



**APLICAÇÃO DA ENERGIA NUCLEAR NA SIDERURGIA E A
UTILIZAÇÃO DO XISTO COMO FONTE DE REDUTORES**

CLAUDIO A. SCARPINELLA e ROBERTO Y. HUKAI

PUBLICAÇÃO IEA N.º 335
Abril — 1974

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
Caixa Postal 11049 (Pinheiros)
CIDADE UNIVERSITÁRIA "ARMANDO DE SALLES OLIVEIRA"
SÃO PAULO — BRASIL

**APLICAÇÃO DA ENERGIA NUCLEAR NA SIDERURGIA E
A UTILIZAÇÃO DO XISTO COMO FONTE DE REDUTORES**

Claudio A. Scarpinella e Roberto Y. Hukai

**Coordenadoria de Engenharia Nuclear
Instituto de Energia Atômica
São Paulo - Brasil**

**Publicação IEA Nº 335
Abril - 1974**

Instituto de Energia Atômica

Conselho Superior

Eng^o Roberto N. Jafet – **Presidente**
Prof.Dr.Emilio Mattar – **Vice-Presidente**
Prof.Dr.José Augusto Martins
Dr.Affonso Celso Pastore
Prof.Dr.Milton Campos
Eng^o Helcio Modesto da Costa

Superintendente

Rômulo Ribeiro Pieroni

APLICAÇÃO DA ENERGIA NUCLEAR NA SIDERURGIA E A UTILIZAÇÃO DO XISTO COMO FONTE DE REDUTORES

Claudio A. Scarpinella e Roberto Y. Hukai

RESUMO

É esperado um progressivo encarecimento dos processos atuais de fabricação - baseados no uso de altos fornos e conversores LD, ligado ao aumento do preço do coque no mercado internacional. Os novos processos siderúrgicos, que usam redução direta e fornos elétricos, por outro lado, utilizam gás natural e nafta como fontes de gás redutor - cujo preço e disponibilidade para o futuro também são problemáticos, principalmente para o Brasil. Um complexo siderúrgico nuclear baseado na utilização dos xistos betuminosos brasileiros para instalações de redução direta é proposto, tendo em vista a utilização ótima de recursos naturais nacionais.

1. INTRODUÇÃO

No amplo debate que vem sendo travado sobre os problemas de abastecimento de redutores e de energia à siderurgia nacional, vez por outra se tem mencionado a perspectiva de uso da energia nuclear^{(1), (2), (3)}. Entretanto, pouco ou nada se publicou no Brasil sobre a forma desse uso. Neste trabalho procuramos expor os fatos mais importantes ligados à aplicação de energia nuclear, de modo a fornecer uma orientação inicial sobre as suas possibilidades para o Brasil, e dos problemas a serem resolvidos antes que ela se efetive. Aqui também, propomos o aproveitamento do xisto betuminoso (folhelho pirobotuminoso) como fonte básica de hidrocarbonetos para a redução de redutores gasosos de minério de ferro como alternativa ao uso do carvão coqueificável.

Antes de entrar nos processos diretamente ligados à siderurgia, convém colocar algumas características gerais da energia nuclear.

A primeira aplicação pacífica da energia nuclear que alcançou grande expressão econômica é a geração de energia elétrica por centrais nucleares. A potência instalada, que no mundo ocidental era de 30.000 MW em 1972, vem crescendo a uma taxa de 25% ao ano, devendo predominar na geração de energia elétrica até o fim do século. Seu custo de geração já é inferior ao de qualquer unidade térmica convencional, salvo condições locais excepcionais.

Nas centrais nucleares a energia elétrica é gerada de maneira perfeitamente similar à das centrais térmicas a combustíveis fósseis. Um sistema nuclear de fornecimento de vapor substitui a fornalha e caldeira das centrais convencionais, e consiste no conjunto do reator (onde o calor é gerado) e dos geradores de vapor e trocadores de calor. O vapor gerado, que é saturado ou superaquecido, conforme o tipo de central nuclear, expande-se em turbinas convencionais em geral de 1800 ou 3600 rpm.

Contudo, o calor transmitido ao vapor também pode ser utilizado diretamente em vários processos químicos e metalúrgicos que requerem calor para o aquecimento dos reagentes a determinadas temperaturas, e para a efetivação de reações endotérmicas. Este calor é atualmente fornecido pela queima de combustíveis fósseis. Devido ao aumento de preços destes

combustíveis, o calor de processo nuclear vai se tornando a alternativa mais barata e já era assim previsto na Alemanha, em 1971⁽⁴⁾.

Como os reatores em geral utilizados na atualidade - os reatores de água leve, fervente ou pressurizada - tem uma temperatura de saída do refrigerante não superior a 350°C, suas possibilidades de aplicação como geradores de calor de processo de origem nuclear são limitadas. Um terceiro tipo de reator, mais avançado que os reatores de água leve, e que deverá alcançar uma importância crescente nos próximos anos, é também o que tem melhores características para a geração de calor nuclear. Trata-se do reator de alta temperatura refrigerado a gás (HTGR, High Temperature Gas Cooled Reactor) fabricado pela General Atomic, EUA. Este reator encontra-se hoje no início de sua aplicação comercial e resulta da evolução de uma tecnologia que surgiu praticamente na mesma época dos reatores de água leve - a dos reatores refrigerados a gás (GCR) desenvolvidos inicialmente na Inglaterra e França. O primeiro HTGR de demonstração, de 300 MW (elétrico) encontra-se atualmente em início de operação nos Estados Unidos, e já foram encomendadas centrais num total de mais de 5000 MW. A figura 1⁽⁵⁾ mostra em esquema as características principais dos dois tipos de reatores de água leve, e do HTGR.

