

BR7902972



**O PROCESSO DO BOCAL DE SEPARAÇÃO PARA O
ENRIQUECIMENTO ISOTÓPICO DE URÂNIO**

**Ivo Jordan, Kiyoe Umada e
Anthony E. P. Brown**

**INFORMAÇÃO IEA 066
IEA - Inf - 066**

MARÇO/1979

CONSELHO DELIBERATIVO

MEMBROS

Klaus Reinach – Presidente
Roberto D'Utra Vaz
Helcio Modesto da Costa
Ivano Humbert Marchesi
Admar Cervellini

PARTICIPANTES

Regina Elisabete Azevedo Beretta
Flávio Gori

SUPERINTENDENTE

Rômulo Ribeiro Pieroni

**O PROCESSO DO BOCAL DE SEPARAÇÃO PARA O
ENRIQUECIMENTO ISOTÓPICO DE URÂNIO**

Ivo Jordan, Kiyoe Umeda e
Anthony E. P. Brown

**CENTRO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CEQ - APE 001**

**INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
SÃO PAULO - BRASIL**

INIS Categories and Descriptors

D11

Uranium

Isotope separation

Separation nozzle method

ÍNDICE

	Página
1 – INTRODUÇÃO	1
2 – HISTÓRICO E PRINCÍPIOS DO PROCESSO	3
2.1 – O Processo na Forma Bocal e Diafragma	3
2.2 – As Condições de Operação Ótimas do Processo	6
2.3 – O processo na Forma Bocal e Jato Centrífugo	11
3 – DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO EM ESCALA DE LABORATÓRIO PILOTO	15
3.1 – Elementos de Separação	15
3.2 – Circuito de Ensaio Fechado	16
3.3 – Cascata de Separação Piloto	19
4 – PROJETO DE UMA USINA DE DEMONSTRAÇÃO	21
5 – DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO DO PROCESSO	22
5.1 – Elementos de Separação Comerciais	22
5.2 – Estágios de Separação	26
6 – ESTADO ATUAL DO PROCESSO	28
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

O PROCESSO DO BOCAL DE SEPARAÇÃO PARA O ENRIQUECIMENTO ISOTÓPICO DE URÂNIO*

Ivo Jordan, Kiyoe Umeda e
Anthony E. P. Brown

RESUMO

Neste trabalho, faz-se um estudo da perspectiva geral de enriquecimento isotópico de urânio-235, principalmente pelo processo do bocal de separação. É apresentada a teoria de elemento de separação e de cascata de separação desse processo e o seu desenvolvimento tecnológico na Alemanha até 1976.

1 – INTRODUÇÃO

Os processos de enriquecimento isotópico ou de separação dos isótopos de urânio atualmente em uso ou em desenvolvimento com a finalidade de produzir, em larga escala, urânio enriquecido no seu isótopo ^{235}U são os processos da difusão gasosa, da centrifugação e do bocal de separação. Os dois primeiros já eram conhecidos antes da Segunda Guerra Mundial, enquanto que o terceiro vem sendo desenvolvido por BECKER e seus colaboradores na República Federal Alemã desde o ano de 1955. Este último processo, atualmente na forma do jato centrífugo também é conhecido, embora de maneira imprópria, por "jet nozzle process".

Os três processos apresentam um característico em comum, a saber, a separação dos isótopos de urânio é muito pequena quando realizada apenas uma vez, isto é, o efeito elementar de separação é extremamente reduzido. Por este motivo, na realização prática de qualquer um destes processos em larga escala e visando enriquecimento significativos, é necessário multiplicar este efeito elementar de separação, ou seja, repetí-lo em grande número de vezes. Esta multiplicação é feita numa instalação ou usina de enriquecimento, na qual as menores unidades, todas idênticas, chamadas elementos de separação, são ligadas em série e em paralelo no sentido de formar uma cascata de separação de isótopos. Além disto, um outro característico no uso destes três processos para o enriquecimento isotópico de urânio é o fato de o material processado nos elementos de separação ser hexafluoreto de urânio UF_6 em estado gasoso.

Até o presente, apenas usinas baseadas no processo de difusão gasosa se encontram em funcionamento para a produção industrial de urânio enriquecido. Os países, que possuem usinas operando com esta tecnologia, são os Estados Unidos, a Inglaterra, a União Soviética, a França e a República Popular da China. Os aspectos tecnológicos de cada uma destas usinas foram rigorosamente mantidos em segredo na época de sua instalação, situação que ainda hoje, pelo menos em parte, continua a prevalecer.

O processo da centrifugação, que também é mantido em segredo, no momento está sendo desenvolvido com sucesso, não só na República Federal Alemã, Holanda e Inglaterra, como também nos Estados Unidos. Embora existam apenas usinas de demonstração parcialmente em operação, sabe-se que em virtude de suas enormes possibilidades de aperfeiçoamento e de suas nítidas vantagens econômicas em relação ao da difusão gasosa, o processo da centrifugação já se encontra em condições de ser utilizado para a produção de urânio enriquecido com finalidades industriais.

* Trabalho realizado em 1976.

Quanto ao processo do bocal de separação, atualmente, seu desenvolvimento tecnológico apresenta-se menos avançado do que o da centrifugação. Todavia, existem indícios seguros de que o processo considerado, dentro de alguns anos, deverá poder competir economicamente com os anteriores. Além disto, o processo do bocal de separação ainda possui a vantagem de não estar sujeito à qualquer sigilo, quer da ordem teórica, quer de natureza tecnológica.

Até meados da década de 1950, a produção em larga escala de urânio enriquecido se restringia a finalidades exclusivamente militares nos países possuidores de usinas de difusão gasosa. A partir desta época, iniciou-se o emprego de urânio levemente enriquecido em reatores nucleares resfriados e moderados com água leve, tendo por finalidade a produção de energia elétrica. Graças à diminuição das exigências militares e à enorme potencialidade das usinas de difusão gasosa, durante toda a década de 1960 a produção de urânio enriquecido, realizada por estas usinas, ainda era superior à demanda mundial do material exigida pelas centrais eletronucleares que usam reatores alimentados com urânio levemente enriquecidos. Todavia, a considerável expansão na construção destas centrais, que se intensificou especialmente nos últimos anos da década considerada, conduz à previsão de que, a curto prazo, deveria ocorrer um aumento muito rápido das necessidades de urânio enriquecido, acompanhado de uma maior importância na posição do correspondente problema de enriquecimento isotópico dentro do ciclo do combustível de reatores nucleares de água leve. Por isto, começou-se naquela época a considerar seriamente as condições de abastecimento de urânio enriquecido, a instalação de novas usinas de enriquecimento, a possibilidade de novos processos de separação dos isótopos de urânio e o aperfeiçoamento dos já existentes. Assim, durante o "Simpósio de Problemas da Separação Isotópica de Urânio", realizado na Itália em 1968, já se havia estimado que no ano de 1980 as necessidades mundiais de urânio enriquecido deveriam ultrapassar a capacidade de separação de 40×10^6 kgTS/a* (correspondente a 10.600 ton de urânio enriquecido a 3%), sendo acompanhada de um déficit de 20×10^6 kgTS/a, que deveria ser coberta na década de 1970 com um investimento de 2 a 3 bilhões de dólares na construção de usinas de enriquecimento⁽²⁶⁾.

Para enfrentar este problema, foram, a seguir, tomadas as seguintes iniciativas: 1) Criação em 1970 de um consórcio de empresas da República Federal Alemã, Inglaterra e Holanda, denominado Urenco/Centec tendo por finalidade instalar usinas de separação dos isótopos de urânio por centrifugação em Almelo (Holanda) e Capenhurst (Inglaterra) com uma produção total prevista de 2×10^6 kgTS/a em 1982, a ser ampliada em 1983 para 10×10^6 kgTS/a⁽³¹⁾; 2) Ampliação das usinas de difusão gasosa americanas para aumentar a capacidade de urânio enriquecido, que atualmente é igual a $17,2 \times 10^6$ kgTS/a, até atingir $27,7 \times 10^6$ kgTS/a em 1985; 3) Criação em 1973 da sociedade Eurodif pela França, Itália, Bélgica e Espanha para a construção em Tricastin (França) da primeira usina europeia de difusão gasosa com uma capacidade inicial de 4×10^6 kgTS/a em 1979 e a capacidade máxima de $10,5 \times 10^6$ kgTS/a em 1982.

Com a eclosão da recente crise energética, estas medidas que se encontram em andamento, todavia, se tornaram insuficientes para assegurar o abastecimento de urânio enriquecido para o mundo ocidental até o ano de 1990. Realmente, em decorrência desta crise, está sendo intensificada a construção de centrais eletronucleares baseadas em reatores de urânio levemente enriquecido, tornando, no momento, ainda mais agudo o problema do correspondente enriquecimento isotópico. Além disto, a necessidade urgente de resolver este problema por meio da construção de novas usinas de separação de isótopos, foi acentuada nos últimos anos pelo constante aumento do preço do petróleo, que vem automaticamente acompanhado pelo preço dos outros combustíveis fósseis. Tendo em vista estes fatos, na 1ª Conferência Nuclear Europeia, realizada em Paris em abril de 1975, foi estimado que para enfrentar o problema do futuro abastecimento de urânio enriquecido deveriam ser construídas até o fim deste século cerca de vinte usinas de enriquecimento de urânio, cada uma com capacidade de 10×10^6 kgTS/a, o que representaria praticamente a instalação de uma destas usinas por ano⁽²⁹⁾.

Na construção destas novas usinas, serão certamente preferidos, no momento, os processos da difusão gasosa e da centrifugação. Todavia, parece não restar dúvidas que num futuro próximo deverão

* $1 \text{ kgTS/a} = 1 \text{ UTS/a} = 1$ unidade (U) de trabalho (T) de separação (S) por ano.

entrar em concorrência com estes processos, o do bocal de separação e o novo processo que está sendo diligentemente desenvolvido na África do Sul*.

No caso brasileiro, embora não se utilize petróleo para a produção de eletricidade e se disponha ainda de um considerável potencial hidroelétrico, o problema energético se situa na inadequada distribuição deste potencial. Assim, dos 50.000 MW que, de acordo com as atuais estimativas, deverão ser instalados até 1990 em adição aos 20.000 MW existentes, a maior parte desta capacidade adicional será absorvida pela região centro-sul. Como nesta região não existirão mais recursos hidroelétricos em quantidade suficiente para atender a demanda considerada, a solução encontrada para garantir o abastecimento futuro de energia elétrica foi a instalação de centrais eletronucleares, a fim de complementar a capacidade de geração de energia pelas usinas hidroelétricas. Dentro deste contexto e considerando que, do ponto de vista do custo da geração elétrica, da eficiência operacional e dos custos de capital, a linha de reatores de urânio levemente enriquecido é a mais aconselhável⁽¹⁾, o Governo Brasileiro optou em realizar o desenvolvimento eletronuclear do país com este tipo de reatores, construir concomitantemente uma usina de enriquecimento isotópico de urânio e instalar o ciclo completo do combustível nuclear, como está previsto no Acordo Nuclear firmado com a República Federal Alemã, em junho de 1975.

Nos termos deste acordo, para a realização do enriquecimento isotópico do urânio, foi escolhido o processo do bocal de separação na forma do jato centrífugo. Em vista deste fato, o objetivo do presente trabalho é divulgar este processo de separação de isótopos desde suas origens, apresentando o histórico e os princípios físicos do mesmo, assim como, seu desenvolvimento tecnológico e o estado atual em que se encontra. Para elaborar este apanhado, levamos em conta a bibliografia publicada sobre o assunto, até junho do ano de 1975, época em que foi assinado o acordo acima citado.

2 -- HISTÓRICO E PRINCÍPIOS FÍSICOS DO PROCESSO

O processo do bocal de separação inicialmente foi introduzido na forma de um bocal situado em frente a um diafragma perfurado. Mais tarde, foi modificado na forma atual constituída de um bocal e um jato centrífugo. Na presente secção, apresentaremos o histórico e os princípios físicos destas duas versões do processo, assim como, as condições de separação ótimas através das quais se pode avaliar e comparar o potencial econômico do processo.

2.1 -- O Processo na Forma Bocal e Diafragma

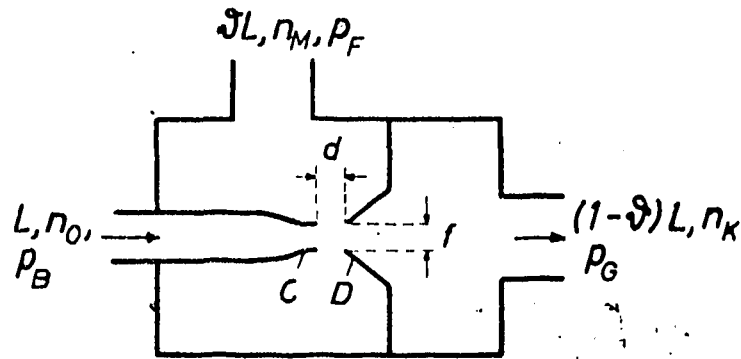
O processo do bocal de separação se originou das experiências feitas por BECKER e colaboradores⁽⁴⁾ com feixes moleculares ultrasônicos, bem monoenergéticos, de hidrogênio, formados de um bocal de Laval desenvolvido pelos autores em 1954. Nestas experiências, com o bocal situado em frente a um diafragma (anteparo) cônico e perfurado no centro, verificaram que com a adição de uma pequena quantidade de um gás mais pesado, ocorria no jato, entre o bocal e o diafragma, uma separação parcial dos dois componentes da mistura gasosa**.

Baseados nesta observação, BECKER e colaboradores⁽¹²⁾ introduziram, em 1955, o processo do bocal de separação de isótopos, que então era realizado por meio da aparelhagem apresentada esquematicamente na Figura 1. A mistura isotópica gasosa com fração molar n_0 do isótopo leve e vazão L atravessa sob a pressão p_0 o bocal C, do qual sai sob a forma de um jato. Um diafragma cônico com um

* O processo sul-africano, conhecido por "centrífuga de parede fixa", foi revelado, em 1975, por ROUX e GRANT⁽³⁷⁾.

** Convém lembrar que a possibilidade de separar misturas gasosas em jatos de alta velocidade já havia sido sugerida por DIRAC durante a Segunda Guerra Mundial, tendo sido demonstrado experimentalmente, em 1946, por TAHOURDIN na Universidade de Oxford⁽³⁹⁾. Aparentemente, BECKER e colaboradores desconheciam este trabalho, quando introduziram o processo do bocal de separação.

com um orifício central de diâmetro f e situado na distância d do bocal, divide o jato em uma parte periférica com fração molar n_M do isótopo leve e em uma parte central de fração molar n_K do mesmo isótopo, a qual atravessa o orifício do diafragma. Estas partes periféricas e central são bombeadas as respectivas pressões p_M e p_K das correspondentes regiões do recipiente de separação formadas pela presença do diafragma. Como p_M é muito menor do que p_0 , o gás emerge do bocal sob a forma de um jato em expansão livre com as linhas de escoamento dirigidas para fora, como mostra a Figura 2.



Prinzip des Trennelementes.

Figura 1 — Princípio do Bocal de Separação na Forma Bocal/Diafragma

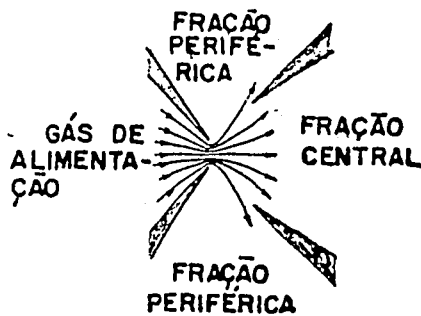


Figura 2 — Expansão Livre do Jato de um Bocal

As experiências realizadas com argônio, composto dos isótopos ^{36}Ar (leve e pouco abundante)* e ^{40}Ar , mostraram que a fração periférica se encontrava enriquecida no isótopo leve (^{36}Ar) e a fração central, no outro isótopo. Estas experiências foram, a seguir, estendidas a bocais convergentes, de secção circular ou em forma de fenda. Com estes bocais, a separação dos isótopos de argônio foi investigada através dos parâmetros d , f , p_M , p_K e p_o , assim como, através da largura w do bocal, verificando-se que os bocais considerados eram mais eficientes do que Laval.

