

# INTEGRAÇÃO DE CICLOS DE COMBUSTÍVEIS HWR/PWR ENTRE ARGENTINA E BRASIL.

CRISTALLINI, O.\* , SANTOS, E.\*  
FERREIRA, P.I.\*\* , ANDRADE, G.G.\*\*  
\* COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA/ARGENTINA  
\*\* COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/IPEN-CNEN/SP.

## RESUMO

Os ciclos combustíveis LWR e HWR avançados que podem ser incorporados nos próximos anos são brevemente descritos, analisando-se de modo mais detalhado o ciclo TANDEM, quanto à economia, descontaminação química, conversão e aspectos relacionados à física de reatores, composição isotópica e gestão da carga de combustível enriquecido. A possibilidade de integração dos ciclos PWR do Brasil e CANDU da Argentina, via aplicação do ciclo TANDEM é analisada, evidenciando-se a conveniência desse ciclo, como meio de reduzir o custo de geração núcleo-elétrica para esses países.

## 1. INTRODUÇÃO

Os vários acordos de cooperação recentemente assinados por Argentina e Brasil, têm resultado num maior intercâmbio de conhecimentos científicos e tecnológicos em várias áreas.

As atividades nucleares desses países, caracterizadas na Argentina pela opção por reatores a água pesada (HWR) e no Brasil pelos reatores a água leve (PWR) apresentam particularidades interessantes no que concerne à reciclagem de combustíveis queimados. Uma colaboração nessa área entre CNEA e CNEN foi iniciada no final de 1990 com a troca de informações sobre reprocessamento de combustível e vem sendo ampliada com o intercâmbio de pesquisadores e reuniões técnicas em outras áreas do ciclo do combustível nuclear.

O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma primeira avaliação das possibilidades de integração de ciclos combustíveis HWR (Argentina) e PWR (Brasil), resultante de reunião técnica entre especialistas argentinos e brasileiros, realizada em junho de 1991, em Bariloche, na Argentina.

São a seguir introduzidos os ciclos de combustíveis avançados para reator LWR e HWR, com ênfase no ciclo TANDEM PWR-CANDU, para o qual são feitas considerações técnicas e econômicas. Apresentam-se alguns aspectos do ciclo do combustível nuclear na Argentina e no Brasil, enfocando especialmente os recursos uraníferos, a capacidade de geração núcleo-elétrica instalada e as experiências já acumuladas nas atividades de conversão, reproprocessamento e fabricação de combustíveis avançados, de forma a respaldar a viabilidade técnica e o interesse econômico na integração PWR-CANDU via ciclo TANDEM.

## 2. ALGUNS ASPECTOS DO CICLO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR NA ARGENTINA

A capacidade núcleo-elétrica instalada atualmente na Argentina é de 1 GWe e a projeção para 1995 é de 1,6 GWe com a introdução da Atucha II. Estimativas recentes de crescimento da capacidade núcleo-elétrica prevêem que este já instalado 2 e 5 GWe nos anos 2000 e 2030 respectivamente, o que elevaria a necessidade de urânio das atuais 150 t/a para 240 t/a em 1995, 320 t/a em 2000 e 800 t/a em 2030. A necessidade global acumulada de urânio alcançaria um valor ao redor de 20000 t no ano 2030.

A experiência acumulada na Argentina ao longo de 37 anos em prospecção, exploração, avaliação e beneficiamento de minerais de urânio, possibilitou a localização de 16000 t de  $U_3O_8$  recuperáveis, das quais somente 5000 t foram beneficiadas.

A capacidade atual de produção de urânio de 150 t/a é suficiente para cobrir a demanda presente das Centrais Atucha I e Embalse operando normalmente. A entrada em serviço de Atucha II, prevista para 1994, exigirá um aumento na produção de 90 t/a a partir de 1992, o que significará elevar imediatamente a capacidade de produção para 240 t/a e a 320 t/a, antes do ano 2000, com a entrada em serviço do quarto reator planejado. Para fazer frente a esse aumento de consumo e reposição de estoque dever-se-á aumentar a capacidade das instalações existentes e contar com novos centros de produção para o ano 2000, com uma perspectiva de custo de recuperação superior aos US\$130/kg atuais, devido ao empobrecimento das jazidas e às imposições do público quanto à minimização do impacto ambiental da mineração.

Consideradas a magnitude das reservas de urânio (16000t), as incertezas quanto à disponibilidade e preço do urânio, o incentivo para a implantação, no país, do ciclo TANDEM, que permite grande economia (-40%) no consumo de urânio, fica perfeitamente justificado.

O emprego do ciclo TANDEM pressupõe o domínio das tecnologias de reproprocessamento e a fabricação de combustíveis MOX. Na Argentina, entre 1967 e 1970 foram reproprocessados combustíveis MTR contendo urânio enriquecido a 20% oriundos do RAL. O conhecimento adquirido no empobrecimento foi utilizado na elaboração do projeto de uma unidade para o reproprocessamento de EC-MTR com enriquecimento de 90%, provenientes do RA3, cuja construção não foi concretizada. Em 1977 foi concluído o projeto e iniciadas a construção e montagem de uma planta experimental (LPR) com vistas ao reproprocessamento dos combustíveis da Central Atucha I. A capacidade projetada de processamento da planta LPR, de 5 t/a de EC queimados a 6000 MWd/tU com, 10 anos de resfriamento, permitirá recuperar cerca de 20 kg/a de plutônio. Essa planta tem hoje 80% de suas instalações concluídas.

