

BR 8613764

PESQUISAS SOBRE ENRIQUECIMENTO DE URÂNIO
REALIZADAS NO CENTRO DE DESENVOLVIMENTO
DA TECNOLOGIA NUCLEAR/NUCLEBRÁS

João Luiz Campos
José Salvador Coelho
José Wellington Lemos
Renato Yadoya
Ricardo V. Consiglio
NUCLEBRÁS/CDTN-490 ,

EMPRESAS NUCLEARES BRASILEIRAS S.A. - NUCLEBRÁS
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE MATERIAIS

PESQUISAS SOBRE ENRIQUECIMENTO DE URÂNIO
REALIZADAS NO CENTRO DE DESENVOLVIMENTO
DA TECNOLOGIA NUCLEAR/NUCLEBRÁS

João Luiz Campos
José Salvador Coelho
José Wellington Lemos
Renato Yadoya
Ricardo V. Consiglio
NUCLEBRÁS/CDTN-490

Trabalho apresentado no I Congresso Geral
de Energia Nuclear, Rio de Janeiro, 17-20
março de 1986.

Belo Horizonte
1986

**PESQUISAS SOBRE ENRIQUECIMENTO DE URÂNIO REALIZADAS NO
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR/NUCLEBRÁS**

João Luiz Campos
José Salvador Coelho
José Wellington Lemos
Renato Yadoya
Ricardo V. Consiglio

(Empresas Nucleares Brasileiras S/A - NUCLEBRÁS)

Resumo

As pesquisas iniciais sobre o processo de enriquecimento por Jato Centrífugo foram realizadas pelo Centro de Pesquisas Nucleares de Karlsruhe - KfK. O desenvolvimento do processo sofreu um impulso decisivo em 1975, quando a NUCLEBRÁS e outras instituições alemãs decidiram iniciar a etapa de comprovação de viabilidade técnico-comercial do processo. Mais recentemente, algumas instalações utilizadas para investigar o processo foram transferidas do KfK para o Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear da NUCLEBRÁS, em Belo Horizonte, onde sua operação vem contribuindo para gerar dados de significativa importância para o estudo do comportamento de elementos de separação e de cascatas de enriquecimento. A experiência adquirida pelo CDTN vem sendo utilizada para dar suporte às atividades de implantação da Usina de Enriquecimento de Urânio, em construção na cidade de Resende.

Abstract

The first researches on uranium enrichment by the Jet Nozzle Process, were carried out initially by the Nuclear Research Center of Karlsruhe - KfK, in Germany. The process development received a decisive thrust in 1975, when NUCLEBRÁS and other German institutions decided to join the efforts in order to demonstrate the technical and economical feasibility of the process. More recently, some experimental facilities have been transferred from KfK to the NUCLEBRÁS' Research Center - CDTN, where they are providing relevant data concerning to the behaviour of advanced Separation Elements and enrichment Cascades. The experience acquired by CDTN is being used to support the implantation activities of the uranium enrichment plant being erected in Resende.

SUMÁRIO

| | | |
|---|-----------------------------------|---|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 4 |
| 2 | CONCEITOS GERAIS..... | 4 |
| 3 | PESQUISAS REALIZADAS NO CDTN..... | 6 |
| 4 | CONCLUSÕES..... | 9 |
| 5 | AGRADECIMENTOS..... | 9 |
| 6 | BIBLIOGRAFIA..... | 9 |

INTRODUÇÃO

A NUCLEBRÁS está construindo em Resende, estado do Rio de Janeiro, uma usina de enriquecimento de urânio, cuja finalidade é a de comprovar a viabilidade técnico-econômica do processo de enriquecimento isotópico por "Jato Centrífugo".

Grande parte dos conhecimentos técnicos e científicos requeridos para o projeto e construção desta usina pioneira foi adquirida através de um extenso programa de Pesquisa e Desenvolvimento, envolvendo não só a pesquisa básica, objetivando o desenvolvimento do processo, como também as pesquisas tecnológicas visando à industrialização de componentes.

Os trabalhos de pesquisa relacionados à industrialização de componentes são relatados em outros artigos apresentados neste Congresso (1, 2).