Baseado nos resultados obtidos com os bocais convergentes, o efeito separador do bocal foi explicado por BECKER e colaboradores^(7,8) através da difusão de pressão compensada pela difusão normal. Assim, em distâncias próximas da saída do bocal ocorre, no caso de bocais convergentes, uma expansão transversal muito intensa do jato, como é mostrado na Figura 2. Como $p_M \ll p_o$, os gradientes de pressão estão dirigidos para fora e estes determinam então a difusão preferencial do isótopo leve para a parte periférica do jato expandido. Através desta difusão por pressão ocorre, então a concentração do isótopo leve nesta região periférica e a do isótopo pesado na central. Estas correntes de difusão por pressão, que determinam a separação progressiva dos isótopos a medida que o jato se expande, são agora compensadas pela difusão comum (de concentração), em sentido oposto, de modo a atingir-se um valor limite para o enriquecimento isotópico^(7,8). Baseado apenas nestes dois tipos de difusão, BECKER e colaboradores⁽⁸⁾ apresentaram uma teoria quantitativa, usando as equações da teoria cinética dos gases, mas, em virtude da complexidade do escoamento gasoso no jato, esta teoria não conseguiu interpretar todos os fatos observados.

Na investigação experimental do bocal de separação, as quantidades medidas, mediante a variação das grandezas w , f e d e das pressões p_o , p_M e p_K , foram as seguintes:

- 1) o fator enriquecimento α definido por BECKER e colaboradores através da razão das respectivas relações de abundância R_M e R_o na fração periférica e na alimentação segundo:

$$\alpha = \frac{R_M}{R_o} = \frac{n_M/(1-n_M)}{n_o/(1-n_o)} = \frac{n_M(1-n_o)}{n_o(1-n_M)} \quad (1)$$

- 2) o fator separação A definido pelos citados autores por

$$A = \frac{R_M}{R_K} = \frac{n_M/(1-n_M)}{n_K/(1-n_K)} = \frac{n_M(1-n_K)}{n_K(1-n_M)} \quad (2)$$

onde R_K = relação de abundância na fração central ;

- 3) os efeitos elementares de enriquecimento e de separação, respectivamente, dados por:

$$e = \alpha - 1 \quad e \quad \epsilon_A = A - 1 \quad (3)$$

- 4) o corte definido por:

$$\theta = \frac{\text{vazão molar do gás na fração periférica (L')}}{\text{vazão molar total (L)}} \quad (4)$$

* Na separação de isótopos estáveis, usualmente, se deseja enriquecer a mistura, de composição isotópica natural, no isótopo menos abundante e, geralmente mais valioso (caso do ^{235}U na separação isotópica do urânio); este isótopo costuma ser chamado, por isto, de isótopo desejado.

de modo que, a vazão da fração periférica é $L' = \theta L$ e a da fração central é $L'' = L - L' = L = \theta L = (1 - \theta)L$, como está indicado na Figura 1.

Convém notar que nas definições (1) e (2), as frações molares $(1 - n)$ se referem ao isótopo pesado, pois, estamos considerando apenas misturas isotópicas binárias, isto é, formadas apenas de dois componentes, o isótopo leve (^{36}Ar ou ^{235}U) e o pesado (^{40}Ar ou ^{238}U). Além disto, as vazões molares são usualmente expressas em mol/s ou mol/h para a mistura isotópica.

Os fatores α ou A e o corte θ são as grandezas características de qualquer elemento de separação de isótopos. As duas primeiras fornecem uma medida quantitativa da separação isotópica realizada pelo elemento e estas grandezas dependem do valor do corte θ .

2.2 — As Condições de Separação Ótimas do Processo

As experiências de separação de isótopos realizadas por BECKER e colaboradores com o processo do bocal de separação na versão da Figura 1 revelaram que, como no caso dos processos da difusão gasosa e da centrifugação, o efeito elementar de enriquecimento ϵ (ou de separação ϵ_A), medido num só elemento de separação (bocal), era muito pequeno. Como já foi mencionado, a aplicação prática do processo do bocal requer, então, a repetição deste efeito elementar, que é realizada numa cascata de separação de isótopos formada por um conjunto de elementos de separação, ligados em série e em paralelo. A ligação em série tem por finalidade multiplicar o efeito elementar de separação, enquanto que a ligação em paralelo visa a produção de grandes quantidades de material enriquecido, uma vez que a produção de isótopos separados num só elemento de separação é muito pequena. Um conjunto de elementos de separação ligados em paralelo e alimentados por material de mesma composição isotópica é denominado estágio de separação. Nestas condições, a cascata de separação de isótopos é simplesmente uma disposição em série de um certo número de estágios.

No caso do enriquecimento isotópico de urânio, a cascata de separação consta de uma secção de enriquecimento e de uma secção de recuperação ("stripping section"). A secção de enriquecimento se destina à produção de uma dada quantidade de material enriquecido no isótopo desejado com a composição desejada, por exemplo, 3% de ^{235}U . A secção de recuperação tem por finalidade economizar a matéria prima, que alimenta a cascata, por meio do reaproveitamento da fração empobrecida no isótopo desejado, que sai da secção de enriquecimento. Então, a tarefa da cascata é separar a vazão de alimentação F com a fração molar n_0 correspondente ao material de composição isotópica natural (por exemplo, urânio natural com $n_0 = 0,72\%$ de ^{235}U) que entra na secção de enriquecimento, em uma vazão de produto P com a fração molar n_p e em uma vazão de rejeito W com a fração molar n_w . As vazões do produto e do rejeito são retiradas do último estágio das respectivas secções de enriquecimento e de recuperação.

Na construção da cascata considerada, os mais diferentes esquemas de ligação dos estágios são possíveis. Assim, a ligação pode ser realizada de modo que a fração enriquecida, que sai de cada estágio, alimenta o estágio posterior, enquanto que a fração empobrecida é introduzida ao mesmo tempo na alimentação do estágio anterior. Esta é a mais simples ligação entre os estágios e a cascata com reciclagem, que a apresenta, é simétrica no sentido de que o corte θ de cada estágio é 0,5. Existe evidentemente a possibilidade de esquemas de ligação mais complexos com cortes θ diferentes de 0,5.

O problema que surge agora na operação da cascata com o esquema de ligação dado e as vazões F , P e W consideradas é estabelecer as condições de operação dos estágios, que conduzem à cascata mais econômica e, portanto, mais eficiente, operando com o menor custo (ou despesa) possível. Esta cascata ótima, como veremos mais tarde, conduz às condições de operação mais favorável do elemento de separação, as quais, para cada processo de separação podem ser estabelecidas experimentalmente.

A solução do problema de otimização considerado constitui o principal objetivo da teoria da separação de isótopos estáveis, elaborada por COHEN e colaboradores⁽³⁰⁾, a qual se aplica a qualquer

processo de enriquecimento isotópico, sem levar em conta o conhecimento exato da construção interna dos elementos de separação. Uma das maneiras, com a qual esta teoria aborda o problema, parte da hipótese de que, tanto o elemento de separação como a cascata, através do seu efeito separador, produzem vazões de valor v , portanto, uma variação no valor de uma quantidade de material separado. A vazão de valor é dada por uma função U , e representa o valor de uma dada quantidade de material separado, sendo o valor deste material entendido como o custo (ou o investimento) da separação necessário para produzi-lo e normalizado de certa maneira. A cascata ótima se caracteriza, então, pelo fato de sua vazão de valor ser igual à soma das produções de valor dos elementos, de modo que nenhum valor produzido pela separação é perdido através da mistura de vazões de composição isotópica diferente. Isto ocorre na chamada cascata ideal, na qual a operação dos estágios é feita de tal modo que só existe a mistura de vazões com a mesma composição isotópica na alimentação de cada estágio.

A vazão de valor representada pela função U é igual ao produto de uma vazão material e de uma função de valor V , que deve ser determinada. Assim, para as secções de enriquecimento e de recuperação, temos, respectivamente, as seguintes vazões de valor do produto e do rejeito:

$$U_p = PV(n_p) \quad \text{e} \quad U_w = WV(n_w)$$

onde V é a função de valor, que depende das respectivas frações molares n_p e n_w do isótopo desejado nas vazões de produto P e de rejeito W . Durante a operação da cascata, a variação total no valor criado pela mesma (produção de valor da cascata) é dada por:

$$\Delta U = U_p + U_w - U_o = PV(n_p) + WV(n_w) - FV(n_o) \quad (5)$$

onde $U_o = FV(n_o)$ é a vazão de valor da alimentação. Portanto a cascata através de seu efeito de separação conduz à produção de vazões de valor: vazões com material de mais valor (custo) do que o de partida, isto é, da alimentação.

O elemento de separação, como já foi mencionado, também fornece uma variação no valor do material separado e esta produção de valor, representada por δU , é denominada poder de separação do elemento. Portanto, ao separar isótopos, determina um aumento de valor no material separado e quanto maior for δU , maior é a capacidade de separação do elemento. Assim, δU é uma característica do elemento de separação e sua expressão matemática depende da natureza deste elemento.

A teoria da separação de isótopos impõe que a variação ou a produção de valor δU do elemento de separação é independente da concentração (fração molar) n do isótopo desejado (isto é, ^{235}U). Esta condição de separação junto com o fato de que o custo para a produção da separação elementar não depende de n . Com esta condição, a teoria fornece a função de valor $V(n)$ na forma da equação diferencial:

$$\frac{d^2 V(n)}{dn^2} = \frac{1}{[n(1-n)]^2} \quad (6)$$

Com esta equação se obtém, então, para o poder de separação de um elemento de separação simples a expressão:

$$\delta U = \frac{\theta}{1-\theta} L \frac{\epsilon^2}{2} \quad (7)$$

A função de valor é agora obtida através da resolução da equação diferencial (6), especificando as duas constantes de integração, mediante condições de contorno apropriadas. Escolhendo as duas constantes de modo que satisfaçam as condições: $V(0,5) = 0$ e $dV(0,5)/dn = 0$, obtemos para $V(n)$:

$$V(n) = (2n - 1) \ln R \quad (8)$$

onde $R = n/(1 - n)$ é a relação de abundância. Os valores desta função se encontram tabelados em função de n . Conhecidos então n_o , n_p e n_w , podemos obter os respectivos valores de V_o , V_p e V_R e daí calcular a variação ΔU da cascata através da equação (5). Para isto, é necessário conhecer F , P e W ; usualmente, P é prefixado ou F é dado. Então, no caso da cascata ideal em que são válidas as relações, provenientes do balanço de material na cascata,

$$F = P + W \quad \text{e} \quad n_o F \equiv n_p P + n_w W$$

podemos calcular W e F através de:

$$W = \frac{n_p - n_o}{n_o - n_w} P \quad \text{e} \quad F = \frac{n_p - n_w}{n_o - n_w} P \quad (9)$$

quando P é dado. No uso das equações (9), o valor de n_o é conhecido (0,0072 para o caso do urânio natural) e o de n_w , proveniente da otimização da secção de recuperação, está situado entre 0,0020 e 0,0030 para o enriquecimento isotópico de urânio.

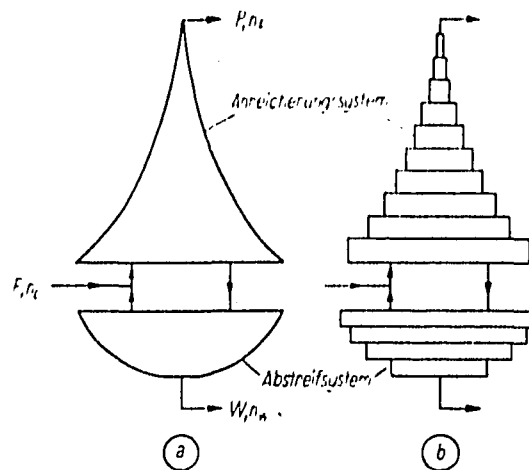
A cascata com o esquema de ligação simétrico anteriormente mencionado, quando é ideal, é representada pelo diagrama da Figura 3(a), onde a largura é proporcional às vazões L e a altura ao número de estágios. Na prática, a cascata ideal é irrealizável, porque exige variação contínua do tamanho dos estágios, o que não é econômico. Neste caso, as cascatas reais são obtidas por meio da quadratura da ideal, como é indicado na Figura 3(b), na qual cada secção retangular constitui um certo número de estágios de mesmo tamanho.

A variação da vazão de valor ΔU da cascata, como mostra a teoria citada, independe do tipo do elemento de separação, porque ela representa na realidade uma medida da capacidade de separação da cascata, independentemente das características dos elementos. Uma outra quantidade útil para medir a separação realizada por uma cascata (ou seja, sua capacidade de separação) é o trabalho de separação. Esta grandeza, agora universalmente usada para avaliar a tarefa de separação de uma cascata, é definida de maneira análoga a ΔU , mas em lugar das vazões P , W e F , figuram as quantidades de material M_p , M_w e M_f , expressas em kg⁽²⁴⁾. Nestas condições, o trabalho de separação é dado pela expressão:

$$\begin{aligned} E &= M_p V(n_p) + M_w V(n_w) - M_f V(n_o) = \\ &= M_p (2n_p - 1) \ln R_p + M_w (2n_w - 1) \ln R_w - M_f (2n_o - 1) \ln R_o \end{aligned} \quad (10)$$

O trabalho de separação, desta maneira, envolve a produção de uma dada quantidade de valor proveniente da separação, isto é, o custo ou o investimento da separação, que se reflete em consumo de energia. Como

* Ver, por exemplo, a tabela apresentada na obra de BENEDICT e PIGFORD⁽²⁴⁾.



Die optimale Durchsatzfunktion
a) kontinuierlich gestaffelte Kaskade, b) „quadierte“ Kaskade

Figura 3 — Diagramas de Cascatas de Separação de Isótopos (a) Cascata Ideal (b) Cascata Real

foi visto, suas dimensões são 1 UTS = 1 kg de trabalho de separação de urânio. Estas dimensões, embora não sejam as de uma energia, mostram por outro lado que o trabalho de separação E está estreitamente relacionado à quantidade de trabalho necessário para conseguir a separação desejada na Cascata. De fato, o trabalho de separação é proporcional à quantidade total de gás, que se faz circular através da cascata, para obter a 1 kg do produto enriquecido e , portanto, está relacionado à capacidade total de bombeamento e , assim, à quantidade de energia consumida para obter-se a separação desejada. Neste sentido, representa o mínimo de energia necessária para separar uma dada quantidade de material de composição isotópica n_o (ou R_o) em duas frações de composição isotópica n_p (ou R_p) e n_w (ou R_w), respectivamente. Em linhas gerais, a produção de 1 kg de urânio enriquecido a 3% em ^{235}U com rejeito de 0,25% deste isótopo corresponde a 4 UTS (4 kgTS)*.

Com auxílio do conceito da cascata de separação ótima baseado em vazões de valor e produção de valor, que acaba de ser descrito, BECKER e colaboradores estabeleceram as condições de operação mais favoráveis para o processo do bocal de separação. Para isto, usando ainda a teoria da separação de isótopos do COHEN, recorreram ao procedimento já apresentado por BECKER no seu estudo sobre o enriquecimento isotópico de urânio pelo processo da difusão gasosa⁽²⁾. Este procedimento de baseia no fato pelo qual, segundo a teoria da separação de isótopos, o custo (ou investimento) de separação da cascata ótima pode ser reconduzido ao custo de separação do elemento através da seguinte relação:

$$\frac{\text{Custo de separação da cascata}}{\Delta U} = \frac{\text{Custo de separação do elemento}}{\delta U} \quad (11)$$

* As composições dos produto e rejeito, apresentadas neste exemplo, correspondem às provenientes das cascatas de separação isotópica de urânio, que fornecem o combustível aos reatores de urânio levemente enriquecido (3% de ^{235}U) e de água leve, utilizados nas centrais eletronucleares.

onde ΔU e δU são, respectivamente, as produções de valor da cascata e do elemento, como já vimos anteriormente, e δU , dado pela equação (7), pode ser expresso em termos de ϵ_A por:

$$\delta U = \frac{L}{2} \epsilon_A^2 \theta (1 - \theta) \quad (12)$$

Como a produção de valor da cascata ΔU não depende das condições de operação, a influência destas condições se reflete sobre o custo (investimento) da cascata por intermédio da relação (custo de separação do elemento)/ δU , a qual BECKER denominou de custo ou investimento específico.

