

Brasília, 23 de outubro de 1979

E.W. Becker

Centro de Pesquisas Nucleares de Karlsruhe, Karlsruhe, RFA.

Enriquecimento do Urânio pelo Processo de Separação por Jatos Centrí-
fugos (Jet Nozzle), dentro do Programa de Cooperação Teuto-Bra-
sileira.

- Apesar do aproveitamento da energia nuclear ser, ainda, calorosa-
mente debatido em parte do mundo, seguramente pode ser admitido
que o urânio é uma cobiçada matéria prima. Por esta razão, é
de considerável importância o fato de terem sido descobertas, no
Brasil, reservas uraníferas numa proporção tal, que situa este
país entre os maiores exportadores em potencial deste minério.
- A quantidade aproximada de 200.000 toneladas de urânio, conside-
rada até agora como relativamente assegurada, corresponde a ven-
das da ordem de 20 bilhões de dólares, ao valor atual do U_3O_8
puro. Contudo, como apenas uma parte relativamente pequena do
país tem sido explorada até o momento, é muito provável que as
jazidas brasileiras de urânio sejam, na realidade, bem maiores.
- Atualmente o urânio é utilizado, principalmente, nos reatores a
água leve, para os quais o isótopo leve urânio 235, que ocorre
no urânio natural com uma abundância de 0,72%, deve ser enrique-
cido em cerca de 3,2%. O enriquecimento dobra, aproximadamente,
o valor comercial do urânio. Assim, sob forma enriquecida, as
reservas brasileiras de urânio, consideradas relativamente asse-
guradas, representarão vendas da ordem de 40 bilhões de dólares.
Por este motivo é desejável para o Brasil, não somente por ra

Escritório Regional de Belém - EORL-PMTrav. Getúlio Borsoi, 1165
Telefones: 223-9866 e 223-0068J. W. Becker
10/23/79

zões políticas de abastecimento interno, como, também, por motivos econômicos, que o enriquecimento do urânio seja feito no próprio país.

Até agora todos os países que desejaram enriquecer o urânio para fins militares ou comerciais tiveram que desenvolver, por si mesmos, a complexa tecnologia do enriquecimento, com considerável despesa. O fato das usinas de enriquecimento não serem, até hoje, artigos de comércio, e da tecnologia empregada nas instalações atuais ter sido mantida em segredo, originou-se, provavelmente, também, de razões econômicas, além das militares: uma vez que os custos específicos de uma usina de enriquecimento decrescem, consideravelmente, com o aumento de seu tamanho, todo proprietário de uma tecnologia de enriquecimento procurará atender ao maior número possível de compradores, com uma usina de maior porte possível. Estes esforços encontram uma limitação natural no desejo compreensível dos países detentores de grandes reservas de urânio, de se tornarem tecnologicamente independentes e de partilharem no comércio do enriquecimento.

Quando em 1955, após a primeira Conferência Átomos para Paz, em Genebra, foi traçado na República Federal da Alemanha um programa de energia atômica a longo prazo, era pouco atraente para os alemães, repetir o desenvolvimento do processo da difusão gasosa, pesquisado há longo tempo nos Estados Unidos, Grã-Bretanha e União Soviética, porém em caráter altamente secreto. Ao invés disso, optou-se pelo prosseguimento dos trabalhos junto à ultracentrifuga de gás, que já haviam sido iniciados durante a Segunda Guerra Mundial.

Aproximadamente na mesma época da retomada dos trabalhos com as ultracentrífugas, teve início, na República Federal da Alemanha, o desenvolvimento do processo dos jatos centrífugos. Este método baseia-se no mesmo efeito físico do processo das ultracentrífugas. Entretanto, a força centrífuga que determina o processo

da separação é gerada pela deflexão de um veloz jato gasoso. Ao contrário do método da ultracentrifugação, desaparece o limite de capacidade de produção de cada unidade de separação individual. Enquanto que uma usina comercial por ultracentrifugação contém entre 10.000 a 100.000 unidades de centrífugas acionadas individualmente, uma usina de separação comercial de jatos centrífugos, de idêntica capacidade, compõe-se, apenas, da ordem de 300 estágios de separação independentes, cada um com um compressor centrífugo. A maior simplicidade de projeto do método da separação por jatos centrífugos é contrabalanceada por um maior consumo de energia, o qual corresponde, entretanto, apenas a cerca de 3% da energia gerada pelo produto e será, provavelmente, reduzido, consideravelmente, no decorrer do seu desenvolvimento.

- O processo dos jatos centrífugos tem sido desenvolvido no Centro de Pesquisas Nucleares de Karlsruhe, com um gasto de aproximadamente 100 milhões de marcos alemães. Desde 1970, a firma STEAG AG, de Essen, tem participado no custeio do desenvolvimento industrial e na implementação comercial do processo. Presentemente são despendidos na República Federal da Alemanha, anualmente, da ordem de 30 milhões de marcos alemães, para a industrialização e a continuação do desenvolvimento do método dos jatos centrífugos. Este esforço está de acordo com a finalidade declarada de criar uma tecnologia de enriquecimento resistente à proliferação e em condições de ser exportada, o que permitiria à República Federal Alemã participar no processamento de grandes reservas de urânio no exterior.
- Dentro do Acordo de Energia Nuclear com a República Federal da Alemanha, o Brasil decidiu participar, ativamente, no prosseguimento do desenvolvimento e na industrialização do processo dos jatos centrífugos, com a finalidade de estabelecer uma base segura para o processamento dos seus recursos uraníferos dentro do próprio país. O processo dos jatos centrífugos possui o menor custo específico de investimento entre as três técnicas em dis

cussão para o enriquecimento comercial do urânio 235 e inclue uma percentagem particularmente elevada de componentes, que podem ser fabricados no país. O consumo energético relativamente elevado, comparado com o processo das ultracentrífugas, pode ser coberto, economicamente, através do potencial hidroelétrico brasileiro e a construção da usina nas proximidades de uma das grandes hidroelétricas do país permitirá obter custos energéticos relativamente baixos. O preço do urânio enriquecido produzido pelo processo dos jatos centrífugos, no Brasil, será, desta forma, não apenas particularmente baixo, como também incluirá uma percentagem particularmente pequena de dispêndio de divisas. A venda ao exterior resultará correspondentemente num considerável superávit de divisas e saldo positivo no balanço de pagamentos.

