a separação entre eles, obtendo-se o valor de  $(313 \pm 1)$ mm, o que corresponde a:

$$\Delta t = \frac{L}{v_{\text{papel}}} = \frac{(313 \pm 1) \text{ mm } 60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}{(607 \pm 3) \frac{\text{mm}}{\text{min}}} = (30,94 \pm 0,18) \text{ s}$$

A vazão do fluido na tubulação foi, então, de:

$$\begin{aligned} Q_o &= S v = \frac{S D}{\Delta t} = \frac{730,6 \text{ cm}^2 5200 \text{ cm}}{30,94 \text{ s}} = 122.790 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} = \\ &= 122,790 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 7.367,5 \frac{\text{l}}{\text{min}} \end{aligned}$$

#### 3.5.1.4 - Saída de gás no topo do alto forno:

A vazão de gás, medida com o instrumental utilizado pela empresa, foi de  $3.490 \text{ Nm}^3/\text{min}$ . A concentração total de água nos gases foi determinada com base na média da taxa de condensação das amostras obtidas, sendo:

$$\text{Taxa de cond} = \frac{14,2 \text{ ml}}{15 \text{ min}} = 0,947 \text{ ml / min}$$

Como a vazão de gás do amostrador foi de 58,16//min, a umidade condensada no amostrador correspondeu a uma concentração de água no gás de:

$$C_{H_2O} = \frac{0,947 \text{ ml / min}}{58,16 \text{ / min}} = 1,628 \times 10^{-2} \text{ ml / l} = 16,28 \text{ g / Nm}^3$$

A umidade depois da passagem pelo amostrador foi de 23,72g/Nm<sup>3</sup>, o que significa um conteúdo total de água nos gases de: 40,0g/Nm<sup>3</sup>.

A vazão de água transportada na forma de vapor pelos gases é então:

$$\therefore Q_{H_2O} = 3,490 \text{ Nm}^3 / \text{min} \cdot 60 \text{ min / h} \cdot 0,04 \text{ / Nm}^3 = 8,376,0 \text{ / h}$$

### 3.5.1.5 - Preparação do padrão de medição de trítio:

A partir de uma amostra tomada da solução de injeção, e com a finalidade de realizar medições da mesma ordem de atividade, foi preparada uma dupla diluição com água destilada.

Para obter o fator de diluição (r) tanto a massa da solução original quanto a da primeira solução, foram pesadas em uma balança de sensibilidade de 0,1mg. As relações utilizadas foram:

$$r_1 = \frac{(0,1812 \pm 0,0001) \text{ g}}{(1000 \pm 1) \text{ ml}} = (1,812 \pm 0,002) \times 10^{-4}$$

$$r_2 = \frac{(0,1656 \pm 0,0001) \text{ g}}{(1000 \pm 1) \text{ ml}} = (1,656 \pm 0,002) \times 10^{-4}$$

$$r = r_1 r_2 = (1,812 \pm 0,002) \times 10^{-4} \cdot (1,656 \pm 0,002) \times 10^{-4} = (3,001 \pm 0,005) \times 10^{-8}$$

### 3.5.1.6 - Cálculo do erro:

Introduzindo na equação (3.35) os valores utilizados no ensaio e considerando os erros nominais do equipamento da instalação, foi calculado o erro na medida da vazão de água para o valor máximo de 30,53//min. O resultado foi de 1,3//min, o que representa um erro relativo de 4,3%.

A relação dos dados experimentais correspondentes a este primeiro ensaio é apresentada na tabela 3.2. Os valores das medições realizadas e dos resultados da vazão de fuga obtidos por aplicação da equação 3.10 são mostrados na tabela 3.3

Tabela 3.2 - Ensaio N° 1: Dados experimentais

Parâmetro	Símbolo	Valor
Vazão de injeção do traçador	$q_0$	17,65ml/min
Concentração de $^3\text{H}$ no traçador	$C_0$	43,8MBq/ml
Tempo de injeção	$\Delta T$	180min
Atividade total de $^3\text{H}$ injetada	$A'$	139GBq
Volume de água tritiada injetada	$q_0 \Delta T$	3.176,4ml
Vazão total de gases no alto forno	$Q_{\text{gás}}$	3.490Nm <sup>3</sup> /min
Teor de água nos gases	$f$	40,0g/Nm <sup>3</sup>
Vazão total de vapor de água	$Q_{\text{H}_2\text{O}}$	8.376,0l/h
Distância entre detectores	$D$	52m
Área interna das seções de medição	$S$	730,6cm <sup>2</sup>
Atividade de $^{82}\text{Br}$ injetada por ensaio	$A$	1,3GBq
Velocidade do papel de registro	$v$	607mm/min
Intervalo de tempo entre picos	$\Delta t$	30,94s
Vazão de água no anel	$Q_0$	7.367,5l/min
Relação de vazões	$q_0/Q_0$	$2,4 \times 10^{-6}$

Tabela 3.3 - Ensaio N° 1: Medições realizadas e resultados

	Trítio na amostra			Contag. líquidas (20 min)	Vazão de fuga	
	1ª med. (20 min)	2ª med. (20 min)	média (20 min)		(l/min)	(l/h)
BG	632	657	644,5			
Padrão	1913	1962	1937,5	1293		
1	7218	6799	7008,5	6364	8,60	516,3
2	3511	3600	3555,5	2911	3,94	236,1
3	4812	4875	4843,5	4199	5,68	340,6
4	23193	23264	23228,5	22584	30,53	1832,0
5	20873	20842	20857,5	20213	27,33	1639,7
6	7311	7552	7431,5	6787	9,18	550,6
7	10160	10383	10271,5	9627	13,02	781,0
8	2832	2949	2890,5	2246	3,04	182,2
9	4248	4253	4250,5	3606	4,88	292,5
10	5626	5575	5600,5	4956	6,70	402,0
11	3757	3766	3761,5	3117	4,21	252,9
12	2864	2859	2861,5	2217	3,00	179,8
13	3030	3109	3069,5	2425	3,28	196,7
14	3149	3088	3118,5	2474	3,34	200,7
15	2483	2438	2460,5	1816	2,46	147,3
16	2916	2995	2955,5	2311	3,12	187,5
17	6681	6692	6686,5	6042	8,17	490,1
18	8743	8880	8811,5	8167	11,04	662,5
19	4947	5006	4976,5	4332	5,86	351,4
20	2879	2938	2908,5	2264	3,06	183,7
21	3340	3405	3372,5	2728	3,69	221,3
22	7259	7338	7298,5	6654	9,00	539,8
23	10398	10541	10469,5	9825	13,28	797,0

### 3.5.2 - *Ensaio posteriores*

Depois de ter sido realizada a manutenção correspondente para a eliminação do vazamento detectado, foram executados outros ensaios sob diversas condições de funcionamento do alto forno. Os dados destas experiências encontram-se no Anexo I.

Na Tabela 3.4 apresenta-se um resumo das condições experimentais de trabalho e dos valores determinados.

Tabela 3.4 - Valores determinados

Vazão	Simbolo	Ensaio												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Vazão ml/min	$q_n$	17,65	18,51	15,87	18,18	18,51	10,48	17,33	17,23	17,23	17,55	17,75	17,65	16,67
Concentração de trítio MBq/ml	$C_o$	43,8	30,1	39,2	30,1	30,1	39,2	39,2	39,2	39,2	65,4	65,4	65,4	65,4
Tempo de injeção min	$\Delta T$	180	180	180	180	170	176	180	180	180	180	180	170	180
Ativ. total de $^3H$ injetada GBq	$A'$	139	100	112	98,5	94,7	72,4	122	122	122	206	208	196	196
Volume injetado ml	$q_n \Delta T$	3176,4	3333,0	2857,2	3273,0	3148,0	1844,4	3119,4	3102,0	3102,0	3159,0	3195,0	3000,5	3000,6
Vazão total de gases $Nm^3/min$	$Q_{gases}$	3490	3405	2976	3292	3429	2840	2783	2783	2735	2730	2780	2500	2489
Teor de água nos gases $g/Nm^3$	$f$	40,00	38,86	46,70	45,07	62,92	1622,2	119,0	64,55	35,94	44,00	56,00	11,30	43,10
Vazão de vapor de água l/h	$Q_{H_2O}$	8376,0	7939,1	8338,8	8888,4	12961	276423	19870	10780	5897,7	7207,2	9304,8	1699,5	6415,5
Atividade de $^{82}Br$ GBq	$A$	1,3	1,1	0,92	0,74	0,92	1,3	1,1	1,1	0,92	0,92	0,92	0,59	0,59
Veloc. do registrador mm/min	$v$	607	596	600	607	596	600	600	600	600	600	600	604	604
Tempo entre picos s	$\Delta t$	30,9	35,7	31,2	30,9	32,4	35,4	35,8	41,2	32,0	34,3	35,7	31,5	35,8
Vazão de água no anel l/min	$Q_n$	7367,5	6378,1	7306,1	7367,5	7035,7	6439,2	6367,2	5532,7	7123,4	6645,7	6385,1	7236,4	6367,2
Relação de vazões $\times 10^{-6}$	$q_n/Q_n$	2,4	2,9	2,2	2,4	2,6	1,6	2,7	3,1	2,4	2,6	2,8	2,4	2,6
Vazamento l/h	$q$	1832,0	16,4	17,8	35,0	57,0	1348,2	7,7	11,7	1,9	1,3	1,3	4,3	5,3

## CAPÍTULO 4 - CONCLUSÕES

O erro na medida da vazão de perda no alto forno foi de 4,3% segundo indicado em 3.5.1.6. Durante seu cálculo observou-se que o fator que mais contribuiu foi o erro de contagem do padrão, por ser sua atividade menor que a da amostra.

O erro relativo aumenta na medida em que a vazão diminui, sendo a atividade da amostra o fator mais importante. Para valores muito baixos da vazão, perto do zero, o erro pode alcançar valores da ordem de 100%.

Na tabela 3.4, que apresenta um resumo dos valores determinados e condições experimentais de trabalho, podem ser identificados alguns pontos importantes, a saber:

- a) no primeiro ensaio realizado já existia, por parte da empresa, a certeza da existência de vazamento, o que foi confirmado pela experiência, sendo posteriormente consertado;
- b) a série de ensaios segundo a quinto, mostra uma sequência muito interessante, pelo fato de acompanhar o avanço da degradação de uma das placas. O pessoal encarregado da operação do alto forno não tinha, inicialmente, nenhuma suspeita da existência deste vazamento e o método permitiu não somente detectar sua presença como também acompanhar sua evolução até seu conserto;
- c) esta série permitiu também estudar a correlação entre a estabilidade térmica do alto forno e a magnitude da vazão, fornecendo parâmetros para a tomada de decisão em relação à solução do problema;
- d) para verificar a sensibilidade do método, sob condições de excessiva umidade da carga, o que dilui apreciavelmente a concentração do traçador, foi realizado o sexto ensaio. Também neste caso tinha-se a certeza da existência de vazamento, o que foi coerentemente confirmado pelo método;
- e) para os ensaios nono a décimo terceiro, a metodologia tradicional não acusou a existência de vazamentos. A diferença entre estes ensaios reside no grau de umidade da carga, o que pode ser visualizado através do valor da vazão de vapor de água nos gases de saída do alto forno;

Como desvantagens foram identificadas duas, consideradas importantes:

- 1) O tempo de resposta, que nas condições do estudo foi da ordem de 24 horas. Este lapso de tempo poderia ser apreciavelmente diminuído com a instalação de um pequeno laboratório na própria indústria, equipado com um aparelho de medição por detectores líquidos de cintilação .
- 2) A utilização do método no anel de refrigeração inferior, situado na região de máximas temperaturas do alto forno, resultaria num erro muito grande pelas reações químicas entre o carbono e a água, que levam a descomposição parcial desta, com liberação de hidrogênio gasoso. Como o hidrogênio (e, conseqüentemente, o trítio) não pode ser retido na amostragem, o traçador deixa de ser utilizável quando se desejam resultados quantitativos. A técnica pode ainda ser de utilidade quando existe interesse em confirmar a presença da vazão de fuga.