2. OS REATORES DE ALTA TEMPERATURA PARA CALOR DE PROCESSO.

O desenvolvimento dos reatores de alta temperatura para a produção de eletricidade alcançou relevo na Inglaterra, Alemanha e particularmente nos Estados Unidos. O combustível nuclear do HTGR encontra-se disseminado no caroço do reator em forma de microesferas de UC_2 com menos de 500 μ de diâmetro revestidas por camadas de carbono pirolítico e carvão de silício dando um diâmetro total inferior a 1 mm. O revestimento constitui-se num vaso de pressão que impede a liberação dos produtos de fissão altamente radioativos para o circuito do refrigerante primário. Nos reatores americanos, microesferas encontram-se distribuídas em uma estrutura de bloco de grafita perfurados, através dos quais passa o gás refrigerante, que é o hélio. Uma variante desses reatores, o THTR, desenvolvido na Alemanha, tem as microesferas de combustível disseminadas em bolas de grafita de 6 cm de diâmetro que preenche um vaso de pressão de forma afunilada e que constitui o caroço do reator. O refrigerante desse reator é também o hélio. A temperatura média do hélio nesses reatores destinados à produção de energia elétrica, é de 760°C. Com o redimensionamento dos canais de refrigeração e pequenas modificações mecânicas, a temperatura pode ser aumentada para 850°C.

A faixa de temperaturas visada em muitas aplicações de calor de processo, de 850°C à 1200°C, exige um esforço de pesquisa e desenvolvimento no setor de materiais que é uma função direta da temperatura requerida. Programas de pesquisa e desenvolvimento neste setor, cada vez mais intensos, estão sendo levados a efeito particularmente na Alemanha e no Japão para aplicação de calor nuclear na siderurgia. Vários estudos preliminares já foram feitos para o projeto de um reator que funcione dentro das especificações. Espera-se ter uma instalação de demonstração antes de 1990.

3. USO DA ENERGIA NUCLEAR NA SIDERURGIA

A concepção corrente de uso de energia nuclear na siderurgia consiste num complexo integrado de redução direta de minério de ferro (bitolado ou em pelotas) e refino em forno elétrico de ultra-alta potência. O processo de laminação pode ser agregado ao complexo, ou

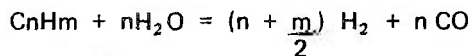
receber energia elétrica da rede. O redutor é o gás resultante da reforma do gás natural ou da nafta.

O reator fornece energia térmica no processo de reforma do redutor e reaquecimento do gás redutor e fornece energia elétrica para o forno de U A P, e outras finalidades da usina.

O complexo siderúrgico nuclear é limitado na escala pela capacidade mínima capaz de fornecer energia térmica ou elétrica a custos favoráveis, que é de 2200 MW a 3000 MW. Este fator de escala provém da complexidade das instalações de um reator nuclear, no qual o custo dos componentes e sistemas foi otimizado para produzir eletricidade pelo menor preço.

Um esquema de complexo siderúrgico integrado é mostrado na figura 2, identificando os principais fluxos de energia.

O que torna o complexo siderúrgico integrado particularmente atraente do ponto de vista econômico é a utilização mais eficiente do calor gerado no reator. Assim, em um esquema típico, o hélio sai do reator com uma temperatura de 950°C. Este hélio troca calor no reformador, onde o metano (ou a nafta) produz o gás redutor, segundo uma reação do tipo

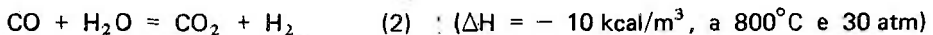


ou, no caso do metano

(1)



O monóxido pode ser trocado por hidrogênio segundo a reação

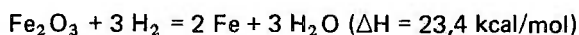


que ocorre simultaneamente, e cujo equilíbrio, assim como o da reação⁽¹⁾, depende das condições termo-químicas do processo.

Controlando essas condições, pode-se ter H₂ puro ou uma mistura H₂ + CO para a redução. O H₂ puro é preferível, para reduzir ou eliminar o carbono no produto ferro-esponja; na temperatura de redução considerada, o redutor predominante é o H₂, devido à baixa velocidade de reação com o CO.

Depois de minimizados os teores de H₂O e CO₂ no gás redutor (no primeiro caso por condensação, no segundo por lavagem química), o gás redutor vai para um aquecedor, onde recebe calor de gás hélio proveniente do reator, e em seguida para o forno de redução. Neste, o minério é carregado após pré-aquecimento a temperaturas de 200 - 300°C, e se aquece mais em contracorrente com os gases que fluem; a redução a ferro metálico ocorre entre 570°C e 900°C.

O calor fornecido através do gás redutor em parte eleva a temperatura do minério e em parte dá conta da endotermicidade das reações de redução, que podem ser resumidas na reação



O hélio, que forneceu calor no reformador e no trocador de calor tem agora uma

temperatura média de 750°C e uma pressão de 40 a 60 atm. Estas são as condições de hélio na saída do caroço de um reator HTGR comercial de produção de energia elétrica. Assim, ele cede calor em geradores de vapor que vão acionar turbinas e gerar eletricidade com uma eficiência térmica de 39%. Esta eletricidade é fornecida ao processo de refino de aço em fornos elétricos, que são carregados com o ferro esponja produzido por redução direta.

A tabela I⁽⁶⁾ mostra o balanço do calor gerado pelo reator num caso típico estudado.

4. ALTERNATIVAS ABERTAS.

A concepção do complexo siderúrgico integrado não é única, devido a várias razões.

Primeiro, os processos de redução direta de minério de ferro não foram ainda exaustivamente estudados; além disso seus resultados são muito dependentes da qualidade e forma do minério, e do tipo de redutor de que se parte (gás natural, nafta ou algum outro hidrocarboneto).

Questões como o uso de H₂ puro ou uma mistura de H₂ + CO, os teores admitidos de CO₂, H₂O e CH₄ no gás redutor, temperatura no reformador, pressão do gás redutor, temperatura no forno de redução, tipo de processo de redução - em forno de cuba ou em leito fluidizado, só começaram a ser estudadas recentemente^{(6), (7)}. O número de alternativas sendo alto, e o sistema complexo, não se pode afirmar ainda que um determinado processo supere todos os demais do ponto de vista técnico ou econômico.