(Por favor, 19 slide)

Os objetivos primários das atividades conjuntas, mostrados no 19 slide, são:

19. Construção e operação no Brasil de uma denominada Cascata Inicial, consistindo de 24 estágios de separação, como preparação à construção de uma Usina de Demonstração.
29. Ampliação da Cascata Inicial para uma Usina de Demonstração de jatos centrífugos, com uma capacidade de trabalho de separação entre 200.000 e 300.000 unidades de trabalho de separação por ano (UTS/a), que poderá abatecer continuamente duas ou três usinas nucleares geradoras de eletricidade do tipo de 1000 MWe.
39. Desenvolvimento de componentes para usinas comerciais de jatos centrífugos dentro do contexto de um chamado programa tecnológico.
49. Desenvolvimentos e aperfeiçoamentos futuros do processo de jatos centrífugos.

(Por favor, próximo slide).

O slide nº 2 mostra a organização para a execução dos citados trabalhos. Pode-se verificar pelo organograma que a companhia NUCLEI arca com a responsabilidade pela Cascata Inicial, em construção no Brasil, e pela sua ampliação para a Usina de Demonstração. Esta firma é composta pela empresa brasileira NUCLEBRÁS e pelas companhias alemãs STEAG e INTERATOM. O arquiteto industrial é o consórcio STEAG/INTERATOM.

- A empresa teuto-brasileira NUSTEP, formada pelas STEAG e NUCLEBRÁS, é a responsável pelos problemas de licenças e pela execução do programa tecnológico, como preparação para a construção de usinas comerciais de jatos centrífugos.
- O prosseguimento do desenvolvimento do processo é atribuído ao Centro de Pesquisas Nucleares de Karlsruhe, em cooperação com o Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) da NUCLEBRÁS, em Belo Horizonte. No âmbito desta cooperação, foi transferida de Karlsruhe para Belo Horizonte, uma usina piloto de separação por jatos centrífugos de 10 estágios. Alguns dos cientistas e engenheiros brasileiros responsáveis pela operação desta usina e pelo programa de pesquisas correspondente, foi treinado em Karlsruhe, por um período de 9 meses.
- Os diversos projetos serão descritos a seguir com mais detalhes.

(Por favor, próximo slide).

O slide nº 3 mostra uma seção transversal do sistema de separação por jatos centrífugos, usado na Cascata Inicial: uma mistura de hexafluoreto de urânio gasoso (UF_6) e hidrogênio escoam ao longo de uma parede curva a alta velocidade. No final da deflexão, o jato gasoso é separado, por meio de uma faca, numa fração leve e numa pesada, que são removidas separadamente. A adição

do hidrogênio melhora, consideravelmente, a separação dos isótopos de urânio, motivado, principalmente, pelo aumento da velocidade de escoamento da mistura, em face à redução de seu peso molecular médio. Para possibilitar a utilização de uma pressão de gás a mais elevada possível, as dimensões características do sistema de jatos centrífugos são mantidas as menores possíveis.

- Os elementos de separação da Cascata Inicial são fabricados por dois processos:
 - um processo desenvolvido em conjunto com a companhia Messerschmitt-Bölkow-Blohm, de Munich, trabalha com meios puramente mecânicos.
 - o outro método baseia-se no empilhamento de lâminas metálicas foto-corroídas e foi desenvolvido em cooperação com a companhia Siemens de Munich.

(Por favor, próximo slide).

Um maior número de elementos de separação em forma de tubos está disposto em conjunto num tanque.

- O tanque, contendo os tubos de elementos de separação, juntamente com um compressor centrífugo e o correspondente resfriador, constitui um estágio de separação por jatos centrífugos. O slide 4 mostra um protótipo deste estágio sendo carregado com os elementos de separação. A capacidade de sucção do compressor é de 33.000 m³/h.

(Por favor, próximo slide).

O slide 5 mostra o resultado de um típico teste de operação. A capacidade de separação do estágio importa em cerca de 270 Kg UTS/ano.

(Por favor, próximo slide)

O slide 6 mostra o diagrama da Cascata Inicial. Os 24 estágios estão dispostos em dois grupos, que podem ser operados individualmente ou em série. Para testes da operação de enriquecimento, a cascata está equipada no topo com uma instalação de separação criogênica de UF₆ e com sistemas de contrôle de alimentação e retirada de UF₆. A capacidade de trabalho de separação acumulada de todos os estágios monta em 6.500 kg UTS/a. Como o fator de enriquecimento da Cascata Inicial é muito reduzido para fins práticos, os fluxos do produto e do rejeito são remisturados nos testes de operação.

- A Cascata Inicial, atualmente em construção em Resende, representa o estágio de desenvolvimento do processo dos jatos centrífugos atingido em 1977. Com a Cascata Inicial, composta de 24 estágios de separação por jatos centrífugos, deverão ser comprovadas as estratégias planejadas para a construção, operação e avaliação da Usina de Demonstração. A ampliação desta instalação para a Usina de Demonstração, programada para ser iniciada em 1982, incorporará a mais avançada tecnologia então disponível.

(Por favor, próximo slide)

As mais significativas inovações, em relação à tecnologia de 1977, serão a duplicação da pressão do gás, pela redução das dimensões características do elemento de separação e a integração econômica do sistema de separação por jatos centrífugos, que opera com a dupla deflexão do jato gasoso, mostrado no slide 7.

- No sistema de dupla deflexão, a fração pesada de um sistema clássico é separada, mais uma vez, por um segundo sistema clássico, diretamente conectado ao primeiro, de forma a serem geradas um total de 3 frações. A fração intermediária é conduzida, no próprio estágio, para a linha de sucção do compressor.

(Por favor, próximo slide)

O slide 8 mostra alguns resultados preliminares de experiências de separação feitas com o sistema de separação por dupla deflexão. Como se observa, o efeito de separação entre as frações pesada e leve de tal sistema é significativamente maior do que o efeito de separação de um "nozzle" único. O corte de UF₆ ótimo, que é de 1/4 para o sistema convencional, é elevado para 1/3 no sistema de dupla deflexão, tendo em vista que uma parte da fração pesada do primeiro "nozzle" recircula no mesmo estágio de separação. Isto resulta numa considerável redução do número de estágios necessários a uma cascata para dada concentração de produto e de rejeito. Apesar de diminuir a vazão líquida de UF₆ no sistema de dupla deflexão, pela recirculação da fração intermediária, a sua capacidade de separação é um pouco superior àquela do sistema simples. Isto resulta em valores mais favoráveis para o consumo específico de energia e para o volume específico de sucção. A vantagem preponderante de um sistema de dupla deflexão é a redução do investimento específico de uma usina de dada capacidade.

(Por favor, o próximo slide)

O slide 9 apresenta os dados da Usina de Demonstração baseados na tecnologia disponível em 1982.