O custo de separação do elemento bocal de separação se compõe de três parcelas principais, a saber: 1) Custo de consumo da energia elétrica; 2) Juros do capital e custos correntes de conserto para compressores, válvulas e tubulações e 3) Juros do capital e custos correntes do conserto dos bocais em forma de fenda, das montagens dos mesmos e dos sistemas de regulagem. Estas três parcelas são basicamente proporcionais às seguintes grandezas físicas mensuráveis: 1) Trabalho de compressão isotérmico ideal; 2) Volume de sucção dos compressores e 3) Comprimento da fenda dos bocais. Então, levando em conta δU e estas três quantidades fisicamente mensuráveis, podemos definir os seguintes fatores de custo específico: 1) Trabalho de compressão isotérmico ideal específico E_e ; 2) Volume de sucção específico V_e e 3) Comprimento de fenda específico ℓ_e . Estes três fatores de custo específico, através da expressão para δU dada pela equação (12), podem ser calculado por meio das seguintes equações, segundo BECKER e colaboradores^(7,8):

$$E_e = \frac{2 RT}{\epsilon_A^2 \theta (1 - \theta)} \{ \theta \ln [p_o/p_M] + (1 - \theta) \ln [(p_o/p_K)] \} \quad (13)$$

$$V_e = \frac{2 RT}{\epsilon_A^2 \theta (1 - \theta)} [(\theta/p_M) + (1 - \theta)/p_K] \quad (14)$$

$$\ell_e = \frac{2}{\epsilon_A^2 \theta (1 - \theta)} \cdot \frac{\ell}{L} \quad \text{onde } \ell = \text{comprimento de fenda} \quad (15)$$

Nas experiências de otimização das condições de operação com o sistema bocal/diafragma da Figura 1, podem ser variados: 1) Forma do bocal e sua largura de fenda w ; 2) Forma do diafragma e largura f de seu orifício; 3) Distância d entre o bocal e diafragma; 4) Temperatura T do gás e 5) Pressões p_o , p_M e p_K . As grandezas dependentes, que devem ser medidas, são: a vazão L através do bocal, o corte θ e o fator de separação A , como já foi mencionado anteriormente. Como o número de parâmetros que pode ser variado para a solução do problema de otimização é muito grande, BECKER e colaboradores restringiram o intervalo de variação e praticamente só mediram os fatores de custo específico em função das pressões, mantendo constantes as outras variáveis para um bocal de separação em forma de fenda com 0,1 mm de largura. Os menores valores destes fatores forneceram, então, as condições de operação ótimas que conduzem à cascata ótima. Estes valores obtidos para a separação dos isótopos de argônio são apresentados nos trabalhos anteriormente citados^(7,8).

As experiências, como descritas acima, foram mais tarde realizadas para separar os isótopos de urânio, na forma do gás UF_6 , utilizando o mesmo tipo de bocal de separação, mas com dois conjuntos de parâmetros geométricos w , d e f diferentes. Os resultados obtidos nesta investigação foram apresentados

por BECKER e colaboradores⁽¹³⁾ na 2ª Conferência Internacional das Nações Unidas sobre o uso Pacífico da Energia Atômica, realizada em Genebra em 1958*. Estes resultados mostraram que para a pressão ótima $p_0 = 20$ Torr ($p_M = p_K = 0,1$ Torr), o fator de separação era comparável ao da difusão gasosa e o valor ótimo da energia de compressão isotérmica ideal era cerca de 1,8 vezes maior do que o da difusão gasosa. Além disto, o ponto mais fraco do processo de bocal era o grande volume de sucção específico, resultante das baixas pressões usadas, o que exigiria compressores de dimensões excessivas e, portanto, de custos proibitivos. Estes resultados foram confirmados mais tarde, em 1960, ao se complementarem as experiências de separação isotópica de urânio com medidas adicionais⁽⁶⁾. Nestas condições, apesar de BECKER e colaboradores ainda terem obtido um aumento da separação isotópica mediante a introdução de um gás adicional à mistura isotópica natural do argônio, até 1961, o processo de separação na forma de um bocal em frente a um diafragma ainda não se mostrava competitivo com o da difusão gasosa. A vantagem da ausência de membranas porosas ainda não era suficiente para compensar as duas desvantagens de processo do bocal na forma em que até então era usado, a saber, o grande consumo de energia elétrica e os enormes volumes de sucção dos compressores.

2.3 — O Processo na Forma Bocal e Jato Centrífugo

A fim de aumentar o potencial econômico do processo, BECKER e colaboradores se basearam então num trabalho teórico de ZIGAN⁽⁴⁰⁾, que seria publicado mais tarde, segundo o qual o efeito de separação em processos, que ocorrem em jatos supersônicos, deveria ser aumentado se o ângulo de desvio (ou de deflexão) das linhas aerodinâmicas na região entre o bocal e o diafragma fosse aumentado ou se número de Mach do jato também fosse aumentado. A primeira condição poderia ser obtida, desviando-se as linhas de escoamento do jato ao longo de uma parede curva. Todavia, nas experiências de separação dos isótopos de argônio feitas, em 1961, BECKER e colaboradores⁽²¹⁾ verificaram que a deflexão do jato ao longo de uma parede curva não mostrou nenhuma vantagem econômica, porque o ângulo de deflexão neste caso era pequeno, havendo ainda grande diminuição do número de Mach. A segunda condição, isto é, o aumento da velocidade supersônica do gás de processo, pode ser satisfeita mediante a adição de um gás leve em grande excesso à mistura isotópica natural, graças à qual diminuía a massa molecular média da mistura gasosa e, portanto, aumentava a velocidade do gás de processo. Esta condição, usando-se ainda o arranjo do bocal de separação original, apresentou sucesso no caso da separação dos isótopos de argônio⁽⁹⁾, como já foi mencionado anteriormente. Todavia, no caso da separação isotópica de urânio foi um fracasso, em virtude da diminuição do ângulo de deflexão das linhas de escoamento, causado pela separação entre o gás leve e a mistura isotópica. Tendo em vista estes dois fatos, BECKER e colaboradores⁽¹⁰⁾, combinaram as duas condições favoráveis para a separação isotópica e começaram então a desenvolver, a partir de 1963 o processo do bocal separador na forma do processo do jato centrífugo para enriquecimento isotópico de urânio, abandonando completamente o arranjo anterior da expansão livre do jato supersônico. Desta maneira, obtiveram um considerável decréscimo dos custos de investimento nesta separação isotópica sem um apreciável aumento dos custos de operação.

O princípio do processo do jato centrífugo é ilustrado na Figura 4. O gás de alimentação, constituído de urânio natural na forma de UF_6 gasoso e de um grande excesso de um gás leve auxiliar, é expandido através de um bocal em forma de fenda, do tipo bocal de Laval curvo, no qual entra sob uma dada pressão p_0 . O bocal produz um jato e este é defletido, sob a forma de corrente muito rápida, ao longo de uma parede curva. A seguir, esse jato curvo é separado por meio de uma cunha (faca ou chapa) em suas frações, que são bombeadas separadamente. A deflexão do jato ao longo da parede curva provoca uma separação parcial dos componentes da mistura isotópica. Esta separação ocorre em virtude da ação do campo centrífugo criado durante o escoamento rápido da mistura gasosa ao longo da parede, o qual se manifesta diferentemente sobre os isótopos de massas diferentes, concentrando o isótopo pesado da mistura isotópica ao longo da superfície da parede. Então, em virtude da ação deste efeito, a fração que se desloca

* Numa comunicação prévia de 1956, BECKER e SHÜTTE⁽⁵⁾ apresentaram pela primeira vez experiências preliminares de enriquecimento de urânio pelo processo do bocal de separação, sem contudo investigar as condições de operação ótimas deste processo para a separação dos isótopos de urânio.

junto à parede curva, ao ser separada pela cunha se enriquece no isótopo pesado (fração pesada), enquanto que a outra fração separada pela cunha se enriquece no isótopo leve (fração leve). O gás leve adicionado, que pode ser hélio ou hidrogênio, aumenta a velocidade da mistura isotópica, e, portanto as forças centrífugas correspondentes, aumentam assim, o efeito da separação. Convém notar que o bocal do processo do jato centrífugo não pode ser convergente, porque neste caso ocorrem ondas de choque e a separação da camada limite, que perturbam o percurso do jato ao longo da parede curva. No caso do bocal de Laval curvo, apresentado na Figura 4, isto não ocorre e se obtém um jato curvo livre de perturbação.

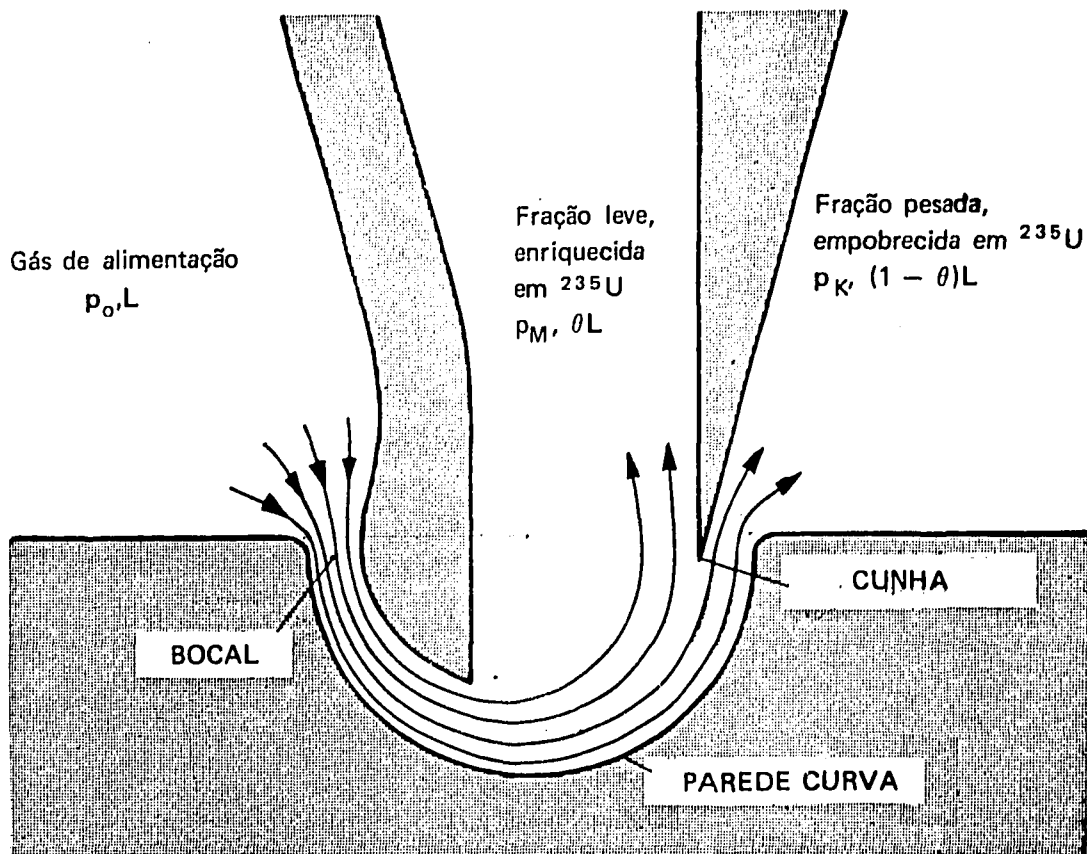


Figura 4 — Bocal de Separação na Forma do Jato Centrífugo (Secção Transversal)

No caso da presença de um gás leve auxiliar, deve-se levar em consideração o corte deste gás (hélio, por exemplo), que é definido por:

$$\theta_{\text{He}} = \frac{\text{vazão do He na fração leve}}{\text{vazão do He no gás de alimentação}} \quad (16)$$

e pode ser determinado experimentalmente. Além disto, naturalmente continua a prevalecer o corte da mistura isotópica θ_{UF_6} , já definido anteriormente. Também, se torna necessário definir o fator de separação entre He e UF_6 , que é obtido a partir dos respectivos cortes segundo:

$$A' = \theta_{\text{He}}(1 - \theta_{\text{UF}_6}) / \theta_{\text{UF}_6}(1 - \theta_{\text{He}}) \quad (17)$$

O efeito de separação ϵ_A continua a ser definido, como antes, por meio das frações molares do isótopo leve nas frações leve e pesada da mistura isotópica UF_6 .

No trabalho publicado em 1963 por BECKER e colaboradores⁽¹⁰⁾, onde são relatadas as primeiras experiências de separação dos isótopos de urânio realizadas com o processo do jato centrífugo, o bocal de Laval curvo utilizado apresentava a largura mais estreita de 0,13 mm, uma largura na saída de 0,25 mm, um comprimento de fenda de 10 mm e um raio de curvatura da superfície de 0,75 mm com um ângulo de deflexão de 180°. A pressão do gás de alimentação era igual a $p_0 = 120$ Torr, sendo a relação de compressão $p_0/p_M = 10$. Usando como gás de alimentação a mistura de 5% molar de UF_6 e 95% molar de He, o efeito elementar de separação era $\epsilon_A = 0,012$ e foram obtidos fatores de custo específico ótimos mais favoráveis do que os correspondentes ao jato em expansão livre do sistema bocal/diafragma.

Nas experiências subsequentes da separação isotópica do urânio relatadas no artigo de revisão de BECKER e colaboradores⁽¹¹⁾, é apresentado um estudo mais detalhado do processo do jato, no qual foram variados os seguintes parâmetros: 1) Tipo do gás auxiliar; 2) Fração molar do UF_6 na mistura de alimentação; 3) Pressão de entrada p_0 ; 4) Tamanho do sistema de separação; 5) Relação de expansão p_0/p_M e 6) Distância entre a superfície curva e a cunha, com p_M e p_K mantidos iguais. Estes parâmetros foram otimizados, a fim de obter-se os mais favoráveis fatores de custo específico. Nestas experiências foram usados dois tipos de elementos ou sistemas de jato centrífugo (bocal de Laval curvo), que apresentavam essencialmente a mesma forma, mas diferiam de um fator de dois nas dimensões características do bocal e superfície defletora, como é mostrado abaixo:

Elemento	Largura do bocal na garganta* (mm)	Largura do bocal na boca* (mm)	Raio de curvatura da superfície (mm)
X	0,40	0,60	1,5
XIII	0,20	0,30	0,75

O comprimento da fenda do bocal (perpendicular ao plano do papel) era igual a 10 mm para ambos os elementos da separação.

As experiências de otimização realizadas com a aparelhagem apresentada na Figura 5. A mistura de UF_6 e do gás auxiliar proveniente do reservatório de gás escoava através da válvula reguladora V_1 até o bocal do sistema de separação. As válvulas V_2 permitem ajustar as pressões p_M e p_K das respectivas frações leve e pesada aos valores desejados. A medida destas pressões e de p_0 é realizada por meio dos 3 manômetros, do tipo diafragma, indicados na figura. O hexafluoreto de urânio das frações gasosas leve e pesada é

* Garganta do bocal é sua parte mais estreita (menor largura) e boca do bocal é sua parte mais larga (na saída).

condensado nos "traps" F_1 , resfriados com nitrogênio líquido. Estes "traps" podem ser isolados das bombas de vácuo rotativas R por meio das válvulas V_3 . O corte do gás auxiliar (por exemplo, He) θ_{He} , definido pela equação (16) foi determinado nestas experiências por meio de medidores de vazão instalados na saída das bombas de vácuo. A determinação do corte UF_6 , θ_{UF_6} , definido pela equação (4) foi realizada através da pesagem das duas frações de UF_6 coletadas nos "traps" F_1 e, a seguir, recondensadas nas pipetas de amostragem F_2 . O fator de separação entre He e UF_6 , A' , definido pela equação (17) foi calculado diretamente a partir desta equação e dos cortes θ_{He} e θ_{UF_6} , medidos como acabamos de descrever. Finalmente, o fator de separação A , definido pela equação (2), e o correspondente efeito elementar de separação $\epsilon_A = A - 1$ foram obtidos a partir da definição de A e das medidas, por espectrometria de massas, das frações molares n_M e n_K do isótopo leve nas respectivas frações leve e pesada.

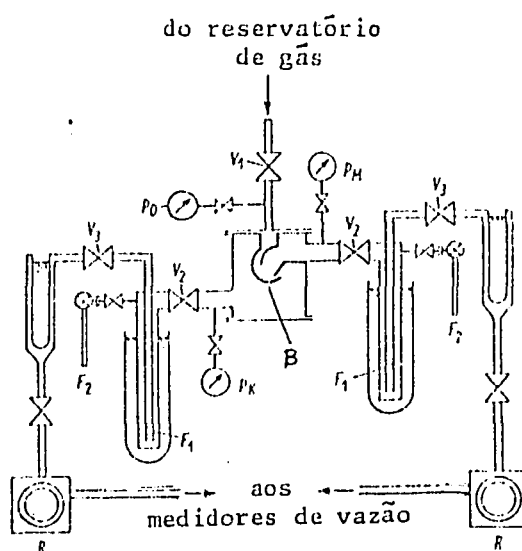


Figura 5 — Esquema da Aparelhagem para a Separação dos Isótopos de Urânio pelo Jato Centrífugo

Os resultados experimentais mostraram, inicialmente, que dos gases estudados, nitrogênio, neônio e hélio, o rendimento mais econômico foi obtido com o hélio. Por este motivo, somente este gás foi usado nas experiências subsequentes. Quanto à fração molar de UF_6 na mistura de alimentação de UF_6 e He, o menor trabalho de compressão foi obtido com a mistura de 5% molar de UF_6 e 95% molar de He, usando-se então esta mistura em todas as outras experiências. O efeito da pressão de entrada p_0 foi investigado com relação a expansão $p_0/p_M = 4$, mantida constante, e nesta investigação se verificou que o elemento de separação menor XIII era mais eficiente. Por isto, na otimização dos outros parâmetros, utilizou-se apenas este elemento de separação, operado na pressão de entrada ótima de 80 Torr. Desta maneira, a investigação mostrou que os fatores de custo mínimos foram obtidos com os valores ótimos da relação de expansão $p_0/p_M = 4$ e do corte $\theta_{UF_6} = 0,33 = 1/3$, este último valor tendo sido obtido no estudo da variação da distância entre a cunha e a parede curva. Dentro destas condições ótimas, o fator de separação elementar encontrado foi igual a $A = 1,011$, portanto, muito menor do que o da difusão gasosa.

