

A FABRICAÇÃO DE OXIGÊNIO PARA A ACIARIA L. D. DE MONLEVADE ⁽¹⁾

FINN MALM ⁽¹⁾

JOAQUIM BURREL ⁽³⁾

RESUMO

Descreve-se o processo de fabricação de oxigênio na instalação Linde-Fraenkl, de Monlevade; assinalam-se os elevados rendimentos dos Regeneradores como trocadores de calor a baixas temperaturas e das "turbinas de expansão" como produtoras de "frio".

Destaca-se também a utilização dos regeneradores e dos filtros adsorventes de sílica-gel como agentes de purificação do ar, assim como a pressão relativamente baixa (6 kg/cm², pressão absoluta), a que se comprime o ar para o processo. Termina-se por assinalar o baixo consumo específico de energia elétrica, da ordem de 0,88 kWh por N m³ de oxigênio já comprimido, o que traduz a importância do processo.

1. INTRODUÇÃO

Após décadas de pesquisas e experiências, resultou que o ar atmosférico era a matéria-prima por excelência para a obtenção do oxigênio em grandes quantidades. Foi o Prof. Karl Von Linde o pioneiro, quando, no início deste século, construiu a primeira instalação para comercializar o oxigênio produzido a partir da destilação do ar liquefeito.

A utilização do oxigênio na siderurgia e em diversas indústrias químicas, teve seus horizontes ampliados quando, em 1930, o Prof. Linde, associando-se ao Eng. Mathias Fraenkl, incorporou ao seu procedimento básico os regeneradores, patenteados pelo segundo. Desta fusão resultou o "Processo Linde-Fraenkl".

(1) Contribuição Técnica n.º 404. Apresentada e discutida na Comissão «A» do XV Congresso da ABM; São Paulo, julho de 1960.

(2) Membro da ABM; Engenheiro da Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira; Monlevade, MG.

(3) Membro da ABM; Engenheiro da Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira; Monlevade, MG.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA FABRICAÇÃO DO OXIGÊNIO

O ar atmosférico pode ser considerado como uma mistura binária de nitrogênio e de oxigênio; os demais gases não chegam a perfazer, juntos, 1% em volume.

TABELA 1

Composição do ar, em % do volume

Nitrogênio	78,03
Oxigênio	20,99
Argônio	0,93
Gás Carbônico	0,03
Hidrogênio	1×10^{-2}
Neônio	$1,5 \times 10^{-3}$
Hélio	5×10^{-4}
Criptônio	$1,1 \times 10^{-4}$
Xenônio	$0,8 \times 10^{-5}$

A fabricação do oxigênio consiste, em linhas gerais, em liquifazer o ar e destilá-lo em uma coluna de retificação. Da cabeça desta coluna sairá o componente mais volátil, o nitrogênio; no fundo ficará o componente menos volátil, o oxigênio. Os fundamentos das diferentes fases de fabricação do oxigênio em uma instalação "Linde-Fraenkl" são:

Purificação do ar — Inicia-se com a sua filtragem através de tela embebida em óleo especial, onde ficam retidas as impurezas sólidas em suspensão. A seguir, elimina-se o vapor d'água, o gás carbônico e os hidrocarbonetos que porventura o poluam.

O vapor d'água se elimina em parte por condensação; o restante, seja por absorção (passando o ar através de hidróxido de sódio ou potássio) seja por adsorção em alumina-gel, sílica-gel ou peneiras moleculares, ou ainda, por congelamento em regeneradores.

A eliminação do gás carbônico, que, como o vapor d'água, causa a obstrução da aparelhagem por congelamento, é conseguida, ou fazendo-se o ar passar por uma solução de hidróxido de sódio, ou pelo seu congelamento à passagem do ar por regeneradores, ou retendo-o por adsorção em filtros de sílica-gel a baixas temperaturas, ou ainda, por adsorção em peneiras moleculares (até 35°C).

A eliminação dos hidrocarbonetos (dos quais o acetileno é o mais perigoso, dado que 0,5 p.p.m. no oxigênio líquido já forma mistura explosiva), é conseguida por adsorção em filtros de sílica-gel a baixas temperaturas.

Liquefação do ar — Para liquefazer o ar, como para liquefazer qualquer gás, é necessário resfriá-lo abaixo de sua temperatura crítica. As condições críticas do ar são:

$$t^k = 132,5^{\circ}\text{K} = (-) 140,7^{\circ}\text{C}$$

$$p^k = 38,4 \text{ kg/cm}^2$$

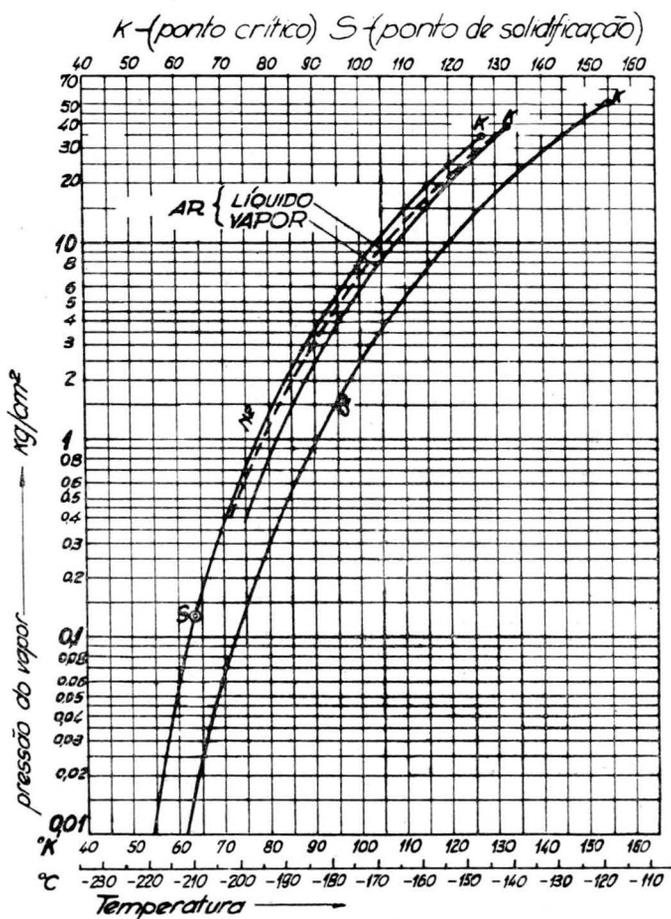


Fig. 1 — Curvas de pressão de vapor. Reproduzida da publicação LINDE — «Kurven und Zahlentafeln für die Tieftemperaturtechnik».

Portanto, deve-se resfriar o ar a uma temperatura tanto mais abaixo de t^k , quanto menor fôr a pressão a que estiver submetido, conforme pode ser visto na figura 1.

A necessidade de se trabalhar a tão baixas temperaturas criou, assim, o problema de como produzi-las. As expansões isoentálpica e isoentrópica (adiabática) do próprio ar previamente comprimido são, ainda hoje, as soluções para a obtenção de temperaturas que permitem a liquefação do ar, mas sempre associadas a eficientes trocadores de calor. A expansão isoentálpica é a que, na prática, se obtém pela expansão de um gás ao atravessar uma válvula, enquanto que a expansão isoentrópica é a que se verifica ao se expandir um gás numa máquina isolada termicamente do meio ambiente, com produção de trabalho.