- A Usina de Demonstração será construída com dois tipos de estágios, cujas capacidades de sucção dos compressores estão relacionadas numa razão de 1 : 3. Este escalonamento permite alcançar uma eficiência da cascata de aproximadamente 90%. Como os estágios da Cascata Inicial, com capacidade de sucção de 33.000 m³/h, representam o tipo menor, os estágios maiores da Usina de Demonstração, considerados estágios de porte médio, em vista da Usina Comercial, terão capacidade de sucção dos compressores de aproximadamente 100.000 m³/h. Um estágio com este tamanho de compres

sor foi testado durante vários anos em Karlsruhe. Um protótipo avançado encontra-se em construção.

- Apesar dos diferentes tipos de elementos de separação e das diferentes condições operacionais, será possível integrar a Cascata Inicial na Usina de Demonstração, sem maiores problemas. Com o emprego da tecnologia de 1982, será esperado para a Usina de Demonstração um custo de trabalho de separação próximo ao padrão internacional.

(Por favor, próximo slide)

- Além dos dois tipos de estágios da Usina de Demonstração, um outro tipo de estágio está previsto para as usinas comerciais, com uma capacidade de sucção do compressor de 300.000 m³/h. Um protótipo correspondente está atualmente sendo construído pela NUSTEP, dentro do programa tecnológico. Para a implementação deste programa, foi construído, em conjunto pela NUSTEP e o KfK, o prédio apresentado no slide 10, no qual está sendo testado, também, o estágio avançado, de capacidade de sucção de 100.000 m³/h, referido anteriormente.

(Por favor, próximo slide)

- Os dados resumidos no slide 11 referem-se à usina comercial, baseado na tecnologia de 1982.
- Em comparação com a Usina de Demonstração, observa-se que para a usina comercial foi prevista uma menor concentração do rejeito. A redução no consumo específico de energia em relação à Usina de Demonstração é o resultado da melhor eficiência da cascata (3 em lugar de 2 tipos de estágios), eficiência mais alta dos compressores maiores e a contribuição relativamente menor do consumo de energia dos sistemas auxiliares.
- Para a usina segundo o slide 11 espera-se custos de trabalho de

separação comparáveis àqueles de usinas muito maiores e correspondentemente mais caras, empregando os outros processos de enriquecimento.

- A usina poderá suprir, continuamente, 10 a 12 reatores nucleares de grande porte. Assim, ela atenderá, não somente a demanda brasileira por um longo período, como também oferecerá capacidade disponível para dar início a exportação de urânio enriquecido. Considerando que o preço da usina será inferior ao preço de um dos reatores nucleares a serem por ela alimentados, o risco do investimento é tolerável, mesmo que a situação de demanda, a longo prazo, ainda seja incerta.

- Entretanto, para processar urânio no Brasil para fins de exportação, deverá ser necessária, a longo prazo, uma usina com capacidade aproximadamente três vezes superior. No processo de separação por jatos centrífugos, a maneira mais econômica para conseguir um aumento da capacidade, é a elevação da pressão, uma vez que ela permite manter os custos dos compressores, tubulações, válvulas e sistemas de controle praticamente inalterados. Como a condensação do UF₆ não ocorre na faixa de pressão considerada, devido a sua alta diluição, a pressão poderá ser aumentada na medida em que possam ser reduzidas as dimensões características do sistema de jatos centrífugos, em sua fabricação em série, a custos toleráveis. As perspectivas mais vantajosas são oferecidas pelas técnicas desenvolvidas para a produção de circuitos microeletrônicos. Estas técnicas tem se mostrado promissoras em ensaios preliminares, na fabricação de sistemas de separação por jatos centrífugos três vezes menores. Espera-se que uma tecnologia comercial correspondente esteja disponível para aplicações práticas em 1984.

- A usina comercial de separação por jatos centrífugos, cujos dados são mostrados no slide 11, alcançará uma capacidade de separação de 3.700.000 kg UTS/a, se a pressão for aumentada por um

fator de 3. O fluxo de alimentação de uma tal usina será de 5.640 toneladas de urânio natural por ano, necessitando de um suprimento total de energia de 1.250 MW. Ao longo de um período de operação de 25 anos, a usina poderá processar aproximadamente 2/3 das reservas de urânio atualmente conhecidas no Brasil, â custos de produto sensivelmente inferiores aos das outras tecnologias de enriquecimento.

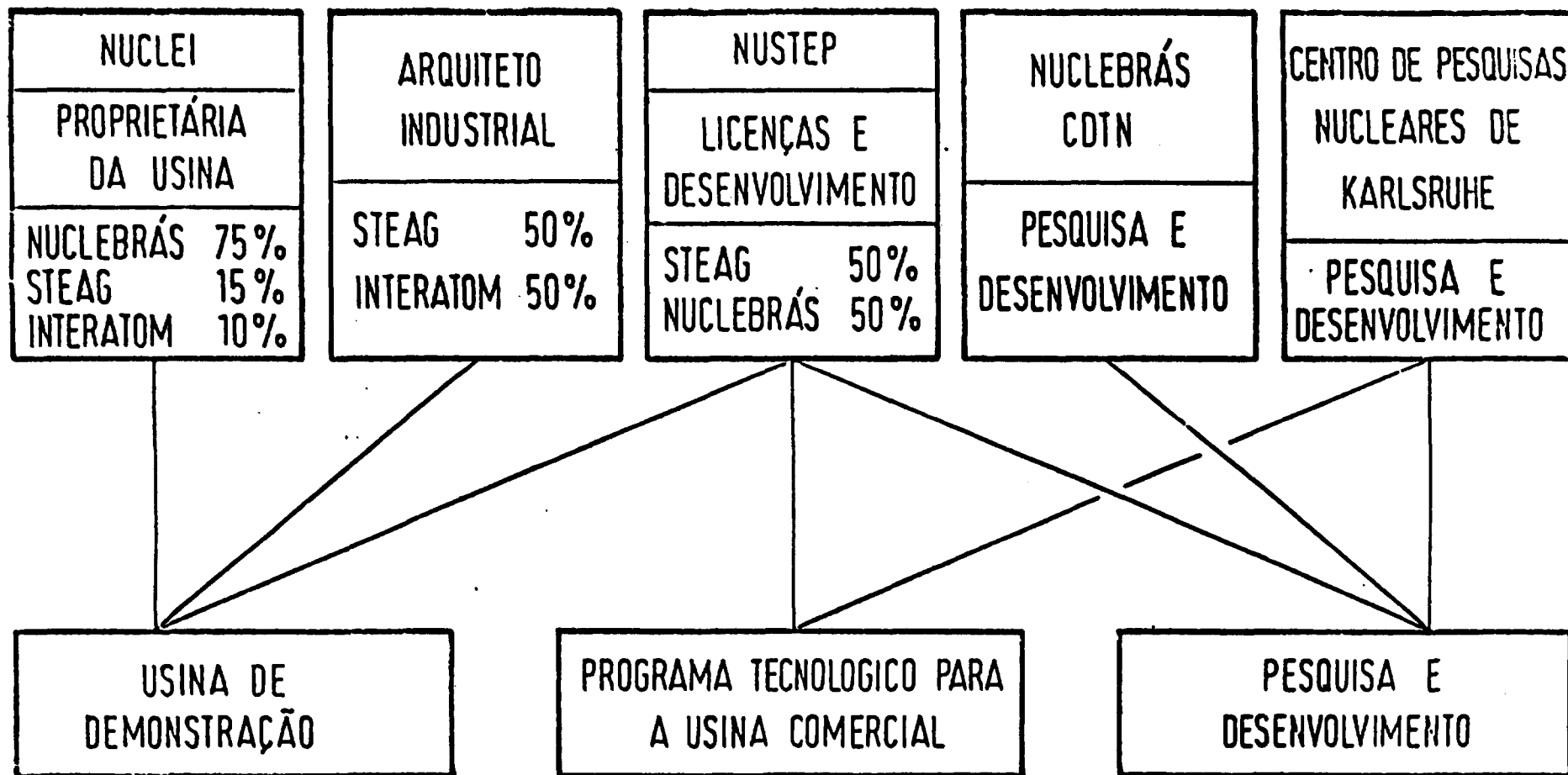
(Por favor, próximo slide)