A comparação entre as condições de operação ótimas do elemento XIII e as do elemento de separação usado no trabalho⁽¹⁰⁾ de 1963, mostra que os valores ótimos dos custos específicos são menores para o elemento de separação XIII, mais aperfeiçoado, tendo-se verificado uma redução de um fator aproximadamente igual a 2 no trabalho de compressão específico e no volume de sucção específico. Esta redução provém da diminuição da relação de compressão de 10 para 4 e do aumento das pressões de sucção $p_M = p_K$ de 12 para 20 Torr, condições que foram possíveis de serem realizadas no elemento XIII.

Comparando-se, agora, os fatores de custo específico ótimo do processo do bocal na forma do jato centrífugo obtidos na operação do elemento mais aperfeiçoado XIII com os fatores correspondentes do processo da difusão gasosa, verifica-se, que o consumo de energia elétrica do processo do jato é ainda 2,1 vezes mais elevado do que o do processo da difusão gasosa e que o volume de sucção específico é cerca de 8,8 vezes maior do que o estimado para o processo da difusão gasosa. Por outro lado, em virtude de seu maior fator de separação, para o corte ótimo de 1/3, o processo de jato centrífugo requer 2,7 vezes menos estágios de separação do que o processo da difusão gasosa. Este fato, apesar do elevado volume de sucção específico do processo do jato, conduz a um custo de investimento que é aproximadamente da mesma ordem de grandeza para ambos os processos. Além disto, ao lado da vantagem principal de dispensar barreiras porosas de custo mais elevado e fabricação mais difícil do que a dos bocais, o método do jato separador, em virtude do maior efeito de separação elementar, apresenta ainda um tempo de equilíbrio que é, pelo menos, uma ordem de grandeza menor do que o processo da difusão gasosa.

3 — DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO EM ESCALA DE LABORATÓRIO E PILOTO

De 1963 a 1967, BECKER e colaboradores desenvolveram no Instituto de Tecnologia Nuclear da Universidade e Centro de Pesquisas Nucleares de Karlsruhe (República Federal Alemã) o processo do jato centrífugo, inicialmente, em escala de laboratório e, a seguir, em escala de usina piloto. Este desenvolvimento foi realizado dentro das seguintes diretrizes: 1) Estudo sistemático do elemento de separação no sentido de otimizar os bocais e as condições de operação, assim como, de estabelecer a configuração geométrica básica do sistema para a produção industrial; 2) Instalação e operação de um circuito de ensaio fechado, que constituiu o protótipo da unidade básica de uma cascata piloto de 10 estágios e 3) Projeto, construção e operação desta cascata piloto.

3.1 — Elementos de Separação

O estudo dos elementos de separação, realizado em laboratório, mostrou que a pressão de entrada ótima do gás de alimentação é inversamente proporcional às dimensões características ou críticas dos elementos com bocais em forma de fendas, como por exemplo, a largura mínima (garganta) do bocal. Considerando que por razões econômicas é desejável operar com as mais elevadas pressões de entrada possíveis, as dimensões características dos elementos ou sistemas de bocais de separação devem ser os menores possíveis. Por este motivo, no período acima mencionado, para fins de otimização, foram progressivamente construídos e ensaiados sistemas de bocais de separação com dimensões características cada vez menores. A Figura 6 apresenta uma fotografia da secção transversal de um destes elementos de separação típicos, cuja ranhura de deflexão possui um diâmetro de apenas 0,2 mm e uma largura mínima de bocal de 0,03 mm. As condições de operação ótimas deste elemento, trabalhando com a mistura de alimentação de 5% molares de UF_6 e 95% molares de He e com o corte ótimo de UF_6 $\theta_{UF_6} = 1/3$ são: pressão de entrada do gás de alimentação $p_0 = 600$ Torr; relação de expansão $p_0/p_M = 4$ e vazão molar de UF_6 por metro de comprimento de fenda = 27 mol/h, no caso de $p_M = p_K = 150$ Torr. Nestas condições de operação, obteve-se um efeito de separação elementar $\epsilon_A = 0,0118$. Além disto, a secção da figura corresponde à configuração básica que foi adotada mais tarde na produção em massa dos elementos de separação^(19,20).

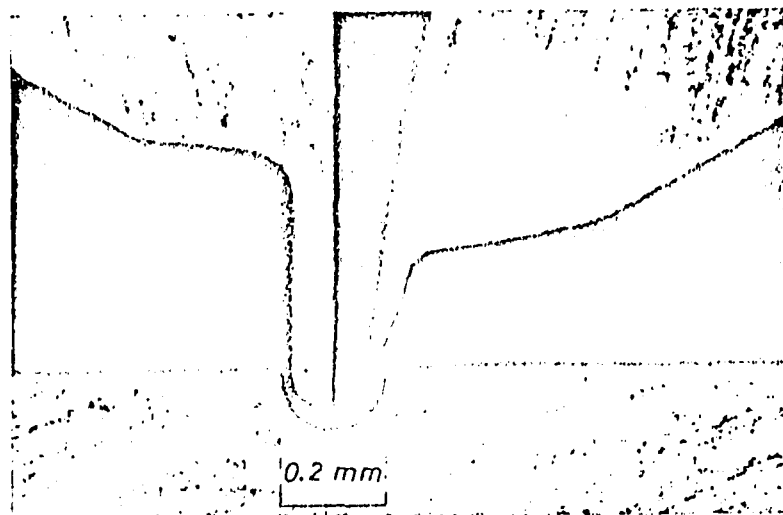


Figura 6 — Fotografia de um Sistema de Bocal de Separação Experimental

3.2 — Circuito de Ensaio Fechado

O circuito de ensaio fechado, construído como protótipo de uma unidade da cascata de separação de 10 estágios⁽¹¹⁾, possui apenas um elemento ou sistema de bocal de separação, cuja secção transversal é mostrada na Figura 7. O bocal de Laval curvo deste elemento é formado de um cilindro sólido, de 1,8 mm de diâmetro, montado excêntrica em relação à superfície defletora curva, de 1,5 mm de raio de curvatura, e apresenta um comprimento de fenda de 100mm na direção perpendicular ao plano do papel. Este modelo de bocal de Laval curvo, cujas dimensões críticas são 15 vezes maiores do que as do sistema anteriormente descrito, possui a vantagem de poder ser fabricado com mais facilidade quando se trata da produção de elementos de separação mais longos. A mistura de alimentação, formada de 5% molares de UF₆ e 95% molares de He, entra no bocal sob a pressão $p_0 = 48$ Torr e é expandida até a pressão $p_M = p_K = 14$ Torr, de modo que a relação de expansão é $p_0/p_M = 3,5$, um pouco menor do que o valor ótimo 4. A vazão de alimentação na pressão de 48 Torr era igual a 60 mol/h. Nas condições de operação dadas, o elemento de separação do circuito de ensaio fornece um efeito de separação elementar $\epsilon_A = 0,008$ ($A = 1,008$) na separação dos isótopos de urânio para um corte de UF₆ igual a 0,5. Este corte, que difere do valor ótimo igual a 1/3, foi escolhido por permitir uma ligação simples entre os estágios da cascata piloto. Os detalhes da montagem das partes individuais do elemento de separação são apresentados no artigo de revisão de BECKER e colaboradores⁽¹¹⁾, o qual contém também a descrição do circuito de ensaio fechado.

O compressor usado no circuito de ensaio era do tipo Roots. Apesar de sua baixa eficiência, este compressor foi escolhido, por que é o mais apropriado para manejar vazões relativamente pequenas, as quais eram desejadas na cascata piloto a fim de não onerar o custo da instalação. Este compressor pôde ser construído para fornecer vazões gasosas pequenas, de cerca de 100 m³/h, sem grandes modificações adicionais. Além disto, o compressor considerado ainda apresenta a vantagem de possuir características operacionais semelhantes às dos compressores axiais ou centrífugos (turbo-compressores), que devem ser utilizados numa usina industrial de separação de isótopos de urânio pelo processo do jato centrífugo.

Resultou da escolha do compressor Roots a restrição na pressão de entrada p_0 e a limitação na relação de expansão, anteriormente mencionadas. A descrição deste compressor, fabricado pela Firma E. Leybolds Nachfolger de Colonia (República Federal Alemã) para sua utilização no circuito de ensaio, é feita com detalhes no trabalho de revisão de BECKER e colaboradores⁽¹¹⁾.

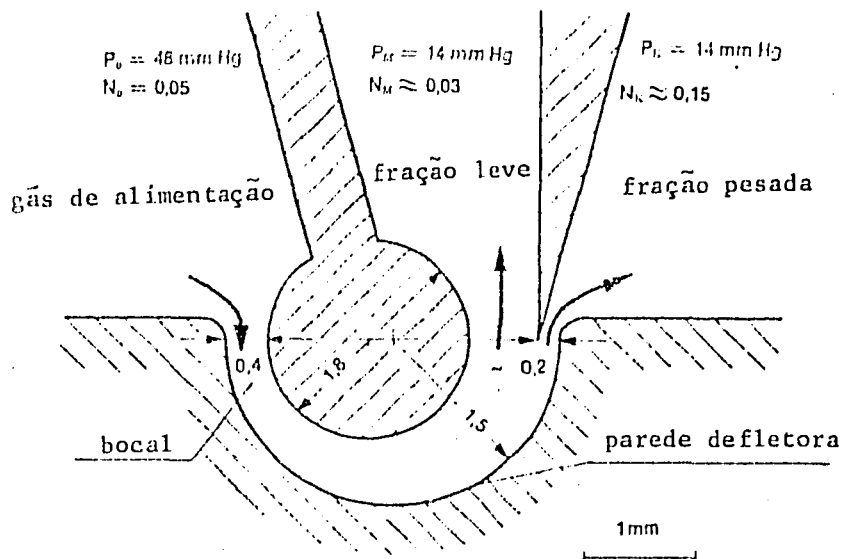


Figura 7 — Sistema de Bocal de Separação Usado no Circuito de Ensaio e na Cascata Piloto

O circuito de ensaio fechado, representado esquematicamente na Figura 8, consta essencialmente da câmara de separação i , que contém o elemento de separação acima descrito, do compressor Roots h e do reservatório l , que fornece o gás de alimentação. As frações leve e pesada são removidas da câmara de separação através das respectivas válvulas c e b pelo compressor Roots. O gás comprimido por este compressor volta à câmara de separação através da válvula e . Os reservatórios de amostragem k , ligados em paralelo com as tubulações das frações leve e pesada, recolhem amostras destas frações, as quais depois de isoladas do sistema são bombeadas dos reservatórios aos respectivos "traps" (não apresentados na Figura 8), para condensar o UF_6 . O UF_6 após a pesagem é submetido à análise isotópica feita por meio de um espectrômetro de massas. Deste modo, se pode determinar o corte θ_{UF_6} e o fator de enriquecimento A . A concentração de UF_6 na mistura UF_6 -He é obtida a partir da massa total de UF_6 , da pressão e do volume dos reservatórios de amostragem.

As experiências realizadas com o circuito de ensaios fechado tiveram por finalidade ajustar o corte de UF_6 , θ_{UF_6} , ao valor 0,5 através da medida de dependência entre o corte e a relação de expansão p_0/p_M , mantendo a cunha de separação a uma distância de 0,20 mm da parede curva do elemento de separação. Além disto, foi medida a variação do efeito de separação ϵ_A em função de p_0/p_M . Esta última medida, feita durante 1100 horas, serviu para ensaiar a vida de toda a instalação e mostrou que durante este período não se verificou uma alteração nas propriedades do elemento de separação. Finalmente, as experiências de separação com o circuito fechado ainda permitiram investigar a variação dos fatores de custo específico com a relação p_0/p_M e comparar os valores obtidos com os determinados para elementos de separação anteriormente mencionados.

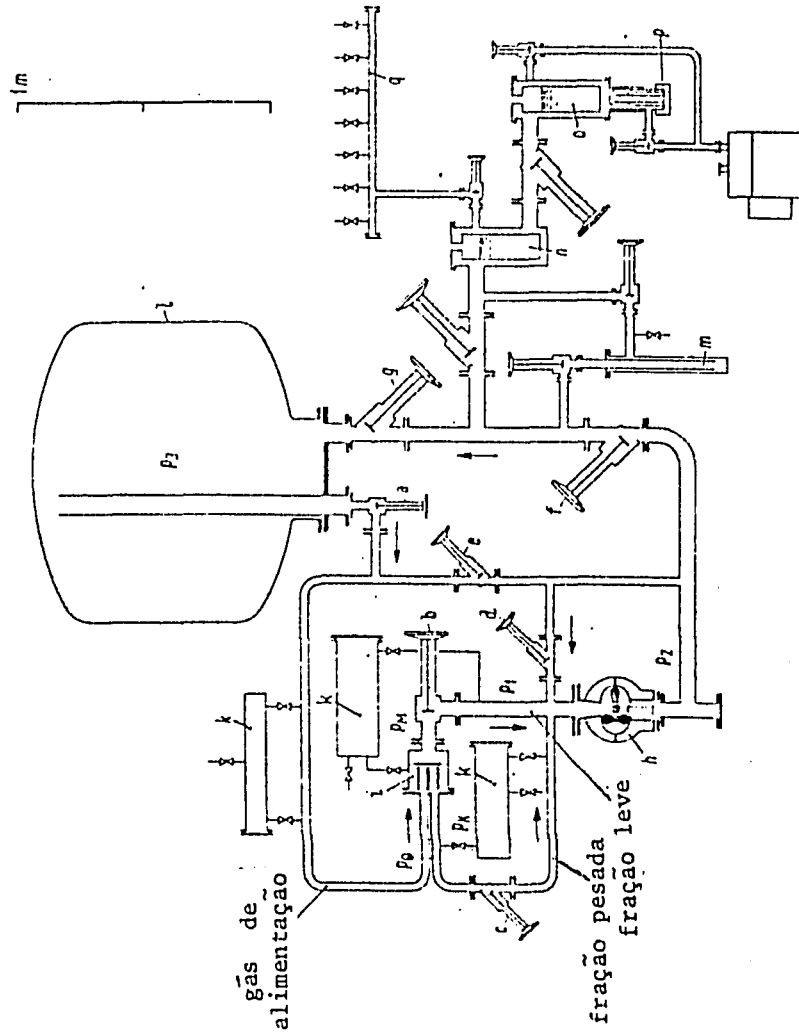


Figura 8 — Esquema do Circuito de Ensaio Fechado

3.3 – Cascata de Separação Piloto

A cascata piloto de 10 estágios foi projetada e construída a fim de conhecer-se com exatidão a estabilidade dinâmica do gás e o controle do comportamento de uma cascata baseada no processo do jato centrífugo^(22,23). Este conhecimento, que não pode ser obtido sem a operação em escala piloto devido à insuficiência do tratamento teórico do problema, é indispensável para a avaliação das perspectivas econômicas do processo numa instalação de produção em larga escala. Cada estágio compreende um elemento de separação e um compressor. Cada elemento de separação era exatamente idêntico ao sistema bocal de separação usado no circuito de ensaio fechado e apresentado na Figura 7, sendo operado nas mesmas condições das empregadas na operação deste circuito, isto é, com corte de UF_6 igual a 0,5 e alimentação com a mistura gasosa formada de 5% molares de UF_6 e 95% molares de He. Os compressores, destinados à recompressão do gás expandido nos bocais de separação, eram compressores do tipo Roots exatamente iguais ao do circuito de ensaio fechado.