A pesquisa básica do processo foi iniciada na década de 1960 pelo Centro de Pesquisas Nucleares de Karlsruhe, República Federal da Alemanha - "Kernforschungszentrum Karlsruhe - KfK", e ainda prossegue dentro dos objetivos de aperfeiçoar o processo e analisar o comportamento operacional das instalações de enriquecimento.

A NUCLEBRÁS participa no desenvolvimento e industrialização da tecnologia do jato centrífugo desde 1975. Em 1979 foi iniciado um processo de transferência de instalações do KfK para o Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear da NUCLEBRÁS/CDTN, para permitir uma maior contribuição de cientistas brasileiros na pesquisa básica do processo. Neste trabalho serão descritas as principais linhas de atividade desenvolvidas pelo CDTN junto a estas instalações, em estreita colaboração com o já referido KfK.

Para facilitar a percepção do escopo e importância destas atividades, será apresentada inicialmente uma breve exposição sobre os conceitos gerais do processo.

CONCEITOS GERAIS

O princípio de funcionamento do processo é mostrado na Figura 1: um jato de hexafluoreto de urânio gasoso (UF_6), misturado com um gás leve auxiliar (H_2 ou He), se expande em alta velocidade através de um bocal constituído por uma fenda com paredes curvas. Devido aos efeitos da força centrífuga, os gases de maior massa molar tendem a fluir junto à parede externa, propiciando uma separação entre as moléculas mais leves de hexafluoreto de U-235 (massa molar 349) e as mais pesadas de hexafluoreto de U-238 (massa molar 352).

A função do gás leve auxiliar é a de imprimir uma maior velocidade à mistura gasosa, além de introduzir condições especiais no regime do escoamento que contribuem para aumentar a separação entre os gases leves e pesado.

No fim do processo de expansão e deflexão, a corrente gasosa Fe é dividida através de uma lâmina de separação S_2 em duas frações, uma "Fração Leve" F_L , contendo maior proporção de UF_6 com urânio-235 e uma "Fração Pesada" F_P , contendo menor proporção de U-235 que no jato inicial. A realização física deste conceito de bocal de separação constitui o "Elemento de Separação".

A razão entre a vazão de UF_6 na Fração Leve e a vazão total de UF_6 que entra no elemento de separação é denominada "Corte", representada pela letra θ :

$$\theta = \frac{F_l (UF_6)}{F_e (UF_6)} \quad (0 < \theta < 1)$$

A separação dos isótopos de urânio, qualquer que seja o processo, é quantificada geralmente pelo parâmetro "Fator de Separação", representado pela letra A, que expressa o grau de enriquecimento da fração leve em relação à fração pesada, em um elemento de separação:

$$A = \frac{f / (1-f) \text{ relativo à fração leve}}{f / (1-f) \text{ relativo à fração pesada}}$$

Onde f é a fração molar de U-235.

Na prática, o enriquecimento do urânio por jato centrífugo é realizado através de "Estágios de Separação". Cada estágio constitui-se em uma unidade integrada, compreendendo um grande número de elementos de separação, um compressor requerido para promover a vazão do gás, resfriadores, componentes estruturais (vasos, tubulações), além da instrumentação e dos dispositivos de controles necessários para o funcionamento do conjunto.

Um estágio permite uma grande vazão de UF_6 , porém apresenta um fator de separação muito pequeno, idêntico ao de um único elemento de separação. Por conseguinte, para se obter um aumento substancial do teor do isótopo U-235, é necessário associar diversos estágios em série, formando um sistema conhecido como "Cascata de Enriquecimento".

O número de estágios de uma cascata, requerido para se atingir um dado enriquecimento, é inversamente proporcional ao fator $\theta(A-1)$. Aumentar o valor de A implica pois em reduzir o nº de estágios, baixando os custos de investimento. Devido a este fato, um dos grandes objetivos do desenvolvimento do processo é o de aperfeiçoar a geometria do bocal de separação, no sentido de se aumentar o valor do fator de separação A.

Valores mais altos do enriquecimento podem ser conseguidos através da redução do corte θ , mas, por questões relacionadas ao projeto de cascatas, o corte é limitado entre 0.20 e 0.5. Os valores de A, típicos do processo por jato centrífugo, se situam entre 1.015 e 1.025.