- Dentro da cooperação teuto-brasileira, o prosseguimento do desenvolvimento do processo dos jatos centrífugos está sendo perseguido vigorosamente.
- Os trabalhos no Brasil concentrar-se-ão, no presente momento, em questões relacionadas com a operação da Cascata Inicial e com o planejamento da Usina de Demonstração. Com este objetivo foi transferida, de Karlsruhe para Belo Horizonte, a usina piloto de separação por jatos centrífugos de 10 estágios, mostrado no último slide. Com esta instalação serão, em primeiro lugar, otimizados os programas de comando, controle e monitoração da Cascata Inicial. Após a referida instalação ter sido adaptada para operar com os elementos de dupla deflexão, os correspondentes trabalhos serão executados para a Usina de Demonstração.
- Finalmente, pode-se constatar que o Brasil será, através da cooperação na industrialização e no prosseguimento do desenvolvimento do processo dos jatos centrífugos, co-proprietário de uma tecnologia moderna e firmemente estabelecida, que poderá ser usada com sucesso econômico também em outros países. Como a experiência de operação das usinas de jatos centrífugos em escala técnica será acumulada primeiramente no Brasil, cientistas e engenheiros brasileiros deverão efetuar importantes contribuições para futuros melhoramentos do método. É fora de dúvida que esta participação ativa no desenvolvimento e na implementação de uma mo

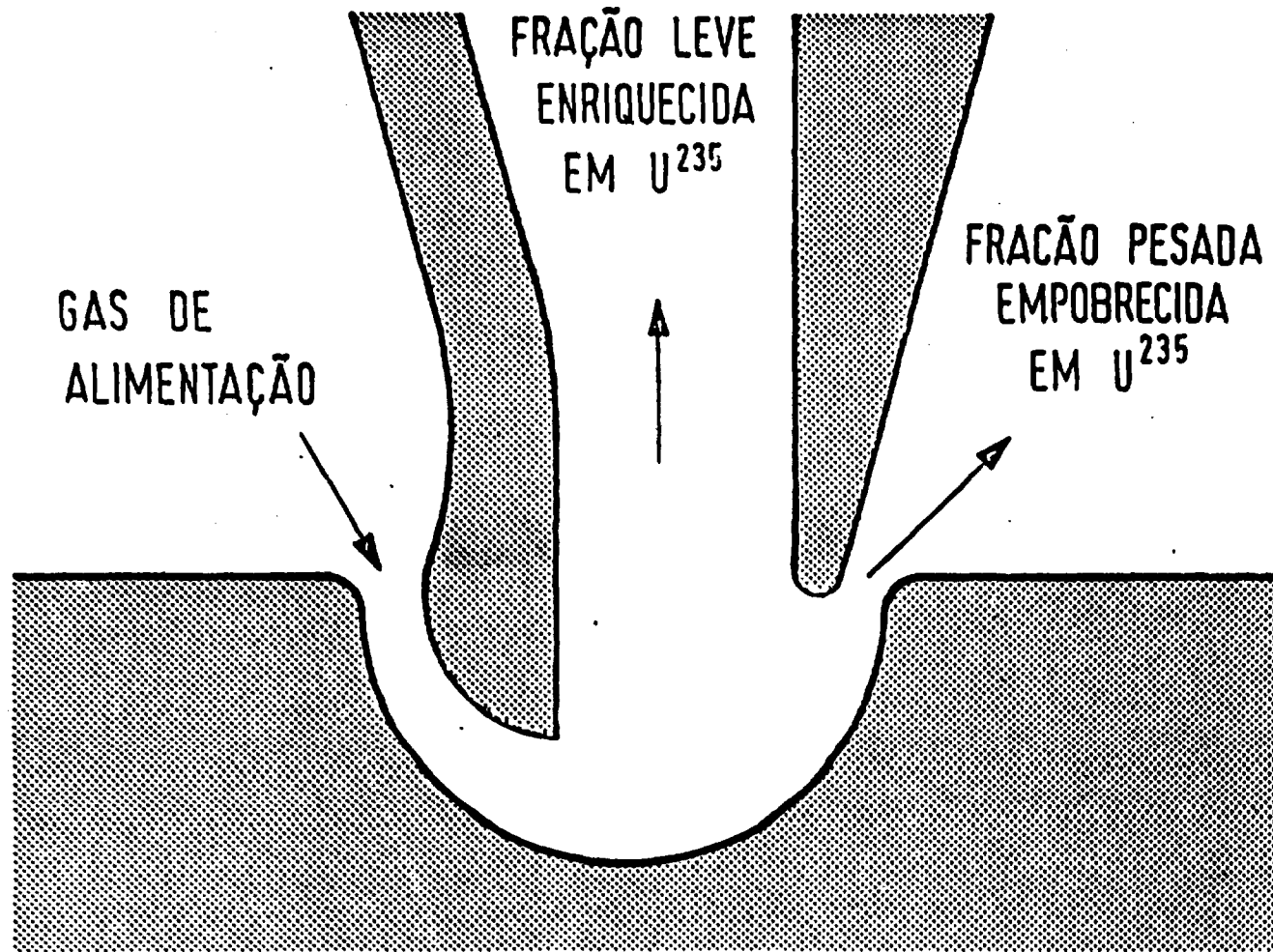
derna tecnologia estimulará outras atividades científicas e tecnológicas no Brasil.

- CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO NO BRASIL DE UMA DENOMINADA CASCATA INICIAL.
- AMPLIAÇÃO DA CASCATA INICIAL PARA UMA USINA DE DEMONSTRAÇÃO DE JATOS CENTRÍFUGOS.
- DESENVOLVIMENTO DE COMPONENTES PARA USINAS COMERCIAIS DE JATOS CENTRÍFUGOS DENTRO DO CONTEXTO DE UM CHAMADO PROGRAMA TECNOLÓGICO.
- DESENVOLVIMENTO E APERFEIÇOAMENTO FUTUROS DO PROCESSO DE JATOS CENTRÍFUGOS.

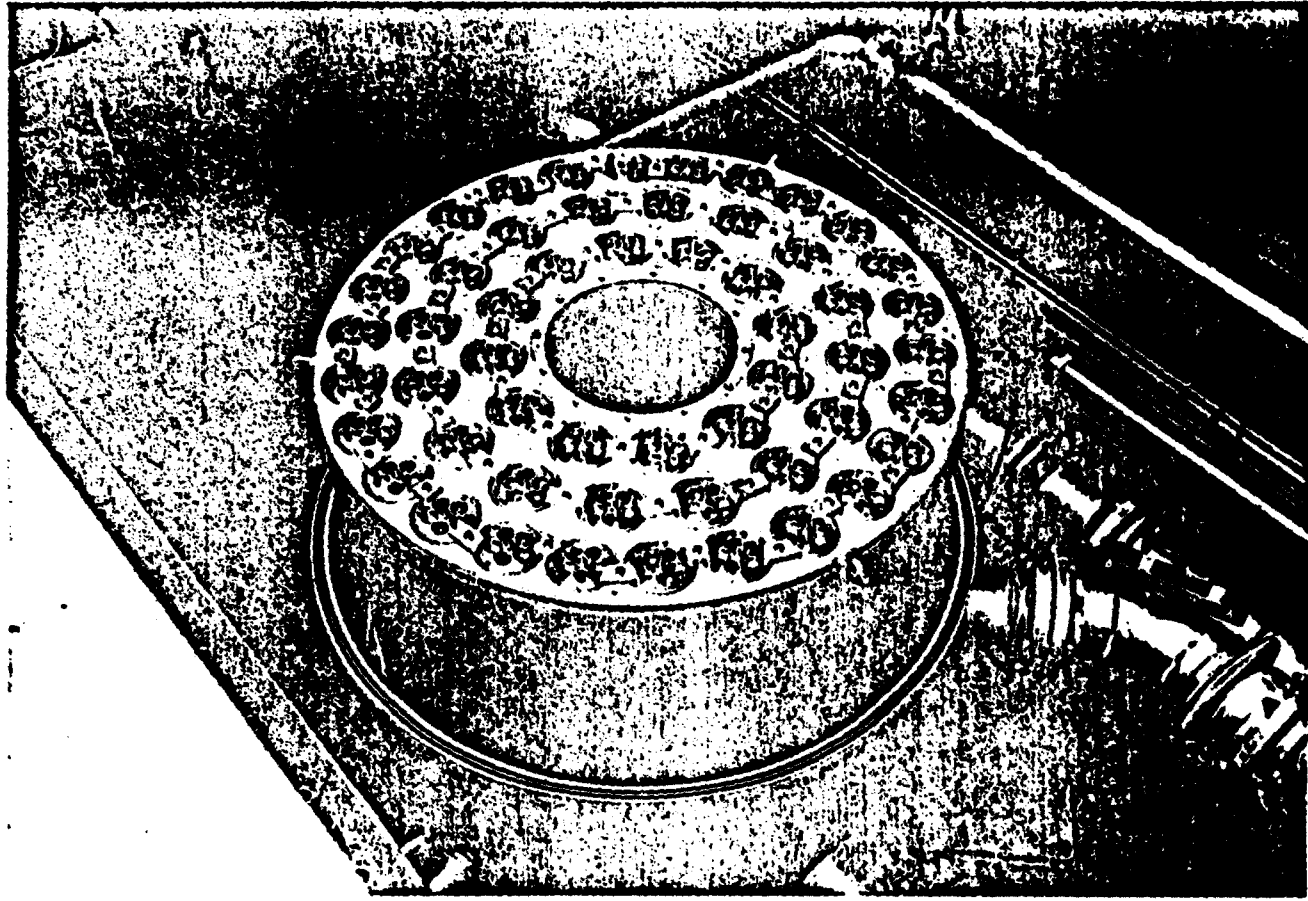
SLIDE 1 - Os OBJETIVOS PRIMÁRIOS DAS ATIVIDADES CONJUNTAS



SLIDE 2 - ORGANOGAMA PARA A IMPLEMENTAÇÃO COMERCIAL E APERFEIÇAMENTO DE PROCESSO DE SEPARAÇÃO POR JATOS CENTRÍFUGOS DENTRO DA COOPERAÇÃO TEUTO-BRASILEIRA