Outra conclusão importante, que surge das tabelas de medições realizadas (anexo I), é que a difusão da água do vazamento nos materiais em processo de fusão no alto forno não é homogênea. Provavelmente existem regiões de retenção, formadas por material parcialmente solidificado, que constituem verdadeiras barreiras que a água deve transpor, ocasionando resultados aleatórios nos valores de vazamento ao longo de cada ensaio.

Estas regiões de material mais frio, localizadas junto as paredes do alto forno e favorecidas pela existência do vazamento, estão na origem dos problemas de estabilidade do processo. É possível que o material sob estas condições fique retido durante um certo tempo, dificultando a descida do resto da carga e favorecendo o surgimento de caminhos preferenciais. Quando a massa deste material chega a um certo valor crítico, se desprende da parede e desce a regiões mais quentes, originando localmente alterações da temperatura que, por sua vez, modificam as correntes de convecção do alto forno.

O trabalho realizado demonstrou a possibilidade de determinar, com um grau de precisão aceitável, a existência de vazamentos nas placas de refrigeração de altos fornos sem interferir na produção nem afetar as condições de operação.

O método tem como vantagem principal o fato de evitar a exposição do pessoal a condições de trabalho excessivamente perigosas, fornecendo uma resposta quantitativa que o método tradicional não oferece.

## CAPÍTULO 5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - ANDRE, C.; CHARENTUS, T.; JAUZEIN, M.; MARGRITA, R. Use of radioactive tracers to study the risks of environmental pollution from iron and steel industry wastes. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Applications of Isotopes and Radiation in Conservation of the Environment: proceedings of an international symposium on... held in Karlsruhe, 9-13 Mars, 1992*. (IAEA Proceedings Series; p. 271-80)
- 2 - BUSH, E.T.; HANSEN, D.L. Improvement of liquid scintillation counting efficiencies by optimization of scintillator composition. Relative efficiencies for three new fluors. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Radioisotope sample measurement techniques in Medicine and Biology: proceedings of an international symposium on... held in Vienna, 24-28 May, 1965*. Vienna, 1965, p. 395
- 3 - BUTLER, F.E. Determination of tritium in water and urine. Liquid scintillation counting and rate-of-drift determinations. *Anal.Chem.*, 33: 409, 1961.
- 4 - CAMPBELL, J.G. Mercury measurement by dilution of a radioactive isotope. *Appita*, 12: 51-56, 1958.
- 5 - CARRARD, G. Understanding a blast furnace. *Nucl. News*, 28: 1-4, 1988.
- 6 - CARDOZO, C.L. Comunicação pessoal.
- 7 - CHARLTON, J.S. Radioactive tracer technique in process optimization: applications in the chemical industry. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Tracer applications for industrial process optimization: proceedings of a advisory group meeting on... held in Dubrovnik, 19-23 October, 1987*. *Isotopenpraxis*, 25(4): 130-5, 1989.
- 8 - CLAYTON, C.G.; SPACKMAN, R.; BALL, A.M. The accuracy and precision of liquid flow measurement by radioactive isotopes. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY *Radioisotope Tracers in Industry and Geophysics: proceedings of a symposium on... held in Prague, 21-25 November, 1966*. Vienna, 1967, p. 563

- 9 - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR Diretrizes básicas de radioproteção. Rio de Janeiro, 1983 (CNEN-NE-3.01/83)
- 10 - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR Gerência de rejeitos radioativos em instalações radiativas. Rio de Janeiro, 1985 (CNEN-NE-6.05/85)
- 11 - DYER, A. *Liquid scintillation counting*. London, Heyden & Sons, 1971.
- 12 - EAPEN, A .C.; RAO, S. M.; AGASHE, S. M.; AJMERA, R. L.; YELGAONKAR; V.N. Radiotracer applications in steel, petroleum and maritime industries with significant economic benefits. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Assessment of economic benefits of industrial tracer applications: proceedings of a advisory group meeting on... held in Leipzig, 8-12 May, 1989*. *Isotopenpraxis*, 26(9): 424-9, 1990.
- 13 - EASEY, J.F. Industrial applications of radioisotope tracers. In: AUSTRALIAN ATOMIC ENERGY COMMISSION. *Nuclear techniques of analysis: proceedings of the 4th Australian conference on... held in Lucas Heights, 6-8 November*. Lucas Heights, 1985, p. 70-3
- 14 - EASEY, J.F. Radioisotope tracers in industrial flow studies. *Nucl. Aust.*, 4(6): 1-3, 1987.
- 15 - EASEY, J.F. *The use of radioisotope tracers in the metallurgical industries*. New South Wales, Australia, Australian Nuclear Science and Technology Organisation, 1987. (INIS-mf-11476)
- 16 - EVANS, G.V.; SPACKMAN, R.; ASTON, M.A.J.; CLAYTON, C.G. Measurement of gas flow by radiotracer methods. In: PETER PEREGRINUS: *Modern Developments in Flow Measurement: Proceedings of a international conference on... held in Harwell, 1972*. London, 1972, p. 242
- 17 - FURST, M.; KALLMANN, H. Concentration quenching of liquid scintillators. In: BELL, C.G.; HAYES, F.N. *Liquid scintillation counting*, New York, N.Y., Pergamon Pres, 1958, p. 237-245.

- 18 - GARDNER, R.P.; ELY, R.L. *Radioisotope measurement applications in engineering*. New York, N.Y., Reinhold Pub. Corp., 1967
- 19 - GAUJE, P.; NICOLLE, R.; STEILER, J.M.; VENTURINI, M.J.; LIBRALESSO, J.M. Écoulement des liquides dans le creuset du haut fourneau. *La Revue de Métallurgie - CIT*, 89(3): 251-60, 1992.
- 20 - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Nuclear analytical techniques for on-line elemental analysis in industry: proceedings of an advisory group meeting on... held in Espoo, 1-5 June, 1987*. (IAEA-TECDOC-459)
- 21 - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Radiation protection in occupational health. Manual for occupational physicians*, Safety Series N° 83, Vienna, IAEA, 1987.
- 22 - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Guidebook on radioisotopes tracers in industry*. Vienna, IAEA, 1990. (Technical Reports Series, 316)
- 23 - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Publication 26*, Pergamon Press, Oxford, 1977
- 24 - KNOLL, G.F. *Radiation detection and measurement*. 2.ed. New York, N.Y., John Wiley & Sons, 1989.
- 25 - KNUDSEN, G.; KATZ, L. *Fluid Dynamics and Heat Transfer*, New York, N.Y., McGraw-Hill, 1958.
- 26 - KOBAYASHI, Y.; MAUDSLEY, D.V. *Biological applications of liquid scintillation counting*, New York, N.Y., Academic, 1974.
- 27 - KUOPPAMÄKI, R.; TURTLAINEN, H. On site calibration of liquid flow meters using the radiotracer transit time method. *FLUID Flow Measurements: International Symposium held in Arlington*, 1986, p. 127

- 28 - LEDERER, C.M.; SHIRLEY, V.S. *Table of Isotopes*, 7 ed., New York, N.Y., John Wiley & Sons, 1978.
- 29 - LIBRALESSO, J; NICOLLE, R.; STEILER, J. The use of radioactive tracers in the blast furnace. In: IRON AND STEEL SOCIETY. *Iron and steel: proceedings of the 5th international congress on... held in Washington DC, 6-9 April 1986*, 1986, p. 565-75
- 30 - LJUNGGREN, K. Review of the use of radioactive tracers for evaluating parameters pertaining to the flow of material in plant and natural systems. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Radioisotope Tracers in Industry and Geophysics: proceedings of a symposium on... held in Prague, 21-25 November, 1966*. Vienna, 1967, p. 303-33.
- 31 - MALISHEV, A.; NIKOLAIEV, G.; SHUVALOV, Y. *Tecnología de los metales*, Moscou, Editorial Paz, 1965.
- 32 - MARGRITA, R. *Tracer theory*. Paris, Commissariat a l'Énergie Atomique, 1988. (CEA-CONF-9676).
- 33 - MOTT, W.E.; DEMPSEY, J.C. Review of radiotracer applications in geophysics in the United States of America. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Radioisotope Tracers in Industry and Geophysics: proceedings of a symposium on... held in Prague, 21-25 November, 1966*. Vienna, 1967, p. 111-113.
- 34 - NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENT. *Tritium measurement techniques*. NCRP Report N° 47, 1976.
- 35 - NUCLEAR CHICAGO CORPORATION. *Liquid scintillation counting*, 3 ed., Chicago, Nuclear Chicago Corporation, 1969. (Publication ALS, 304).
- 36 - OTTO, R. Labelled compound for tracer investigations in industry. In: RADIOISOTOPE applications and radiation processing in industry: *proceedings of the 3rd working meeting on... held in Leipzig, 23-27 September, 1985*, p. 223-36

- 37 - PACKARD INSTRUMENT COMPANY Inc., *Insta-Gel*, Technical Report 3011/474/J, 1974.
- 38 - PERRY, R.H.; GREEN, D. *Perry's Chemical Engineers' Handbook, 6 ed.*, Sem local, McGraw Hill, 1984, p. 12-3
- 39 - RAO, S.M. Radioisotope tracer applications in industry. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Applications of nuclear techniques in industry: proceedings of a seminar on ... held in Kuala Lumpur, 17-19 November, 1987*. Vienna, 1987.
- 40 - RAPKIN, E.; GIBBS, J.A. Polyethylene containers for liquid scintillation spectrometry *Int. J. App. Radiation and Isotopes*, 14: 71, 1963.
- 41 - SEIDEL, A.; VOLF, V. Rapid determination of some transuranium elements in biological material by liquid scintillation counting. *Int. J. Appl. Radiat. and Isotopes*, 23: 1-6, 1972.
- 42 - STREETER, V.L. *Fluid mechanics* 5.ed. New York, N.Y., McGraw-Hill, 1971.
- 43 - TANIELIAN, C.; COCHE, A.; DELUZARCHE, A.; LAUSTRIAT, G.; MAILLARD, A. Influence de la purification du solvant sur le rendement des scintillateurs liquides - 1 *Int. J. App. Radiation and Isotopes*, 15: 11, 1964.
- 44 - TAYLOR, G.I. *Proc.Roy.Soc.London, Ser. A*, 219: 186, 1953 apud GARDNER, R.P. & ELY, R.L. *Radioisotope measurement applications in engineering*. New York, N.Y., Reinhold, 1967.
- 45 - TAYLOR, G.I. *Proc.Roy.Soc.London, Ser. A*, 223: 446, 1954 apud GARDNER, R.P. & ELY, R.L. *Radioisotope measurement applications in engineering*. New York, N.Y., Reinhold, 1967.

- 46 - THYN, J. Radioisotope techniques for process optimization In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Tracer applications for industrial process optimization: proceedings of a advisory group meeting on... held in Dubrovnik, 19-23 October, 1987. Isotopenpraxis*, 25(4): 145-52, 1989.
- 47 - THYN, J. Cost benefit ratio of industrial tracer applications. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Assessment of economic benefits of industrial tracer applications: proceedings of a advisory group meeting on... held in Leipzig, 8-12 May, 1989. Isotopenpraxis*, 26(9): 429-34, 1990.
- 48 - WIBLIN, W.A. The use of radioactive tracers to study metal and slag flow in blast furnace. In: AUSTRALIAN NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY ORGANISATION. *Nuclear techniques of analysis: proceedings of the Australian conference on... held in Lucas Heights, 4-6 November, 1987. Lucas Heights, 1987, p. 154-6*

ANEXO

Neste anexo descrevem-se a metodologia e resultados obtidos nos ensaios numerados de 2 a 13, na seqüência abaixo indicada:

Ensaio N°	Página
02	85
03	90
04	94
05	99
06	103
07	107
08	111
09	115
10	119
11	123
12	127
13	131

## 1 - ENSAIO Nº 2

### 1.1 - Calibração do rotâmetro:

Foram cronometradas duas medidas do tempo gasto para injetar 50ml de água, uma antes e outra depois da injeção, sendo os valores obtidos 161seg e 163seg. Isto indica uma vazão de solução radioativa de:

$$q_o = 1111,1 \text{cm}^3/\text{h} = 18,51 \text{ml}/\text{min}$$

### 1.2 - Atividade total injetada:

Foram utilizados 3,8ml da mesma solução empregada no primeiro ensaio; a atividade total colocada no cilindro de injeção foi de 301GBq (8,14Ci).