Dentro destes intervalos, uma usina de enriquecimento destinada a produzir urânio enriquecido a 3.2%, a partir do urânio natural, cujo teor de U-235 é de 0.72% e rejeitar urânio empobrecido a 0.25%, exige uma cascata com aproximadamente 300 estágios. (3)

Para que o processo de separação seja eficiente, é necessário não só que se tenha um alto fator de separação, mas também que a energia requerida para o processo de compressão, escoamento, expansão e separação dos gases seja a menor possível.

E economicidade do processo, em termos de consumo energético pode ser avaliada com base no consumo específico de energia, que é a quantidade de energia requerida para a produção de uma "Unidade de Trabalho de Separação", normalmente expressa em kWh/UTS*.

(*) O termo "Unidade de Trabalho de Separação", abreviadamente "UTS" expressa a unidade utilizada para quantificar a capacidade de produção de uma insta-

O "Consumo Específico Real do Processo", representado por Esr, leva em conta todas as irreversibilidades inerentes às instalações, tais como o rendimento dos compressores e motores requeridos para o funcionamento do processo.

O valor de Esr depende pois, da tecnologia a ser empregada nas instalações de enriquecimento e é afetada pela capacidade de produção total da usina e pelo porte dos equipamentos. Os últimos avanços tecnológicos permitem prever, para uma instalação de porte comercial, com capacidade de produção em torno de 3.000.000 UTS/ano, um consumo específico real da ordem de 3.100 kWh/UTS: (3)

A maneira mais econômica de aumentar a capacidade de produção dos estágios é pela elevação da pressão do gás de processo: a capacidade de produção de uma instalação é praticamente proporcional à pressão de operação e os dispêndios adicionais com componentes, tais como compressores, obras de calderaria e instrumentação são muito pouco afetados pela elevação da pressão. Por outro lado, devido a questões ligadas à física do processo, a pressão ótima de operação é inversamente proporcional às dimensões características do bocal (raio de curvatura R). Consequentemente, uma redução das dimensões dos bocais de separação resulta no aumento da capacidade de produção das instalações, sem um aumento apreciável do investimento.

Este fato tem motivado grandes esforços de pesquisa no sentido de se produzir bocais com dimensões mais reduzidas: no momento, já se consegue produzir industrialmente bocais com 0.05 mm ou seja com a metade da dimensão dos bocais dos elementos de separação encomendados para a usina de Resende. Além do mais, já estão sendo desenvolvidos métodos de fabricação de bocais com dimensões inferiores a 0.025 mm, o que permitirá uma maior eficiência e economia do processo.

Ao finalizar esta parte dedicada aos conceitos gerais do processo, não se pode deixar de mencionar o "Sistema de Dupla Deflexão", que representa um grande avanço tecnológico e permite a construção de elementos de separação mais eficientes.

No sistema de dupla deflexão, mostrado na Figura 2, a fração pesada emergente de um primeiro bocal, sofre uma segunda deflexão, aproveitando a energia cinética remanescente da primeira deflexão. Neste caso, além das frações leve e pesada, gera-se uma "Fração Intermediária", F_i , que é recirculada internamente no próprio estágio. A dupla deflexão aumenta sensivelmente o fator de separação, reduzindo o número de estágios de uma usina de enriquecimento.

PESQUISAS REALIZADAS NO CDTN

Presentemente, as atividades realizadas no CDTN são desenvolvidas tanto no sentido de pesquisar o desempenho de novas geometrias de elementos de separação como no de investigar o comportamento operacional de cascatas de enriquecimento.

As pesquisas com elementos de separação são realizadas no CDTN

lação de enriquecimento. O número de UTS's leva em conta não só o grau de enriquecimento atingido como também a quantidade de urânio processada. Uma definição precisa de UTS envolveria a definição de diversas grandezas básicas e fugiria do escopo do presente trabalho. Para as presentes finalidades, é suficiente dizer que a produção de 1 kg de urânio enriquecido a 3,2%, a partir de urânio natural, exige aproximadamente 4 UTS, qualquer que seja o processo de enriquecimento utilizado.

em uma instalação construída na RFA e operada originalmente pelo Centro de Pesquisas Nucleares de Karlsruhe-KfK até 1981, quando foi transferida para a NUCLEBRÁS, juntamente com um espectrômetro de massa VARIAN MAT UF5. Devido à sua procedência, esta instalação é conhecida como TKA, abreviatura de "Trennkammerapparatur", como era anteriormente denominada no KfK.