Concretamente, podemos prever problemas de pesquisas e desenvolvimento como os seguintes⁽⁸⁾:

1. Troca de calor ao nível do caroço do reator: Ao passar de 850°C a 950°C e 1100°C, haverá problemas de contenção mecânica das partículas (microesferas) revestidas de combustível. As microesferas de UC₂, revestidas de carbono pirolítico, quando submetidas a gradientes de temperatura em matrizes de grafita a temperaturas superiores a 1200°C apresentam um fenômeno conhecido como "Efeito Ameba" em que as microesferas tendem a emigrar para fora do revestimento de carbono pirolítico rompendo a contenção e possibilitando o escape de produtos de fissão ao meio exterior. Contudo, estudos recentes realizados por A. Naoumidis⁽¹⁴⁾, indicam possíveis soluções para este problema ao se alterar a composição química das microesferas de combustível introduzindo-se elementos como zircônio e nitrogênio nas mesmas.
2. Troca de calor entre o circuito primário, de hélio e o processo de reforma: Por razões de corrosão de materiais dos componentes dos trocadores de calor e conseqüentemente as suas implicações na segurança do reator, seria necessário um circuito intermediário, preferivelmente também de hélio, entre o circuito primário e o circuito dos gases redutores.
3. Na interface entre o circuito primário e o intermediário deve haver estanqueidade e/ou um diferencial de pressão suficientes para impedir a difusão ou o vazamento de hidrogênio através dos tubos dos trocadores de calor para o circuito primário do refrigerante. O H₂ corroi a grafita, que constitui a estrutura da parte ativa do reator.

4. Na interface circuito intermediário/reforma, há o problema de manutenção de tubos mantendo uma diferença de pressão de cerca de 40 atm, em presença do H_2 produzido. Há vantagens em manter o circuito intermediário a 60 atm (igual à do circuito primário) para melhorar a transmissão de calor e equalizar as pressões do circuito primário e do circuito secundário.
5. O reator deverá estar particularmente adaptado para o reaquecimento dos gases redutores. Os fenômenos de fragilização e de difusão do hidrogênio deverão ser caracterizados.

Um efeito que ainda exige mais estudos é o do encarecimento que a crise do petróleo traz para o gás natural e a nafta. Isto levou os estudiosos do assunto a voltarem os seus olhos para os processos de gaseificação do carvão como alternativa da nafta, para a produção de gás reductor.

Na gaseificação, seriam usados carvões não coqueificáveis, principalmente lignita. Devido a disponibilidade desta matéria prima, os alemães parecem estar na dianteira nos estudos para esse processo⁽⁹⁾; entretanto, seriam necessárias temperaturas da ordem de $1200^{\circ}C$ para o hélio, que embora sejam teoricamente viáveis, estão no limite da faixa de temperaturas possíveis, e exigirão um esforço de desenvolvimento bem maior.

No Japão, onde a dependência de fontes externas de carvão coqueificável é de 85%, o Governo projetou um programa de pesquisa e desenvolvimento abrangendo a construção de um reator protótipo de HTGR capaz de atingir temperaturas de utilização de $1000^{\circ}C$ para operação em fins desta década. Por outro lado, processos de redução direta estão sendo estudados em colaboração com as empresas siderúrgicas. Como condição básica deste projeto, a fonte de hidrocarbonetos para a produção do gás reductor seria o resíduo das refinarias de petróleo que compõe 5% do petróleo processado.

Economicamente mais promissor do que a gaseificação do carvão parece agora a gaseificação do querogênio do xisto betuminoso, para as condições brasileiras. Esta alternativa adquire características bastante significativas tendo-se em vista as escassas reservas de carvão, coqueificável ou não, no Brasil, as enormes reservas ferríferas brasileiras e a rápida expansão da produção siderúrgica projetada para o futuro. Por outro lado, existem tres opções para a exportação do ferro brasileiro cada qual com diferentes graus de conteúdo tecnológico:

- 1) a exportação de minério de ferro pelo preço de aproximadamente U\$ 10 dólares por tonelada exportada;
- 2) o ferro-esponja da ordem de U\$ 50 dólares por tonelada;
- 3) o aço de mais de U\$ 200 dólares por tonelada.

A inserção de conteúdo tecnológico nos produtos de exportação tem importância vital na balança de pagamentos do país.

A diminuição de dependência das fontes de carvão coque externas e o simultâneo aumento do grau de tecnologia do produto ferrífero de exportação tornam a alternativa do xisto betuminoso bastante atraente para um estudo de viabilidade técnica e econômica mais aprofundada.

5. XISTO BETUMINOSO

Não há estudos publicados sobre a utilização do calor nuclear para a extração seja do óleo de xisto seja para a extração de um gás redutor, integrando um complexo siderúrgico-nuclear ampliado. Entretanto, esta possibilidade parece promissora.

Os hidrocarbonetos podem ser extraídos por retortagem por gases quentes resultantes da combustão parcial do querogênio ou de parte do produto (óleo ou gás combustível), por aquecimento por bolas cerâmicas e por hidrogenação ou hidrogaseificação do xisto.

A Petrobrás vem desenvolvendo um processo do primeiro grupo para o xisto da formação de Irati (que tem as melhores perspectivas no Brasil), o processo Petrosix (fig. 3), enquanto o processo mais promissor nos Estados Unidos (que possuem as maiores reservas de xisto do mundo) é o Tosco, que troca calor de queima do coque de xisto através de bolas cerâmicas que circulam na retorta. (fig. 4).

Um outro caminho, que poderá ser o mais promissor para o uso da energia nuclear, parece ser o da hidrogenação. Em escala de laboratório, foi desenvolvido um processo nos EE.UU., o Pirochem, que inclui o aquecimento de hidrogênio a 500°C, e passagem deste por uma cama de xisto betuminoso. O hidrogênio e vapores de querogênio são conduzidos a um catalizador de cobalto-molibdênio. Um outro processo, de hidrogaseificação, desenvolvido pelo Institute of Gas Technology, converte 90 e 100% do querogênio no xisto em gás combustível a uma temperatura de 650°C - 710°C, e pressão de 140 atm. Este gás consiste principalmente numa mistura de metano e hidrogênio⁽¹⁰⁾.