O volume total de água no cilindro foi de 10.000ml; portanto a concentração de atividade de trítio na solução utilizada no ensaio foi:

$$C_o = \frac{301 \text{GBq}}{1,0 \cdot 10^4 \text{ml}} = 30,1 \text{MBq} / \text{ml}$$

Considerando que se fez uma injeção contínua durante 180min, a atividade total injetada foi de:

$$A' = C_o \cdot q_o \cdot \Delta t = 30,1 \frac{\text{MBq}}{\text{ml}} \cdot 1111,1 \frac{\text{cm}^3}{\text{h}} \cdot 3 \text{h} = 100,3 \text{GBq} (2,71 \text{Ci})$$

### 1.3 - Determinação do valor de $Q_o$ :

Para a realização das medições da vazão na tubulação de água de resfriamento utilizou-se o  $^{82}\text{Br}$  como traçador. A atividade injetada foi de, aproximadamente, 1,1GBq (30mCi) por determinação.

A velocidade de avanço do papel do registrador foi repetidamente verificada, sendo o valor médio de  $(596 \pm 5) \text{mm}/\text{min}$ .

Depois de determinado o centro de massa de ambos picos, mediu-se com precisão a separação entre eles, obtendo-se o valor de 355mm, o que corresponde a:

$$\Delta t = \frac{L}{v_{\text{papel}}} = \frac{355 \text{ mm } 60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}{596 \frac{\text{mm}}{\text{min}}} = 35,74 \text{ s}$$

A vazão do fluido na tubulação é, então, de:

$$\begin{aligned} Q_o &= S v = \frac{S D}{\Delta t} = \frac{730,6 \text{ cm}^2 5200 \text{ cm}}{35,74 \text{ s}} = 106.299 \text{ cm}^3/\text{s} = \\ &= 106,299 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 6.378,1 \frac{\text{l}}{\text{min}} \end{aligned}$$

#### 1.4 - Saída de gás no topo do alto forno:

A vazão de gás, medida com o instrumental utilizado pela empresa, foi de  $3.405 \text{ Nm}^3/\text{min}$ . A concentração total de água nos gases foi determinada com base na média da taxa de condensação das amostras obtidas, sendo:

$$\text{Taxa de cond} = \frac{12,0 \text{ ml}}{30 \text{ min}} = 0,40 \text{ ml} / \text{min}$$

Como a vazão de gás do amostrador foi de  $34,60 \text{ l}/\text{min}$ , a umidade condensada no amostrador correspondeu a uma concentração de água no gas de:

$$C_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,40 \text{ ml} / \text{min}}{34,60 \text{ l} / \text{min}} = 1,156 \times 10^{-2} \text{ ml} / \text{l} = 11,56 \text{ g} / \text{Nm}^3$$

A umidade depois da passagem pelo amostrador foi de  $27,3 \text{ g}/\text{Nm}^3$ , o que significa um conteúdo total de água nos gases de:  $38,86 \text{ g}/\text{Nm}^3$ .

A vazão de água transportada na forma de vapor pelos gases é então:

$$\therefore Q_{\text{H}_2\text{O}} = 3.405 \text{ Nm}^3/\text{min} \cdot 60 \frac{\text{min}}{\text{h}} \cdot 0,03886 \frac{\text{l}}{\text{Nm}^3} = 7.939,1 \frac{\text{l}}{\text{h}}$$

#### 1.5 - Preparação do padrão de medição de trítio:

A partir de uma amostra tomada da solução de injeção, e com a finalidade de realizar medições da mesma ordem de atividade, foi preparada uma dupla diluição com água destilada.

Tanto a massa da solução original quanto a da primeira solução foram pesadas em uma balança de sensibilidade de  $0,1 \text{ mg}$ . As relações utilizadas foram:

$$r_1 = \frac{(0,3169 \pm 0,0001)g}{(1000 \pm 1)ml} = (3,169 \pm 0,003) \times 10^{-4}$$

$$r_2 = \frac{(0,3156 \pm 0,0001)g}{(1000 \pm 1)ml} = (3,156 \pm 0,003) \times 10^{-4}$$

$$r = r_1 r_2 = (3,169 \pm 0,003) \times 10^{-4} (3,156 \pm 0,003) \times 10^{-4} = (1,00 \pm 0,001) \times 10^{-7}$$

Tabela A1 - Ensaio N° 2: Dados experimentais

Parâmetro	Símbolo	Valor
Vazão de injeção do traçador	$q_0$	18,51ml/min
Concentração de $^3\text{H}$ no traçador	$C_0$	30,1MBq/ml
Tempo de injeção	$\Delta T$	180min
Atividade total de $^3\text{H}$ injetada	$A'$	100GBq
Volume de água tritiada injetada	$q_0 \Delta T$	3.333ml
Vazão total de gases no alto forno	$Q_{\text{gás}}$	3.405Nm <sup>3</sup> /min
Teor de água nos gases	$f$	38,86g/Nm <sup>3</sup>
Vazão total de vapor de água	$Q_{\text{H}_2\text{O}}$	7.939,1l/h
Distância entre detectores	$D$	52m
Área interna das seções de medição	$S$	730,6cm <sup>2</sup>
Atividade de $^{82}\text{Br}$ injetada por ensaio	$A$	1,1GBq
Velocidade do papel de registro	$v$	596mm/min
Intervalo de tempo entre picos	$\Delta t$	35,74s
Vazão de água no anel	$Q_0$	6.378,1l/min
Relação de vazões	$q_0/Q_0$	$2,9 \times 10^{-6}$

Tabela A2 - Ensaio Nº 2: Medições realizadas e resultados

	Trítio na amostra			Contag. líquidas (20 min)	Vazão de fuga	
	1ª med. (20 min)	2ª med. (20 min)	média (20 min)		(l/min)	(l/h)
BG	712	738	725			
Padrão	7195	7245	7220	6495		
1	701	755	728	3	0,00	0,1
2	731	712	721,5	0	0,00	0,0
3	835	789	812	87	0,06	3,7
4	859	843	851	126	0,09	5,3
5	852	820	836	111	0,08	4,7
6	1098	1132	1115	390	0,27	16,4
7	787	805	796	71	0,05	3,0
8	763	807	785	60	0,04	2,5
9	754	698	726	1	0,00	0,0
10	851	777	814	89	0,06	3,7
11	904	916	910	185	0,13	7,8
12	1041	1023	1032	307	0,22	12,9
13	975	1033	1004	279	0,20	11,7

## 2 - ENSAIO Nº 3

### 2.1 - Calibração do rotâmetro:

Foram cronometradas duas medidas do tempo gasto para injetar 50ml de água, uma antes e outra depois da injeção, sendo os valores obtidos 187seg e 191seg. Isto indica uma vazão de solução radioativa de:

$$q_0 = 952,4 \text{ cm}^3/\text{h} = 15,87 \text{ ml}/\text{min}$$

### 2.2 - Atividade total injetada:

Foi preparada uma diluição da solução de trítio de concentração de atividade:  $C_0 = 39,22 \text{ MBq}/\text{ml}$ . Considerando que se fez uma injeção contínua durante 180min, a atividade total injetada foi de:

$$A' = C_0 q_0 \Delta t = 39,22 \frac{\text{MBq}}{\text{ml}} 952,4 \frac{\text{cm}^3}{\text{h}} 3\text{h} = 112 \text{ GBq} (3,3 \text{ Ci})$$

### 2.3 - Determinação do valor de $Q_0$ :

Para a realização das medições da vazão na tubulação de água de resfriamento utilizou-se o  $^{82}\text{Br}$  como traçador. A atividade injetada foi de aproximadamente 0,92GBq (25mCi) por determinação.

A velocidade de avanço do papel do registrador foi repetidamente verificada, sendo o valor médio determinado de  $(600 \pm 3) \text{ mm}/\text{min}$ .

Depois de determinado o centro de massa de ambos picos, mediu-se a separação entre eles, obtendo-se o valor de 312mm, o que corresponde a:

$$\Delta t = \frac{L}{v_{\text{papel}}} = \frac{312 \text{ mm} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}{600 \frac{\text{mm}}{\text{min}}} = 31,2 \text{ s}$$

A vazão do fluido na tubulação é, então, de:

$$\begin{aligned} Q_0 &= S v = \frac{S D}{\Delta t} = \frac{730,6 \text{ cm}^2 \cdot 5200 \text{ cm}}{31,2 \text{ s}} = 121.767 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} = \\ &= 121,767 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 7.306,1 \frac{\text{l}}{\text{min}} \end{aligned}$$

#### 2.4 - Saída de gás no topo do alto forno:

A vazão de gás, medida com o instrumental utilizado pela empresa, foi de 2.976Nm<sup>3</sup>/min. A concentração total de água nos gases foi determinada com base na média da taxa de condensação das amostras obtidas, sendo:

$$\text{Taxa de cond} = \frac{16,0\text{ml}}{15\text{min}} = 1,067\text{ml} / \text{min}$$

Como a vazão de gás do amostrador foi de 45,0//min, o conteúdo de água nos gases do alto forno foi:

$$C_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{1,067\text{ml} / \text{min}}{45,0// \text{min}} = 2,371 \times 10^{-2} \text{ml} // = 23,71\text{g} / \text{Nm}^3$$

A umidade depois da passagem pelo amostrador foi de 23,0g/Nm<sup>3</sup>, o que significa um conteúdo total de água nos gases de: 46,71g/Nm<sup>3</sup>.

A vazão de água transportada na forma de vapor pelos gases é então:

$$\therefore Q_{\text{H}_2\text{O}} = 2.976\text{Nm}^3 / \text{min} \cdot 60\text{min} / \text{h} \cdot 0,0467 \text{ l} / \text{Nm}^3 = 8.338,8 \text{ l} / \text{h}$$

#### 2.5 - Preparação do padrão de medição de trítio:

A partir de uma amostra tomada da solução de injeção, e com a finalidade de realizar medições da mesma ordem de atividade, foi preparada uma dupla diluição com água destilada.

Tanto a massa da solução original quanto a da primeira solução foram pesadas em uma balança de sensibilidade de 0,1mg. As relações utilizadas foram:

$$r_1 = \frac{(0,3002 \pm 0,0001)\text{g}}{(1000 \pm 1)\text{ml}} = (3,002 \pm 0,003) \times 10^{-4}$$

$$r_2 = \frac{(0,3331 \pm 0,0001)\text{g}}{(1000 \pm 1)\text{ml}} = (3,331 \pm 0,003) \times 10^{-4}$$

$$r = r_1 r_2 = (3,002 \pm 0,003) \times 10^{-4} (3,331 \pm 0,003) \times 10^{-4} = (1,00 \pm 0,001) \times 10^{-7}$$

Tabela A3 - Ensaio N° 3: Dados experimentais

Parâmetro	Símbolo	Valor
Vazão de injeção do traçador	$q_o$	15,87ml/min
Concentração de $^3\text{H}$ no traçador	$C_o$	39,22MBq/ml
Tempo de injeção	$\Delta T$	180min
Atividade total de $^3\text{H}$ injetada	$A'$	112GBq
Volume de água tritiada injetada	$q_o \Delta T$	2.857,2ml
Vazão total de gases no alto forno	$Q_{gás}$	2.976Nm <sup>3</sup> /min
Teor de água nos gases	$f$	46,7g/Nm <sup>3</sup>
Vazão total de vapor de água	$Q_{\text{H}_2\text{O}}$	8.338,8l/h
Distância entre detectores	$D$	52m
Área interna das seções de medição	$S$	730,6cm <sup>2</sup>
Atividade de $^{82}\text{Br}$ injetada por ensaio	$A$	0,92GBq
Velocidade do papel de registro	$v$	600mm/min
Intervalo de tempo entre picos	$\Delta t$	31,2s
Vazão de água no anel	$Q_o$	7.306,1l/min
Relação de vazões	$q_o/Q_o$	$2,2 \times 10^{-6}$