Basicamente, o TKA é uma instalação que impele uma mistura de UF₆ e gás leve auxiliar em réplicas de elemento de separação, mede as vazões dos gases e monitora as pressões reinantes nas diversas fases do processo. As réplicas de elementos de separação reproduzem a geometria dos elementos industriais a serem analisados, porém com as dimensões ampliadas em torno de 10 vezes. A vazão e pressão dos gases são estabelecidas de forma a manter os mesmos números dimensionais característicos do escoamento no elemento industrial.

O fator de separação é medido diretamente através de tomadas de amostras da fração leve e da fração pesada, as quais são levadas para a determinação de teor isotópico no espectrômetro de massa. O consumo específico de energia é calculado a partir dos parâmetros medidos.

Apesar da simplicidade de sua concepção, o TKA fornece um grande número de informações sobre o processo e pode ser considerado como um instrumento imprescindível para avaliar o contínuo aperfeiçoamento dos elementos de separação.

Durante o primeiro ano de operação do TKA em Belo Horizonte, foram realizadas aproximadamente 70 corridas experimentais destinadas principalmente a testar a reprodutibilidade de medidas.

Em 1984 foi iniciado um exaustivo programa de testes, objetivando otimizar detalhes geométricos e investigar os pontos de operação mais apropriados de elementos de separação mais avançados do que os já fabricados na Alemanha, destinados a equipar a usina de Resende em sua primeira etapa de construção. Estes elementos de separação deverão ser fabricados no Brasil pela "Fábrica de Elementos de Separação - FES", que será montada também na cidade de Resende.

Resultados típicos deste programa de testes estão mostrados na Figura 3: os gráficos se referem a estudos de otimização de elementos de separação passíveis de utilização para a primeira extensão da Primeira Cascata de Resende, que deverão possuir bocais com geometria "birradial", com raios de curvatura 0.05/0.075 mm.

As experiências foram realizadas com uma réplica de laboratório, denominados L-124, com geometria ampliada $r = 0.5/0.75$ mm e foi utilizado como gás de processo uma mistura de He e UF₆, este último em uma concentração molar de 2.4%.

As curvas mostradas na Figura 3 ilustram a dependência entre alguns parâmetros do processo e a pressão do gás na entrada do bocal. Convém observar que a utilização de hidrogênio como gás auxiliar melhoraria o desempenho do elemento de separação, reduzindo o consumo de energia de 30 a 40%.

Os valores da pressão de operação para uma usina utilizando elementos de operação industriais ($r = 0.05/0.075$) deverão ser 10 vezes superiores às pressões P_0 indicadas nos gráficos.

Os gráficos indicam que o valor do fator de separação A passa por um máximo quando a pressão de operação atinge 34 Torr. Coincidentemente, o menor consumo específico E_{sr} também ocorre nesta região de trabalho. Por outro lado, o menor valor do corte θ ocorre em outra região, onde $P_0 = 39$ Torr. Como os valores de P_0 correspon-

dentes ao mínimo de θ e E_{sr} e ao máximo de A nem sempre coincidem, o ponto de operação otimizado deverá ser determinado através de funções de custos, como parâmetros econômicos válidos na época da decisão.

As pesquisas do CDTN com o TKA deverão prosseguir dentro do objetivo de aperfeiçoar geometrias de bocais de separação e de otimizar os respectivos pontos de operação ao longo do desenvolvimento do processo.

Os Estudos sobre Comportamento de Cascatas constituem a outra linha de pesquisa conduzida no CDTN. Estes estudos foram iniciados em fins de 1979, quando foi transferida do KfK para o CDTN uma Usina Piloto de dez estágios.