Tendo em vista o corte $\theta_{UF_6} = 0,5$ prefixado, a ligação dos estágios foi feita de tal modo que a fração leve de um elemento de separação atravessa o compressor deste estágio e é introduzido no estágio seguinte, enquanto que o mesmo compressor recebe simultaneamente a fração pesada do segundo estágio seguinte. Então, desde que o valor do corte igual a 0,5 seja rigorosamente mantido, ambas as frações leve e pesada que alimentam um dado estágio da cascata apresentam a mesma composição isotópica em urânio. O fluxograma correspondente a este esquema de ligação é apresentado na Figura 9, no caso da operação da cascata sem retirada do produto^(22,23). Observa-se desta figura que em virtude da separação entre o He e UF_6 , ocorre um escoamento resultante de He para o topo da cascata, enquanto que as correntes de UF_6 com a manutenção exata do corte $\theta_{UF_6} = 0,5$ circulam simplesmente, com a composição isotópica correta, entre os estágios da cascata. O transporte resultante de He para o topo exige que a correspondente vazão parcial de He seja separada da fração leve do topo (estágio 10) e reciclada à parte inferior da cascata, a fim de manter-se a mesma composição UF_6 -He na alimentação de todos os estágios. Por este motivo, foi instalada no topo da cascata a unidade ou planta de separação de UF_6 , que recebe a mistura a ser separada através do compressor 11. Esta unidade consiste de dois "traps" de nitrogênio líquido, que condensam alternadamente o UF_6 . O hélio livre de UF_6 escoa, então, para a parte inferior da cascata, enquanto que a fração separada de UF_6 é reciclada ao topo da cascata ou então substituída neste estágio por nova quantidade de UF_6 .

O fator de enriquecimento total da cascata é definida por:

$$A_T = \frac{n_{M,10}(1 - n_{K,1})}{n_{K,1}(1 - n_{M,10})} \quad (18)$$

onde $n_{M,10}$ e $n_{K,1}$ são, respectivamente, as frações molares do isótopo leve ^{235}U na fração leve do topo da cascata e na fração pesada da base (ou pé) da cascata. Pode-se mostrar que se s for o número de estágios da cascata, devemos ter:

$$A_T = (\epsilon_A + 1)^s \quad (19)$$

que, no presente caso de $s = 10$ e $\epsilon_A = 8 \times 10^{-3}$, fornece o valor teórico de $A_T \cong 1,083$.

Antes da operação, toda a usina piloto foi posta em vácuo através de uma linha de vácuo central ligada a estação central de alto-vácuo. Como na montagem dos elementos de separação o ajuste mecânico de distância entre a cunha e a parede defletora permite apenas a obtenção do valor desejado do corte de UF_6 dentro de uma certa margem de erro, durante a operação da cascata piloto, o ajuste fino do corte de UF_6 ao seu valor exato $\theta_{UF_6} = 0,5$ foi efetuado para cada estágio, variando-se a pressão p_K da fração pesada por meio de uma válvula de controle e usando-se a curva de calibração de θ_{UF_6} em função de p_K obtida para o respectivo elemento de separação.

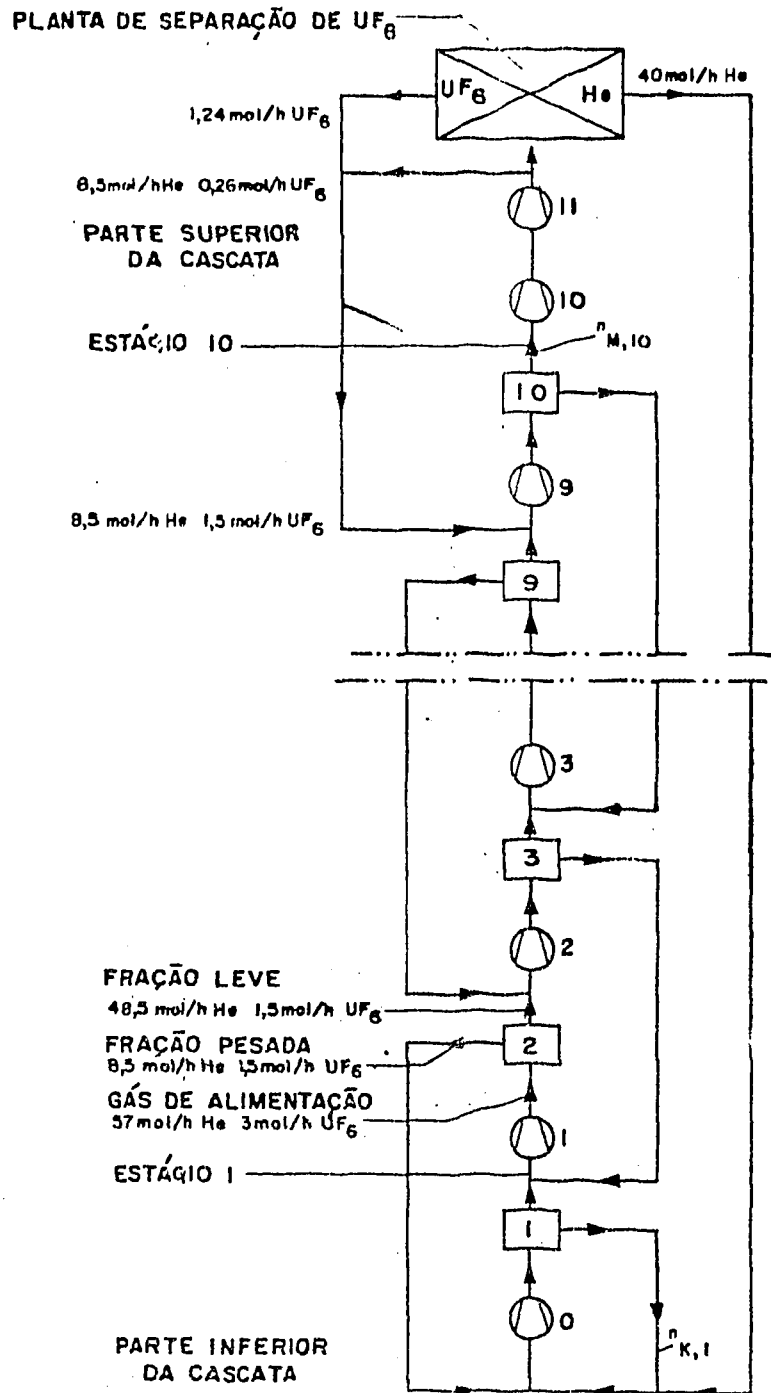


Figura 9 – Esquema de Ligação na Cascata Piloto para a Operação sem Retirada de Produto

A usina piloto, construída pela firma W. C. Heraeus, de Hanau (República Federal Alemã), segundo o projeto elaborado no Instituto de Tecnologia Nuclear de Karlsruhe, foi posta em funcionamento com a mistura He-UF₆ em novembro de 1967^(22,23). A operação desta cascata mostrou-se ser inerentemente estável desde o princípio do funcionamento e o problema de controle, como mencionamos acima, foi facilmente resolvido através da operação de uma válvula por estágio. Com este controle, a cascata forneceu um fator de separação total $A_T = 1,082$, que concorda dentro do erro experimental com o valor A_T calculado, a partir da equação (10). Além disto, experiências adicionais mostraram que a operação da usina mantém-se estável mesmo com cortes de UF₆, θ_{UF_6} , irregularmente ajustados. Em vista de todos estes resultados, BECKER e colaboradores concluíram que não devem surgir sérios problemas de controle na operação em escala industrial do processo em questão.

A usina piloto, cujos detalhes descritivos e operacionais são apresentados nos dois trabalhos de BECKER e colaboradores^(22,23), já citados, foi operada até o ano de 1973. Até esta data, foi ainda investigada por SHUTTE e colaboradores⁽³⁸⁾ a influência de intervenções estacionárias e perturbações na operação desta usina, tanto do ponto de vista experimental como com auxílio do cálculo numérico. Mais tarde, FRITZ e colaboradores⁽³³⁾ verificaram este método de cálculo para o comportamento não estacionário da usina piloto, especialmente no caso da passagem das condições de operação estacionárias para as não estacionárias. Estes autores desenvolveram, então, um programa de computação digital para a simulação da operação em escala industrial de usinas baseadas no método do jato centrífugo, o qual permite prever as características operacionais destas usinas com elevado grau de confiança.

4 – PROJETO DE UMA USINA DE DEMONSTRAÇÃO

Tendo em vista a operação satisfatória da cascata piloto de 10 estágios, BECKER e colaboradores^(19,20), em cooperação com a indústria, apresentaram ainda em 1968 o projeto de uma usina de demonstração, baseada nos dados e nas condições de operação do sistema bocal de separação de dimensões pequenas, anteriormente descrito e apresentado na Figura 6. A finalidade deste projeto era apenas obter uma avaliação mais exata dos aspectos econômicos do processo do jato centrífugo, não existindo naquela época nenhum plano definitivo para construir a usina projetada.

O projeto foi elaborado fixando-se as concentrações do produto e rejeito da usina de demonstração em 3,0% e 0,25% de ²³⁵U, respectivamente, e usando-se como alimentação, a mistura 5% molar de UF₆ e 95% molar de He. O trabalho de separação previsto era de 600.000 kgTS/a, que corresponde a cerca de 1/10 da capacidade de separação de uma das usinas de difusão gasosa norte-americanas. Com este trabalho de separação, a usina de demonstração poderia fornecer 153×10^3 kg/ano de urânio enriquecido a 3% mediante a alimentação de 920×10^3 kg/ano de urânio natural.

A usina deveria comportar 335 estágios grandes e 235 estágios pequenos, dos quais 135 estariam situados no topo da cascata e 100, na base da mesma. Os estágios grandes seriam formados de 100 elementos de separação tubulares, cada um comportando 10 dos bocais descritos em 3.1, e os estágios pequenos apresentariam 1/3 da capacidade dos grandes^(19,20). A versão atual destes elementos de separação tubulares e dos estágios será apresentada na secção 5.1. O preço de cada estágio grande, no caso de produção em massa, seria de US\$95.000, admitindo-se a metade desta quantia para cada estágio menor. Baseado nestes preços e nos custos de outras partes componentes da instalação, estimou-se que, para o trabalho de separação acima mencionado, o investimento específico da usina de demonstração seria de US\$123 por unidade de trabalho de separação anual. Este investimento específico é cerca de três vezes menor do que o de uma usina de difusão gasosa de mesma capacidade de separação. Por outro lado, a partir do consumo de energia e do trabalho de separação considerado, o consumo de energia específico da usina de demonstração projetada deveria ser igual a 6850 kWh/UTS, que é 2,2 vezes mais elevado do que o valor correspondente para as usinas de difusão gasosa norte-americanas. Para que o consumo de energia fosse o mesmo, seria necessário aumentar o efeito elementar de separação do processo do bocal de 1,5 vezes. Como será visto mais tarde, este fato parece estar dentro das possibilidades físicas do processo.

Em 1971, BECKER e colaboradores⁽¹⁶⁾ em cooperação com a firma STEAG AG, de Essen (República Federal Alemã), elaboraram um projeto semelhante para uma usina de demonstração operando, agora, com a mistura de alimentação composta de 5% molares de UF_6 e 95% molares de hidrogênio*. A Figura 10 apresenta o diagrama da usina de demonstração projetada. De acordo com esta figura, a parte central das seções de enriquecimento e de rejeito deverá ser formada de 270 estágios de separação grandes do tipo anteriormente mencionado. O topo e a base da cascata deverão comportar, ao todo, 182 estágios de dimensões menores, também já citados. Estão também previstas seções especiais de separação, não indicadas na figura, para separar o hidrogênio de UF_6 no topo e nas partes superiores da seção de enriquecimento da cascata. Para as concentrações do produto e rejeito de 3,0% e 0,26% em ^{235}U , a usina deverá produzir 160.000 kg de urânio enriquecido por ano. Esta produção corresponde a um trabalho de separação de 610.000 kgTS/a e seria suficiente para alimentar continuamente de reatores de água leve com a potência total de cerca de 6000 MW(e). Estes dados foram obtidos, admitindo-se que na usina sejam usados bocais de separação semelhantes aos do projeto anterior, operando nas mesmas condições (pressão de alimentação $p_0 = 600$ Torr e corte de UF_6 $\theta_{UF_6} = 1/3$), porém, apresentando um efeito elementar de separação mais elevado, a saber, $\epsilon_A = 0,015$. Com este efeito elementar de separação e condições de operação mais favoráveis para os compressores, calculou-se que o consumo de energia específico seria ainda 1,6 mais elevado do que o correspondente ao processo de difusão gasosa, continuando os custos de investimento específicos serem consideravelmente menores do que os das usinas de difusão de mesma capacidade. Esta redução de consumo de energia específica e a possibilidade de ainda maiores aumentos no efeito de separação, assim como as outras vantagens já citadas, permitiram prever naquela época que o processo do jato centrífugo deveria tornar-se num futuro próximo uma real alternativa em relação ao processo da difusão gasosa.

5 – DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO DO PROCESSO

A partir de 1968, com a elaboração do projeto de usina de demonstração, foi iniciado por BECKER e colaboradores, junto com a indústria, o desenvolvimento tecnológico do processo, tendo-se em vista a aplicação do mesmo na instalação de usinas industriais de enriquecimento isotópico de urânio. Neste sentido, desde março de 1970, as firmas alemãs "Gesellschaft für Kernforschung mbH", de Karlsruhe, e STEAG AG, de Essen, estão, em cooperação, trabalhando ativamente na implantação comercial do processo^(16,18). O desenvolvimento tecnológico que desde então vem sendo realizado se refere à construção de elementos e de estágios de separação, os quais deverão ser produzidos em larga escala para poderem ser usados em usinas de enriquecimento. Os detalhes construtivos destes componentes serão apresentados a seguir.

5.1 – Elementos de Separação Comerciais

Os elementos de separação, para produção em massa, se compõe dos bocais de Laval curvos, de dimensões pequenas, que deverão ser operados com as pressões de alimentação compreendidas entre 400 e 600 Torr, tendo em vista a proporcionalidade inversa entre a pressão ótima de alimentação e as dimensões características dos bocais.

Um dos métodos de produzir, estes elementos é arranjar os bocais de separação na forma de elementos de separação tubulares^(16,18,22), como é mostrado na Figura 11. Neste caso, 10 sistemas bocais de separação, em forma de fenda, se encontram ordenados na superfície de um tubo de alumínio com um diâmetro de cerca de 10 cm e um comprimento de 2 m. O interior do tubo está dividido em 10 compartimentos ou canais por meio de paredes divisórias. O gás de alimentação F é introduzido em 5 destes compartimentos e a fração pesada H é retirada de cada um dos 5 compartimentos restantes, adjacentes aos primeiros. A fração leve escapa radialmente para fora num tanque contendo os elementos de separação tubulares.

* Como gás auxiliar, o hidrogênio, fornece, em comparação com o hélio, fatores de custo específico mais favoráveis em condições de operação ótimas⁽³⁾.