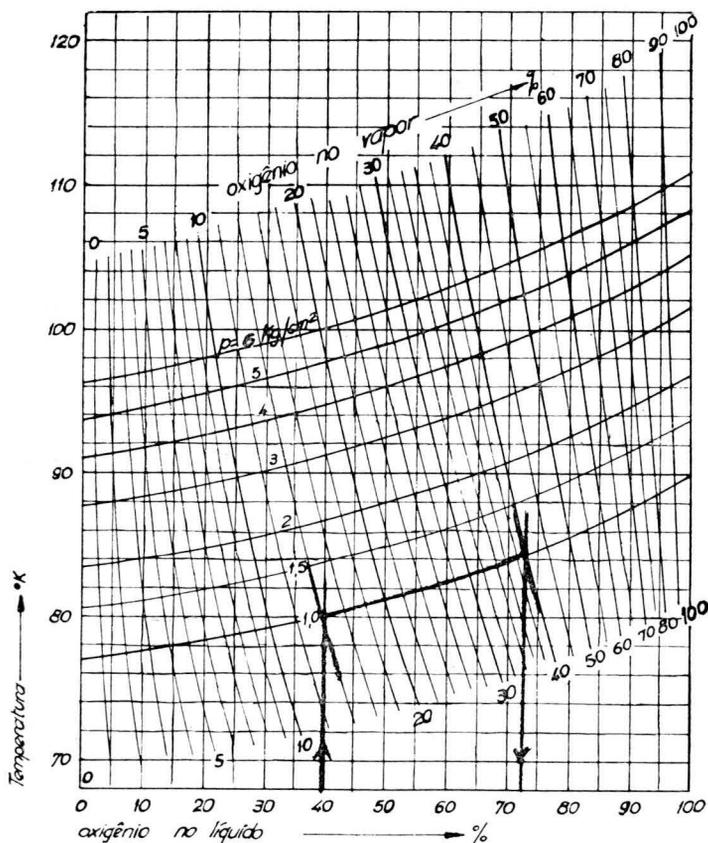


Fig. 2 — Curvas de equilíbrio da mistura O_2-N_2 , conforme Dodge e Dunbar. Reproduzido da publicação LINDE, «Kurven und Zahlentafeln für Tieftemperaturtechnik».

Destilação do ar líquido — A separação dos componentes de uma mistura (binária) é tanto mais fácil, quanto maior for a diferença entre a composição do líquido e a do vapor desprendido pela evaporação deste. Na mistura oxigênio-nitrogênio, esta diferença é bastante grande.

Pelas curvas de equilíbrio vapor-líquido da mistura binária oxigênio-nitrogênio à pressão de, por exemplo, 1 kg/cm^2 (fig. 3), pode-se observar que um líquido contendo 40% de oxigênio começa a ferver a 81°K (-192°C) e o primeiro vapor formado contém apenas 14% de oxigênio. À medida que se vai aquecendo o líquido, este vai se enriquecendo até que a última gota, a se evaporar, contenha 73% de O_2 e o vapor formado terá, neste instante, a composição inicial do líquido: 40% de O_2 .

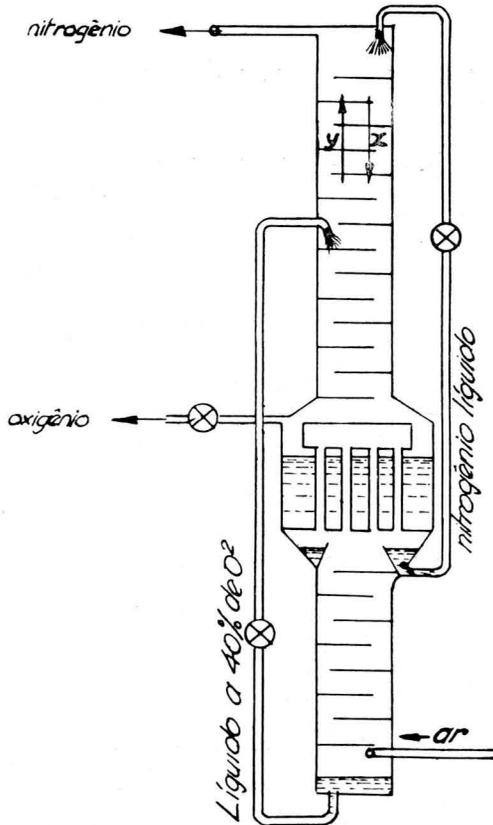


Fig. 3 — Dupla coluna de Linde.

A separação do oxigênio e do nitrogênio se realiza em colunas de retificação, alimentadas em um ponto médio e aquecidas por baixo para provocar a ebulição do líquido aí acumulado. Da cabeça da coluna deve provir o refluxo, quer dizer, o líquido que desce em contra-corrente com os vapores ascendentes.

Nas destilações a elevadas temperaturas, é fácil produzir o refluxo, pois, para isto, basta dispor de um refrigerante (em geral água) que se encontre à temperatura mais baixa que o produto da "cabeça". Entretanto, o problema é outro, quando se trata da destilação do ar, onde se deseja condensar vapores a (—) 178°C. O processo clássico é o da dupla coluna de Linde, que consiste, em sua essência, de duas colunas sobrepostas, interligadas termicamente pelo condensador-evaporador. O produto do "pé" da coluna superior condensa o produto da "cabeça" da coluna inferior, parte do qual é, justamente, o refluxo da coluna inferior e, parte, o refluxo da coluna superior (fig. 4).

3. DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO EXISTENTE EM MONLEVADE

Projetada para uma produção de 2.170 N m³/h de oxigênio puro (99,5%) equivalente a 75 t/dia, pode produzir, ao mesmo tempo, 600 N m³/h de nitrogênio puro (99,99%). O nitrogênio impuro deixa o aparelho com cerca de 3% a 5% de oxigênio.

Compressão do ar — O ar (utilizado como matéria-prima) é filtrado em telas metálicas impregnadas com óleo especial, e comprimido em um turbo-compressor à pressão de, aproximadamente, 6 kg/cm² (pressão absoluta). O ar, que sai do turbo-compressor a 100°C, é resfriado com água em contra-corrente numa torre de refrigeração cheia de anéis de "Raschig". O ar sai desta torre a uma temperatura da ordem de 30°C a 40°C, saturado de vapor d'água, mas, em geral, com menor umidade absoluta (g/N m³) que o ar aspirado.

Regeneradores — O ar, em seguida, atravessa dois dos quatro regeneradores existentes à entrada do aparelho de fracionamento. Cada regenerador consta de um corpo cilíndrico de aço, em cujo interior encontram-se:

- a) serpentina tubular para saída de oxigênio puro;
- b) serpentina tubular para saída de nitrogênio puro;
- c) um enchimento constituído de tetraedros de alumínio (7 a 8 t) ocupando todo o espaço livre.

Através dêste enchimento circulam, alternadamente e em sentidos opostos, ar e nitrogênio impuro, dando-se as inversões de 8 em 8 minutos. Os regeneradores cumprem dupla missão: resfriam o ar que entra e purificam-no da umidade e do gás carbônico, os quais nêles ficam retidos em estado sólido, para serem sublimados pelo nitrogênio impuro, quando da inversão seguinte.

Os regeneradores, que transportam calor de um gás a outro, utilizando o enchimento como armazenamento de calor, têm ainda grande vantagem sôbre os trocadores de calor tubulares, por serem de construção mais simples e apresentarem uma resistência pequena à passagem dos gases. Outro fator interessante a destacar, nas qualidades dos regeneradores aplicados a baixas temperaturas, é sua eficiência da ordem de 99%, sendo a diferença das temperaturas do ar que entra e do nitrogênio impuro que sai da ordem de 3°C apenas. Os regeneradores de nossa instalação realizam um transporte de calor, em regime normal, da ordem de $7,5 \times 10^5$ Kcal/h.

A inversão de um par de regeneradores se faz em 3 tempos, por meio de válvulas comandadas automaticamente:

- 1.º TEMPO: Fechamento simultâneo das válvulas de entrada do ar do regenerador sob pressão e saída de N² do regenerador resfriado.
- 2.º TEMPO: Igualação da pressão nos 2 regeneradores mediante abertura e fechamento de uma válvula de ligação (cêrca de 3,5 kg/cm² de pressão).
- 3.º TEMPO: Abertura simultânea das válvulas de entrada de ar do regenerador frio e saída de N² do regenerador sob pressão.

Uma perda inevitável dos regeneradores é a do ar que se perde no 3.º Tempo; no entanto, esta perda não ultrapassa 3% do ar comprimido.