Durante os anos de 1980 e 1981, a Usina Piloto foi utilizada para reproduzir os experimentos anteriormente realizados na RFA. Em junho de 1981, os elementos de separação originais foram substituídos por elementos de dupla deflexão e foi iniciado um programa de pesquisas destinado ao desenvolvimento de métodos de regulação da cascata e à comprovação experimental do conceito de controle de rejeito, previsto para a Usina de Resende.

A Figura 4 mostra a Usina Piloto instalada no CDTN, cujo fluxograma simplificado é mostrado na Figura 5: em cada estágio, a fração leve F_l é conduzida ao estágio seguinte, a fração pesada F_p é retornada ao estágio anterior e a fração intermediária F_i é recirculada no próprio estágio. A fração leve do estágio-topo (estágio dez) entra em um separador criogênico, onde o UF_6 é retirado e o hélio é reconduzido para a cascata, realimentando o topo (estágio dez) e o estágio-pé (estágio um) da cascata. O UF_6 é alimentado no estágio-topo e há uma pequena retirada controlada do rejeito no pé da cascata.

A operação de uma cascata com elementos de dupla deflexão foi realizada pioneiramente no CDTN, confirmando experimentalmente a estabilidade e controlabilidade já previstas em simulações por computador.

A Figura 6 mostra os resultados de um experimento realizado na Usina Piloto para determinar a variação temporal das concentrações de UF_6 nos diversos estágios da cascata. O experimento consistiu em reduzir subitamente a taxa de compressão do compressor do estágio 4. Verifica-se que as concentrações atingem novos valores estacionários após alguns minutos. Os estágios anteriores ao estágio 4 são os que sofrem um transiente de maior duração. O estágio-pé é conduzido ao ponto de trabalho através de um sistema de controle atuando sobre a válvula VC instalada na retirada de rejeito.

A instalação do sistema de controle na retirada de rejeito da Usina Piloto constitui a realização prática do conceito de controle que está sendo otimizado pelo CDTN, objetivando minimizar os desvios das condições de operação em casos de perturbações.

A Figura 7 apresenta os desvios da pressão e da concentração nominais nos diversos estágios da Usina Piloto, após atingirem as condições estacionárias, ao se provocar uma variação súbita de 30% na abertura da válvula de retorno da fração pesada F_p do estágio 3. Constata-se que os desvios dos valores iniciais ficam localizados em sua maior parte no estágio 3, com pequena propagação aos outros estágios. Nesta mesma Figura, os resultados experimentais são comparados com os obtidos por meio de um programa de simulação, podendo-se notar a boa concordância entre os mesmos.

As pesquisas em andamento visam ao aperfeiçoamento do concei-

to de controle de rejeito e ao estudo do comportamento de componentes isolados de cada estágio, fornecendo importantes dados para os modelos de simulação. Futuramente deverão ser pesquisadas novas estratégias de operação e de controle de cascatas.

CONCLUSÕES

As pesquisas relativas ao enriquecimento de urânio foram iniciadas no CDTN em fins de 1979, quando foi transferida a Usina Piloto de 10 estágios, anteriormente instalada no Centro de Pesquisa Nuclear de Karlsruhe.

Os trabalhos iniciais no CDTN foram desenvolvidos por uma equipe treinada na Alemanha, com assistência direta de técnicos do KfK.

Passados 4 anos, o Centro conta hoje com diversas instalações adicionais, contribuindo para o desenvolvimento de processo.

Na Usina Piloto foi demonstrada a controlabilidade e estabilidade de cascatas equipadas com elementos de dupla deflexão e a utilidade do conceito de regulagem por controle de rejeito, além de ter sido constatada a conformidade entre resultados experimentais e simulações teóricas por computador. No TKA, está sendo avaliada a eficiência de separação isotópica de elementos de separação avançados e a conseqüente economicidade energética do processo.