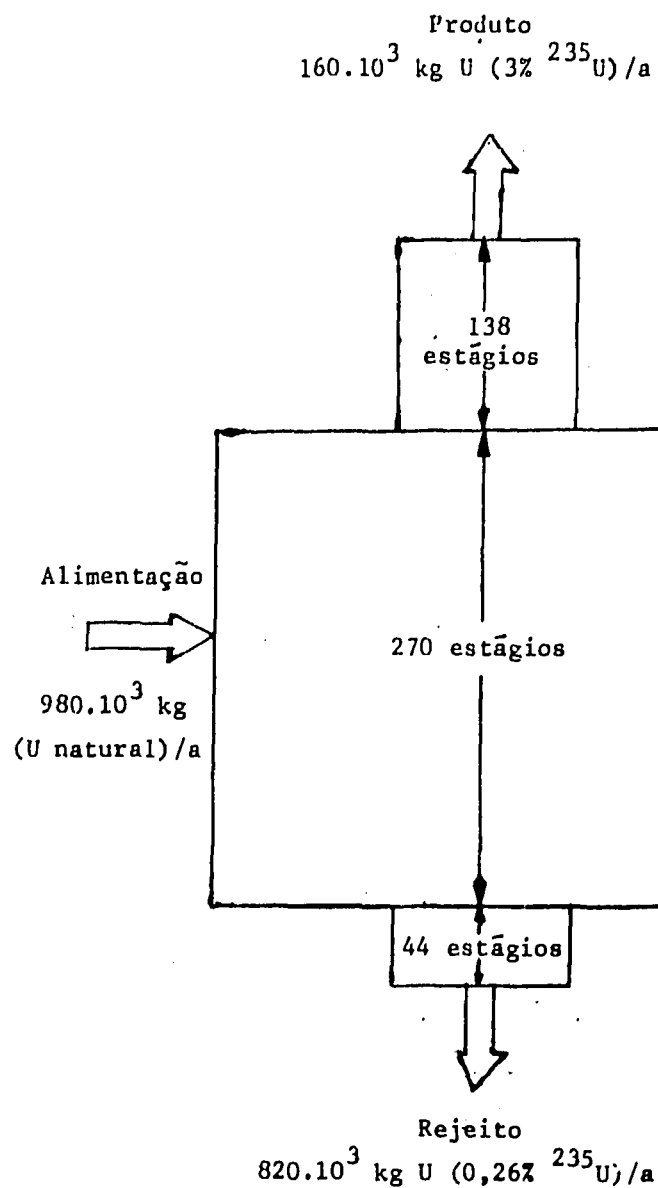


Figura 10 — Diagrama de uma Usina de Demonstração Projetada para Operar com o Processo do Jato Centrífugo

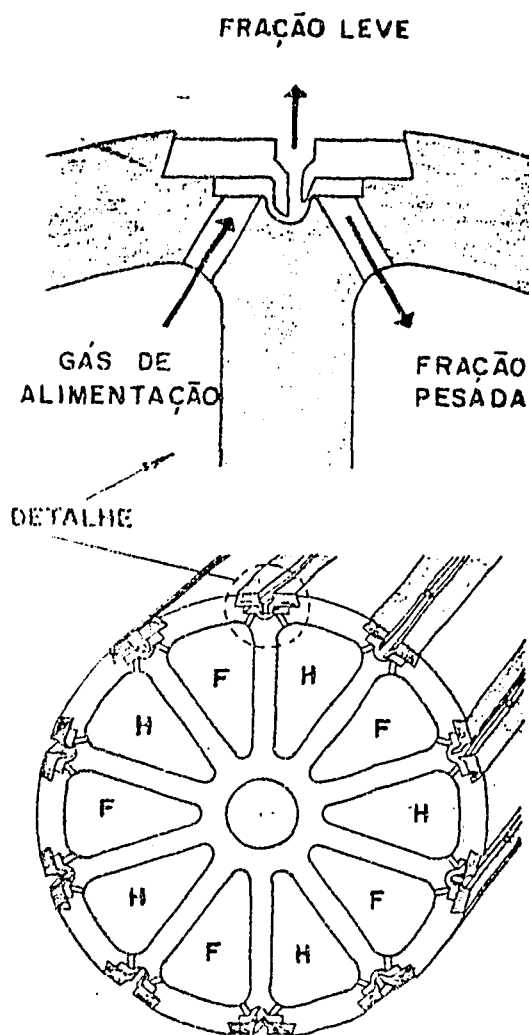


Figura 11 — Elemento de Separação Tubular Comercial

O sistema bocal de separação é constituído de uma ranhura de deflexão, de secção semi-circular, usinada ao longo do tubo, e de tiras de alumínio, especialmente projetadas. O raio de curvatura da ranhura de deflexão é de aproximadamente 0,1 mm. As tiras de alumínio são afixadas em ranhuras de parede inclinada, presentes no tubo, por meio de esferas introduzidas sob pressão entre as tiras. Este método especial de fabricação de elementos de separação comerciais, que é muito adequado para a produção em massa e fornece dentro do erro experimental efeitos de separação iguais aos dos elementos fabricados em laboratório, foi desenvolvido pela firma Messerschmitt-Bolkow-Blohm GmbH, de Munique.

O preço de cada um destes elementos tubulares fabricados comercialmente em massa é da ordem de US\$ 16/UTS e um ensaio de operação contínua efetuado com um destes elementos mostrou que, dentro do erro experimental, seu efeito elementar de separação se manteve constante durante um período de 22.000 horas⁽¹⁸⁾. O trabalho de separação destes elementos tubulares é aproximadamente igual a 12 UTS/a, quando operados com uma mistura He/UF_6 e uma relação de expansão de 4. Usando-se uma mistura de alimentação de H_2/UF_6 , obtém-se um trabalho de separação de 15 UTS/a⁽¹⁸⁾.

Outro método para a fabricação em massa de elementos de separação, desenvolvido pela firma Siemens AG, Munique, se baseia na foto-erosão de uma folha metálica, técnica que é utilizada na micro-eletrônica^(16,18,28). A Figura 12 mostra uma folha metálica, na qual as estruturas dos bocais de separação e os condutores de gás foram impressos por foto-erosão. Estas folhas de metal, em número aproximado de 100, são empilhadas, cobertas com uma placa e mantidas unidas. Deste modo, são introduzidas num tubo, que funciona então como a unidade básica do elemento de separação comercial. Este método de fabricação permite a obtenção de elementos de separação muito compactos com uma elevada capacidade de separação por unidade de volume. Assim, um tubo deste tipo, de 2 m de comprimento e 15 cm de diâmetro, pode conter um número de bocais suficiente para formar um elemento de separação com a capacidade separativa de cerca de 50 UTS/a^(18,28).

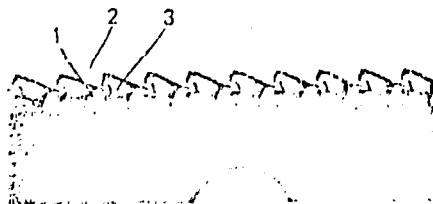


Figura 12 — Folha Metálica dos Perfis de Estruturas de Bocais de Separação Obtidos por Foto-Erosão.
1) Gás de Alimentação ; 2) Fração Leve ; 3) Fração Pesada.

Em virtude das pequenas dimensões críticas dos sistemas bocais de separação (iguais ou menores do que décimo de mm), na fabricação em massa dos elementos por qualquer um dos processos descritos, os custos de fabricação vão depender, em grande parte, da exatidão especificada para estas dimensões críticas. Por este motivo, a fim de conhecer os efeitos de imprecisão nestas dimensões sobre as propriedades de separação dos bocais e, desta maneira, estabelecer tolerâncias racionais para a fabricação em massa dos elementos de separação, BIER e WEIS⁽²⁵⁾ realizaram, em 1972, uma investigação sistemática, tanto experimental como teórica, da influência dos parâmetros geométricos e de suas flutuações no desempenho dos sistemas bocais de separação. Resultou deste estudo que as tolerâncias nas dimensões críticas dos bocais, isto é, nos parâmetros geométricos investigados, devem ser da ordem de micrometros nos elementos de separação manufaturados industrialmente. Graças ao contínuo aperfeiçoamento dos métodos de fabricação acima descritos, que foi realizado pelas firmas manufatureiras, tornou-se possível atingir estas tolerâncias para elementos de separação comerciais dentro de limites de custos de fabricação economicamente justificáveis. Deste modo, foram eliminadas em grande parte, as variações anteriormente observadas nas características de separação dos elementos.

5.2 — Estágios de Separação

No desenvolvimento tecnológico do processo, um grande número de elementos de separação tubulares, do tipo conccionado por meios mecânicos (Figura 11), tem sido instalado numa só unidade para formar um estágio de separação^(14,16,18). A Figura 13 mostra a secção transversal de um protótipo destes estágios de escala industrial, contendo cerca de 80 elementos de separação tubulares, que foi desenvolvido em Karlsruhe em colaboração com a indústria. O estágio compreende um tanque contendo os elementos de separação tubulares, o sistema de distribuição do gás, um refrigerador de gases de dois estágios, um compressor centrífugo de duplo estágio e um motor rigidamente acoplado ao compressor. A altura deste estágio, que constitui uma unidade integrada, é de cerca de 7 m e seu diâmetro de cerca de 2 m. A capacidade de separação de estágio é de carga 2000 kgTS/a, que corresponde aproximadamente a 1/3 da capacidade de separação dos maiores estágios das usinas de difusão gasosa norte-americanas.

O compressor com capacidade de 10^5 m³/h e relação de compressão igual a 4 foi desenvolvido e construído pela firma francesa Hispano-Suíza e o motor de 300 Hz produzindo 150 rps foi fornecido pela Siemens AG⁽¹⁶⁾.

Em virtude da grande vazão de gás que pode atravessá-lo, o estágio foi ensaiado em operação de circuito fechado. Neste caso, a fração pesada foi reciclada ao circuito fechado superior e misturada com a fração leve proveniente dos elementos de separação. Maiores detalhes sobre esta operação e a operação em cascata, assim como, em relação a dados construtivos podem ser encontrados nos trabalhos de BECKER e colaboradores^(16,18).

O estágio sem os elementos de separação tubulares (isto é, apenas com o compressor e o refrigerador) foi posto em operação com a mistura He/UF₆ em julho de 1970, tendo funcionado sem maiores problemas⁽¹⁶⁾. Em setembro de 1972, foram inseridos no estágio os elementos de separação e foi iniciada a operação contínua do estágio completo com a mistura gasosa citada^(14,18). Desde o início, o estágio operou com sucesso, sendo atualmente usado permanentemente para ensaiar elementos de separação fornecidos pela indústria. Estágios deste tipo foram tomados por base para o projeto de segurança das usinas de demonstração anteriormente descrita (ver Secção 4).

Em 1974 foi instalado em Karlsruhe uma versão mais avançada do estágio descrito, o qual foi desenvolvido pela STEAG⁽¹⁴⁾. Este estágio protótipo, descrito por BRIGOLI⁽²⁸⁾ apresenta dimensões menores do que o anterior e também se destina a usinas de enriquecimento comerciais. Em ambos os casos, os estágios considerados permitem a construção de usinas com capacidades compreendidas entre 5×10^5 e 10^6 kgTS/a sem exigir qualquer ligação dos estágios em paralelo.

6 — ESTADO ATUAL DO PROCESSO

Atualmente, o desenvolvimento relativo aos aspectos físicos do processo de jato centrífugo continua a concentrar-se na otimização das condições de operação do sistema bocal de separação apresentado na Figura 5 e agora alimentado pela mistura H₂/UF₆ (95/5% molares). A meta mais importante deste desenvolvimento é a redução do consumo específico de energia do processo. Tendo em vista que no bocal de separação os complexos fenômenos simultâneos de escoamento e difusão só podem ser avaliados teoricamente de maneira qualitativa, estes resultados de otimização estão sendo conduzidos em bases puramente experimentais, sob a contínua consideração dos conhecimentos obtidos no desenvolvimento tecnológico do processo. Por este motivo, foi recentemente instalado em Karlsruhe um novo equipamento para estudos de otimização destinado a experiência de separação com o UF₆. Este equipamento, mencionado por BECKER e colaboradores⁽¹⁸⁾, constitui em grande aperfeiçoamento em relação à precisão e à velocidade com que as experiências são realizadas. Nestas experiências, é possível, medir e ajustar diretamente o corte do bocal de separação, assim, como, variar os parâmetros geométricos do bocal durante o ensaio. Desta maneira, com uma dada geometria do bocal de separação pode-se usar, para fins de otimização, apenas o valor de corte e as correspondentes condições de operação exigidas para a cascata de separação. Os dados assim obtidos do equipamento de otimização são imediatamente

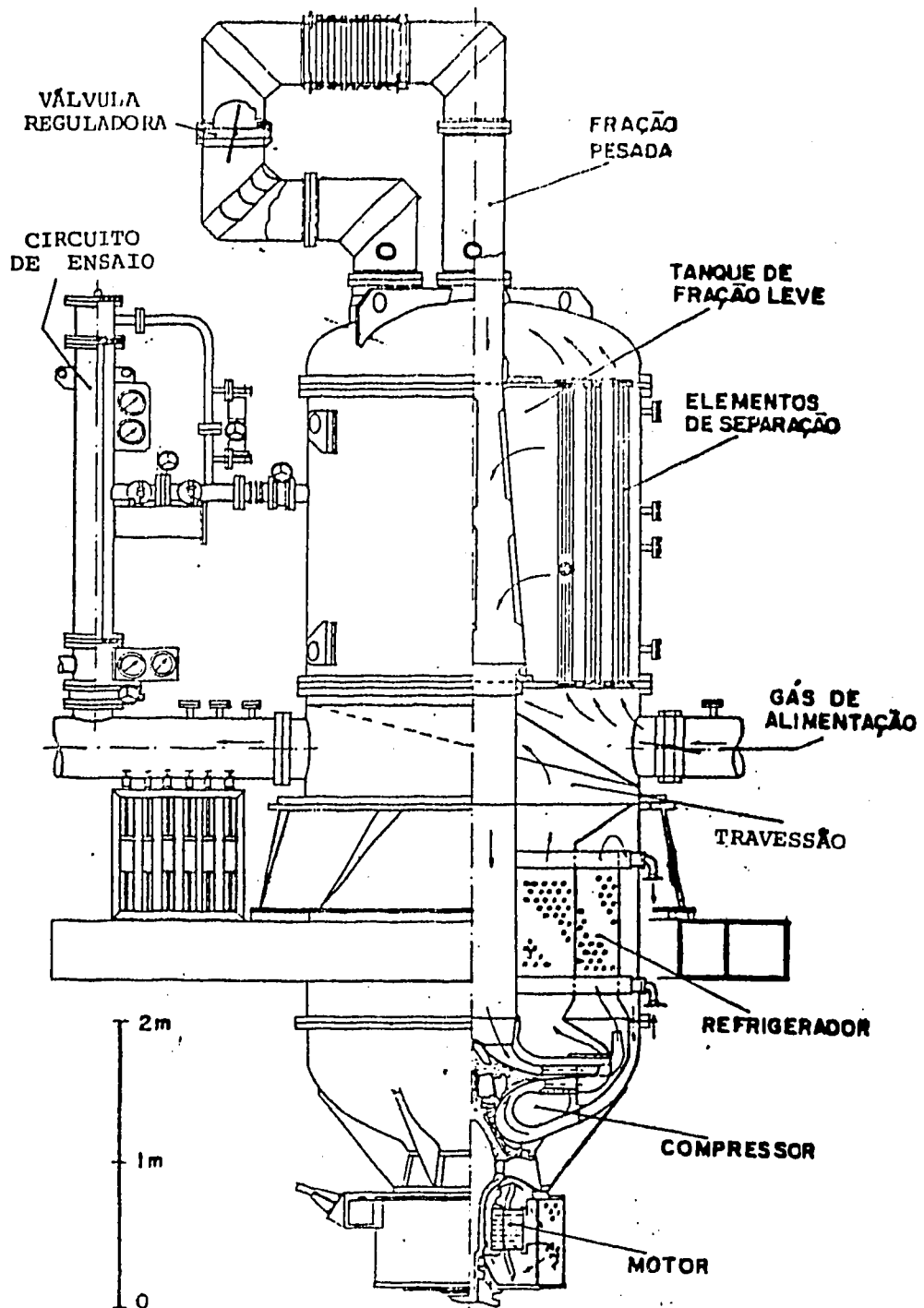


Figura 13 - Esquema do Protótipo de um Estágio de Separação

processadas por programas de computação, analisados em termos dos aspectos técnicos do processo e usados para fixar as condições para novas experiências de otimização. Esses estudos de otimização, apesar do uso de uma técnica experimental mais aperfeiçoada exigem um dispêndio considerável de tempo, em virtude do grande número de parâmetros, que devem ser variados, e da impossibilidade de otimizá-los independentemente uns dos outros. Assim, existem mais de 10 destes parâmetros, dos quais os mais importantes são as dimensões geométricas do bocal, a pressão de alimentação do gás, as pressões de sucção, o corte e a concentração de UF_6 .

O sucesso obtido nas experiências de otimização destes parâmetros está ilustrado na Figura 14, que representa o consumo específico de energia em função do tempo de desenvolvimento, sendo no cálculo do consumo levadas em conta todas as perdas e eficiências de uma usina de separação industrial para o processo do jato, tais como, a eficiência da cascata, a eficiência elétrica e a eficiência dos compressores. No estado atual do desenvolvimento, o consumo específico de energia, como mostra a figura, está situado apenas um pouco acima do correspondente às usinas existentes de difusão gasosa, mas ainda é 1,4 vezes mais elevado do que o das usinas projetadas ou em estágio de aperfeiçoamento. Os resultados preliminares do programa de otimização em andamento, assim como a inclinação da curva da Figura 14, indicam que nos próximos anos será possível atingir-se com o processo do jato um consumo de energia menor do que o das usinas de difusão gasosa, isto é, menor do que 2400 kWh/kgTS, sem realizar-se alterações fundamentais no sistema bocal de separação.