A temperatura da ordem de 500 a 650°C e pressão de 71 atm, o óleo de xisto pode ser gaseificado de modo a obter-se uma forte percentagem de hidrocarbonetos gasosos (principalmente metano) e nafta⁽¹¹⁾.

Embora o xisto betuminoso brasileiro possua características um tanto inferiores às do americano (altos teores de umidade e de enxofre), elas não impedem que se extrapole os resultados já obtidos nos processos de hidrogenação e hidrogaseificação que citamos acima.

6. O COMPLEXO SIDERÚRGICO—NUCLEAR INTEGRADO AMPLIADO.

A proposta para o Brasil de um complexo siderúrgico-nuclear situado junto a uma jazida de xisto betuminoso tem características particularmente atraentes. Do que vimos acima, conclui-se ser possível estabelecer um processo unitário ou de dois ou três estágios obtendo-se gás redutor como produto principal ou sub-produto, utilizando calor de processo de um reator nuclear de alta temperatura refrigerado a gás.

A motivação geral da introdução do calor de processo nuclear deriva do fato de o valor projetado para os produtos a serem obtidos nos processos de reforma e de cracking, ser superior ao custo de calor nuclear. Assim, ao invés de queimar parte dos hidrocarbonetos, introduzimos calor nuclear para dar conta dos requisitos termodinâmicos e cinéticos (aquecimento a altas temperaturas) dos processos.

Na figura 5 está esquematizado o que seria um complexo siderúrgico - petrolífero nuclear,

baseado na exploração do xisto betuminoso.

É possível, a partir do estudo do balanço de massas, do balanço energético e das taxas de produção, otimizar o projeto de um tal complexo do ponto de vista econômico. A otimização compreende a determinação das capacidades de produção dos estágios dos processos compreendidos, levando-se em conta uma dissipação total mínima de energia, uma eficiência global máxima em termos de matérias primas utilizadas, e taxas de produção determinadas pelos estágios cujo fator de escala seja mais fortemente determinante na formação dos custos dos produtos. Tudo indica que este estágio no nosso caso é a produção de energia - um reator produzindo menos de 2000 MW térmicos no total não é econômico. Presentemente, reatores nucleares de alta temperatura de 3000 MW térmicos estão sendo oferecidos comercialmente nos EUA.

O projeto de estabelecimento de um complexo ótimo em termos de balanço de massas e de energias não deve ser encarado, entretanto, de um ponto de vista estático. Em um universo de condições econômicas com alto grau de imprevisibilidade de sua evolução, esta não seria a melhor solução, que poderia mesmo tornar-se inviável em alguma data futura. Ao mesmo tempo, é preciso que os processos que compõem o complexo não estejam rigidamente acoplados, de maneira que o efeito de interrupções das unidades seja mínimo para o funcionamento do todo.

O complexo siderúrgico-nuclear ampliado parece ter condições de prover as folgas necessárias no projeto.

Primeiro, a produção dos estágios do processo pode ser estocada ou vendida: do processamento do xisto betuminoso podem ser extraídos óleo, nafta, coque, gás liquefeito de petróleo, gás combustível. Todos estes produtos podem ser utilizados como matérias primas para a fabricação do gás redutor ou ser vendidos para outros fins. O ferro esponja produzido na unidade de redução direta, além de alimentar a produção de aço interna da usina, pode ser entregue ao mercado nacional de sucata de aço, no qual se esperam déficits crescentes de suprimento (para 1980, extrapolando-se as tendências atuais, o Brasil precisará importar cerca de 3,5 milhões de toneladas de sucata, a preços incertos, mas provavelmente altos)⁽¹²⁾. Outra aplicação do ferro esponja que tem sido estudada é o seu carregamento em altos-fornos, que poderia reduzir o "coke-rate" a cerca da metade do atual⁽¹³⁾.

Em segundo lugar, a existência de vários estágios absorvedores de calor de processo nuclear permite, para uma mesma capacidade do reator em MW térmicos, utilizar capacidades de produção menores para esses estágios. Em outras palavras, em um complexo industrial a escala dos estágios dependentes de um determinado componente com alto fator de escala diminui, quando o número desses estágios aumenta. No nosso caso, isto aumenta a flexibilidade para a fixação das taxas mínimas de produção de refinados e de ferro esponja.

Finalmente, diferentes processos ou condições físicas nos reatores dos estágios de cracking e de reforma podem resultar em diferentes proporções de gás redutor (e portanto de aço) e produtos refinados.

7. CONCLUSÕES.

Para um mercado mundial em que os redutores (e combustíveis) de origem fóssil usados

na siderurgia, particularmente o carvão coqueificável e o petróleo, se tornarão inevitavelmente cada vez mais caros, será preciso encaminhar os processos para o uso de fontes de energia que poupem ao máximo o uso dessas matérias primas. Dentre os processos utilizáveis, a redução direta com o calor de processo nuclear em um complexo siderúrgico integrado é o que está mais próximo da aplicação prática. Para o Brasil, a disponibilidade do xisto betuminoso em grandes quantidades (algumas estimativas otimistas indicam uma quantidade total de óleo extraível superior às atuais reservas mundiais de petróleo) pode determinar a instalação de tais complexos nas jazidas desse combustível. A necessidade de se garantir o desenvolvimento siderúrgico a longo prazo (que implica na busca de custos mínimos de fabricação de aço) estabelece um alto prêmio para todo trabalho de pesquisa e desenvolvimento que se fizer nesse sentido. O esforço que tem sido dispendido em outros países, notadamente a Alemanha e Japão, tem sido em direção análoga à que se propõe neste momento para o Brasil.