Devido ao contínuo aperfeiçoamento dos elementos de separação e o aparecimento de novos conceitos de operação e controle de cascatas, conclui-se que o CDTN deverá desempenhar um papel cada vez mais importante no desenvolvimento e consolidação de tecnologia de enriquecimento isotópico de urânio pelo processo do jato centrífugo.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam o seu agradecimento ao Eng^o H. Hein, do KfK pela participação e orientação das pesquisas realizadas na Usina Piloto e ao Eng^o Aljose A. Souza, do CDTN, pelo contínuo apoio na operação das instalações mencionadas neste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

1. CAMARGO, P.P., LERMONTOV, M., "O Programa Brasileiro de Enriquecimento de Urânio: Organização, Programa, Realizações" III CBE, Outubro 1984.
2. DIAS, J.W.C., "O Processo de Enriquecimento Isotópico de Urânio pelo Jato Centrífugo e suas Perspectivas Industriais", III CBE, Outubro 1984.
3. BECKER, E.W., BIER, W., BLEY, P., EHFELD, W., SCHUBERT, K., SEIDEL, D., "Development and Technical Implementation of the Separation Nozzle Process for Enrichment of Uranium-235" AIChE Symposium Series number 221, volume 78, 1982.
4. BLEY, P., CÂMARA, A.S., CONSIGLIO, R.V., HEIN, H., LINDER, G., YADOYA, R., "Untersuchungen zum Betriebsverhalten von Trenndüsenkaskaden zur Anreicherung von U-235 an einer 10 - stufigen Versuchsanlage", Relatório KfK-3665, Março 1984.

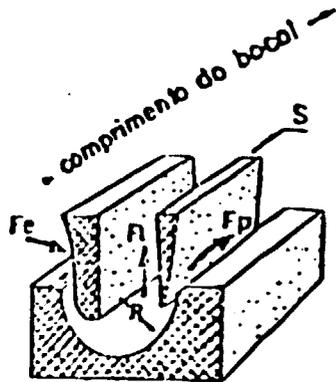


FIG.1: PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO JATO CENTRÍFUGO.

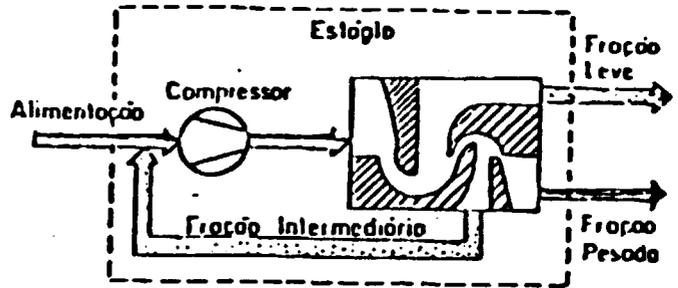
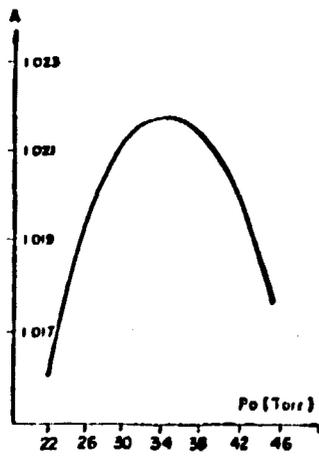
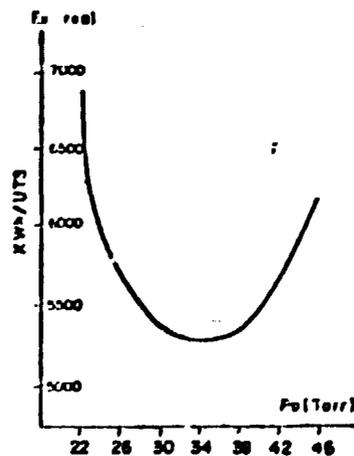


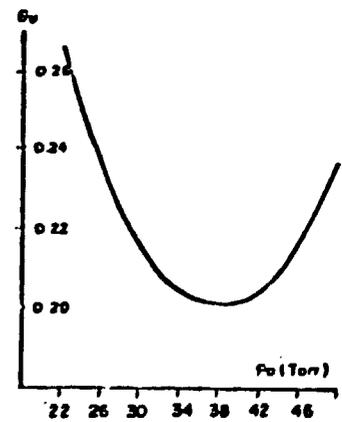
FIG.2: SISTEMA DE DUPLA DEFLEXÃO



I FATOR DE SEPARAÇÃO



II CONSUMO ESPECÍFICO REAL



III CORTE DE URÂNIO

FIG.3: RESULTADOS DE MEDIDAS REALIZADAS NO CDTN COM O ELEMENTO DE SEPARAÇÃO L-124.