Além dos estudos de otimização, estão sendo desenvolvidos sistemas de bocais avançados, mais complicados do que o sistema simples até aqui considerado. Estes sistemas avançados se originaram de extensos estudos fundamentais, tanto teóricos como experimentais, realizados para o melhor conhecimento dos fenômenos físicos que ocorrem no bocal de separação. A finalidade destas investigações, feitas por BECKER e seus colaboradores^(15,26,27), em 1971 e 1973, foi a de obter uma maior redução do consumo específico da energia do processo. No primeiro destes estudos⁽¹⁵⁾, a análise teórica mostrou que o gás leve (He ou H_2) da mistura de alimentação não aumenta apenas a separação dos isótopos de urânio por diminuir a massa molecular média desta mistura, aumentando, assim, sua velocidade de escoamento e, portanto, a força centrífuga responsável pela separação. O gás leve adicionado contribui também na separação dos isótopos através de um segundo efeito, que consiste em retardar o estabelecimento da distribuição barométrica de densidades, diminuindo, desta maneira, a ação da difusão de concentração, a qual se opõe à separação isotópica. No segundo estudo⁽²⁶⁾ é examinado experimentalmente a influência do atrito da mistura gasosa ao longo da parede curva do bocal na separação dos isótopos de urânio para misturas de UF_6 com H_2 , D_2 e He , respectivamente. Finalmente, no terceiro trabalho⁽²⁷⁾ são apresentados os resultados das medidas realizadas com uma sonda de Pitot, em lugar da cunha, num bocal de separação de dimensões aumentadas e com a mistura gasosa escoando através deste bocal em condições de número de Reynolds ótimo para a separação isotópica do componente pesado na mistura. Estas medidas, que permitiram conhecer o fluxo gasoso em todos os pontos do bocal de separação, forneceram o perfil de escoamento, o perfil da pressão total do gás e o perfil da concentração do componente pesado ao longo da parede curva, apresentados na Figura 15, além de revelarem que a energia cinética da mistura gasosa ainda era relativamente grande na saída do bocal.

No processo do jato centrífugo, quase toda a energia é consumida nos compressores, que comprimem, novamente o gás expandido nos bocais até a pressão inicial na entrada dos estágios de separação subsequentes. Então, de acordo com BECKER e colaboradores⁽¹⁴⁾, para a diminuição do consumo específico de energia existem basicamente três possibilidades: 1) Redução da relação de expansão necessária para a obtenção de uma dada condição de escoamento; 2) Utilização da energia cinética do escoamento gasoso, ainda disponível na parte final da parede defletora, para uma recompressão parcial do gás ou prosseguimento da separação e 3) Aumento da separação isotópica para condições de bombeamento pré-estabelecidas.

Os pontos de partida para a realização destas três possibilidades são os três trabalhos acima citados de BECKER e seus colaboradores^(15,26,27). Assim, em relação a primeira possibilidade, o perfil da velocidade de escoamento apresentado na Figura 15a, extraída do terceiro destes trabalhos, mostra que,

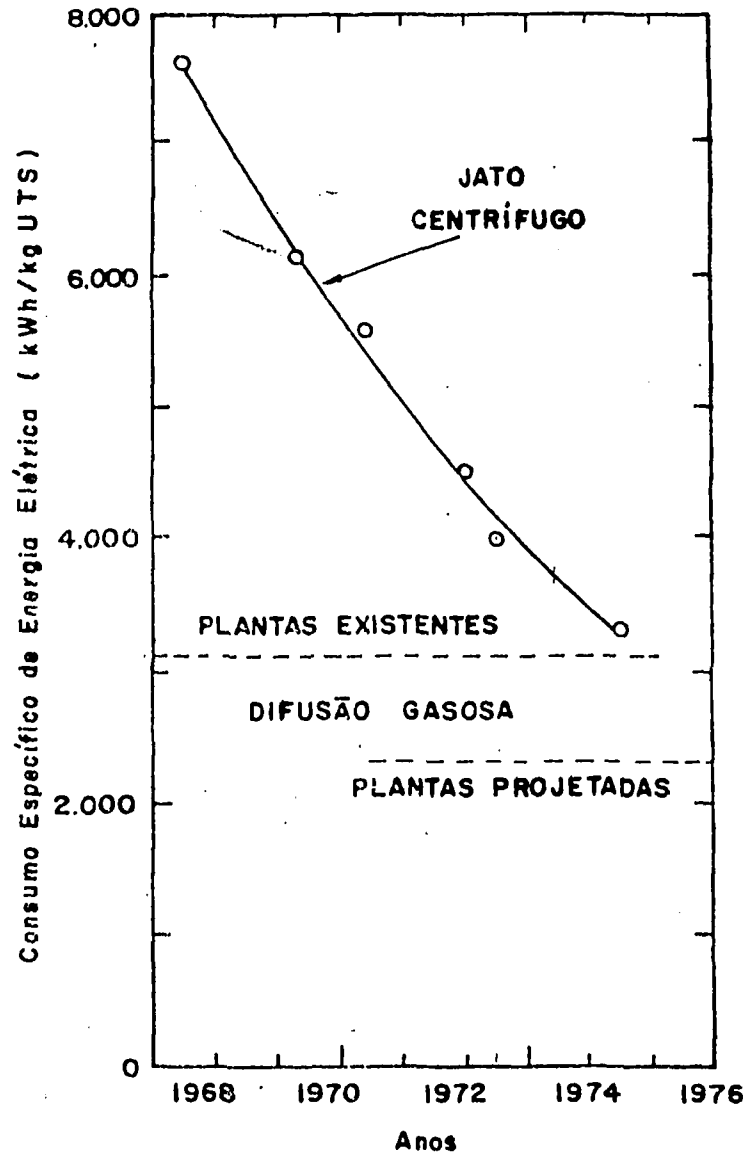


Figura 14 — Redução do Consumo Específico de Energia Elétrica no Processo do Jato Centrífugo

em condições de operação do bocal ótimas para a separação isotópica, existe uma queda de velocidade do gás muito pronunciada na região da parede curva próxima à saída do gás. Esta queda é causada pelo forte atrito do gás com a parede, cuja presença já fora constatada no seguimento dos trabalhos citados⁽¹⁶⁾. Então a primeira possibilidade de diminuir o consumo específico de energia seria alcançada, realizando-se a deflexão da corrente gasosa de modo a eliminar-se a elevação da queda de velocidade na parede. Para isto, BECKER e colaboradores⁽¹⁴⁾ introduziram um novo dispositivo ou sistema de separação constituído de bocais, um em frente ao outro, dos quais os respectivos jatos de gás saem frontalmente em sentidos opostos, como é mostrado na Figura 16. Neste caso, a mudança de direção de escoamento, que para a maior parte da mistura gasosa é apenas de 90° , é causada apenas pela interação mútua dos jatos de gás em expansão livre, evitando-se, assim, a elevada queda de velocidade devida ao atrito. Este sistema de bocal avançado com jatos interagentes forneceu resultados favoráveis com misturas de H_2/UF_6 no que diz respeito à economia global do processo. Quanto ao consumo específico de energia, só foram obtidos resultados melhores do que os fornecidos pelo bocal de separação convencional do jato único, quando o gás usado era constituído apenas de UF_6 . Todavia, neste caso, o melhoramento introduzido pelo sistema de jato duplo ainda não é suficiente para tornar o processo de separação econômico. No seu estado atual do desenvolvimento, o bocal com jato único defletido por uma parede curva ainda é mais vantajoso do que o sistema de bocal com jatos gasosos interagentes⁽¹⁷⁾.

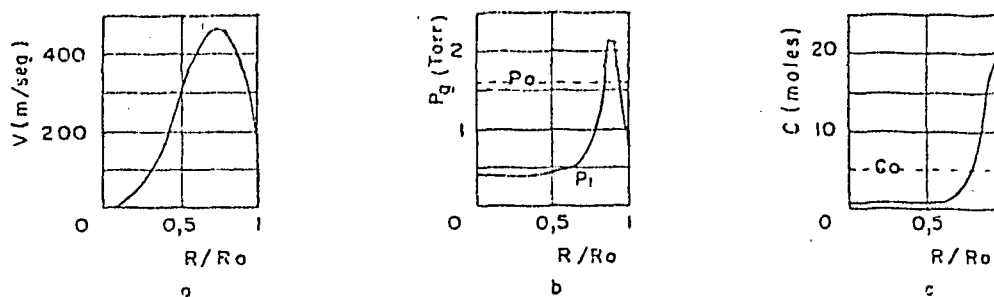


Figura 15 — (a) Perfil da Velocidade de Escoamento V ; (b) Perfil da Pressão Total; (c) Perfil da concentração do C do Componente Pesado.

R = distância a partir do centro de curvatura da parede curva; R_0 = raio de curvatura da parede (distância do centro de curvatura até a superfície da parede).

A segunda possibilidade, isto é, o aproveitamento da energia cinética da corrente gasosa, foi sugerida pelo perfil da pressão total mostrado na Figura 15b, extraída do terceiro dos trabalhos acima mencionados. Este perfil revela que a energia cinética da corrente gasosa se concentra principalmente nas regiões que, próximas à parede curva, se situam nas imediações da saída do bocal. Nestas regiões, a pressão total da mistura passa por um máximo, superior ao valor da pressão da mistura p_0 na entrada do bocal em consequência da separação da mistura. Como nas proximidades deste máximo da pressão total está usualmente situada a cunha, esta divide a mistura isotópica numa fração pesada relativamente fácil de ser recomprimada e numa fração leve praticamente impossível de ser reprocessada. Como, porém, esta fração pesada corresponde apenas a 30% do total do gás a ser comprimido, sua recompressão não apresenta nenhuma vantagem face às complicações técnicas que introduziria no bocal. Por este motivo, procurou-se aproveitar a energia cinética, relativamente grande, da fração pesada ainda presente na saída do bocal para o prosseguimento da separação. Esta segunda possibilidade para reduzir o consumo da energia poderia ser realizada com o sistema de bocal de desvio duplo apresentado esquematicamente na Figura 17. Na

operação de uma cascata com este elemento de separação mais avançado, a fração leve do segundo bocal deverá ser reconduzida à parte da sucção do compressor de alimentação do primeiro bocal. Com esta operação, foi calculado, a partir de experiências preliminares, que é possível chegar nos estágios da cascata a fatores de separação consideravelmente maiores do que os que seriam obtidos com o sistema de bocal simples para o mesmo consumo específico de energia⁽¹⁴⁾.

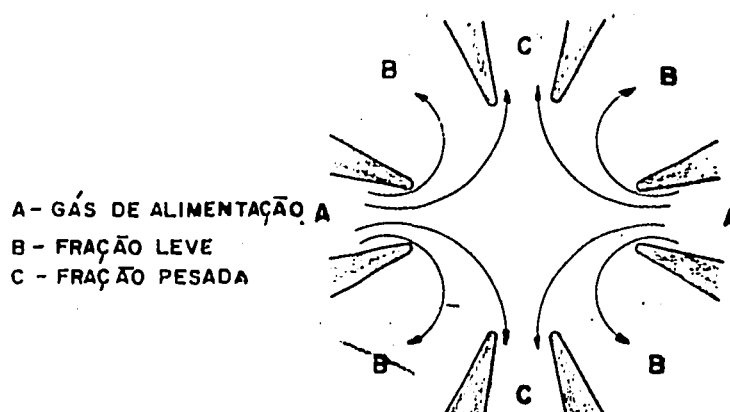


Figura 16 — Esquema de um Sistema de Bocais de Separação com Jatos Opostos Interagentes

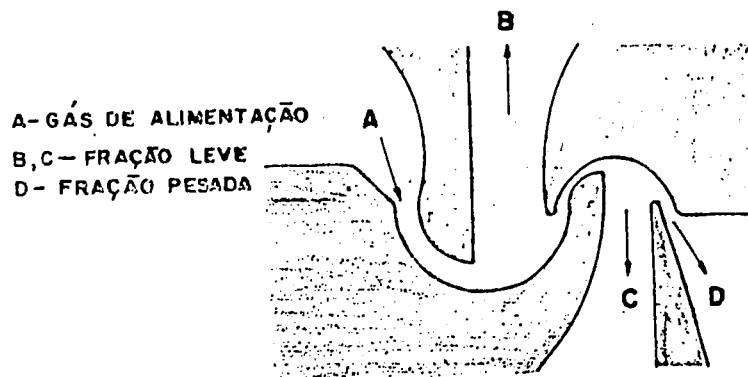


Figura 17 — Esquema de um Sistema de Bocal de Separação Duplo com Aproveitamento da Energia Cinética da Fração Pesada

A terceira possibilidade para reduzir o consumo específico de energia, que corresponde ao aumento da separação isotópica para as mesmas condições de bombeamento, pode ser deduzida do perfil de concentrações mostrado na Figura 15c, relativa ao terceiro dos trabalhos citados⁽²⁷⁾, e das conclusões procedentes do primeiro destes trabalhos⁽¹⁵⁾. Em ambos os casos, verificou-se a concentração do componente pesado (UF_6) da mistura na forma de uma camada muito fina adjacente à superfície da parede curva na saída do bocal, decorrente do equilíbrio de sedimentação (ou distribuição barométrica das densidades) deste componente, causado pelo campo centrífugo criado no escoamento gasoso. Então, deve-se esperar um aumento da separação isotópica, para dadas condições de bombeamento, se for possível retardar ou diminuir a sedimentação do UF_6 em relação ao gás auxiliar leve. Em princípio, esta possibilidade pode ser realizada com o bocal convencional de desvio simples, quando a separação entre UF_6 e o gás auxiliar leve é contraposta pela introdução de correntes de diferentes concentrações de UF_6 no gás de alimentação do bocal. Estas correntes gasosas, de composições adequadas com respeito à relação isotópica e às concentrações, podem ser obtidas diretamente de cascata de separação operando com o processo do bocal simples. Uma outra maneira de pôr em prática esta possibilidade, é a modificação do bocal de desvio duplo na forma do sistema de bocal avançado apresentado na Figura 18. Como no caso anterior, neste novo sistema, a fração leve do primeiro bocal, que contém a maioria do gás leve auxiliar, é conduzido aos estágios da cascata, enquanto que a fração pesada, que contém a maioria de UF_6 , entra no segundo bocal com uma elevada energia cinética, onde é de novo defletida pela segunda cunha. Todavia, no presente sistema de bocais de desvio duplo, a deflexão no segundo bocal não ocorre sobre uma parede fixa, mas é feita por um gás de arraste retirado de um estágio inferior da cascata na forma de uma fração rica em gás auxiliar. Deste modo, se obtém uma distribuição mais uniforme de UF_6 no campo centrífugo e este gás não se concentra numa camada muito fina, como ocorre no caso em que uma parede sólida é usada para deflexão. As experiências preliminares realizadas com este sistema de bocal avançado mostraram que realmente ocorre um aumento do fator de separação e que este sistema constitui um modo interessante para melhorar a economia do processo^(17,18).

Os sistemas de bocais de separação avançados, que foram descritos, assim como elementos de separação mais complicados, podem ser manufacturados comercialmente através do método de foto-erosão, anteriormente descrito⁽¹⁸⁾. Este método apresenta a vantagem de fornecer elementos de separação tubulares, que podem ser facilmente adaptados em estágios, que usam outros tipos de construção de elementos de separação, mantendo assim inalteradas as exigências tecnológicas destas instalações.

No momento, os estudos que estão sendo realizados com estes sistemas avançados de bocais de separação ainda têm por finalidade principal o estudo mais profundo dos fenômenos físicos envolvidos no processo do bocal. Assim que as atuais investigações preliminares forem concluídas, o trabalho de desenvolvimento será concentrado nos dispositivos avançados mais promissores. Então, deverá ser iniciado um programa de otimização baseado nos aspectos técnicos e económicos, da mesma maneira como foi feito com os sistemas de bocais de separação simples⁽¹⁷⁾.

Do ponto de vista tecnológico, o estado atual do programa de desenvolvimento do processo do jato centrífugo está sendo estendido à fabricação de componentes, baseados nos dois protótipos de estágios de separação já instalados, com a finalidade da construção de usinas de enriquecimento com capacidades separativas de alguns milhões de kgTS/a, as quais oferecem mais atrativos para a aplicação prática do processo de separação. Este programa tecnológico se centraliza em torno do desenvolvimento de estágios de separação de elevada capacidade, compreendida entre 6000 a 10000 kgTS/a. Neste sentido, a firma STEAG AG está atualmente construindo dois estágios protótipos de elementos de bocais, de dimensões diferentes, dimensionados para uma usina de separação de $2,5 \times 10^6$ kgTS/a. No trabalho de BRIGOLI⁽²⁸⁾, são apresentadas as características principais destes estágios, assim como, o esquema do estágio de dimensões maiores, que está representado na Figura 19.