Tabela A4 - Ensaio Nº 3: Medições realizadas e resultados

	Trítio na amostra			Contag. líquidas (15 min)	Vazão de fuga	
	1ª med. (15 min)	2ª med. (15 min)	média (15 min)		(l/min)	(l/h)
BG	490	498	494			
Padrão	11591	11577	11584	11090		
1	568	588	578	84	0,05	2,9
2	1030	986	1008	514	0,30	17,8
3	759	743	751	257	0,15	8,9
4	633	599	616	122	0,07	4,2
5	605	595	600	106	0,06	3,7
6	643	639	641	147	0,08	5,1
7	569	555	562	68	0,04	2,4
8	668	636	652	158	0,09	5,5
9	558	576	567	73	0,04	2,5
10	555	563	559	65	0,04	2,2
11	594	590	592	98	0,06	3,4
12	621	625	623	129	0,07	4,5
13	629	597	613	119	0,07	4,1
14	565	539	552	58	0,03	2,0
15	488	514	501	7	0,00	0,2
16	438	470	454	0	0,00	0,0
17	489	501	495	1	0,00	0,0
18	520	526	523	29	0,02	1,0
19	513	509	511	17	0,01	0,6
20	445	449	447	0	0,00	0,0

### 3 - ENSAIO Nº 4

#### 3.1 - Calibração do rotâmetro:

Foram cronometradas várias medidas do tempo gasto para injetar 50ml de água, obtendo-se uma média de 165seg. Isto indica uma vazão de solução radioativa de:

$$q_0 = 1090,9 \text{ cm}^3/\text{h} = 18,18 \text{ ml}/\text{min}$$

#### 3.2 - Atividade total injetada:

Foi utilizada a mesma solução empregada no segundo ensaio, de concentração de atividade:  $C_0 = 30,1 \text{ MBq}/\text{ml}$ . Considerando que se fez uma injeção contínua durante 180min, a atividade total injetada foi de:

$$A' = C_0 q_0 \Delta t = 30,1 \frac{\text{MBq}}{\text{ml}} 1090,9 \frac{\text{cm}^3}{\text{h}} 3\text{h} = 98,5 \text{ GBq} (2,66 \text{ Ci})$$

#### 3.3 - Determinação do valor de $Q_0$ :

Para a realização das medições da vazão na tubulação de água de resfriamento utilizou-se o  $^{82}\text{Br}$  como traçador. A atividade injetada foi de aproximadamente 0,74GBq (20mCi) por determinação.

A velocidade de avanço do papel do registrador foi repetidamente medida, obtendo-se um valor médio de  $(607 \pm 3) \text{ mm}/\text{min}$ .

Depois de determinado o centro de massa de ambos picos, mediu-se a separação entre eles, obtendo-se o valor de 313mm, o que corresponde a:

$$\Delta t = \frac{L}{v_{\text{papel}}} = \frac{313 \text{ mm} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}{607 \frac{\text{mm}}{\text{min}}} = 30,94 \text{ s}$$

A vazão do fluido na tubulação é, então, de:

$$Q_a = S v = \frac{S D}{\Delta t} = \frac{730,6\text{cm}^2 \cdot 5200\text{cm}}{30,94\text{s}} = 122,790\text{cm}^3/\text{s} =$$

$$= 122,790\text{ l}/\text{s} = 7.367,5\text{ l}/\text{min}$$

### 3.4 - Saída de gás no topo do alto forno:

A vazão de gás, medida com o instrumental utilizado pela empresa, foi de 3.292Nm<sup>3</sup>/min. A concentração total de água nos gases foi determinada com base na média da taxa de condensação das amostras obtidas, sendo:

$$\text{Taxa de cond} = \frac{16,5\text{ml}}{20\text{min}} = 0,825\text{ml} / \text{min}$$

Como a vazão de gás do amostrador foi de 39,25l/min, a umidade condensada no amostrador correspondeu a uma concentração de água no gás de:

$$C_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,825\text{ml} / \text{min}}{39,25\text{l} / \text{min}} = 2,102 \times 10^{-2}\text{ ml} / \text{l} = 21,02\text{g} / \text{Nm}^3$$

A umidade depois da passagem pelo amostrador foi de 24,05g/Nm<sup>3</sup>, o que significa um conteúdo total de água nos gases de: 45,07g/Nm<sup>3</sup>.

A vazão de água transportada na forma de vapor pelos gases é então:

$$\therefore Q_{\text{H}_2\text{O}} = 3.292\text{Nm}^3/\text{min} \cdot \frac{60\text{min}}{\text{h}} \cdot 0,045\text{ l}/\text{Nm}^3 = 8.888,4\text{ l}/\text{h}$$

### 3.5 - Preparação do padrão de medição de trítio:

A partir de uma amostra tomada da solução de injeção, e com a finalidade de realizar medições da mesma ordem de atividade, foi preparada uma dupla diluição com água destilada.

Tanto a massa da solução original quanto a da primeira solução foram pesadas em uma balança de sensibilidade de 0,1mg. As relações utilizadas foram:

$$r_1 = \frac{(0,3182 \pm 0,0001)g}{(1000 \pm 1)ml} = (3,182 \pm 0,003) \times 10^{-4}$$

$$r_2 = \frac{(0,3143 \pm 0,0001)g}{(1000 \pm 1)ml} = (3,143 \pm 0,003) \times 10^{-4}$$

$$r = r_1 r_2 = (3,182 \pm 0,003) \times 10^{-4} (3,143 \pm 0,003) \times 10^{-4} = (1,00 \pm 0,001) \times 10^{-7}$$

Tabela A5 - Ensaio N° 4: Dados experimentais

Parâmetro	Símbolo	Valor
Vazão de injeção do traçador	$q_0$	18,18ml/min
Concentração de $^3\text{H}$ no traçador	$C_0$	30,1MBq/ml
Tempo de injeção	$\Delta T$	180min
Atividade total de $^3\text{H}$ injetada	$A'$	98,5GBq
Volume de água tritiada injetada	$q_0 \Delta T$	3.273,0ml
Vazão total de gases no alto forno	$Q_{\text{gás}}$	3.292Nm <sup>3</sup> /min
Teor de água nos gases	$f$	45,07g/Nm <sup>3</sup>
Vazão total de vapor de água	$Q_{\text{H}_2\text{O}}$	8.888,4l/h
Distância entre detectores	$D$	52m
Área interna das seções de medição	$S$	730,6cm <sup>2</sup>
Atividade de $^{82}\text{Br}$ injetada por ensaio	$A$	0,74GBq
Velocidade do papel de registro	$v$	607mm/min
Intervalo de tempo entre picos	$\Delta t$	30,94s
Vazão de água no anel	$Q_0$	7.367,5l/min
Relação de vazões	$q_0/Q_0$	$2,4 \times 10^{-6}$

Tabela A6 - Ensaio N° 4: Medições realizadas e resultados

	Trítio na amostra			Contag. líquidas (20 min)	Vazão de fuga	
	1ª med. (20 min)	2ª med. (20 min)	média (20 min)		(l/min)	(l/h)
BG	712	738	725			
Padrão	7195	7245	7220	6495		
1	800	767	783,5	58,5	0,05	3,2
2	690	730	710	0	0,00	0,0
3	1350	1364	1357	632	0,58	35,0
4	1052	1038	1045	320	0,30	17,7
5	1275	1233	1254	529	0,49	29,3
6	1001	1145	1073	348	0,32	19,3
7	1098	1132	1115	390	0,36	21,6
8	1085	1163	1124	399	0,37	22,1
9	1097	1105	1101	376	0,35	20,8
10	1212	1172	1192	467	0,43	25,9
11	1225	1235	1230	505	0,47	28,0
12	1278	1262	1270	545	0,50	30,2
13	1105	1147	1126	401	0,37	22,2
14	1285	1167	1226	501	0,46	27,8
15	1312	1276	1294	569	0,53	31,6
16	1178	1208	1193	468	0,43	25,9
17	1242	1264	1253	528	0,49	29,3
18	1011	1061	1036	311	0,29	17,2
19	1050	1104	1077	352	0,33	19,5
20	1185	1229	1207	482	0,45	26,7
21	1242	1276	1259	534	0,49	29,6

#### 4 - ENSAIO Nº 5

##### 4.1 - Calibração do rotâmetro:

Foram cronometradas duas medidas do tempo gasto para injetar 50ml de água, uma antes e outra depois da injeção, obtendo-se os valores 162seg e 162seg. Isto indica uma vazão de solução radioativa de:

$$q_0 = 1111,1 \text{cm}^3/\text{h} = 18,51 \text{ml}/\text{min}$$

##### 4.2 - Atividade total injetada:

Utilizou-se a mesma diluição preparada para o segundo ensaio, cuja concentração de atividade era:  $C_0 = 30,1 \text{MBq}/\text{ml}$ . Considerando que se fez uma injeção contínua durante 170min, a atividade total injetada foi de:

$$A' = C_0 q_0 \Delta t = \frac{30,1 \text{MBq}/\text{ml} \cdot 1111,1 \text{cm}^3/\text{h} \cdot 170 \text{min}}{60 \text{min}/\text{h}} = 94,76 \text{GBq} (2,56 \text{Ci})$$

##### 4.3 - Determinação do valor de $Q_0$ :

Para a realização das medições da vazão na tubulação de água de resfriamento utilizou-se o  $^{82}\text{Br}$  como traçador. A atividade injetada foi de, aproximadamente, 0,92GBq (25mCi) por determinação.

A velocidade de avanço do papel do registrador foi repetidamente medida, sendo o valor médio determinado de  $(596 \pm 4) \text{mm}/\text{min}$ .

Depois de determinado o centro de massa de ambos picos, mediu-se a separação entre eles, obtendo-se o valor de 322mm, o que corresponde a:

$$\Delta t = \frac{L}{v_{\text{papel}}} = \frac{322 \text{mm} \cdot 60 \text{ s}/\text{min}}{596 \text{ mm}/\text{min}} = 32,41 \text{s}$$

A vazão do fluido na tubulação é, então, de:

$$\begin{aligned} Q_0 &= S v = \frac{S D}{\Delta t} = \frac{730,6 \text{cm}^2 \cdot 5200 \text{cm}}{32,41 \text{s}} = 117.220 \text{cm}^3/\text{s} = \\ &= 117,220 \text{l}/\text{s} = 7.035,7 \text{l}/\text{min} \end{aligned}$$

#### 4.4 - Saída de gás no topo do alto forno:

A vazão da gás, medida com o instrumental utilizado pela empresa, foi de 3.429Nm<sup>3</sup>/min. A concentração total de água nos gases foi determinada com base na média da taxa de condensação das amostras obtidas, sendo:

$$\text{Taxa de cond} = \frac{16,0\text{ml}}{15\text{min}} = 1,067\text{ml} / \text{min}$$

Como a vazão de gás do amostrador foi de 33,63l/min, a umidade condensada na amostrador correspondeu a uma concentração de água no gás de:

$$C_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{1,067\text{ml} / \text{min}}{33,63\text{l} / \text{min}} = 3,172 \times 10^{-2} \text{ml} / \text{l} = 31,72\text{g} / \text{Nm}^3$$

A umidade depois da passagem pelo amostrador foi de 31,2g/Nm<sup>3</sup>, o que significa um conteúdo total de água nos gases de: 62,92g/Nm<sup>3</sup>.

A vazão de água transportada na forma de vapor pelos gases é então:

$$\therefore Q_{\text{H}_2\text{O}} = 3.429\text{Nm}^3 / \text{min} \cdot 60\text{min} / \text{h} \cdot 0,063 \text{l} / \text{Nm}^3 = 12.961,6 \text{l} / \text{h}$$

#### 4.5 - Preparação do padrão de medição de trítio:

O padrão utilizado foi o mesmo do ensaio anterior.