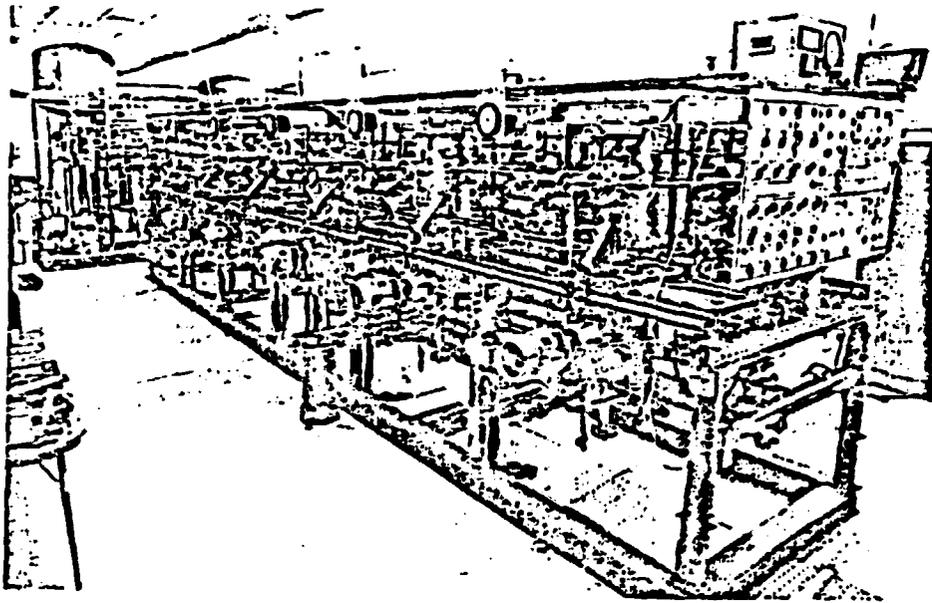


FIG.4: VISTA GERAL DA USINA PILOTO NO CDTN

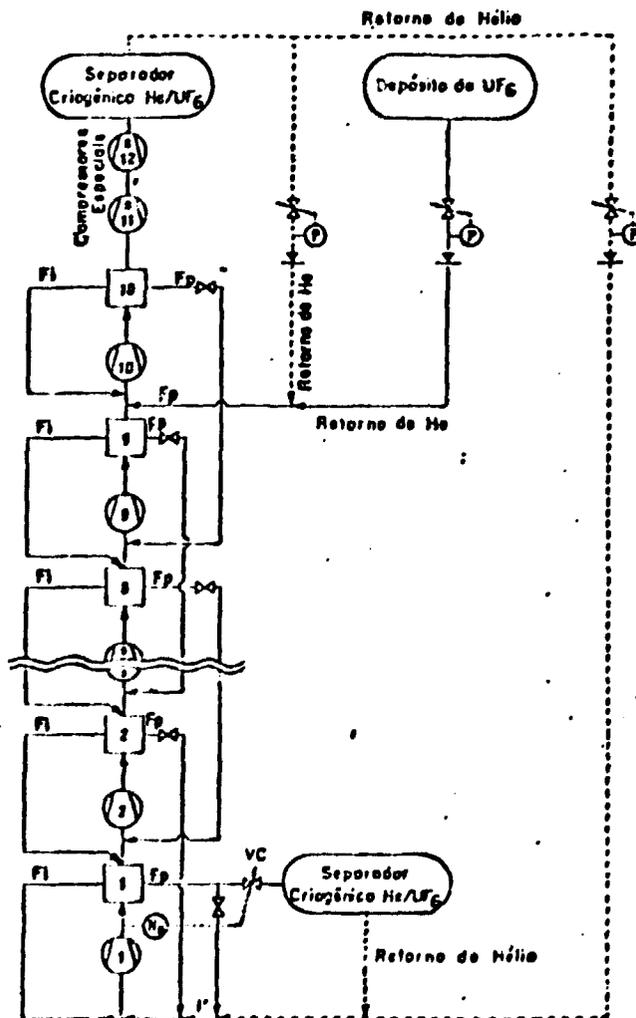


FIG.5: FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DA USINA PILOTO

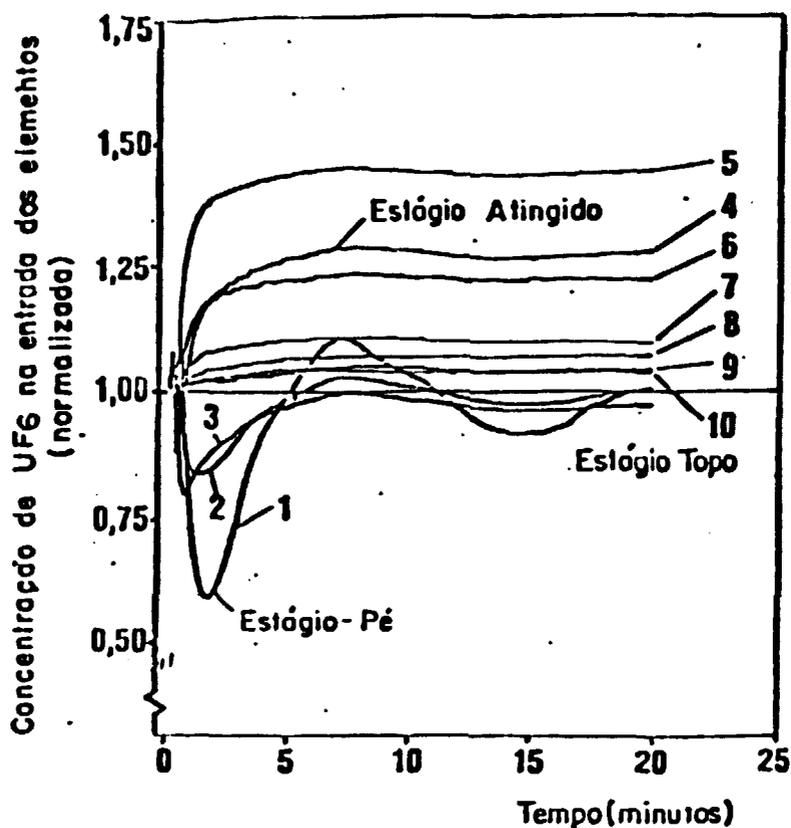


FIG.6: Comportamento dinâmico da Usina Piloto equipada com controle de rejeito para manter a concentração de UF_6 do estágio-pé no valor de