ABSTRACT

A progressive increase in the costs of contemporary steel making process based on the blast-furnace and LD converters - is expected, due to the increase of the coke prices in the international market. New steel making processes using direct reduction an electric furnances are themselves based on the use of natural gas or light hydrocarbons, for wich the supply in the future at steady prices is at least problematic, mainly for a country like Brazil. A stellmaking-nuclear complex based on the utilization of Brazilian oil shales for the direct reduction process is proposed, having in mind the optimal utilization of domestic natural resources.

BIBLIOGRAFIA

1. Labarrure, F. J. "A Eletricidade e o Futuro da Siderurgia Brasileira". Simpósio de Eletrosiderurgia da ABM em Salvador, Bahia, 1968.
2. Poubel, E. V., E. M. Oliveira e M. P. M. Lopes. Análise das Perspectivas do Uso de Redutores na Siderurgia Brasileira. Seminário Latino Americano sobre "A Redução Direta dos Minérios de Ferro e sua Aplicação na América-Latina" México, Nov. 1973, p. 38.
3. A Siderurgia no Brasil. Conjuntura Econômica, 28, 1, jan. 1974, p. 81.
4. Bode, K. H., "Uses of High Temperature Reactors for the Generation of Process Heat" *Kerntechnik* 13, 3, p 109 (1971).
5. Scarpinella, C. A. - Análise Custo-Benefício para a Implantação da Industria Nuclear no Brasil. Dissertação de Mestrado, EPUSP, 1972.
6. Angelini, A., et al., "HTRCP : High Temperature Reactor for Chemical Purpose (an Application for the Steel-Making Industry)", relatório EUR 4684, Comunidade Européia de Energia Atômica, ago. 1971.
7. Elmisch, K., et al., "Concept of a Compound Plant with a High Temperature Reactor for Steel Production", *Kerntechnik* 15 1, 9 (1973); 15, 2, 80 (1973); 15, 3, 121 (1973).
8. Siebker, M. e H. Martin. "L'utilisation du Chaleur Nucléaire à Haut Temperature en Chimie et Metallurgie" *Energie Nucleaire* 13 4, p. 275 (julho 1971).
9. Schulten, R. et. al. "The application of Nuclear Process Heat for Process Techniques". Fourth United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy. Genebra, Suíça.
10. "Shale Oil ... the Problems and the Prospects. "The Oil and Gas Journal. Março, 1964, p. 73.
11. Cottingham, P. L. e H. C. Carpenter. "Catalytic Gasification of Shale Oil", in Fuel Gasification - Simposium at the 152nd Meeting of the American Chemical Society. American Chemical Society, Washington, D. C. (1967).

12. Poubel, E. V. "Disponibilidade, Coleta e Preparação de Sucata". Siderurgia, nº 41, Dez. 1973.
13. Kobayashi, T., et al., "Probable Applications of Nuclear Energy to Blast Furnace Process with an Emphasis in Direct Injection of Reformed Gas into Furnace Stack". Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, vol 11, 412 (1971).
14. Naoumidis, A. "Unterdrückung des Amoebeneffektes bei Beschichteten Brennstoffteilchen mit Carbidkern für Hochtemperaturreaktoren" Journal of Nuclear Materials, Vol 48 (1973) Nº 2.

TABELA 1

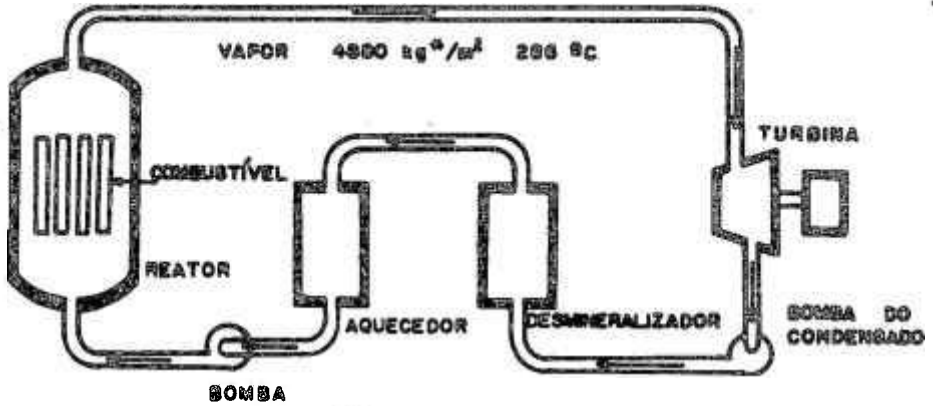
Balanço Térmico (MW) de um complexo siderúrgico-nuclear

1º caso: 12 loops primários, cada um com um trocador de calor de processo e um gerador de vapor, alojados numa cavidade comum do vaso.

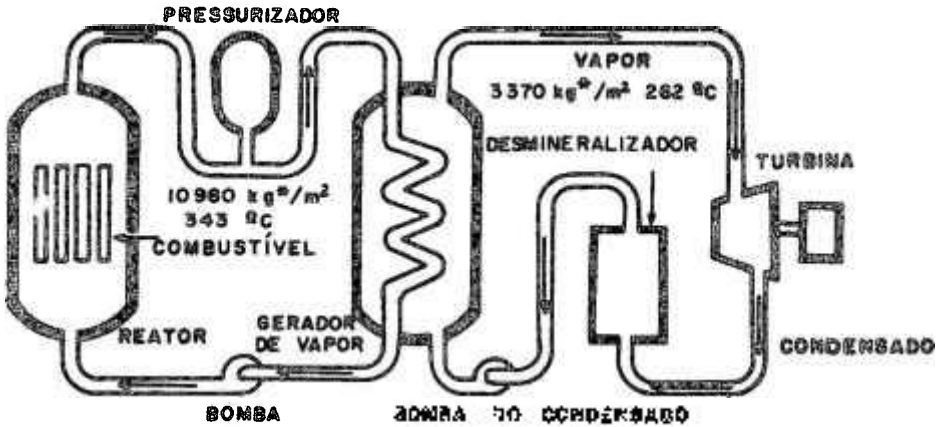
2º caso: os dois tipos de trocadores divididos em cavidades alternadas (6 de cada), sendo cada par de cavidades adjacentes ligadas por um duto intermediário.