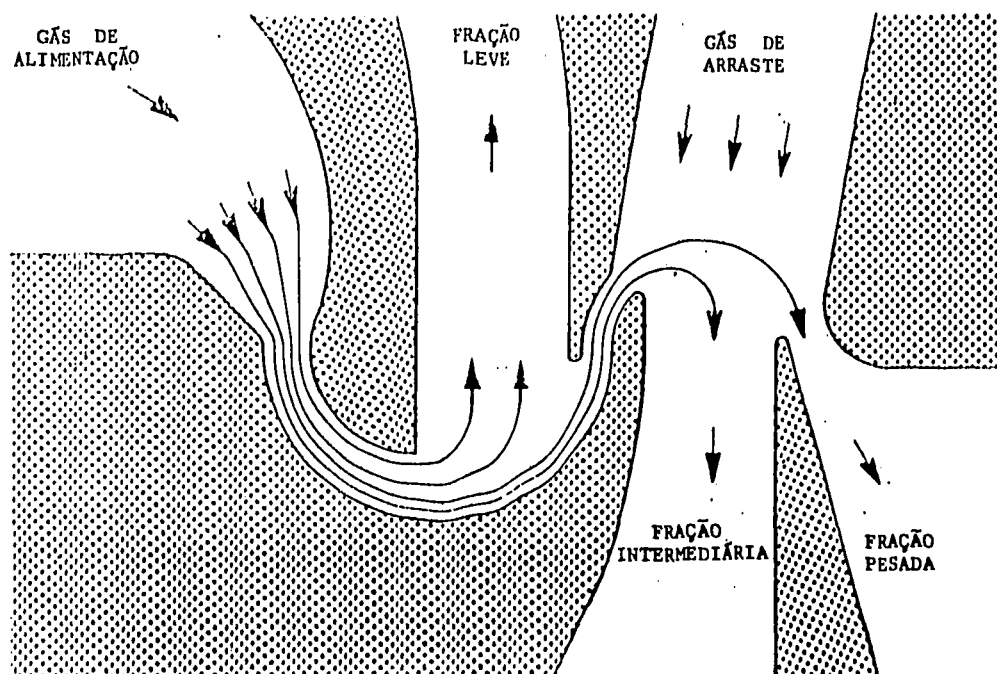


Figura 18 - Esquema de um Sistema de Bocal de Separação Duplo com Gás de Varredura

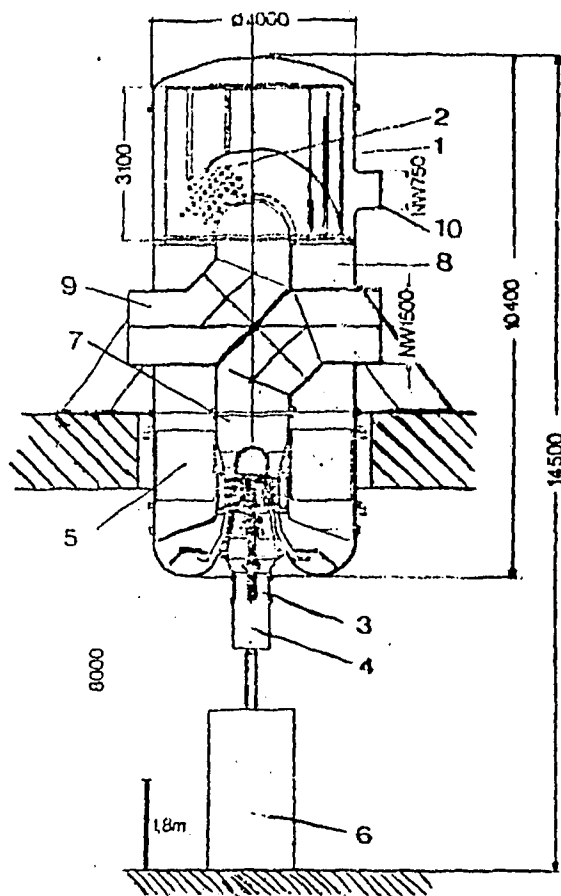


Figura 19 — Esquema de um Estágio de Separação do Processo do Bocal para uma Usina de $2,5 \cdot 10^6$ kgTS/a.
 1) Tanque dos Elementos de Separação ; 2) elemento de Separação tubular ; 3) Compressor ;
 4) Caixa de Engrenagens ; 5) Trocador de Calor ; 6) Motor do compressor ; 7) Entrada do
 Gás de Alimentação ; 8) Alimentação dos Bocais de Separação ; 9) Fração Leve ; 10) Fração
 Pesada

Ao mesmo tempo, a firma STEAG está desenvolvendo os estudos do projeto de uma usina industrial de 5×10^6 kgTS/a. Dentro do estado atual da tecnologia do processo do bocal de separação esta usina poderia ser formada de 570 estágios, dos quais 384 seriam grandes e os restantes, pequenos, com 1/3 da capacidade dos primeiros. Destes estágios pequenos, 144 deverão constituir o topo da cascata e 42, a base da mesma⁽²⁸⁾. Os estágios grandes deverão apresentar um comprimento de fenda total dos bocais de 26660m, uma capacidade de separação de 12800 kgTS/a e uma potência elétrica de cerca de 5,5 MW, prevendo-se que o projeto e a construção dos protótipos desses estágios levará cerca de 5 anos⁽³²⁾. O projeto da usina ainda estima a instalação de 2520 MW de potência e admite que a área construída da usina será de 800.000 m². O trabalho de BRIGOLI⁽²⁸⁾ apresenta ainda outros dados para os elementos, estágios e cascatas desta usina de separação em projeto.

Quanto ao programa brasileiro de enriquecimento isotópico de urânio pelo processo do jato separador, o acordo entre a Nuclebras e a STEAG prevê a construção de uma usina de demonstração com uma capacidade inicial de 180000 kgTS/a, que deverá entrar em funcionamento em 1981. A usina deverá ser formada de 400 estágios com 2,5 m de diâmetro e 8 a 12 m de comprimento, prevendo-se que o consumo específico de energia para a usina industrial deverá ser de cerca de 4000 kWh/UTS⁽³⁴⁾. A capacidade da usina de demonstração deverá ser ampliada até 250000 kgTS/a⁽¹⁾ e o acordo ainda pressupõe o desenvolvimento posterior do processo até alcançar a fase comercial⁽³⁵⁾.

Concluindo, cabe mencionar inicialmente que o processo de jato centrífugo atualmente ainda se encontra em fase de desenvolvimento, tanto nos seus aspectos físicos, como tecnológicos. Embora o programa de otimização dos sistemas convencionais de bocais de separação, que se encontra em andamento, tenha permitido uma redução considerável do consumo específico de energia no desenvolvimento de elementos de separação individuais, convém salientar que no caso de uma usina de enriquecimento se admite atualmente que este consumo deva apresentar o valor mais realista de 400 kWh/UTS⁽³²⁾. Este valor é ainda muito elevado em relação ao de 2400 kWh/UTS do processo da difusão gasosa, porém, é necessário não esquecer o grande potencial de desenvolvimento do processo do jato centrífugo, o qual se baseia principalmente no fato de que, tanto este processo como o da centrifugação, teoricamente não necessitam do fornecimento de energia para a manutenção do estado de separação de isótopos. As contrário da difusão gasosa, nestes dois processos o consumo real de energia é determinado basicamente por etapas que não apresentam uma relação interna com a separação. Além disto, cabe acrescentar que o progresso até agora alcançado no desenvolvimento do processo, como se pode constatar da presente exposição, parece certamente destinado a tornar o processo do jato centrífugo um sério concorrente dos processos da difusão gasosa e da centrifugação. Em vista dos custos de capital e de manutenção relativamente baixos e na base do elevado potencial de desenvolvimento, associado à tecnologia relativamente simples, é de esperar-se que dentro de alguns anos o processo do jato centrífugo deverá fornecer custos de trabalho de separação consideravelmente menores do que os dos outros processos de enriquecimento isotópico de urânio, como foi mencionado na 1ª Conferência Nuclear Europeia, realizada em abril do ano passado⁽¹⁷⁾.

ABSTRACT

In this report a general survey of the isotopic enrichment of Uranium-235, principally by Jet Nozzle process, is made. Theoretical treatment of a single stage and cascade of separation stages of the above process with its development in Germany until 1976 is presented.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BATISTA, P. N. *Perspectivas abertas ao Brasil com a aquisição de tecnologia nuclear. Revista bras. Energia Elétrica*, 31: 43-68, jul/set. 1975.
2. BECKER, E. W. The diffusion process for the enrichment of the light isotope of uranium. *Chem. Ing. Techn.*, 29: 365, 1957.

3. BECKER, E. W. Separation Nozzle process for uranium enrichment. *Atomenergie Toepass.*, 11:272-6, Nov. 1969.
4. BECKER, E. W. & BIER, K. The production of intense partially monochromatic hydrogen molecular beams with a lval Nozzle. *Z. Naturforsch.*, 9a:975-86, 1954.
5. BECKER, E. W. & SCHUETTE, R. The separation of uranium isotopes with the separation Nozzle. *Z. Naturforsch.*, 11a:679, 1956.
6. BECKER, E. W. & SCHUETTE, R. *Z. Naturforsch.*, 15a:336, 1960.
7. BECKER, E. W.; BEYRICH, W.; BIER, K.; BURGHOFF, H.; HAGENA, O.; LOHSE, P.; SCHUETTE, R.; TUROWSKI, P.; ZIGAN, F. In: KISTEMAKER, J.; BIGELEISEN, J.; BIER, A.O.C., ed. *Isotope separation: proceedings of the international symposium on. . . held in Amsterdam, Holland, April 23-27, 1957*. Amsterdam, North Holland, 1958. p.560. (Series In physics).
8. BECKER, E. W.; BEYRICH, W.; BIER, K.; BURGHOFF, H.; ZIGAN, F. The separation Nozzle. II. The physical bases and the specific magnitudes od the expenditures of the process. *Z. Naturforsch.* 12a:609-21, 1957.
9. BECKER, E. W.; BIER, W. Separation Nozzle method with light auxliary gas. *Z. Naturforsch.*, 17a:778-85, Sep. 1962.
10. BECKER, E. W.; BIER, K.; BIER, W.; SCHUETTE, R. Separation Nozzle dissociation of uranium isotopes by use of light admixed gases. *Z. Naturforsch.*, 18a:246-50, Feb. 1963.
11. BECKER, E. W.; BIER, K.; BIER, W.; SCHUETTE, R.; SEIDEL, D. SEparation of the isotopes of uranium by the separation Nozzle process. *Angew. Chem. In. Ed. Engl.*, 6:507-18, Jun. 1967.
12. BECKER, E. W.; BIER, K.; BURGHOFF, H. A new apparatus for the separation of gases and isotopes. *Z. Naturforsch.*, 10a:565-72, 1955.
13. BECKER, E. W.; BIER, K.; BURGHOFF, H.; HAGENA, O.; LOHSE, P.; SCHUETTE, R.; TUROWSKI, P.; ZIGAN, F. Separation of the uranium isotopes by the Nozzle process. In: UNITED NATIONS. *Peaceful uses of taomic energy: proceedings of the second international conference. . . held in Geneva, 1 September-13 September 1958. v.4: Production of nuclear materials and isotopes*. Geneva, 1958, p.455-61. .
14. BECKER, E. W.; BIER, W.; BLEY, P.; EHRFELD, U.; EHRFELD, W.; EISENBEISS, G. Das Entwicklungspotential des Trenndüsenverfahrens zur U-235-Anreicherung. *Atomwirtschaft*, 18(11):524-7, Nov. 1973.
15. BECKER, E. W.; BIER, W.; EHRFELD, W.; EISENBEISS, G. Physical principles of 235U enrichment according to the separation Nozzle method the effects of added light gases. *Z. Naturforsch.*, 26a(9):1377-84, Sep. 1971.
16. BECKER, E. W.; BIER, W.; EHRFELD, W.; EISENBEISS, G.; FREY, G.; HAPPE, P.; HEESCHEN, G.; LUCKE, R.; PLESCH, D.; SCHUBERT, K.; SCHUETTE, R.; SIEDEL, D.; SIEBER, U.; WEIS, F.; GEPPERT, H.; VOLCKER, H. The separation Nozzle process for enric uranium-235. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Peaceful uses of atomic energy: Proceedings of the fourth international conference on. . . held in Geneva, 6-16 September 1971. v.9. Vienna, 1972. p.3-13. (Proceedings series)*.

17. BECKER, E. W.; BIER, W.; EHRFELD, W.; SCHUBERT, K.; SCHUETTE, R.; SEIDEL, D. Physics and technology of the separation Nozzle process. *Trans. Am. nucl. Soc.*, 20:801-2, 1975.
18. BECKER, E. W.; BIER, W.; EHRFELD, W.; SCHUBERT, K.; SCHUETTE, R.; SEIDEL, D. *Present state and development potential of separation Nozzle process*. Karlsruhe, Gesellschaft für Kernforschung, 1974. (KFK-2067).
19. BECKER, E. W.; BIER, W.; FREY, G.; SCHUETTE, R. Trenndüsen-Demonstrations-anlage für die Urananreicherung. *Atomwirtschaft*, 14:249-51, Mai 1969.
20. BECKER, E. W.; BIER, W.; SCHUETTE, R. *Principles and economic aspects of the separation Nozzle process*. Karlsruhe, Gesellschaft für Kernforschung, 1968. (KFK-853).
21. BECKER, E. W.; BURGHOFF, H.; GSPANN, J. Separation Nozzle dissociation in deflected gas jets. *Z. Naturforsch.*, 16a:955-60, Oct. 1961.
22. BECKER, E. W.; FREY, G.; SCHUETTE, R.; SEIDEL, D. Entmischung der Uranisotope in einer zehnstufigen Trenndüsen-Versuchsanlage. *Atomwirtschaft*, 13:359-62, Jul. 1968.
23. BECKER, E. W.; FREY, G.; SCHUETTE, R.; SEIDEL, D. *Operation of a 10-stage separation Nozzle pilot plant*. Karlsruhe, Gesellschaft für Kernforschung, 1968. (KFK-854).
24. BENEDICT, M. & PIGFORD, T. H. *Nuclear chemical engineering*. New York, N. Y., McGraw-Hill, 1957.
25. BIER, W. & WEIS, F. Influence of geometric parameter on the performance of separating Nozzle elements. *Kerntechnik*, 14(3):105-17, 1972.
26. BIER, W.; EISENBEISS, G.; HEESCHEN, G. Physics of uranium-235 enrichment in the Nozzle process. II. Comparison of the added light gases H_2 , He, and D_2 . *Z. Naturforsch.*, 28a(8):1267-72, 1973.
27. BLEY, P.; DUERR, R.; EHRFELD, W.; EISENBEISS, G. Physics of uranium-235 enrichment in Nozzle process. III. Mechanisms of entropy production in the separation Nozzle flow. *Z. Naturforsch.*, 28a(8):1273-80, 1973.
28. BRIGOLI, B. Progressi nelle tecniche di separazione isotopica dell'uranio, Parte 1. *Energia nucl. (Milano)*, 22(7):361-73, Lug. 1975.
29. CASA, A. F. Il ciclo del combustibile alla conferenza di Parigi. *Notizario*, 21(7):72-8, Lug. 1975.
30. COHEN, K. *The theory of isotope separation as applied to large-scale production of U-235*. New York, N. Y., McGraw-Hill, 1951. (National nuclear series, Div. III, v.18).
31. CONTRATI per Almelo e Capenhurst. *Notizario*, 20(2):13, Feb. 1974.
32. FERGUSON, A. T. G. International conference on uranium isotope separation, 5-7 March 1975. *J. Br. nucl. Energy Soc.*, 14(3):213-9, Jul. 1975.
33. FRITZ, W.; HOCH, P.; LINDER, G.; SCHAEFER, R.; SCHUETTE, R. *Chem. Ing. Techn.*, 45:590, 1973.

34. JEFFS, E. Nuclex reveals Europe's growing nuclear industry strenght. *Energy Int.*, 12(12):15-8, Dec. 1975.
35. Notiziario. 21(10):21, Ott. 1975.
36. ROSTAGNI, A. Problemi della separazione isotopica dell'uranio. In: COMITATO NAZIONALE ENERGIA NUCLEARE. *Simposio nucleare dei CNEN, Torino, 1/2 Ottobre 1968*. s.n.t.l. p.1.
37. ROUX, A. J. & GRANT, W. L. L'arricchimento dell'uranio in Sud Africa. *Notiziario*, 21(6):47-51, Giug. 1975.
38. SCHUETTE, R.; SEIDEL, D.; FRITZ, W.; PLECH, D.; LINDER, G.; FRITSCH, H. J. Experimental and theoretical investigation of the stationary operational behavior of cascade separation Nozzle for the enrichment of ²³⁵U. *Chem. Ing. Tech.*, 44(19):1099-104, Oct. 1972.
39. STERN, S. A.; WATERMAN, P. C.; SINCLAIR, T. F. Separation of gas mixtures in a supersonic jet. II. Behavior of helium-argon mixtures and evidence of shock separation. *J. chem. Phys.*, 33(3):805-13, Sep. 1960.
40. ZIGAN, F. Gas dynamic calculation of Nozzle separation. *Z. Naturforsch.*, 17a:772-8, Sep. 1962.

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
Caixa Postal, 11049 – Pinheiros
CEP 05508
01000 – São Paulo – SP

Telefone: 211-6011
Endereço Telegráfico – IEATOMICA
Telex – 011-23592 IENA BR