Nos regeneradores, o ar se divide em duas trajetórias. Uma parte, aproximadamente 85%, os atravessa totalmente, deixando-os nas extremidades frias à temperatura de $\sim 103^\circ\text{K}$ (-170°C), muito próximo, portanto, do início de sua liquefação, que, à pressão de 6 kg/cm², é $\sim 100^\circ\text{K}$ (-173°C). Esta fração de ar é justamente a que alimenta e aquece a coluna inferior da dupla coluna de Linde.

A outra parte do ar, $\sim 15\%$, não atravessa completamente os regeneradores, deixando-os em um ponto intermediário, a uma temperatura de cêrca de 140°K (-133°C). Como a esta tem-

peratura o ar ainda contém uma porção prejudicial de CO_2 e vapor d'água, esta fração atravessa um dos adsorvedores de sílica-gel (são dois, em paralelo), onde são retidas ambas as impurezas, devendo o ar à saída destes adsorvedores conter, no máximo, 0,5 p.p.m. de CO_2 . A superfície específica da sílica-gel por nós utilizada é da ordem de 600 m^2 por grama.

Controla-se o bom funcionamento do adsorvedor de CO_2 , utilizando-se uma solução saturada de hidróxido de bário, por onde fazem-se passar amostras de ar; a turvação desta indicará que a sílica-gel já não está adsorvendo satisfatoriamente. Faz-se então a sua regeneração, isto é, faz-se circular por êle uma corrente de ar sêco a 60°C , até que a temperatura dêste ar, à saída do adsorvedor, atinja 30°C . O calor dissolve o CO_2 e o vapor d'água contidos na sílica-gel, e são ambos arrastados pelo ar.

Em Monlevade, o ar sêco é obtido em uma pequena instalação adicional, na qual o ar atmosférico, após ser filtrado, passa por um leito de alumina-gel, para então ser impulsionado através de um aquecedor elétrico. O ar limpo e frio, que sai do adsorvedor mencionado, constitui a alimentação da Turbina de Expansão.

Turbina de expansão — É uma máquina rotativa, na qual o ar se expande radialmente, de fora para o centro, num anel de tubeiras, onde a energia de pressão se converte em energia cinética, e esta, impulsionando um rotor, em energia mecânica. A energia mecânica liberada converte-se em energia elétrica, mediante um gerador acoplado ao eixo da Turbina.

Em nossa instalação, a Turbina de serviço tem um rotor com aproximadamente 20 cm de diâmetro girando a 15.000 r.p.m., e libera cerca de $2,5 \times 10^4$ Kcal/h.

A Turbina de expansão resfria, a uma temperatura próxima à de condensação, o ar procedente do adsorvedor de CO_2 e o envia para a coluna superior da dupla coluna de Linde. Obtém-se o abaixamento de temperatura do ar mediante uma expansão isoentrópica, ou melhor, tanto mais próxima da expansão isoentrópica quanto melhor fôr o rendimento termodinâmico da Turbina.

Em nossa instalação de Monlevade, o ar se expande de $5,8 \text{ kg/cm}^2$ para $\sim 1,5 \text{ kg/cm}^2$, baixando a temperatura do ar de 140°K (-133°C) para 104°K (-169°C), logrando assim um rendimento termodinâmico da ordem de $\sim 85\%$, pois se a expansão fôsse de fato isoentrópica, a temperatura do ar expandido seria de $\sim 98^\circ\text{K}$ (-175°C).

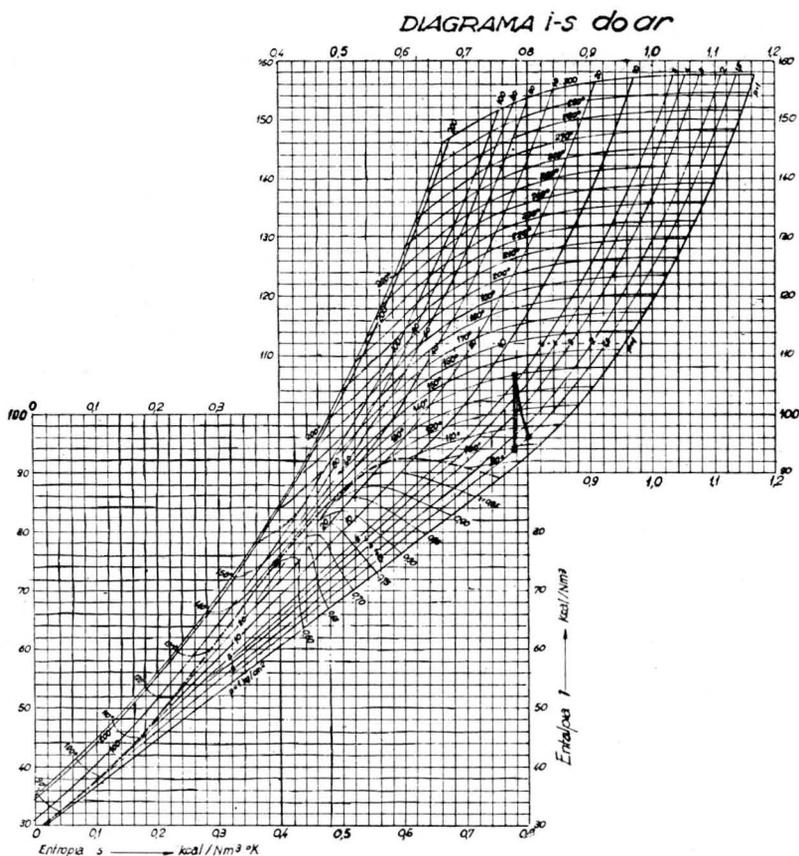


Fig. 3a — Diagrama «i-s» do ar. Reproduzido da fonte citada.

Um outro rendimento, definido como a relação entre a energia produzida pelo gerador e a energia liberada pela expansão do ar, é da ordem de 88%, e traduz a eficiência de toda a máquina (Turbina, redução e gerador).

A vazão do ar que atravessa a turbina pode ser regulada mediante a abertura de maior ou menor número de tubearas, podendo a Turbina de “serviço”, quando totalmente aberta, admitir até 3.200 N m³/h de ar.

A fábrica de oxigênio de Monlevade possui também uma segunda turbina disposta em paralelo com a de “serviço”, a Turbina de “arranque”, de maior capacidade, podendo admitir até 8.500 N m³/h de ar, e utilizada somente para as “partidas, seja

após uma parada de 24 horas, seja após um descongelamento total. Esta pode manter a instalação em produção por um período de tempo limitado, quando, por motivo de força maior, deve ser parada a turbina de "serviço".

DESTILAÇÃO DO AR LÍQUIDO

Coluna inferior — O ar que atravessa totalmente os regeneradores constitui a alimentação da coluna inferior da nossa dupla coluna de Linde. Já dissemos que este ar constitui aproximadamente 85% do ar que entra na instalação e, portanto, representa cêrca de $10.500 \text{ N m}^3/\text{h}$. A coluna inferior realiza o fracionamento do ar líquido mediante bandejas perfuradas. O produto da cabeça é o nitrogênio de pureza 97% (condensado da fase gasosa a $\sim 99\%$), enquanto que o produto do pé é o "líquido rico", com $\sim 40\%$ de oxigênio. Uma parte do produto da cabeça alimenta a coluna de nitrogênio puro, enquanto outra parte constitui o refluxo da coluna superior. O produto do pé se destina à alimentação da coluna superior. A distribuição das correntes, expressa em % do volume de alimentação, é, em regime normal, aproximadamente: do fundo, 41%; do tópo para a coluna superior, 47%; do tópo para a coluna auxiliar, 12%.

A condensação dos vapores da cabeça da coluna inferior fornece o calor latente de vaporização do produto do pé da coluna superior através do "condensador-evaporador", mais conhecido como "condensador principal". Nele, o intercâmbio de calor é, em regime normal, da ordem de $5,5 \times 10^5 \text{ Kcal/h}$, o que representa aproximadamente $\frac{3}{4}$ do calor contido no ar que alimenta a coluna inferior ($7,2 \times 10^5 \text{ Kcal/h}$). O produto do fundo da coluna inferior, antes de alimentar a coluna superior, atravessa um adsorvedor de sílica-gel (são dois, em paralelo), que retêm as impurezas que não foram eliminadas nos regeneradores.