Tabela A7 - Ensaio Nº 5: Dados experimentais

Parâmetro	Símbolo	Valor
Vazão de injeção do traçador	$q_0$	18,51ml/min
Concentração de $^3\text{H}$ no traçador	$C_0$	30,1MBq/ml
Tempo de injeção	$\Delta T$	170min
Atividade total de $^3\text{H}$ injetada	$A'$	94,7GBq
Volume de água tritiada injetada	$q_0 \Delta T$	3.148ml
Vazão total de gases no alto forno	$Q_{\text{gás}}$	3.429Nm <sup>3</sup> /min
Teor de água nos gases	$f$	62,92g/Nm <sup>3</sup>
Vazão total de vapor de água	$Q_{\text{H}_2\text{O}}$	12.961,6l/h
Distância entre detectores	$D$	52m
Área interna das seções de medição	$S$	730,6cm <sup>2</sup>
Atividade de $^{82}\text{Br}$ injetada por ensaio	$A$	0,925GBq
Velocidade do papel de registro	$v$	596mm/min
Intervalo de tempo entre picos	$\Delta t$	32,41s
Vazão de água no anel	$Q_0$	7.035,7l/min
Relação de vazões	$q_0/Q_0$	$2,6 \times 10^{-6}$

Tabela A8 - Ensaio Nº 5: Medições realizadas e resultados

	Trítio na amostra			Contag. líquidas (20 min)	Vazão de fuga	
	1ª med. (20 min)	2ª med. (20 min)	média (20 min)		(l/min)	(l/h)
BG	712	738	725			
Padrão	7195	7245	7220	6495		
1	730	748	739	14	0,02	1,1
2	713	732	722,5	0	0,00	0,0
3	863	833	848	123	0,16	9,3
4	842	822	832	107	0,14	8,1
5	989	1073	1031	306	0,39	23,2
6	1010	1174	1092	367	0,46	27,8
7	901	949	925	200	0,25	15,2
8	813	839	826	101	0,13	7,7
9	903	839	871	146	0,18	11,1
10	1050	1024	1037	312	0,39	23,7
11	1060	1078	1069	344	0,43	26,1
12	1491	1463	1477	752	0,95	57,0
13	884	902	893	168	0,21	12,7
14	1475	1461	1468	743	0,94	56,3
15	911	923	917	192	0,24	14,6
16	849	861	855	130	0,16	9,9
17	841	863	852	127	0,16	9,6

## 5 - ENSAIO Nº 6

### 5.1 - Calibração do rotâmetro:

Foram cronometradas duas medidas do tempo gasto para injetar 50ml de água, uma antes e outra depois da injeção, obtendo-se os valores 288seg e 284seg. Isto indica uma vazão de solução radioativa de:

$$q_0 = 629,3 \text{ cm}^3/\text{h} = 10,48 \text{ ml}/\text{min}$$

### 5.2 - Atividade total injetada:

Foi utilizada a mesma diluição do terceiro anterior, de concentração de atividade:  $C_0 = 39,22 \text{ MBq}/\text{ml}$ . Considerando que se fez uma injeção contínua durante 176min, a atividade total injetada foi de:

$$A' = C_0 q_0 \Delta t = \frac{39,22 \text{ MBq}/\text{ml} \cdot 629,3 \text{ cm}^3/\text{h} \cdot 176 \text{ min}}{60 \text{ min}/\text{h}} = 72,39 \text{ GBq} (1,96 \text{ Ci})$$

### 5.3 - Determinação do valor de $Q_0$ :

Para a realização das medições da vazão na tubulação de água de resfriamento utilizou-se o  $^{82}\text{Br}$  como traçador. A atividade injetada foi de aproximadamente 1,3GBq (35mCi) por determinação.

A velocidade de avanço do papel do registrador foi repetidamente medida, sendo o valor médio determinado de  $(600 \pm 4) \text{ mm}/\text{min}$ .

Depois de determinado o centro de massa de ambos picos, mediu-se a separação entre eles, obtendo-se o valor de 354mm, o que corresponde a:

$$\Delta t = \frac{L}{v_{\text{papel}}} = \frac{354 \text{ mm} \cdot 60 \text{ s}/\text{min}}{600 \text{ mm}/\text{min}} = 35,4 \text{ s}$$

A vazão do fluido na tubulação é, então, de:

$$\begin{aligned} Q_0 &= S v = \frac{S D}{\Delta t} = \frac{730,6 \text{ cm}^2 \cdot 5200 \text{ cm}}{35,4 \text{ s}} = 107.319 \text{ cm}^3/\text{s} = \\ &= 107,319 \text{ l}/\text{s} = 6.439,2 \text{ l}/\text{min} \end{aligned}$$

#### 5.4 - Saída de gás no topo do alto forno:

A vazão de gás, medida com o instrumental utilizado pela empresa, foi de  $2.840\text{Nm}^3/\text{min}$ . A concentração total de água nos gases foi determinada com base na média da taxa de condensação das amostras obtidas, sendo:

$$\text{Taxa de cond} = \frac{365,0\text{ml}}{5\text{min}} = 73,0\text{ml} / \text{min}$$

Como a vazão de gás do amostrador foi de  $45,0\text{ l/min}$ , a umidade condensada no amostrador correspondeu a uma concentração de água no gás de:

$$C_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{73,0\text{ml} / \text{min}}{45,0\text{ l} / \text{min}} = 1,622\text{ml} / \text{l} = 1.622,0\text{g} / \text{Nm}^3$$

A umidade depois da passagem pelo amostrador foi nula, o que significa uma vazão de água transportada na forma de vapor pelos gases de:

$$\therefore Q_{\text{H}_2\text{O}} = 2.840\text{Nm}^3 / \text{min} \cdot 60\text{min} / \text{h} \cdot 1,62\text{ l} / \text{Nm}^3 = 276.422,9\text{ l} / \text{h}$$

#### 5.5 - Preparação do padrão de medição de trítio:

O padrão utilizado foi o mesmo do ensaio anterior.

Tabela A9 - Ensaio N° 6: Dados experimentais

Parâmetro	Símbolo	Valor
Vazão de injeção do traçador	$q_0$	10,48ml/min
Concentração de $^3\text{H}$ no traçador	$C_0$	39,22MBq/ml
Tempo de injeção	$\Delta T$	176min
Atividade total de $^3\text{H}$ injetada	$A'$	72,4GBq
Volume de água tritiada injetada	$q_0 \Delta T$	1.844,4ml
Vazão total de gases no alto forno	$Q_{\text{gás}}$	2.840Nm <sup>3</sup> /min
Teor de água nos gases	$f$	1.622,2g/Nm <sup>3</sup>
Vazão total de vapor de água	$Q_{\text{H}_2\text{O}}$	276.423l/h
Distância entre detectores	$D$	52m
Área interna das seções de medição	$S$	730,6cm <sup>2</sup>
Atividade de $^{82}\text{Br}$ injetada por ensaio	$A$	1,3GBq
Velocidade do papel de registro	$v$	600mm/min
Intervalo de tempo entre picos	$\Delta t$	35,4s
Vazão de água no anel	$Q_0$	6.439,2l/min
Relação de vazões	$q_0/Q_0$	$1,6 \times 10^{-6}$

Tabela A10 - Ensaio Nº 6: Medições realizadas e resultados

	Trítio na amostra			Contag. líquidas (15 min)	Vazão de fuga	
	1ª med. (15 min)	2ª med. (15 min)	média (15 min)		(l/min)	(l/h)
BG	587	597	592			
Padrão	11670	11612	11641	11049		
1	546	588	567	0	0,00	0,0
2	639	531	585	0	0,00	0,0
3	745	701	723	131	3,34	200,5
4	603	535	569	0	0,00	0,0
5	605	537	571	0	0,00	0,0
6	1430	1516	1473	881	22,47	1348,2
7	585	539	562	0	0,00	0,0
8	739	745	742	150	3,83	229,5
9	644	560	602	10	0,26	15,3
10	555	577	566	0	0,00	0,0
11	594	548	571	0	0,00	0,0
12	578	502	540	0	0,00	0,0
13	540	568	554	0	0,00	0,0
14	745	761	753	161	4,11	246,4
15	873	917	895	303	7,73	463,7
16	680	708	694	102	2,60	156,1
17	746	706	726	134	3,42	205,1
18	679	703	691	99	2,52	151,5
19	544	534	539	0	0,00	0,0
20	605	589	597	5	0,13	7,7
21	653	659	656	64	1,63	97,9
22	1052	1062	1057	465	11,86	711,6
23	605	559	582	0	0,00	0,0
24	613	623	618	26	0,66	39,8
25	661	673	667	75	1,91	114,8

## 6 - ENSAIO Nº 7

### 6.1 - Calibração do rotâmetro:

Foram cronometradas duas medidas do tempo gasto para injetar 50ml de água, uma antes e outra depois da injeção, obtendo-se os valores 174seg e 172seg. Isto indica uma vazão de solução radioativa de:

$$q_0 = 1.040,0 \text{cm}^3/\text{h} = 17,33 \text{ml}/\text{min}$$

### 6.2 - Atividade total injetada:

Foi utilizada a mesma diluição do ensaio anterior, de concentração de atividade:  $C_0 = 39,22 \text{MBq}/\text{ml}$ . Considerando que se fez uma injeção contínua durante 180min, a atividade total injetada foi de:

$$A' = C_0 q_0 \Delta t = 39,22 \frac{\text{MBq}}{\text{ml}} 1.040,0 \frac{\text{cm}^3}{\text{h}} 3\text{h} = 122,3 \text{GBq} (3,31 \text{Ci})$$

### 6.3 - Determinação do valor de $Q_0$ :

Para a realização das medições da vazão na tubulação de água de resfriamento utilizou-se o  $^{82}\text{Br}$  como traçador. A atividade injetada foi de aproximadamente 1,1GBq (30mCi) por determinação.

A velocidade de avanço do papel do registrador foi repetidamente medida, sendo o valor médio determinado de  $(600 \pm 4) \text{mm}/\text{min}$ .

Depois de determinado o centro de massa de ambos picos, mediu-se a separação entre eles, obtendo-se o valor de 358mm, o que corresponde a:

$$\Delta t = \frac{L}{v_{\text{papel}}} = \frac{358 \text{mm} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}{600 \frac{\text{mm}}{\text{min}}} = 35,8 \text{s}$$

A vazão do fluido na tubulação é, então, de:

$$\begin{aligned} Q_0 &= S v = \frac{S D}{\Delta t} = \frac{730,6 \text{cm}^2 \cdot 5200 \text{cm}}{35,8 \text{s}} = 106.120 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} = \\ &= 106,120 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 6.367,2 \frac{\text{l}}{\text{min}} \end{aligned}$$

#### 6.4 - Saída de gás no topo do alto forno:

A vazão de gás, medida com o instrumental utilizado pela empresa, foi de  $2.783 \text{ Nm}^3/\text{min}$ . A concentração total de água nos gases foi determinada com base na média da taxa de condensação das amostras obtidas, sendo:

$$\text{Taxa de cond} = \frac{42,6 \text{ ml}}{15 \text{ min}} = 2,84 \text{ ml / min}$$

Como a vazão de gás do amostrador foi de  $45,0 \text{ l/min}$ , a umidade condensada no amostrador correspondeu a uma concentração de água no gás de:

$$C_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{2,84 \text{ ml / min}}{45,0 \text{ l / min}} = 6,311 \cdot 10^{-2} \text{ ml / l} = 63,11 \text{ g / Nm}^3$$

A umidade depois da passagem pelo amostrador foi de  $55,9 \text{ g/Nm}^3$ , o que significa um conteúdo total de água nos gases de:  $119,0 \text{ g/Nm}^3$ .

A vazão de água transportada na forma de vapor pelos gases é então:

$$\therefore Q_{\text{H}_2\text{O}} = 2.783 \text{ Nm}^3/\text{min} \cdot 60 \text{ min/h} \cdot 0,119 \text{ l/Nm}^3 = 19.870,6 \text{ l/h}$$

#### 6.5 - Preparação do padrão de medição de trítio:

O padrão utilizado foi o mesmo do ensaio anterior.