trabalho, no caso de uma redução de 25% na razão de compressão do compressor 4. Ref. (4)

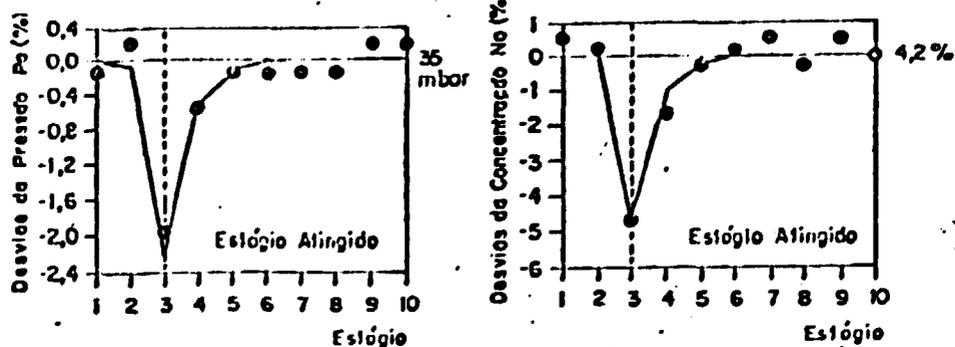


FIG.7: Condições estacionárias atingidas na Usina Piloto após a abertura em 30% da válvula de retorno da Fração Pesada do estágio nº 3. Os pontos são correspondentes aos resultados experimentais e as linhas contínuas são obtidas por simulação em computador. Ref. (4)