Dêste modo, as duas correntes que alimentam a coluna superior, uma procedente da turbina de expansão e outra da coluna inferior, atravessam antes, um leito de sílica-gel, eliminando assim o risco de acúmulo de acetileno e outros hidrocarbonetos, no oxigênio líquido do condensador principal. A alimentação da coluna inferior entra a $\sim 103^\circ\text{K}$ (-170°C), enquanto que os produtos do pé e da cabeça saem, respectivamente, a $\sim 99^\circ\text{K}$ (-174°C) e $\sim 95^\circ\text{K}$ (-178°C). A pressão de trabalho da coluna inferior, também chamada "coluna de pressão", é de $\sim 5,8 \text{ kg/cm}^2$. O nível do "líquido rico" no fundo da coluna é mantido por volta de 40 cm, enquanto a resistência interna da coluna à passagem dos vapores de baixo para cima é de

uns 33 cm H₂O, ambas estas grandezas medidas por meio de hipsômetros.

Coluna superior — Como já foi visto, a coluna superior é alimentada por duas correntes: da Turbina de expansão e do fundo da coluna inferior.

O calor necessário para a retificação nesta coluna é prove-niente do calor latente de condensação dos produtos da cabeça da coluna inferior através do condensador principal, e o refluxo é formado por duas correntes: uma, procedente da cabeça da coluna inferior e outra, do fundo da coluna de nitrogênio. O produto da cabeça da coluna superior é nitrogênio impuro (95% a 97%). Os produtos do pé são dois: oxigênio líquido (que vai ainda servir de meio refrigerante para a produção do refluxo na coluna de nitrogênio), e oxigênio gasoso, de pureza 99,5% em equilíbrio com a fase líquida anterior. Ambas as correntes se unem, formando o chamado “oxigênio puro”.

As duas correntes (que constituem o refluxo da coluna superior) são de nitrogênio líquido a ~ 97%. Êste refluxo é da ordem de 5.500 N m³/h, dos quais 90% provêm da coluna inferior e o restante da coluna de nitrogênio. Portanto, a regulação do refluxo da coluna superior se faz principalmente com o produto da cabeça da coluna inferior.

A coluna superior trabalha a ~ 1,5 kg/cm² de pressão, enquanto que a inferior e a de nitrogênio trabalham a ~ 5,8 kg/cm². Isto quer dizer que tôdas as correntes que chegam à coluna superior, procedentes das outras duas, devem sofrer redução de pressão, o que se dá em válvulas, com expansão isoentálpica e conseqüente abaixamento de temperatura.

A alimentação procedente da turbina de expansão entra na coluna superior a ~ 104°K (— 169°C), enquanto que a prove-niente da coluna inferior entra a ~ 83°K (— 190°C); as duas correntes, que formam o refluxo, entram na coluna superior a ~ 80°K (— 193°C), enquanto o oxigênio que constitui o produto do pé sai a ~ 93°K (— 180°C). Pode-se observar que há uma diferença de ~ 13°C entre a cabeça e o pé da coluna superior. Também o gradiente de pressão (medido com um hipsômetro) é da ordem de 200 cm de H₂O.

Condensador-evaporador — O condensador principal é o aparelho regulador por excelência da dupla coluna de Linde. Ê, em essência, um trocador de calor do tipo “feixe tubular”, circulando pelo interior dos tubos os gases da cabeça da coluna inferior e, circundando-os, o oxigênio líquido do fundo da coluna superior. Portanto, o intercâmbio de calor verificado no con-

densador principal afeta simultâneamente o funcionamento de ambas as colunas. Êste intercâmbio de calor pode ser regulado de três maneiras:

- 1.º) Atuando sôbre a coluna superior, modificando a vazão de ar que a ela chega, procedente da Turbina de expansão.
- 2.º) Atuando sôbre a coluna de N² puro, modificando a vazão de oxigênio líquido que a ela chega como meio refrigerante.
- 3.º) Atuando sôbre a coluna inferior, modificando as vazões da cabeça e do fundo. Êste é o menos efetivo e, portanto, o menos usado.

O condensador principal está provido de ligações para um hipsômetro que indica o nível de oxigênio líquido que contém. Quando êste nível sobe, é porque diminui o intercâmbio de calor e, portanto, a evaporação; um abaixamento do nível indicará o contrário. O nível normal do líquido (oxigênio) do condensador é de 100 a 120 cm de altura.

Coluna de nitrogênio — Trata-se, na verdade, de um condensador adicional com coluna para produção de nitrogênio puro. Dela obtém-se até 600 N m³/h de nitrogênio de pureza 99,99% a partir do produto da cabeça da coluna inferior.

A coluna de N² puro trabalha sob a mesma pressão que a coluna inferior (5,8 kg/cm²) e é alimentada pelos gases da cabeça desta última, nitrogênio a ~ 98%. O seu produto do pé é nitrogênio líquido a ~ 97%, que vai servir de refluxo à coluna superior, e seu produto da cabeça é o nitrogênio 99,99% que vai direto aos regeneradores.

Provoca-se o refluxo da coluna de N², utilizando como meio refrigerante o oxigênio líquido do condensador principal, que atravessa uma serpentina situada na parte superior da coluna, e aí condensando os vapores ricos em nitrogênio.

Quase todo o oxigênio líquido que vai à coluna de N² deve ser evaporado na serpentina; para controlar isto, existe na tubulação de saída do oxigênio um recipiente provido de indicador de nível. Ê também neste recipiente (chamado separador de acetileno), que é retido o acetileno que porventura tenha alcançado o condensador principal.

Controla-se o bom funcionamento da coluna de N² pelas indicações fornecidas por hipsômetros, que medem o nível do líquido no fundo, o gradiente de pressão ao longo da coluna e o nível de líquido acumulado no separador de acetileno.

A pureza de nitrogênio é controlada, passando-se amostras continuamente através de fôsforo branco. Se o gás, após esta

passagem, não se apresentar enfumaçado, o seu conteúdo em oxigênio será inferior a 0,01%.

Não se desejando produzir nitrogênio puro, pode-se simplesmente fechar sua saída, continuando a coluna a funcionar como condensador adicional, ou retirar toda a coluna de serviço, o que em nada prejudica o funcionamento do aparelho de fracionamento.

Aquecimento do nitrogênio impuro — O nitrogênio impuro, que sai da cabeça da coluna superior, constitui uma importante fonte de refrigeração, já que sua entalpia é muito pequena (~ 60 Kcal/N m³). O seu aquecimento realiza-se em quatro fases, que, sucessivamente, são:

- 1) Resfriando o refluxo e alimentação líquida da coluna superior em trocador de calor.
- 2) Liquefazendo parte do ar que alimenta a coluna inferior em outro trocador de calor.
- 3) Resfriando o ar que entra pelos regeneradores.
- 4) Resfriando a água de refrigeração que resfria o ar saído do turbo compressor.

Distribuição do oxigênio puro — O oxigênio que sai do aparelho de fracionamento vai aos compressores, após passar por um reservatório amortecedor de pulsações.

Dois são os tipos de compressores de oxigênio que temos em Monlevade. Um para enchimento de botijões e outro para alimentar a aciaria L. D. Do primeiro tipo, temos dois compressores, para uma vazão de 50 m³/h cada, atingindo a pressão de 225 kg/cm² em três estágios. A lubrificação dos cilindros é feita com água destilada. Do segundo tipo, temos três compressores de três estágios verticais para comprimir 1.320 m³/h (condições de aspiração) cada, até 26 kg/cm². São compressores a “sêco”, com pistões e camisas de bronze e anéis de segmento em grafita.

Sendo o consumo de oxigênio pela aciaria L. D. descontinuo, enquanto a produção é contínua, faz-se necessário armazenar o oxigênio nos períodos que não houver demanda. Para isto, existem cinco reservatórios de 63 m³ de capacidade cada um, onde o oxigênio pode ser armazenado à pressão máxima de 26 kg/cm². Estes reservatórios estão ligados em paralelo com a aciaria L. D., fornecendo a esta o complemento da produção da fábrica durante os 15-20 minutos que dura o “sôpro” de um convertedor.