Tabela A11 - Ensaio N<sup>o</sup> 7: Dados experimentais

Parâmetro	Símbolo	Valor
Vazão de injeção do traçador	$q_0$	17,33ml/min
Concentração de $^3\text{H}$ no traçador	$C_0$	39,22MBq/ml
Tempo de injeção	$\Delta T$	180min
Atividade total de $^3\text{H}$ injetada	$A'$	122GBq
Volume de água tritiada injetada	$q_0 \Delta T$	3.119,4ml
Vazão total de gases no alto forno	$Q_{\text{gás}}$	2.783Nm <sup>3</sup> /min
Teor de água nos gases	$f$	119,0g/Nm <sup>3</sup>
Vazão total de vapor de água	$Q_{\text{H}_2\text{O}}$	19.870,6l/h
Distância entre detectores	$D$	52m
Área interna das seções de medição	$S$	730,6cm <sup>2</sup>
Atividade de $^{82}\text{Br}$ injetada por ensaio	$A$	1,1GBq
Velocidade do papel de registro	$v$	600mm/min
Intervalo de tempo entre picos	$\Delta t$	35,8s
Vazão de água no anel	$Q_0$	6.367,2l/min
Relação de vazões	$q_0/Q_0$	$2,7 \times 10^{-6}$

Tabela A12 - Ensaio N° 7: Medições realizadas e resultados

	Trítio na amostra			Contag. líquidas (10 min)	Vazão de fuga	
	1ª med. (10 min)	2ª med. (10 min)	média (10 min)		(l/min)	(l/h)
BG	341	335	338			
Padrão	11401	11455	11428	11090		
1	449	461	455	117	0,13	7,7
2	398	378	388	50	0,05	3,3
3	391	401	396	58	0,06	3,8
4	335	341	338	0	0,00	0,0
5	405	385	395	57	0,06	3,8
6	339	329	334	0	0,00	0,0
7	326	334	330	0	0,00	0,0
8	345	375	360	22	0,02	1,4
9	330	337	333,5	0	0,00	0,0
10	338	326	332	0	0,00	0,0
11	335	317	326	0	0,00	0,0
12	339	323	331	0	0,00	0,0
13	315	325	320	0	0,00	0,0
14	330	328	329	0	0,00	0,0
15	339	331	335	0	0,00	0,0
16	340	328	334	0	0,00	0,0
17	385	411	398	60	0,07	3,9
18	323	327	325	0	0,00	0,0
19	336	316	326	0	0,00	0,0
20	330	322	326	0	0,00	0,0

## 7 - ENSAIO Nº 8

### 7.1 - Calibração do rotâmetro:

Foram cronometradas duas medidas do tempo gasto para injetar de 50ml de água, uma antes e outra depois da injeção, obtendo-se os valores 176seg e 172seg. Isto indica uma vazão de solução radioativa de:

$$q_0 = 1.034,0 \text{cm}^3/\text{h} = 17,23 \text{ml}/\text{min}$$

### 7.2 - Atividade total injetada:

Foi utilizada a mesma diluição do ensaio anterior, de concentração de atividade:  $C_0 = 39,22 \text{MBq}/\text{ml}$ . Considerando que se fez uma injeção contínua durante 180min, a atividade total injetada foi de:

$$A' = C_0 q_0 \Delta t = 39,22 \frac{\text{MBq}}{\text{ml}} 1.034,0 \frac{\text{cm}^3}{\text{h}} 3\text{h} = 121,6 \text{GBq} (3,29 \text{Ci})$$

### 7.3 - Determinação do valor de $Q_0$ :

Para a realização das medições da vazão na tubulação de água de resfriamento utilizou-se o  $^{82}\text{Br}$  como traçador. A atividade injetada foi de aproximadamente 1,1GBq (30mCi) por determinação.

A velocidade de avanço do papel do registrador foi repetidamente medida, sendo o valor médio determinado de  $(600 \pm 4) \text{mm}/\text{min}$ .

Depois de determinado o centro de massa de ambos picos, mediu-se a separação entre eles, obtendo-se o valor de 412mm, o que corresponde a:

$$\Delta t = \frac{L}{v_{\text{papel}}} = \frac{412 \text{mm} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}{600 \frac{\text{mm}}{\text{min}}} = 41,2 \text{s}$$

A vazão do fluido na tubulação é, então, de:

$$\begin{aligned} Q_0 &= S v = \frac{S D}{\Delta t} = \frac{730,6 \text{cm}^2 \cdot 5200 \text{cm}}{41,2 \text{s}} = 92.211 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} - \\ &= 92,211 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 5.532,7 \frac{\text{l}}{\text{min}} \end{aligned}$$

#### 7.4 - Saída de gás no topo do alto forno:

A vazão de gás, medida com o instrumental utilizado pela empresa, foi de  $2.783 \text{ Nm}^3/\text{min}$ . A concentração total de água nos gases foi determinada com base na média da taxa de condensação das amostras obtidas, sendo:

$$\text{Taxa de cond} = \frac{5,1 \text{ ml}}{15 \text{ min}} = 0,34 \text{ ml / min}$$

Como a vazão de gás do amostrador foi de  $45,0 \text{ l/min}$ , a umidade condensada no amostrador correspondeu a uma concentração de água no gás de:

$$C_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,34 \text{ ml / min}}{45,0 \text{ l / min}} = 0,755 \cdot 10^{-2} \text{ ml / l} = 7,55 \text{ g / Nm}^3$$

A umidade depois da passagem pelo amostrador foi de  $57,0 \text{ g/Nm}^3$ , o que significa um conteúdo total de água nos gases de:  $64,55 \text{ g/Nm}^3$ .

A vazão de água transportada na forma de vapor pelos gases é então:

$$\therefore Q_{\text{H}_2\text{O}} = 2.783 \text{ Nm}^3/\text{min} \cdot 60 \text{ min/h} \cdot 0,0645 \text{ l/Nm}^3 = 10.780,2 \text{ l/h}$$

#### 7.5 - Preparação do padrão de medição de trítio:

O padrão utilizado foi o mesmo do ensaio anterior.

Tabela A13 - Ensaio N° 8: Dados experimentais

Parâmetro	Símbolo	Valor
Vazão de injeção do traçador	$q_0$	17,23ml/min
Concentração de $^3\text{H}$ no traçador	$C_0$	39,22MBq/ml
Tempo de injeção	$\Delta T$	180min
Atividade total de $^3\text{H}$ injetada	$A'$	122GBq
Volume de água tritiada injetada	$q_0 \Delta T$	3.102,0ml
Vazão total de gases no alto forno	$Q_{\text{gás}}$	2.783Nm <sup>3</sup> /min
Teor de água nos gases	$f$	64,55g/Nm <sup>3</sup>
Vazão total de vapor de água	$Q_{\text{H}_2\text{O}}$	10.780,2l/h
Distância entre detectores	$D$	52m
Área interna das seções de medição	$S$	730,6cm <sup>2</sup>
Atividade de $^{82}\text{Br}$ injetada por ensaio	$A$	1,1GBq
Velocidade do papel de registro	$v$	600mm/min
Intervalo de tempo entre picos	$\Delta t$	41,2s
Vazão de água no anel	$Q_0$	5.532,7l/min
Relação de vazões	$q_0/Q_0$	$3,1 \times 10^{-6}$

Tabela A14 - Ensaio Nº 8: Medições realizadas e resultados

	Trítio na amostra			Contag. líquidas (15 min)	Vazão de fuga	
	1ª med. (15 min)	2ª med. (15 min)	média (15 min)		(l/min)	(l/h)
BG	527	543	535			
Padrão	11601	11649	11625	11090		
1	525	531	528	-7	-0,01	-0,5
2	519	528	523,5	-11,5	-0,01	-0,8
3	722	704	713	178	0,20	11,7
4	539	531	535	0	0,00	0,0
5	591	569	580	45	0,05	3,0
6	517	524	520,5	0	0,00	0,0
7	528	532	530	0	0,00	0,0
8	540	532	536	1	0,00	0,1

## 8 - ENSAIO Nº 9

### 8.1 - Calibração do rotâmetro:

Foram cronometradas duas medidas do tempo gasto para injetar 50ml de água, uma antes e outra depois da injeção, obtendo-se os valores 175seg e 173seg. Isto indica uma vazão de solução radioativa de:

$$q_0 = 1.034,0 \text{cm}^3/\text{h} = 17,23 \text{ml}/\text{min}$$

### 8.2 - Atividade total injetada:

Foi utilizada a mesma diluição de traçador do ensaio anterior, de concentração de atividade:  $C_0 = 39,22 \text{MBq}/\text{ml}$ . Considerando que se fez uma injeção contínua durante 180min, a atividade total injetada foi de:

$$A' = C_0 q_0 \Delta t = 39,22 \frac{\text{MBq}}{\text{ml}} 1.034,0 \frac{\text{cm}^3}{\text{h}} 3\text{h} = 121,6 \text{GBq} (3,29 \text{Ci})$$

### 8.3 - Determinação do valor de $Q_0$ :

Para a realização das medições da vazão na tubulação de água de resfriamento utilizou-se o  $^{82}\text{Br}$  como traçador. A atividade injetada foi de aproximadamente 0,92GBq (25mCi) por determinação.

A velocidade de avanço do papel do registrador foi repetidamente medida, sendo o valor médio determinado de  $(600 \pm 4) \text{mm}/\text{min}$ .

Depois de determinado o centro de massa de ambos picos, mediu-se a separação entre eles, obtendo-se o valor de 320mm, o que corresponde a:

$$\Delta t = \frac{L}{v_{\text{papel}}} = \frac{320 \text{mm} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}{600 \frac{\text{mm}}{\text{min}}} = 32,0 \text{s}$$

A vazão do fluido na tubulação é, então, de:

$$\begin{aligned} Q_0 &= S v = \frac{S D}{\Delta t} = \frac{730,6 \text{cm}^2 \cdot 5200 \text{cm}}{32,0 \text{s}} = 118.722 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} = \\ &= 118,722 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 7.123,4 \frac{\text{l}}{\text{min}} \end{aligned}$$

#### 8.4 - Saída de gás no topo do alto forno:

A vazão de gás, medida com o instrumental utilizado pela empresa, foi de  $2.735 \text{ Nm}^3/\text{min}$ . A concentração total de água nos gases foi determinada com base na média da taxa de condensação das amostras obtidas, sendo:

$$\text{Taxa de cond} = \frac{12,5 \text{ ml}}{15 \text{ min}} = 0,83 \text{ ml / min}$$

Como a vazão de gás do amostrador foi de  $45,0 \text{ l/min}$ , a umidade condensada no amostrador correspondeu a uma concentração de água no gás de:

$$C_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,83 \text{ ml / min}}{45,0 \text{ l / min}} = 1,844 \cdot 10^{-2} \text{ ml / l} = 18,44 \text{ g / Nm}^3$$

A umidade depois da passagem pelo amostrador foi de  $17,5 \text{ g/Nm}^3$ , o que significa um conteúdo total de água nos gases de:  $35,94 \text{ g/Nm}^3$ .

A vazão de água transportada na forma de vapor pelos gases é então:

$$\therefore Q_{\text{H}_2\text{O}} = 2.735 \text{ Nm}^3/\text{min} \cdot 60 \text{ min/h} \cdot 0,03594 \text{ l/Nm}^3 = 5.897,7 \text{ l/h}$$

#### 8.5 - Preparação do padrão de medição de trítio:

A partir de uma amostra tomada da solução de injeção, e com a finalidade de realizar medições da mesma ordem de atividade, foi preparada uma dupla diluição com água destilada.