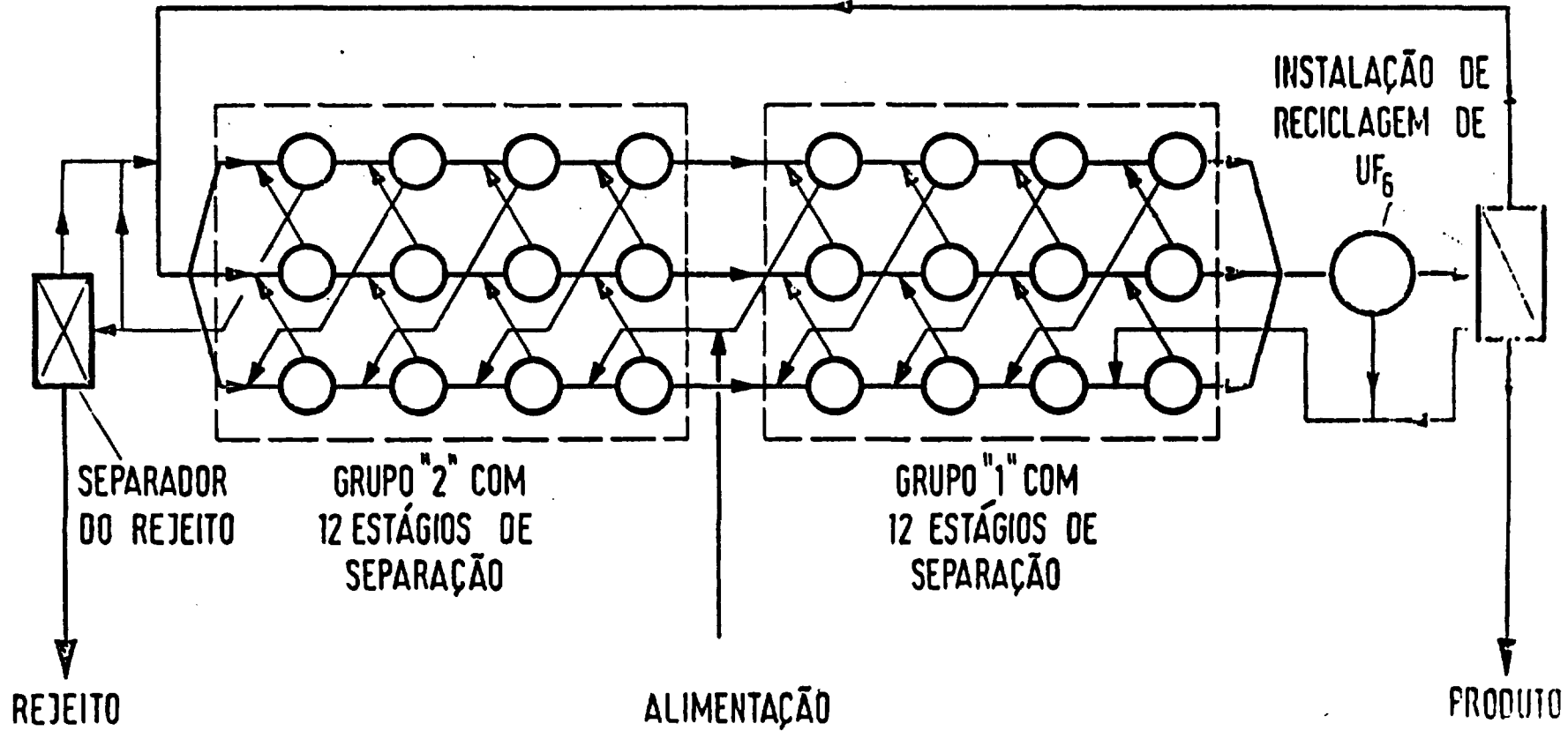


SLIDE 3 - SEÇÃO TRANSVERSAL DO SISTEMA DE SEPARAÇÃO POR JATOS CENTRÍFUGOS, COM DEFLEXÃO SIMPLES DO JATO, USADO NA CASCATAS INICIAIS