A pressão do oxigênio na tubulação que alimenta a aciaria L. D. é mantida constantemente a 14 kg/cm², por meio de válvulas automáticas.

4. DADOS DE OPERAÇÃO

Montagem — A fábrica de oxigênio de Monlevade foi posta em marcha em setembro de 1957, um mês antes da inauguração da aciaria L. D. Montada sob a orientação de especialistas da “Gesellschaft für Lind’s Eismaschinen A. G.”, a instalação ocupa uma área coberta de ~ 1.000 m², com porão; dispõe de uma ponte rolante para 15 t. O prédio está previsto para abrigar uma segunda instalação, de capacidade dupla da atual.

Pessoal — Atualmente contamos com 4 homens por turno. Durante o dia, o pessoal fica aumentado de 1 mecânico, para pequenos serviços de manutenção, 2 bateristas, que se ocupam do enchimento de botijões e 1 encarregado geral. Para grandes reparações elétricas ou mecânicas, existem turmas que atendem quando solicitadas.

Operação — De um modo geral, a fábrica de oxigênio, uma vez em produção, não requer muita regulagem; exige, entretanto, o máximo de atenção do pessoal responsável por ocasião das “partidas” para produção, mesmo que estas se dêem após paradas de minutos. Na tabela 2 estão anotados os tempos gastos para repor a instalação em produção, após paradas de diversas durações. Supõe-se ainda que, por ocasião da “parada”, o condensador principal esteja bem cheio (nível ~ 150 cm).

TABELA 2

Instalação parada. Tempo aproximado necessário para atingir a produção de

Parada de	I 4/5 da nominal	II nominal
1 minuto	20 minutos	60 minutos
20 minutos	30 minutos	60 minutos
até 4 horas	60 minutos	2 horas
24 horas	2 horas	3-4 horas
72 horas	5 horas	0 horas

Descongelamento — O descongelamento é uma operação que tem por finalidade desobstruir partes da instalação bloqueadas (ou semi-bloqueadas) por neve carbônica ou gelo, que causam grandes perdas de carga diminuindo a capacidade de produção.

Na tabela 3, estão anotados, para diferentes partes do aparelho, assim como também para todo o aparelho de fracionamento, os tempos de “permanência em serviço”, de “aquecimento” e de “reposição em produção após aquecimento”. Por “permanência em serviço”, entende-se o tempo que vai de um descongelamento a outro.

TABELA 3
Descongelamento

<i>Partes do aparelho a serem aquecidas ou descongeladas</i>	<i>Permanência em serviço</i>	<i>Tempo necessário para aquecimento</i>	<i>Tempo necessário, após aquecimento, para atingir a produção nominal</i>	
			<i>C₁</i>	<i>C₂</i>
<i>I Um adsorvedor de sí-gel (CO₂)</i>	~ 80 horas	~ 4 horas	—	—
<i>II Um adsorvedor de sí-gel (C⁺H⁺)</i>	~ 250 horas	~ 2 "	—	—
<i>III Coluna de nitrogênio puro</i>	~ 2 meses	~ 3 "	—	—
<i>IV Uma turbina de expansão</i>	(1)	~ 2 "	—	—
<i>V Um par de regeneradores</i>	~ 12 meses	~ 24 "	~ 18 horas	~ 24 horas
<i>VI Colunas e demais circuitos</i>	~ 12 meses	~ 30 "	~ 30 "	~ 36 "
<i>VII Todo o aparelho de fracionamento</i>	(2)	~ 70 "	~ 66 "	~ 72 "

Quando o descongelamento total do aparelho de fracionamento se faz necessário, nós o fazemos em duas ou três etapas, conforme simbolizamos a seguir (tabela 3): (V) + (V + VI) ou (V) + (V) + (VI). As razões pelas quais fazemos sempre descongelamento total em etapas são três:

- 1.^a) O operacionamento é mais fácil e mais seguro.
- 2.^a) Diminui o tempo de parada da aciaria L. D. por falta de oxigênio, uma vez que se aproveita sempre um domingo em cada etapa.
- 3.^a) Diminui o problema de estocagem de gusa.

Ainda na tabela 3, se, para cada um dos itens V, VI e VII, somarmos os tempos das colunas B e C₁ ou B e C₂, teremos o tempo total que realmente a fábrica de oxigênio ficará fora de produção de cada vez.

O consumo de oxigênio pela aciaria L. D. apresenta, desde outubro de 1957, um aumento constante, atingindo seu máximo no mês de maio deste ano (fig. 4), quando também foi máxima a produção da fábrica de oxigênio com ~ 1.350.000 N m³.

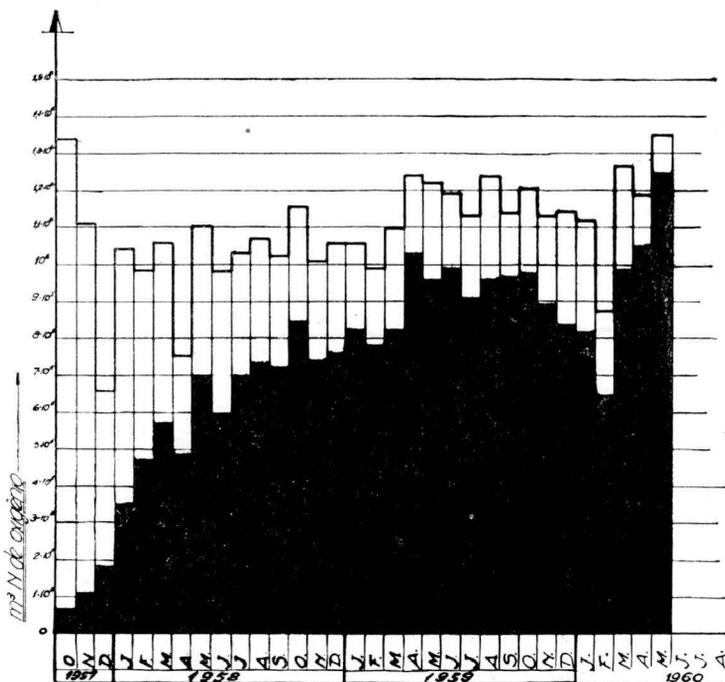


Fig. 4 — Consumo de oxigênio pela aciaria L.D. Faixas claras O₂ produzido; faixas em escuro: O₂ consumido pelo L.D.

Da tubulação que leva o oxigênio à aciaria L.D., partem condutos menores que formam uma verdadeira rede de distribuição de oxigênio para tôdas as secções da Usina. Isto traz, como grande vantagem, a eliminação do transporte de botijões. Assim, a distribuição aproximada do consumo de oxigênio, por exemplo, no mês de maio próximo passado na Usina de Monlevade, foi o seguinte, em N m³ mil:

Aciaria L. D.	1.250
Corte de sucata e "bodes"	22
Escarfagem manual de lingotes e placas	30
Serviços de solda e corte nas diversas secções (com tomadas de oxigênio)	8
Enchimento de botijões (mais usado em serviços de montagens fora da Usina)	6
Lançado à atmosfera (sem utilização)	34
Total	1.350

O oxigênio lançado de novo à atmosfera, e que na distribuição acima representa apenas 2,5% do total produzido, é, sem dúvida, um mínimo atingindo até hoje; traduz um funcionamento muito regular da aciaria L. D. Contribuem também para isso os outros dois grandes consumidores, a escarfigem e o corte de sucata.

O consumo de oxigênio por tonelada de aço L. D. fabricado em Monlevade é da ordem de 56 N m³, inclusive o que é gasto para o aquecimento dos convertedores no início das campanhas.