	12 loops	6 loops duplos
Gerador de vapor-turbina e vapor de processo	1514 (600 MWe liq)	1520 (597 MWe liq)
Calor de processo de reforma do vapor	426	426
Preaquecimento de gases de redução	207	207
Aquecimento intermediário de gases de redução	71	71
Sub Total	2218	2224
Compressor	10	16
Calor Nuclear Total	2208	2208

REATOR DE ÁGUA FERVENTE (BWR)



REATOR DE ÁGUA PRESSURIZADA (PWR)



REATOR DE ALTA TEMPERATURA REFRIGERADO A GÁS (HTGR)

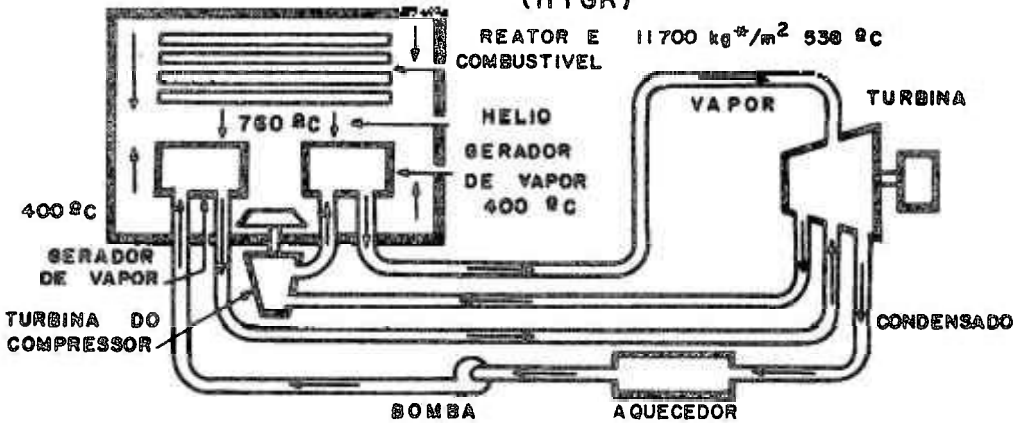


Fig. 1 - Esquemas dos Reatores da Água Leve e de Alta Temperatura Refrigerado a Gás

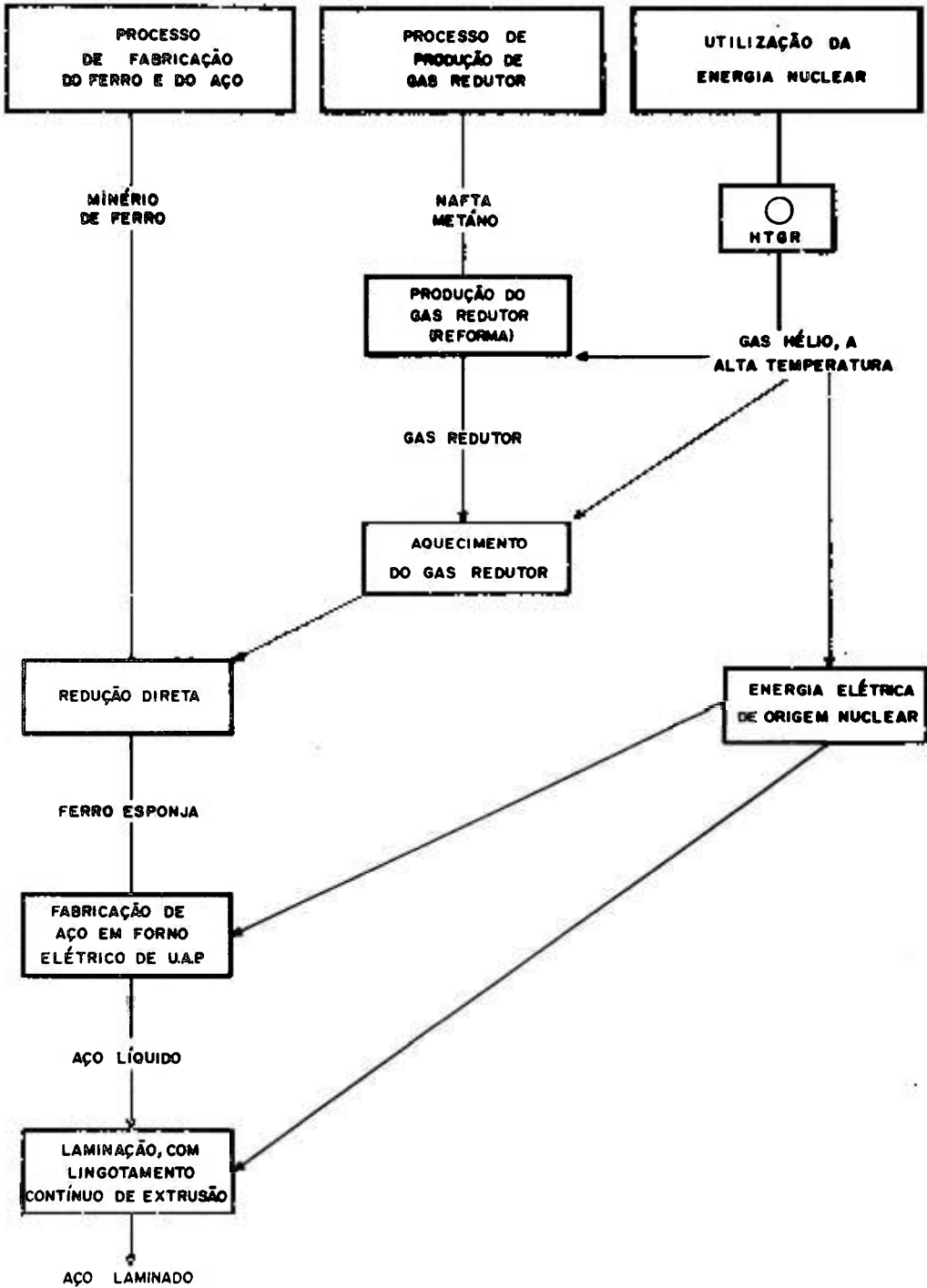


Fig. 2 - Esquema da utilização da Energia Nuclear na siderurgia a partir do HTGR.