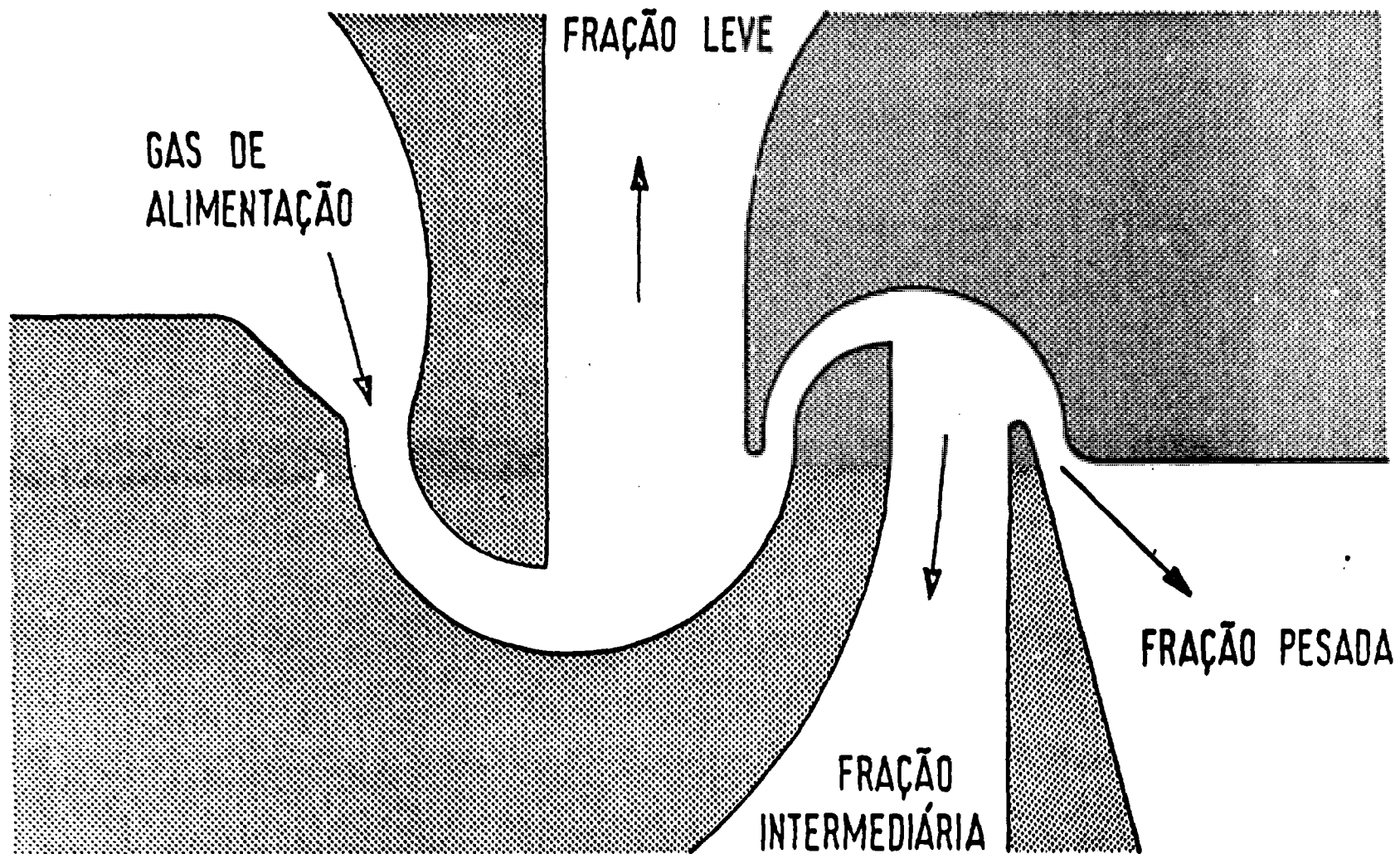


SLIDE 4 - COLOCAÇÃO DOS TUBOS DE ELEMENTOS DE SEPARAÇÃO NO CHAMADO PEQUENO
ESTÁGIO DE SEPARAÇÃO POR JATOS CENTRÍFUGOS

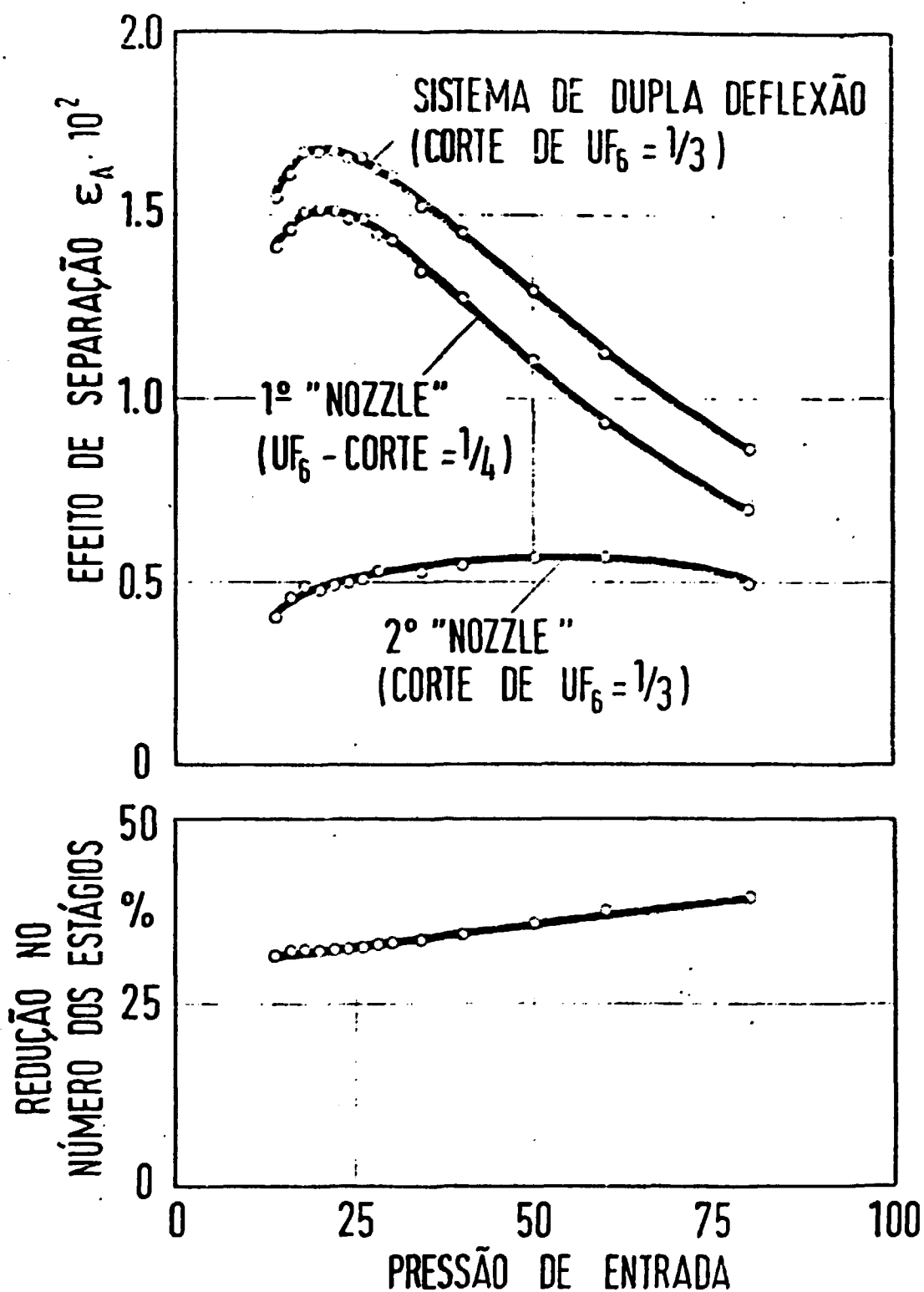
REALIMENTAÇÃO DO GÁS LEVE



SLIDE 6 - DIAGRAMA DA CASCATAS INICIAL COM SISTEMAS AUXILIARES



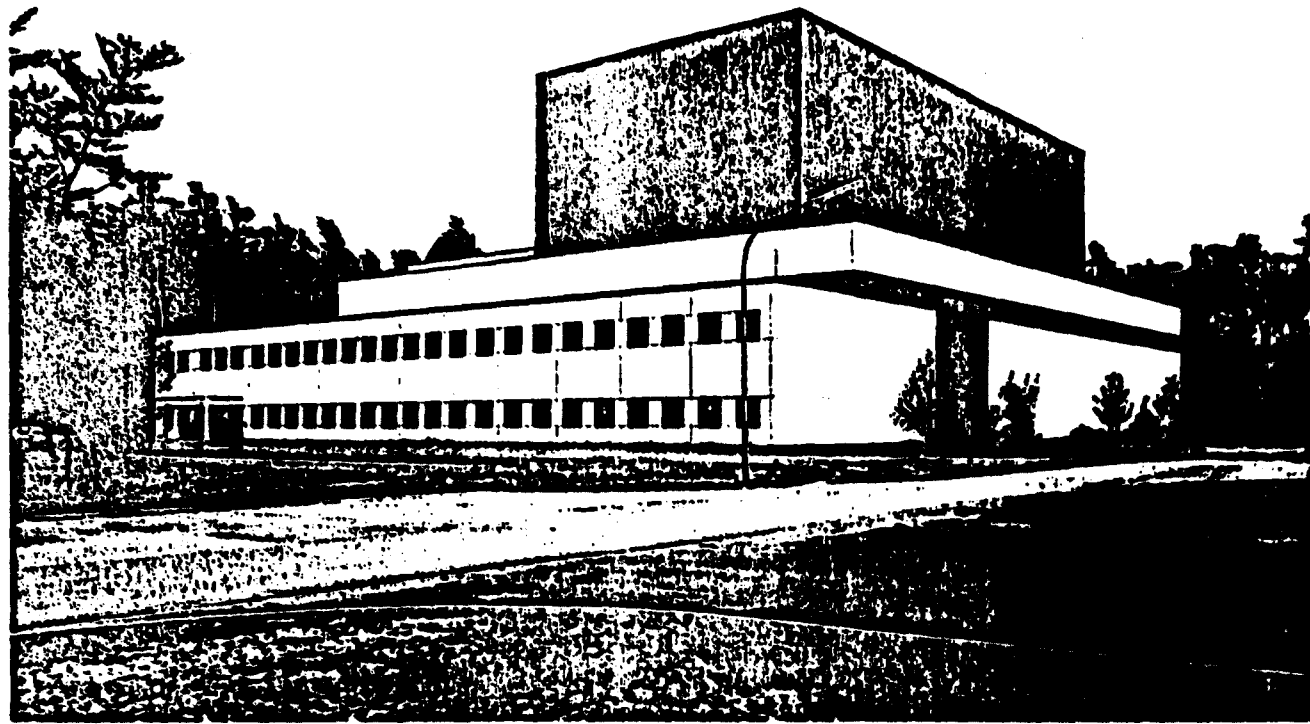
SLIDE 7 - SEÇÃO TRANSVERSAL DO SISTEMA DE SEPARAÇÃO POR JATOS CENTRÍFUGOS, COM DUPLA DEFLEXÃO DO JATO, A SER USADO NA USINA DE DEMONSTRAÇÃO E NA USINA COMERCIAL.