Energia — É de 0,88 kWh N m³ de oxigênio produzido o consumo médio anual da fábrica de oxigênio de Monlevade, incluindo, portanto, os períodos de descongelamento, que são apenas consumidores de energia. O dado acima é a soma dos consumos específicos da produção pròpriamente dita e da compres-

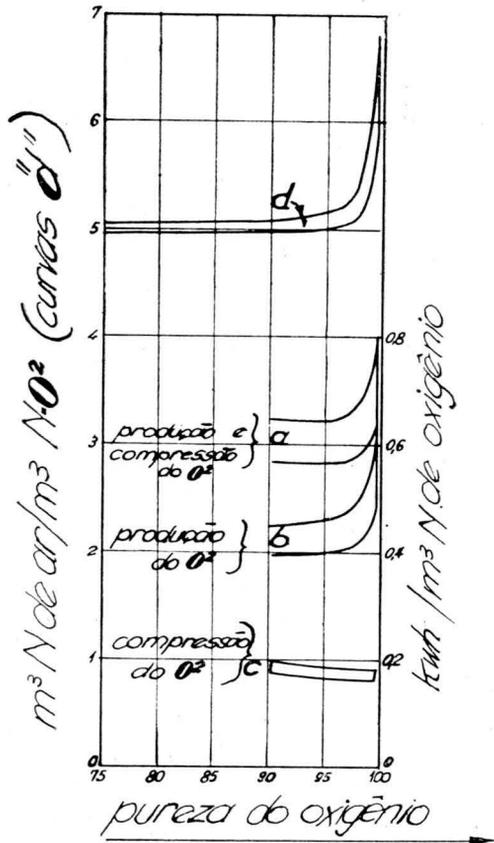


Fig. 5 — Consumo de ar e de energia por N m³ de O₂ de purezas diversas. Reproduzido da publicação «Wärmestelle Dusseldorf» — «Anhaltzahlen für die Warmwirtschaft in Eisenhüttenwerken».

são do oxigênio produzido, acrescido ainda da fração correspondente ao consumo dos períodos de descongelamento e partidas para produção.

Na figura 5, que é típica para instalações "Linde Fraenkl", na qual, portanto, se enquadra a nossa instalação, pode-se observar o consumo de energia por $N\ m^3$ de oxigênio e sua variação com a pureza do mesmo. Nesta figura, a região limitada pelas linhas "c" representa a soma das duas outras, "a" e "b". Ainda na figura 5, a região limitada pelas curvas "d" mostra como cresce a quantidade de ar necessária para a obtenção de $1\ N\ m^3$ de oxigênio, em função de sua pureza.

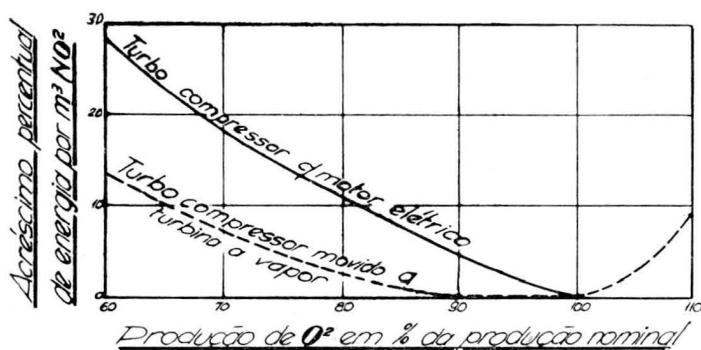


Fig. 6 — Consumo específico de energia em função da produção em uma instalação Linde-Fraenkl. Reproduzido da publicação citada acima.

A flexibilidade de nossa instalação permite trabalhar em regimes estáveis, com produções variando de $\sim 70\%$ a 105% da nominal. No entanto, pode-se observar na figura 6 que o consumo específico é mínimo para a produção correspondente à nominal.

Dados técnicos — As partes integrantes do aparelho de fracionamento, que devem trabalhar a baixas temperaturas, são quase tôdas construídas em cobre e algumas em alumínio. O aço comum e o latão, quando submetidos a tais temperaturas, tornam-se duros e quebradiços; assim, os parafusos, estojos e porcas são, em geral, feitos de deltametal ou de aço inoxidável. As soldas, dependendo de sua solicitação, são de cobre, feitas pelo processo "Argon-arc", ou de liga chumbo-estanho, solda branca. São de alumínio as carcassas das turbinas de expansão, seus rotores e outras peças.

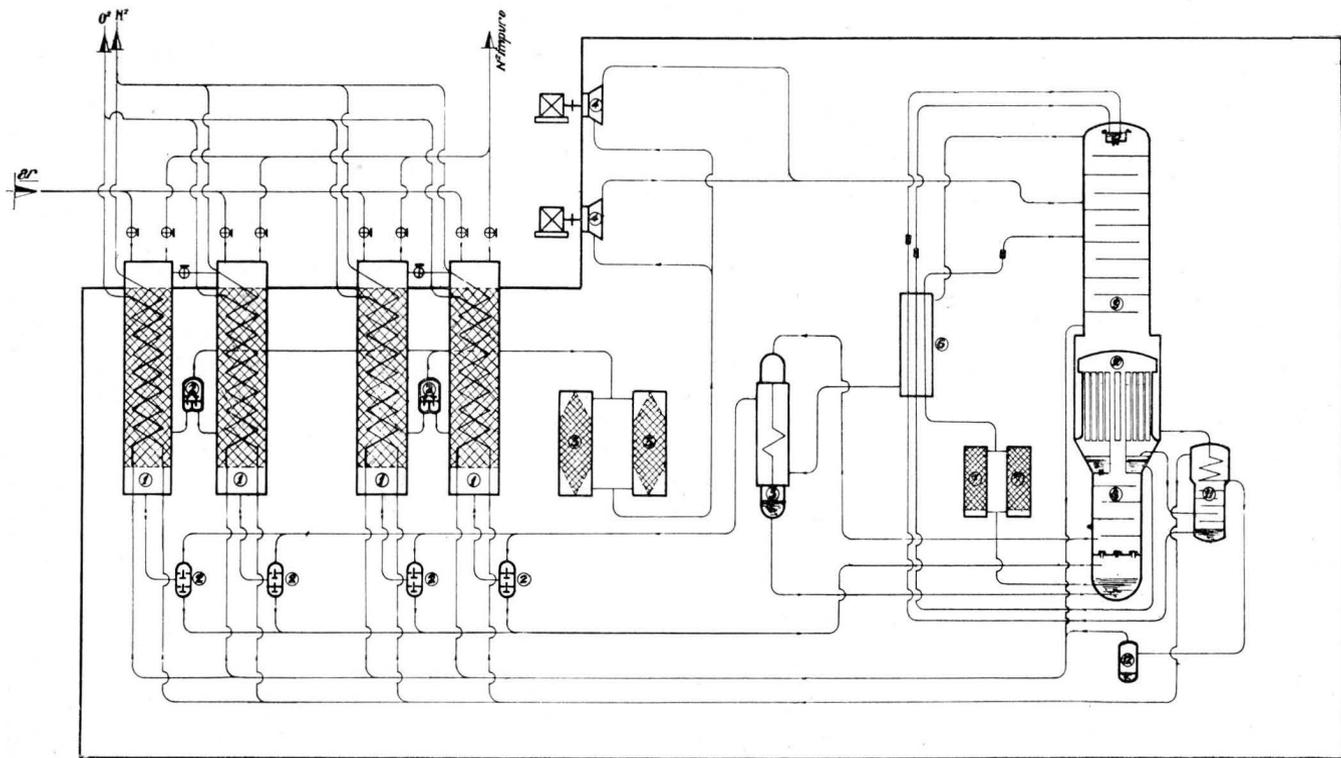


Fig. 7 — Instalação Linde-Frankl para produção de oxigênio na Usina de Monlevade da CSBM: 1 — Regeneradores; 2 — Válvulas de retenção; 3 — Adsorvedores de sílica-gel; 4 — Turbinas de expansão; 5 — Liquidificador; 6 — Trocador de calor; 7 — Adsorvedores de sílica-gel; 8 — Coluna inferior; 9 — Coluna superior; 10 — Condensador principal; 11 — Coluna de N_2 puro e 12 — Separador de C_2H_2 . Estão assinaladas as válvulas de comando automático e as de expansão isoentálpica.