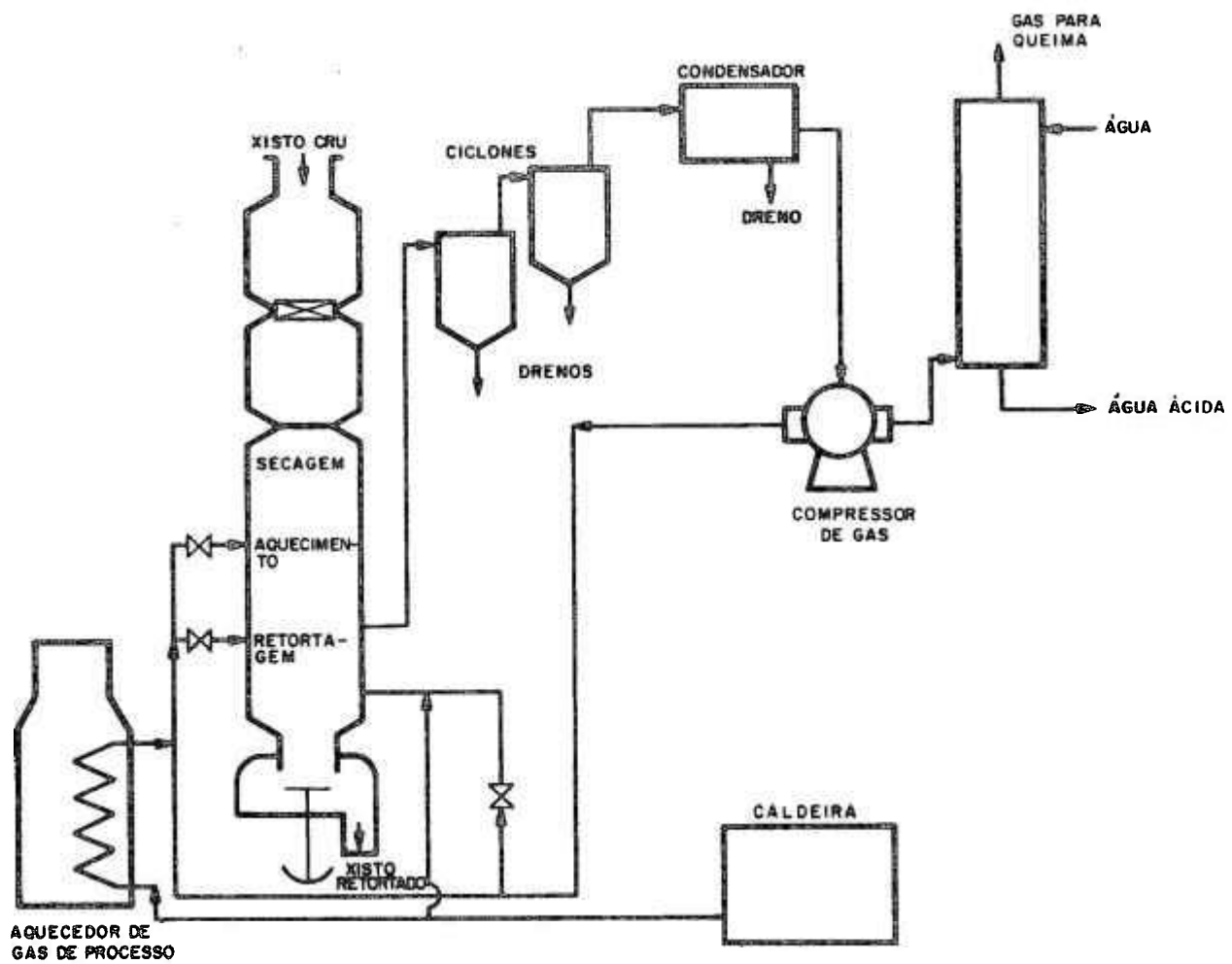


Fig. 3 - Diagrama simplificado do Processo Petrosix

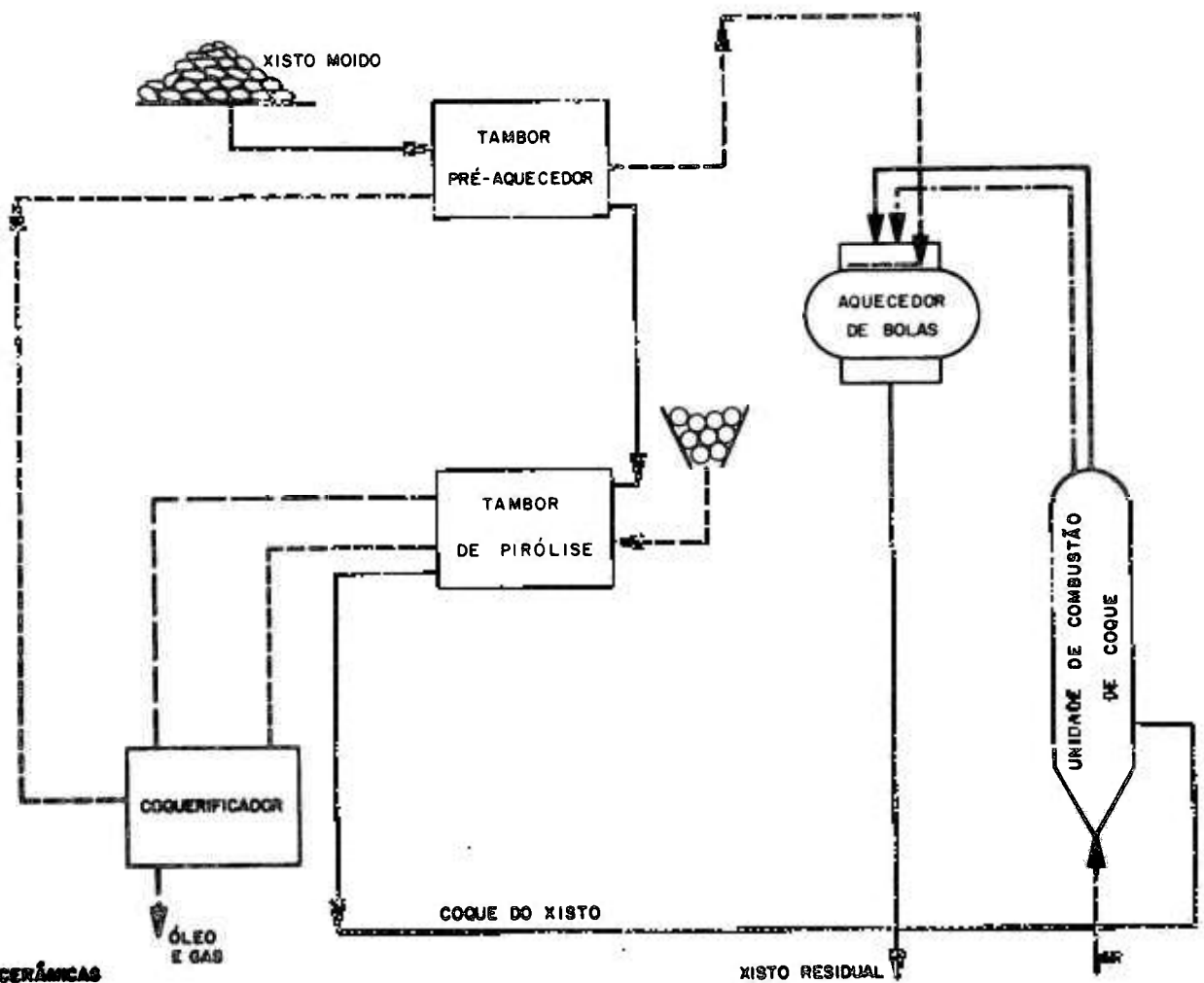


Fig. 4 - O processo TOSCO usa bolas cerâmicas para transportar calor para o xisto. Este método permite a retortagem do xisto em uma atmosfera livre de oxigênio⁽¹¹⁾