Tanto a massa da solução original quanto à da primeira solução foram pesadas em uma balança de sensibilidade de  $0,1 \text{ mg}$ . As relações utilizadas foram:

$$r_1 = \frac{0,1036 \text{ g}}{1000 \text{ ml}} = 1,036 \times 10^{-4}$$

$$r_2 = \frac{0,0965 \text{ g}}{1000 \text{ ml}} = 0,965 \times 10^{-4}$$

$$r = r_1 r_2 = 1,036 \times 10^{-4} \cdot 0,965 \times 10^{-4} = 1,0 \times 10^{-8}$$

Tabela A15 - Ensaio Nº 9: Dados experimentais

Parâmetro	Símbolo	Valor
Vazão de injeção do traçador	$q_0$	17,23ml/min
Concentração de $^3\text{H}$ no traçador	$C_0$	39,22MBq/ml
Tempo de injeção	$\Delta T$	180min
Atividade total de $^3\text{H}$ injetada	$A'$	122GBq
Volume de água tritiada injetada	$q_0 \Delta T$	3.102,0ml
Vazão total de gases no alto forno	$Q_{\text{gás}}$	2.735Nm <sup>3</sup> /min
Teor de água nos gases	$f$	35,94g/Nm <sup>3</sup>
Vazão total de vapor de água	$Q_{\text{H}_2\text{O}}$	5.897,7l/h
Distância entre detectores	$D$	52m
Área interna das seções de medição	$S$	730,6cm <sup>2</sup>
Atividade de $^{82}\text{Br}$ injetada por ensaio	$A$	0,92GBq
Velocidade do papel de registro	$v$	600mm/min
Intervalo de tempo entre picos	$\Delta t$	32,0s
Vazão de água no anel	$Q_0$	7.123,4l/min
Relação de vazões	$q_0/Q_0$	$2,4 \times 10^{-6}$

Tabela A16 - Ensaio Nº 9: Medições realizadas e resultados

	Trítio na amostra			Contag. líquidas (15 min)	Vazão de fuga	
	1ª med. (15 min)	2ª med. (15 min)	média (15 min)		(l/min)	(l/h)
BG	512	518	515			
Padrão	2224	2206	2215	1700		
1	525	501	513	0	0,00	0,0
2	581	591	586	71	0,02	1,0
3	523	527	525	10	0,00	0,1
4	519	507	513	0	0,00	0,0
5	511	515	513	0	0,00	0,0
6	521	527	524	9	0,00	0,1
7	517	509	513	0	0,00	0,0
8	525	497	511	0	0,00	0,0
9	551	587	569	54	0,01	0,8
10	624	670	647	132	0,03	1,9
11	598	590	594	79	0,02	1,1
12	574	616	595	80	0,02	1,1
13	583	609	596	81	0,02	1,2

## 9 - ENSAIO Nº 10

### 9.1 - Calibração do rotâmetro:

Foram cronometradas duas medidas do tempo gasto para injetar 50ml de água, uma antes e outra depois da injeção, obtendo-se os valores 170seg e 172seg. Isto indica uma vazão de solução radioativa de:

$$q_0 = 1.053,0 \text{cm}^3/\text{h} = 17,55 \text{ml}/\text{min}$$

### 9.2 - Atividade total injetada:

Foi utilizada uma diluição de concentração de atividade:  $C_0 = 65,38 \text{MBq}/\text{ml}$ . Considerando que se fez uma injeção continua durante 180min, a atividade total injetada foi de:

$$A' = C_0 q_0 \Delta t = 65,38 \frac{\text{MBq}}{\text{ml}} 1.053,0 \frac{\text{cm}^3}{\text{h}} 3\text{h} = 206 \text{GBq} (5,57 \text{Ci})$$

### 9.3 - Determinação do valor de $Q_0$ :

Para a realização das medições da vazão na tubulação de água de resfriamento utilizou-se o  $^{82}\text{Br}$  como traçador. A atividade injetada foi de aproximadamente 0,92GBq (25mCi) por determinação.

A velocidade de avanço do papel do registrador foi repetidamente medida, sendo o valor médio determinado de  $(600 \pm 4) \text{mm}/\text{min}$ .

Depois de determinado o centro de massa de ambos picos, mediu-se a separação entre eles, obtendo-se o valor de 343mm, o que corresponde a:

$$\Delta t = \frac{L}{v_{\text{papel}}} = \frac{343 \text{mm} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}{600 \frac{\text{mm}}{\text{min}}} = 34,3 \text{s}$$

A vazão do fluido na tubulação é, então, de:

$$\begin{aligned} Q_0 &= S v = \frac{S D}{\Delta t} = \frac{730,6 \text{cm}^2 \cdot 5200 \text{cm}}{34,3 \text{s}} = 110.761 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} = \\ &= 110,761 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 6.645,7 \frac{\text{l}}{\text{min}} \end{aligned}$$

#### 9.4 - Saída de gás no topo do alto forno:

A vazão de gás, medida com o instrumental utilizado pela empresa, foi de  $2.730 \text{ Nm}^3/\text{min}$ . A concentração total de água nos gases foi determinada com base na média da taxa de condensação das amostras obtidas, sendo:

$$\text{Taxa de cond} = \frac{5,9 \text{ ml}}{15 \text{ min}} = 0,39 \text{ ml / min}$$

Como a vazão de gás do amostrador foi de  $45,0 \text{ l/min}$ , a umidade condensada no amostrador correspondeu a uma concentração de água no gás de:

$$C_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,39 \text{ ml / min}}{45,0 \text{ l / min}} = 0,87 \cdot 10^{-2} \text{ ml / l} = 8,7 \text{ g / Nm}^3$$

A umidade depois da passagem pelo amostrador foi de  $35,3 \text{ g/Nm}^3$ , o que significa um conteúdo total de água nos gases de:  $44,0 \text{ g/Nm}^3$ .

A vazão de água transportada na forma de vapor pelos gases é então:

$$\therefore Q_{\text{H}_2\text{O}} = 2.730 \text{ Nm}^3/\text{min} \cdot 60 \text{ min/h} \cdot 0,044 \text{ l/Nm}^3 = 7.207,2 \text{ l/h}$$

#### 9.5 - Preparação do padrão de medição de trítio:

O padrão utilizado foi o mesmo do ensaio anterior.

Tabela A17 - Ensaio Nº 10: Dados experimentais

Parâmetro	Símbolo	Valor
Vazão de injeção do traçador	$q_0$	17,55ml/min
Concentração de $^3\text{H}$ no traçador	$C_0$	65,37MBq/ml
Tempo de injeção	$\Delta T$	180min
Atividade total de $^3\text{H}$ injetada	$A'$	206GBq
Volume de água tritiada injetada	$q_0 \Delta T$	3.159,0ml
Vazão total de gases no alto forno	$Q_{\text{gás}}$	2.730Nm <sup>3</sup> /min
Teor de água nos gases	$f$	44,0g/Nm <sup>3</sup>
Vazão total de vapor de água	$Q_{\text{H}_2\text{O}}$	7.207,2l/h
Distância entre detectores	$D$	52m
Área interna das seções de medição	$S$	730,6cm <sup>2</sup>
Atividade de $^{82}\text{Br}$ injetada por ensaio	$A$	0,92GBq
Velocidade do papel de registro	$v$	600mm/min
Intervalo de tempo entre picos	$\Delta t$	34,3s
Vazão de água no anel	$Q_0$	6.645,7l/min
Relação de vazões	$q_0/Q_0$	$2,6 \times 10^{-6}$

Tabela A18 - Ensaio Nº 10: Medições realizadas e resultados

	Trítio na amostra			Contag. líquidas (15 min)	Vazão de fuga	
	1ª med. (15 min)	2ª med. (15 min)	média (15 min)		(l/min)	(l/h)
BG	605	575	590			
Padrão	3417	3431	3424	2834		
1	575	581	578	0	0,00	0,0
2	589	579	584	0	0,00	0,0
3	612	572	592	2	0,00	0,0
4	569	585	577	0	0,00	0,0
5	611	639	625	35	0,01	0,3
6	729	725	727	137	0,02	1,3
7	688	672	680	90	0,01	0,9

## 10 - ENSAIO Nº 11

### 10.1 - Calibração do rotâmetro:

Foram cronometradas duas medidas do tempo gasto para injetar 50ml de água, uma antes e outra depois da injeção, obtendo-se os valores 169seg e 169seg. Isto indica uma vazão de solução radioativa de:

$$q_0 = 1.065,0 \text{cm}^3/\text{h} = 17,75 \text{ml}/\text{min}$$

### 10.2 - Atividade total injetada:

Foi utilizada a mesma diluição de traçador do ensaio anterior, de concentração de atividade:  $C_0 = 65,38 \text{MBq}/\text{ml}$ . Considerando que se fez uma injeção contínua durante 180min, a atividade total injetada foi de:

$$A' = C_0 q_0 \Delta t = 65,38 \frac{\text{MBq}}{\text{ml}} 1.065,0 \frac{\text{cm}^3}{\text{h}} 3\text{h} = 208,9 \text{GBq} (5,65 \text{Ci})$$

### 10.3 - Determinação do valor de $Q_0$ :

Para a realização das medições da vazão na tubulação de água de resfriamento utilizou-se o  $^{82}\text{Br}$  como traçador. A atividade injetada foi de aproximadamente 0,92GBq (25mCi) por determinação.

A velocidade de avanço do papel do registrador foi repetidamente medida, sendo o valor médio determinado de  $(600 \pm 4) \text{mm}/\text{min}$ .

Depois de determinado o centro de massa de ambos picos, mediu-se a separação entre eles, obtendo-se o valor de 357mm, o que corresponde a:

$$\Delta t = \frac{L}{v_{\text{papel}}} = \frac{357 \text{mm} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}{600 \frac{\text{mm}}{\text{min}}} = 35,7 \text{s}$$

A vazão do fluido na tubulação é, então, de:

$$\begin{aligned} Q_0 &= S v = \frac{S D}{\Delta t} = \frac{730,6 \text{cm}^2 \cdot 5200 \text{cm}}{35,7 \text{s}} = 106.417 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} = \\ &= 106,417 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 6.385,1 \frac{\text{l}}{\text{min}} \end{aligned}$$

#### 10.4 - Saída de gás no topo do alto forno:

A vazão de gás, medida com o instrumental utilizado pela empresa, foi de  $2.780 \text{ Nm}^3/\text{min}$ . A concentração total de água nos gases foi determinada com base na média da taxa de condensação das amostras obtidas, sendo:

$$\text{Taxa de cond} = \frac{24,3 \text{ ml}}{30 \text{ min}} = 0,81 \text{ ml / min}$$

Como a vazão de gás do amostrador foi de  $45,0 \text{ l/min}$ , a umidade condensada no amostrador correspondeu a uma concentração de água no gás de:

$$C_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,81 \text{ ml / min}}{45,0 \text{ l / min}} = 1,80 \cdot 10^{-2} \text{ ml / l} = 18,0 \text{ g / Nm}^3$$

A umidade depois da passagem pelo amostrador foi de  $38,0 \text{ g/Nm}^3$ , o que significa um conteúdo total de água nos gases de:  $56,0 \text{ g/Nm}^3$ .

A vazão de água transportada no forma de vapor pelos gases é então:

$$\therefore Q_{\text{H}_2\text{O}} = 2.780 \text{ Nm}^3/\text{min} \cdot 60 \text{ min/h} \cdot 0,056 \text{ l/Nm}^3 = 9.340,8 \text{ l/h}$$

#### 10.5 - Preparação do padrão de medição de trítio:

O padrão utilizado foi o mesmo do ensaio anterior.