SLIDE 8 - EFEITO ELEMENTAR, DE SEPARAÇÃO ISOTÓPICA ϵ_A E REDUÇÃO DO NÚMERO DE ESTÁGIOS DE SEPARAÇÃO, COMO UMA FUNÇÃO DA PRESSÃO DO GÁS DE ENTRADA NO "NOZZLE" DO SISTEMA DE DUPLA DEFLEXÃO

Concentração do produto (% U235)	3,2
Concentração do rejeito (% U235)	0,35
Número de estágios pequenos	104
Número de estágios de tamanho médio	104
Capacidade de produção (kg UTS/a)	290.000
Suprimento total de potência elétrica (MW)	120
Consumo específico de energia (kWh /kg UTS)	3600
Alimentação de urânio natural (ton U/a)	662

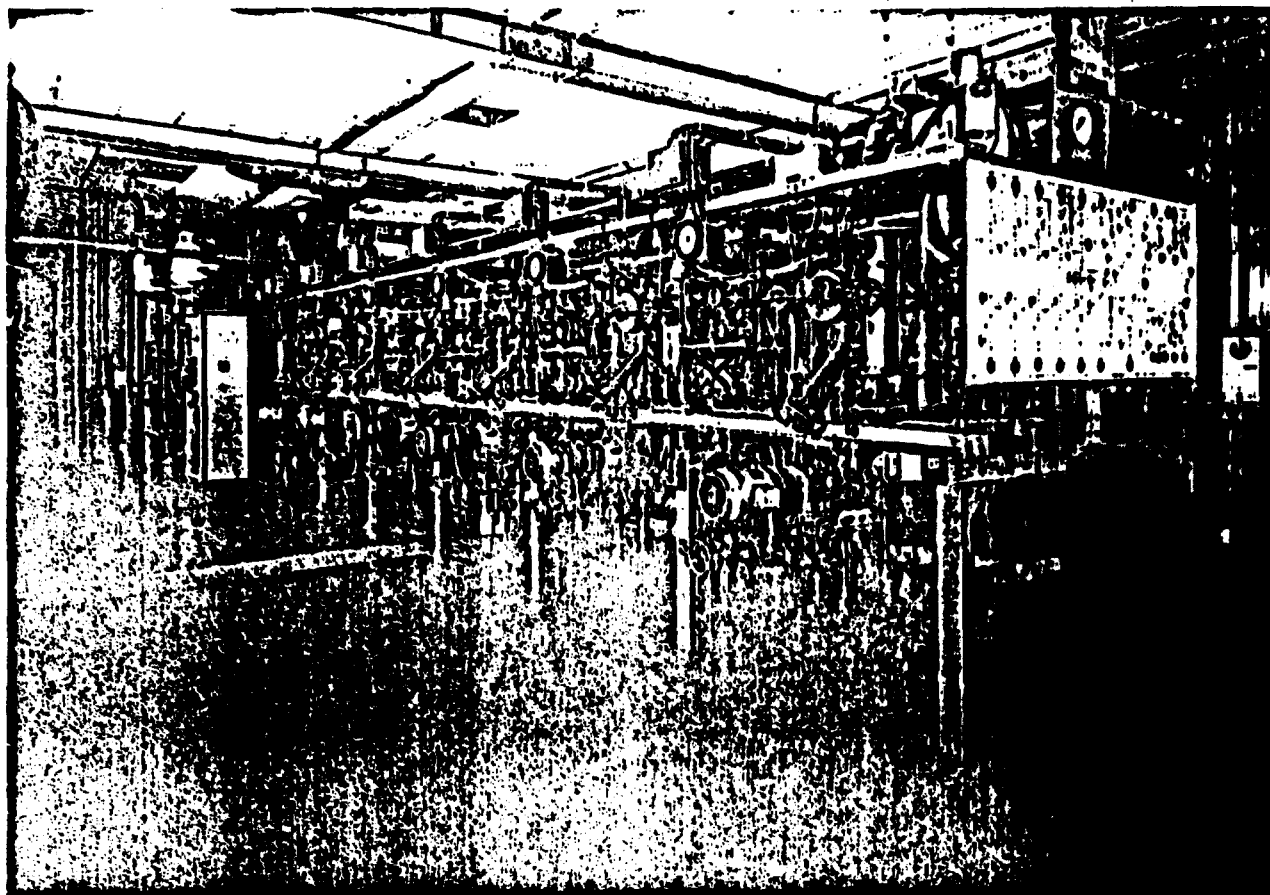
SLIDE 9 - DADOS DA USINA DE DEMONSTRAÇÃO DE SEPARAÇÃO POR JATOS CENTRÍFUGOS, COM BASE NA TECNOLOGIA DISPONÍVEL EM 1982.



SLIDE 10 - PRÉDIO CONSTRUÍDO EM CONJUNTO PELA NUSTEP E O KfK PARA A IMPLEMENTAÇÃO DO PROGRAMA TECNOLÓGICO.

Concentração do produto (% U235)	3,2
Concentração do rejeito (% U 235)	0,25
Número de estágios pequenos	40
Número de estágios médios	80
Número de estágios grandes	152
Capacidade de produção (kg UTS /a)	1.235.000
Suprimento total de potencia (MW)	430
Consumo específico de energia (kWh/kg UTS)	3020
Alimentação de urânio natural (ton U/a)	1880

SLIDE 11 - DADOS DE UMA USINA COMERCIAL DE SEPARAÇÃO POR JATOS CENTRÍFUGOS BASEADOS NA TECNOLOGIA DISPONÍVEL EM 1982.



SLIDE 12 - USINA PILOTO DE SEPARAÇÃO POR JATOS CENTRÍFUGOS DE 10 ESTÁGIOS, TRANSFERIDA DE KARLSRUHE PARA BELO HORIZONTE