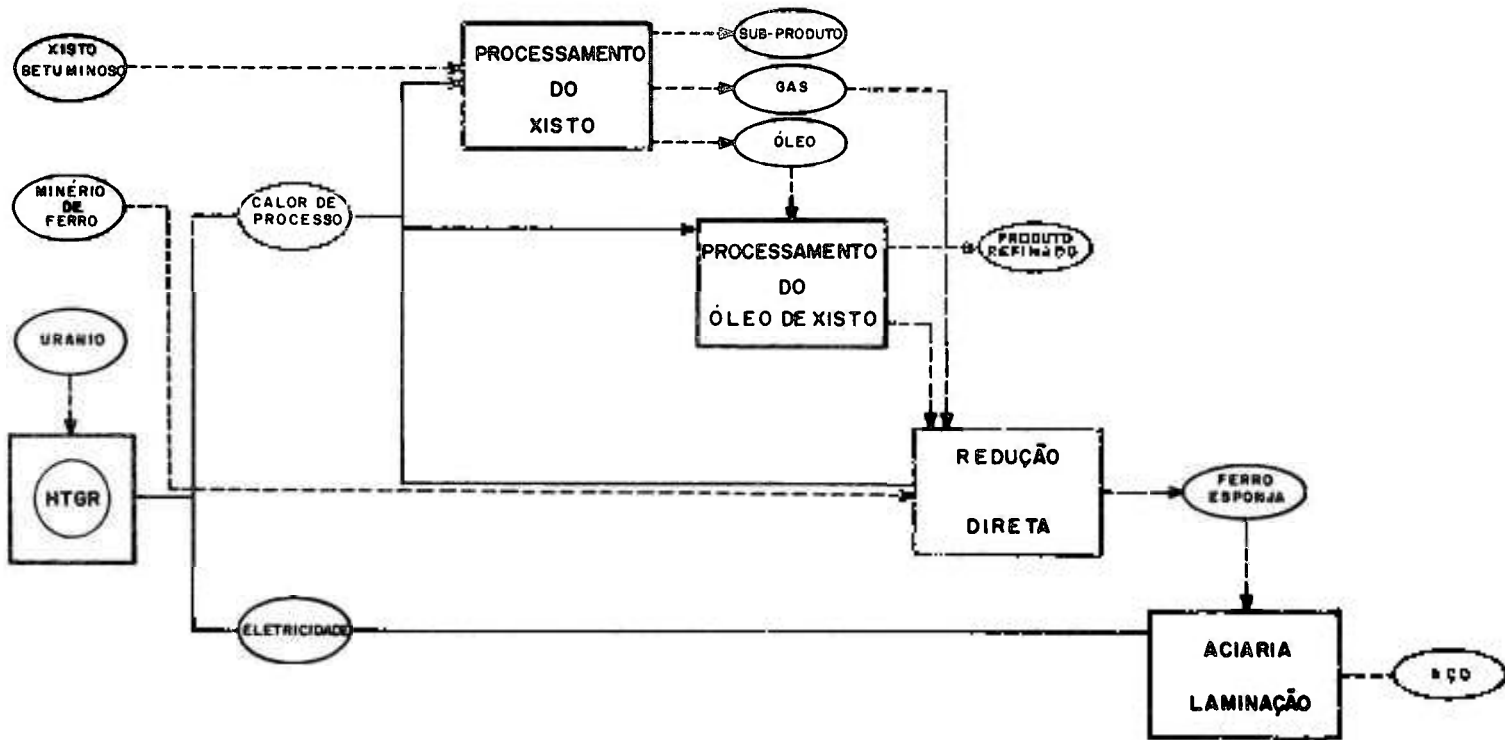


Fig. 5 - Esquema de um complexo siderúrgico-petrolífero utilizando-se o xisto betuminoso como fonte de hidrocarbonetos e uma central nuclear como fonte de energia térmica e elétrica.