Todo o conjunto (colunas, condensador, tubulações, válvulas, trocadores de calor, turbinas, etc.) está situado dentro de um invólucro de chapa e isolado termicamente do meio ambiente por quase 100 t de lâ de escória. A lâ de escória é um ótimo isolante para instalações de produção de oxigênio, por não ser inflamável; sua condutibilidade térmica é da ordem de 0,03 Kcal/h.m°C a zero grau centígrado. É exigido ainda um ph compreendido entre 6 e 7. A lâ de escória apresenta a desvantagem de dificultar o acesso ao interior do aparelho de fracionamento, para eventuais reparações.

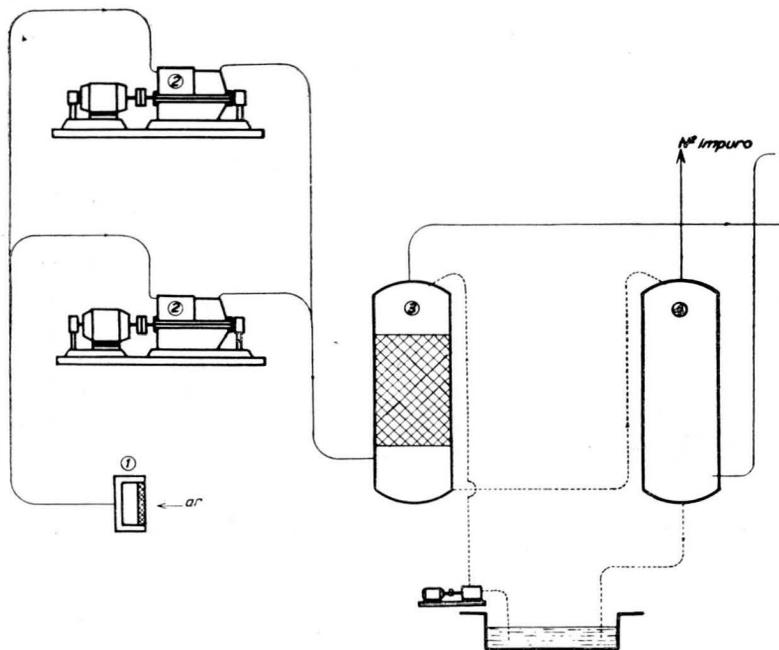


Fig. 8 — Esquema da Fábrica de Oxigênio de Monlevade: 1 — Filtro de ar; 2 — Turbo compressor; 3 — Torre de resfriamento e 4 — Resfriador de água.

As temperaturas nos diversos pontos do aparelho de fracionamento são medidas por meio de termômetros de resistência de platina, ligados todos a um galvanômetro seletivo de leitura direta.

O oxigênio gasoso, saindo do aparelho a temperatura pouco abaixo da ambiente, escoo por tubos de aço tipo Mannesmann previamente decapados em solução de ácido sulfúrico, e calcula-

dos para permitir uma velocidade máxima de escoamento de 8 m/s.

Tôda a distribuição de oxigênio à Usina, assim como a tubulação de 6" que vai à aciaria L. D., é de aço, tendo intercalados, de espaço a espaço, pedaços de tubos de cobre de ~ 1 metro de comprimento. Isto tem por finalidade evitar, em caso de acidente, que a tubulação queime e se funda, atingindo os reservatórios. Tôdas as válvulas para oxigênio gasoso são de bronze especial ou de aço, com sede e agulha (e haste) em

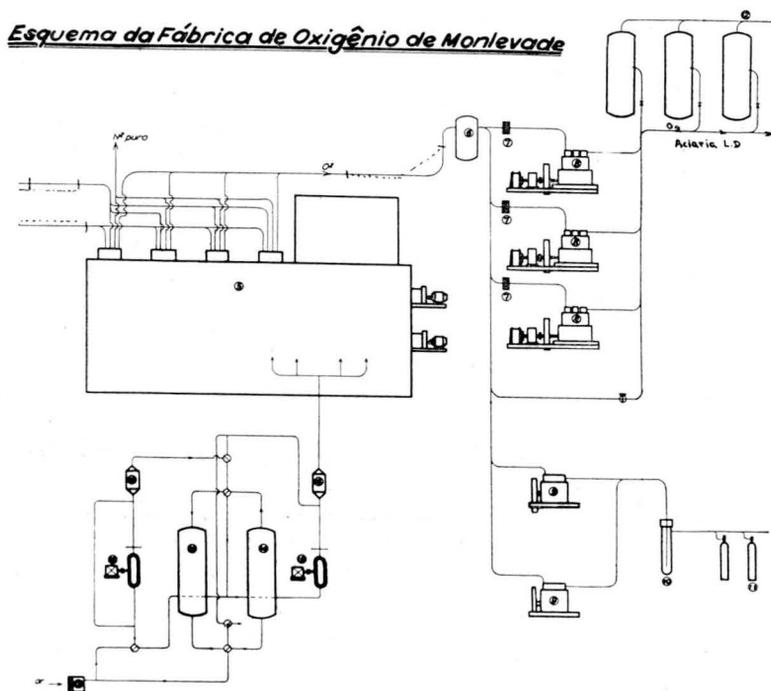


Fig. 9 — Esquema da Fábrica de Oxigênio de Monlevade: 5 — Aparelho de fracionamento; 6 — Amortecedor; 7 — Filtro; 8 — Compressor de oxigênio; 9 — Compressor de alta pressão do oxigênio; 10 — Garrafa purgadora; 11 — Botijões de oxigênio; 12 — Seis reservatórios de oxigênio; 13 — Filtro de ar; 14 — Secadores com alumina gel; 15 — Soprador; 16 — Aquecedor. Estão assinaladas as válvulas de regulagem automática.

aço inoxidável. Temos também utilizado, nos circuitos de distribuição de oxigênio para a Usina, válvulas com corpo de bronze e fechamento por membrana de neoprene.

Preço de custo — Influem no preço de custo do oxigênio, principalmente, as despesas com energia elétrica e amortização da instalação, conforme pode ser observado no quadro abaixo, expresso em Cr\$/N m³:

Energia elétrica (Cr\$ 0,80/kWh)	0,70
Amortização	0,70
Salários e ordenados	0,23
Reparações e peças	0,21
Óleos lubrificantes	0,01
Água de refrigeração (350 m ³ /h)	0,03
Outros	0,01
Total	<u>1,89</u>

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem à direção da Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira a autorização para a publicação dêste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- M. RUHEMANN — *"The Separation of Gases"*. Oxford — At the Clarendon Press.
- MANSEL DAVIES — *"The Physical Principles of Gas Liquefaction and Low Temperature Rectification"*.
- E. GOMONET — *"Les Très Basses Températures, Production et Emplois"*. Encyclopedie du Froid, Paris, Librairie J. B. Baillièrre et Fils.
- JEORGES CLAUDE — *"Air Liquide, Oxygène, Azote"*. H. Dunod et E. Pinat, Paris.
- J. H. STRASSBURGER — *"Oxygen and the Steel Plant"*. Iron and Steel Engineer, May 1958.
- F. J. CLARK e J. L. HARRISON — *"Tonnage Oxygen"*. Journal of the Iron and Steel Institute, July 1957.
- ARTHUR E. STEELE e DONALD E. CUMMINGS — *"Steel Mill High and Low-Purity Oxygen Applications"*. Iron and Steel Engineer, June 1957.
- MARTIN J. CONWAY — *"Construction and Operation of Tonnage Oxygen Plants"*. Iron and Steel Engineer, March 1951.
- VON ERNST KARWAT — *"In Und Auslandische Neuerungen Im Bau Gros-sauerstoff Anlagen"*. Stahl und Eisen, Juli 1951.



DISCUSSÃO (1)

R. F. Azevedo (2) — Está em discussão o trabalho que acaba de ser exposto pelo Eng. Finn Malm, co-autor juntamente com o Eng. Joaquim Burrel Juvillar.