Tabela A19 - Ensaio Nº 11: Dados experimentais

Parâmetro	Símbolo	Valor
Vazão de injeção do traçador	$q_0$	17,75ml/min
Concentração de $^3\text{H}$ no traçador	$C_0$	65,37MBq/ml
Tempo de injeção	$\Delta T$	180min
Atividade total de $^3\text{H}$ injetada	$A'$	208GBq
Volume de água tritiada injetada	$q_0 \Delta T$	3.195,0ml
Vazão total de gases no alto forno	$Q_{\text{gás}}$	2.780Nm <sup>3</sup> /min
Teor de água nos gases	$f$	56,0g/Nm <sup>3</sup>
Vazão total de vapor de água	$Q_{\text{H}_2\text{O}}$	9.304,8l/h
Distância entre detectores	$D$	52m
Área interna das seções de medição	$S$	730,6cm <sup>2</sup>
Atividade de $^{82}\text{Br}$ injetada por ensaio	$A$	0,92GBq
Velocidade do papel de registro	$v$	600mm/min
Intervalo de tempo entre picos	$\Delta t$	35,7s
Vazão de água no anel	$Q_0$	6.385,1l/min
Relação de vazões	$q_0/Q_0$	$2,8 \times 10^{-6}$

Tabela A20 - Ensaio Nº 11: Medições realizadas e resultados

	Trítio na amostra			Contag. líquidas (15 min)	Vazão de fuga	
	1ª med. (15 min)	2ª med. (15 min)	média (15 min)		(l/min)	(l/h)
BG	575	543	559			
Padrão	1805	1835	1820	1261		
1	555	561	558	0	0,00	0,0
2	571	545	558	0	0,00	0,0
3	581	571	576	17	0,00	0,2
4	665	673	669	110	0,02	1,3
5	591	571	581	22	0,00	0,3
6	629	623	626	67	0,01	0,8
7	608	640	624	65	0,01	0,8
8	567	581	574	15	0,00	0,2
9	562	554	558	0	0,00	0,0
10	587	619	603	44	0,01	0,5
11	564	548	556	0	0,00	0,0

## 11 - ENSAIO Nº 12

### 11.1 - Calibração do rotâmetro:

Foram cronometradas duas medidas do tempo gasto para injetar 50ml de água, uma antes e outra depois da injeção, obtendo-se os valores 169seg e 171seg. Isto indica uma vazão de solução radioativa de:

$$q_0 = 1.059,0 \text{ cm}^3/\text{h} = 17,65 \text{ ml}/\text{min}$$

### 11.2 - Atividade total injetada:

Foi utilizada a mesma diluição de traçador do ensaio anterior, de concentração de atividade:  $C_0 = 65,38 \text{ MBq}/\text{ml}$ . Considerando que se fez uma injeção contínua durante 170min, a atividade total injetada foi de:

$$A' = C_0 q_0 \Delta t = \frac{65,38 \text{ MBq}/\text{ml} \cdot 1059,0 \text{ cm}^3/\text{h} \cdot 170 \text{ min}}{60 \text{ min}/\text{h}} = 196,1 \text{ GBq} (5,3 \text{ Ci})$$

### 11.3 - Determinação do valor de $Q_0$ :

Para a realização das medições da vazão na tubulação de água de resfriamento utilizou-se o  $^{82}\text{Br}$  como traçador. A atividade injetada foi de aproximadamente 0,59GBq (20mCi) por determinação.

A velocidade de avanço do papel do registrador foi repetidamente medida, sendo o valor médio determinado de  $(604 \pm 5) \text{ mm}/\text{min}$ .

Depois de determinado o centro de massa de ambos picos, mediu-se a separação entre eles, obtendo-se o valor de 317mm, o que corresponde a:

$$\Delta t = \frac{L}{v_{\text{papel}}} = \frac{317 \text{ mm} \cdot 60 \text{ s}/\text{min}}{604 \text{ mm}/\text{min}} = 31,5 \text{ s}$$

A vazão do fluido na tubulação é, então, de:

$$\begin{aligned} Q_0 &= S v = \frac{S D}{\Delta t} = \frac{730,6 \text{ cm}^2 \cdot 5200 \text{ cm}}{31,5 \text{ s}} = 120.607 \text{ cm}^3/\text{s} \\ &= 120,607 \text{ l}/\text{s} = 7.236,4 \text{ l}/\text{min} \end{aligned}$$

#### 11.4 - Saída de gás no topo do alto forno:

A vazão de gás, medida com o instrumental utilizado pela empresa, foi de 2.500Nm<sup>3</sup>/min. A concentração total de água nos gases foi determinada com base na média da taxa de condensação das amostras obtidas, sendo:

$$\text{Taxa de cond} = \frac{14,4\text{ml}}{30\text{min}} = 0,48\text{ml} / \text{min}$$

Como a vazão de gás do amostrador foi de 45,0l/min, a umidade no amostrador correspondeu a uma concentração de água no gás de:

$$C_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,48\text{ml} / \text{min}}{45,0\text{l} / \text{min}} = 0,106 \cdot 10^{-2}\text{ml} / \text{l} = 10,6\text{g} / \text{Nm}^3$$

A umidade depois da passagem pelo amostrador foi de 0,7g/Nm<sup>3</sup>, o que significa um conteúdo total de água nos gases de: 11,3g/Nm<sup>3</sup>.

A vazão de água transportada na forma de vapor pelos gases é então:

$$\therefore Q_{\text{H}_2\text{O}} = 2.500\text{Nm}^3 / \text{min} \cdot 60\text{min} / \text{h} \cdot 0,0113\text{l} / \text{Nm}^3 = 1.699,5\text{l} / \text{h}$$

#### 11.5 - Preparação do padrão de medição de trítio:

O padrão utilizado foi o mesmo do ensaio anterior.

Tabela A21 - Ensaio N<sup>o</sup> 12: Dados experimentais

Parâmetro	Símbolo	Valor
Vazão de injeção do traçador	$q_0$	17,65ml/min
Concentração de $^3\text{H}$ no traçador	$C_0$	65,37MBq/ml
Tempo de injeção	$\Delta T$	170min
Atividade total de $^3\text{H}$ injetada	$A'$	196GBq
Volume de água tritiada injetada	$q_0 \Delta T$	3.000,5ml
Vazão total de gases no alto forno	$Q_{\text{gás}}$	2.500Nm <sup>3</sup> /min
Teor de água nos gases	$f$	11,3g/Nm <sup>3</sup>
Vazão total de vapor de água	$Q_{\text{H}_2\text{O}}$	1.699,5
Distância entre detectores	$D$	52m
Área interna das seções de medição	$S$	730,6cm <sup>2</sup>
Atividade de $^{82}\text{Br}$ injetada por ensaio	$A$	0,59GBq
Velocidade do papel de registro	$v$	604mm/min
Intervalo de tempo entre picos	$\Delta t$	31,5s
Vazão de água no anel	$Q_0$	7.236,4l/min
Relação de vazões	$q_0/Q_0$	$2,4 \times 10^{-6}$

Tabela A22 - Ensaio N° 12: Medições realizadas e resultados

	Trítio na amostra			Contag. líquidas (15 min)	Vazão de fuga	
	1ª med. (15 min)	2ª med. (15 min)	média (15 min)		(l/min)	(l/h)
BG	531	527	529			
Padrão	2345	2381	2363	1834		
1	511	523	517	0	0,00	0,0
2	572	548	560	31	0,00	0,2
3	1345	1329	1337	808	0,07	4,3
4	522	530	526	0	0,00	0,0
5	565	551	558	29	0,00	0,2
6	738	716	727	198	0,02	1,1
7	625	581	603	74	0,01	0,4
8	1095	1077	1086	557	0,05	3,0

## 12 - ENSAIO Nº 13

### 12.1 - Calibração do rotâmetro:

Foram cronometradas duas medidas do tempo gasto para injetar 50ml de água, uma antes e outra depois da injeção, obtendo-se os valores 179seg e 181seg. Isto indica uma vazão de solução radioativa de:

$$q_0 = 1.000,0\text{cm}^3/\text{h} = 16,67\text{ml}/\text{min}$$

### 12.2 - Atividade total injetada:

Foi utilizada a mesma diluição de traçador do ensaio anterior, de concentração de atividade:  $C_0 = 65,38\text{MBq}/\text{ml}$ . Considerando que se fez uma injeção contínua durante 180min, a atividade total injetada foi de:

$$A' = C_0 q_0 \Delta t = 65,38 \frac{\text{MBq}}{\text{ml}} 1.000,0 \frac{\text{cm}^3}{\text{h}} 3\text{h} = 196,1\text{GBq} (5,3\text{Ci})$$

### 12.3 - Determinação do valor de $Q_0$ :

Para a realização das medições da vazão na tubulação de água de resfriamento utilizou-se o  $^{82}\text{Br}$  como traçador. A atividade injetada foi de aproximadamente 0,59GBq (16mCi) por determinação.

A velocidade de avanço do papel do registrador foi repetidamente medida, sendo o valor médio determinado de  $(604 \pm 5)\text{mm}/\text{min}$ .

Depois de determinado o centro de massa de ambos picos, mediu-se a separação entre eles, obtendo-se o valor de 360mm, o que corresponde a:

$$\Delta t = \frac{L}{v_{\text{papel}}} = \frac{360\text{mm} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}{604 \frac{\text{mm}}{\text{min}}} = 35,8\text{s}$$

A vazão do fluido na tubulação é, então, de:

$$\begin{aligned} Q_0 &= S v = \frac{S D}{\Delta t} = \frac{730,6\text{cm}^2 \cdot 5200\text{cm}}{35,8\text{s}} = 106.121 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} = \\ &= 106,121 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 6.367,2 \frac{\text{l}}{\text{min}} \end{aligned}$$

#### 12.4 - Saída de gás no topo do alto forno:

A vazão de gás, medida com o instrumental utilizado pela empresa, foi de 2.489 Nm<sup>3</sup>/min. A concentração total de água nos gases foi determinada com base na média da taxa de condensação das amostras obtidas, sendo:

$$\text{Taxa de cond} = \frac{58,2 \text{ ml}}{30 \text{ min}} = 1,94 \text{ ml / min}$$

Como a vazão de gás do amostrador foi de 45,0 l/min, a umidade condensada no amostrador correspondeu a uma concentração de água no gás de:

$$C_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{1,94 \text{ ml / min}}{45,0 \text{ l / min}} = 4,31 \cdot 10^{-2} \text{ ml / l} = 43,1 \text{ g / Nm}^3$$

A umidade depois da passagem pelo amostrador foi nula, o que significa um conteúdo total de água nos gases de: 43,1 g/Nm<sup>3</sup>.

A vazão de água transportada na forma de vapor pelos gases é então:

$$\therefore Q_{\text{H}_2\text{O}} = 2.489 \text{ Nm}^3 / \text{min} \cdot 60 \text{ min / h} \cdot 0,0431 \text{ l / Nm}^3 = 6.451,5 \text{ l / h}$$

#### 12.5 - Preparação do padrão de medição de trítio:

O padrão utilizado foi o mesmo do ensaio anterior.

Tabela A23 - Ensaio Nº 13: Dados experimentais

Parâmetro	Símbolo	Valor
Vazão de injeção do traçador	$q_0$	16,67ml/min
Concentração de $^3\text{H}$ no traçador	$C_0$	65,37MBq/ml
Tempo de injeção	$\Delta T$	180min
Atividade total de $^3\text{H}$ injetada	$A'$	196GBq
Volume de água tritiada injetada	$q_0 \Delta T$	3.000,6ml
Vazão total de gases no alto forno	$Q_{\text{gás}}$	2.489Nm <sup>3</sup> /min
Teor de água nos gases	$f$	43,1g/Nm <sup>3</sup>
Vazão total de vapor de água	$Q_{\text{H}_2\text{O}}$	6.415,5l/h
Distância entre detectores	$D$	52m
Área interna das seções de medição	$S$	730,6cm <sup>2</sup>
Atividade de $^{82}\text{Br}$ injetada por ensaio	$A$	0,59GBq
Velocidade do papel de registro	$v$	604mm/min
Intervalo de tempo entre picos	$\Delta t$	35,8s
Vazão de água no anel	$Q_0$	6.367,2l/min
Relação de vazões	$q_0/Q_0$	$2,6 \times 10^{-6}$

Tabela A24 - Ensaio Nº 13: Medições realizadas e resultados

	Trítio na amostra			Contag. líquidas (15 min)	Vazão de fuga	
	1ª med. (15 min)	2ª med. (15 min)	média (15 min)		(l/min)	(l/h)
BG	446	454	450			
Padrão	1730	1776	1753	1303		
1	432	454	443	0	0,00	0,0
2	510	492	501	51	0,02	1,0
3	643	667	655	205	0,06	3,9
4	601	619	610	160	0,05	3,0
5	717	703	710	260	0,08	4,9
6	502	488	495	45	0,01	0,9
7	462	470	466	16	0,01	0,3
8	451	437	444	0	0,00	0,0
9	478	470	474	24	0,01	0,5
10	476	452	464	14	0,00	0,3
11	560	568	564	114	0,04	2,2
12	479	465	472	22	0,01	0,4
13	438	466	452	2	0,00	0,0
14	713	743	728	278	0,09	5,3
15	621	629	625	175	0,06	3,3