L. A. de Araujo (3) — Desejaria saber qual a capacidade dos reservatórios de oxigênio.

Finn Malm (4) — Cada reservatório tem a capacidade de 63 m³, volume líquido. São cinco reservatórios dando 315 m³; multiplicando-se por 25 k teremos a capacidade total de aproximadamente 8.000 m³.

L. A. Araujo — O Sr. falou dos intervalos na rede de distribuição, com peças de cobre. Desejaria saber se são conflanges.

F. Malm — São inclusive conflanges.

L. A. Araujo — A pressão na rede para LD e para distribuição de escarfagem é a mesma?

F. Malm — Sim, de 13 kg/cm², mantida automaticamente pelas válvulas; 14 kg/cm², pressão absoluta.

L. A. Araujo — O Sr. usa sistema em anel para o LD na rede de distribuição?

F. Malm — Em circuito fechado, é uma alimentação só. Dêsses tubos que o Sr. está vendo neste esquema, e que são de seis polegadas, é que saem os outros canais.

P. Salabascheff (5) — Desejaria saber quais as instruções de segurança que deram para os operários.

F. Malm — A primeira é: «É proibido fumar». As demais são instruções no sentido de não pôr óleo, não engraxar as hastes das válvulas. Sempre que houver algum serviço de reparação com maçarico na fábrica de oxigênio, tiramos a análise do ar para ver se não está mais rico em hidrocarbonetos.

R. F. Azevedo — O Sr. disse que há hidrocarbonetos que se podem tornar explosivos. Como é feita sua eliminação? Qual o controle que os senhores têm para evitá-los. Aliás, o Sr. acaba de se referir a esse caso do maçarico que, de certo modo, tem relação.

F. Malm — No ar puro de montanha não há hidrocarbonetos. Mas no ar de uma cidade industrial há. Em Monlevade, não temos; contudo fazemos análise diariamente. Tiramos uma amostra do oxigênio líquido do condensador — porque a concentração de 0,5 p.p.m. já é

(1) Contribuição Técnica n.º 404. Apresentada na Comissão «A» do XV Congresso da ABM.

(2) Membro da ABM e Presidente da Comissão; Diretor Industrial da Usina de Volta Redonda da CSN; Volta Redonda, RJ.

(3) Membro da ABM; Engenheiro da Cia. Siderúrgica Paulista; São Paulo, SP.

(4) Membro da ABM; Engenheiro da Fábrica de Oxigênio da Usina de Monlevade da CSBM; Monlevade, MG.

(5) Membro da ABM; Engenheiro da Usina de Monlevade da CSBM; Monlevade, MG.

considerada perigosa — e o fazemos passar por um filtro de sílica-gel. Depois, recuperamos o que ficou. Se tiver acetileno, êle fica nesse filtro de sílica-gel. Em seguida, por um sistema colorimétrico, sabemos quanto deveria ter essa amostra. Aquêlo segundo filtro de sílica-gel é que retém êsses hidrocarbonetos.

R. F. Azevedo — Os senhores têm algum plano no sentido de usar o nitrogênio produzido?

F. Malm — Por enquanto estamos usando êsse nitrogênio para fins de laboratório, mas temos intenção de fazer ambientes neutros.

L. A. de Araujo — Tenho duas questões a adicionar. A instalação foi planejada para 99,5% de pureza. Gostaria de saber se os senhores têm-se esforçado para ultrapassar êsse índice.

F. Malm — Bastaria diminuir a produção, que êsse índice seria logo ultrapassado. Mas não o fizemos, porque estamos satisfeitos com o índice de 99,5%.

L. A. de Araujo — Uma outra pergunta: qual a localização dos filtros de ar?

F. Malm — No nosso caso êles não são necessários porque felizmente o ar vem puro. Mas, se não houver essa possibilidade, os filtros devem ser colocados tanto mais alto quanto possível.

F. Fabriani ⁽⁶⁾ — O Sr. se referiu ao isolamento adotado dêle dizendo que sua única desvantagem é a devida à dificuldade de inspeção. Isso subentende que haja coisa melhor?

F. Malm — Sim; ouvi falar que há isolamento de dupla parede. Tôda a instalação fica dentro de dupla parede, com vácuo. Entra-se lá e pode-se andar à vontade, sem outro empecilho. Se não me engano, os americanos usam isolamentos mais finos.

H. Meiers ⁽⁷⁾ — Reefrindo-me à pergunta do colega Renato Frota Azevedo, devo aduzir que temos outra aplicação para o nitrogênio. Peço ao Eng. Finn Malm que discorra um pouco sôbre sua aplicação no combate a incêndios nos depósitos de carvão vegetal.

F. Malm — Para essa aplicação vamos usar o nitrogênio impuro, mais ou menos 10.000 m³/h, com 3% a 5%, no máximo, de oxigênio. Está sendo preparada uma instalação de combate a incêndio no nosso depósito regulador de carvão. Além do ar, vai ter nitrogênio para sair no meio do carvão, a fim de parar a combustão. Vai haver uma tubulação de 1 km da fábrica até o depósito. Vai ter ventilação de baixa pressão (4 m de pressão) e, quando houver necessidade, êsse nitrogênio impuro, depois de já ter saído da fábrica, será encaminhado para o depósito.

I. G. Dutra ⁽⁸⁾ — Desejaria ter idéia da parte isolada tèrmicamente numa instalação dêsse tipo, ou melhor, o número de metros cúbicos da instalação que são isolados tèrmicamente.

(6) Membro da ABM; Professor Catedrático da Escola Nacional de Engenharia; Rio de Janeiro, GB.

(7) Membro da ABM; Engenheiro Chefe da Usina de Monlevade da CSBM; Monlevade, MG.

(8) Membro da ABM; Engenheiro da SOCOTEC; São Paulo, SP.

F. Malm — A única parte isolada é esta que o Sr. pode ver; é a que trabalha à baixa temperatura. Deve ter 6,5 m de lado por uns 8 m de altura e mais a torre que sobe um pouco mais, e que deve ter mais uns quatro metros.

José Domingos Azevedo ⁽⁹⁾ — Numa tabela deu uma perda de 32 mil m³, em botijões, porque enchem apenas 8 mil m³. Por que não se usam mais botijões?

F. Malm — Cada botijão leva apenas 6 mil m³; é o consumo do botijão. Não se usam mais porque não há mais consumo. Só produzimos para nosso consumo. Os botijões são agora mais para servir de montagem fora da usina.

N. B. Paes Leme ⁽¹⁰⁾ — Sobre o turbo compressor de ar, desejaria saber se a manutenção tem sido normal ou se tem havido alguma dificuldade.

F. Malm — No começo houve. Chegamos a ficar parados por falta de dois tubos. Os mancais estragam-se. De modo que o turbo compressor de cinco estágios e os mancais, no começo, deram trabalho. Depois trocou-se o tubo por um acoplamento de tipo de estôjo. Agora, é daquele tipo de engrenagem ligeiramente flexível, com jôgo, e nunca mais houve nada.

(9) Membro da ABM; Engenheiro da CSN; Volta Redonda, RJ.

(10) Membro da ABM; Engenheiro e Diretor da Eletro Metalúrgica Saudade, Limitada.

porque qualidade :

A qualidade e a perfeição técnica dos produtos CESBRA são o resultado de incansáveis pesquisas científicas. São elas o alicerce de um altíssimo grau de confiança, segurança e aprimoramento, que fazem da CESBRA um símbolo de alta qualidade.



PRODUTOS CESBRA :

ESTANHO EM LINGOTES E VERGUINHAS
METAL PARA MANCAIS E BRONZINAS:
ANTIFRICÇÃO, BABBIT, METAL PATENTE, ETC.
SOLDA BRANCA EM LINGOTES E VERGUINHAS
SOLDA EM FIOS SIMPLES OU COM TRÊS NÚ-
CLEOS DE COLOFÔNIA PURA OU ATIVADA.

SOLDA EM PASTA
PÓS METÁLICOS
PÓ ESTANHANHO
ESTANHO GRANULADO —
QUÍMICAMENTE PURO PARA ANÁLISE.