As atividades voltadas ao desenvolvimento da tecnologia de combustíveis MOX iniciaram-se na Argentina no Centro Atômico Constituyentes com a inauguração da Facilidade Alfa, no ano 1975. Fo

ram investigadas várias etapas do processo de fabricação na rota de co-moagem e numerosas pastilhas foram fabricadas, o que consumiu cerca de 0,5 kg de  $PuO_2$ . Em 1988 completou-se a fabricação de uma vâreta contendo pastilhas MOX que teve sua irradiação executada no reator de PETEN (Holanda) e a avaliação pós-irradiação conduzida no KFK-Karlsruhe (Alemanha). Os resultados dos ensaios obtidos até o presente, são muito animadores.

### 3. ALGUNS ASPECTOS DO CICLO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR NO BRASIL

Cerca de 90% da eletricidade presente mente gerada no país é oriunda da hidro-eletricidade. Estima-se que a maior parte da demanda das próximas duas décadas, possa ser suprida pelo grande potencial hidroelétrico ainda disponível. Entretanto, como esses recursos utilizáveis encontram-se principalmente na bacia amazônica, onde o impacto ambiental de barragens pode ser considerável, e distante dos grandes centros consumidores do sul e sudeste, os custos de geração e transmissão poderão ser elevados. Prevê-se, então, uma participação crescente da núcleo-eletricidade no país, nas próximas décadas, inclusive pela necessidade de complementação térmica.

O Brasil tem hoje uma capacidade núcleo-elétrica instalada de 625 MW oriunda da central Angra 1 (PWR-Westinghouse). As centrais Angra 2 e Angra 3, (PWR-KWU), ambas com 1245 MWE estão em construção. A quase totalidade das obras civis de Angra 2 já foi executada e prevê-se o término de sua construção para o final da década de 90. Angra 3 tem suas obras apenas iniciadas e o término de sua construção é ainda incerto. Com a entrada em operação de Angra 2, a capacidade núcleo-elétrica instalada ao final do século será de 1870 MWE.

Um grande esforço de prospecção de recursos uraníferos foi feito no país no período 1975-1985, no âmbito do acordo de colaboração Brasil-Alemanha e grandes ocorrências de urânio foram descobertas. As reservas brasileiras de urânio são hoje estimadas em mais de 200000 t de  $U_3O_8$  considerando os recursos razoavelmente assegurados. Cerca de 50% desse urânio ocorre na forma de fosfatos em Itataia, no Estado do Ceará, cuja exploração pode ser mais econômica por permitir a obtenção conjunta de ácido fosfórico. Outros grandes depósitos existem ainda em Lagoa Real, no Estado da Bahia e no planalto de Poços de Caldas, no Estado de Minas Gerais.

As tecnologias de purificação a grau nuclear, conversão do "yellow-cake" (YC) a hexafluoreto de urânio e de transformação do  $UF_6$  a dióxido de urânio sinterizável foram desenvolvidas no país, a nível de laboratório, na década de 70, com produção piloto, a partir de 1980. A consolidação dessas tecnologias, a nível de escala semi-industrial, vem progredindo de modo gradativo no Brasil.

A experiência do país na área de processamento de combustíveis irradiados iniciou-se no IPEN-CNEN/SP com a implantação do Projeto Reprocessamento, na década de 70, dando origem à instalação CELESTE I (Célula de Estudos e Testes em Extração), concluída na década de oitenta. Trata-se de uma instalação em escala de laboratório para trabalhos de pesquisa e desenvolvimento, constituída por duas células com blindagem biológica, duas cadeias de caixas de luva, capelas e laboratórios instrumentais para controle de processo e laboratórios auxiliares. Após a confirmação de operacionalidade e eficiência dos equipamentos da instalação em testes a frio, uma série de campanhas foi executada simulando-se a composição de um combustí-

tível tipo PWR com 500 MWd/tU de queima e ano de resfriamento. Os estudos dirigiram-se à aquisição de conhecimento no primeiro ciclo do processo PUREX ácido com partição de U/Pu. Esses trabalhos permitiram a obtenção de dados de processo, projeto, controle, operação e manutenção, de grande importância no domínio dessa tecnologia.

Um amplo programa de pesquisa, envolvendo a fabricação, irradiação, avaliação pós-irradiação e reprocessamento de combustíveis avançados, foi desenvolvido conjuntamente por Alemanha e Brasil, no período 1979-1988, com vistas à utilização de tório em reatores PWR. A investigação evidenciou que os combustíveis à base de óxido de tório ( $Th, U$ ) $O_2$  e ( $Th, Pu$ ) $O_2$  podem ser empregados num reator PWR sem necessidade de grandes modificações no elemento combustível ou no projeto do núcleo. O uso do tório com plutônio reciclado no ciclo "once-through" e queima estendida mostrou ser a aplicação mais promissora desses combustíveis avançados(11).

### 4. CICLOS COMBUSTÍVEIS AVANÇADOS PWR-HWR

A reciclagem do urânio e do plutônio disponíveis em elementos combustíveis queimados tem sido uma preocupação constante da comunidade nuclear, na última década, refletida nas atividades desenvolvidas na Argentina e no Brasil, descritas anteriormente. Tal preocupação é motivada pela busca de uma fonte de energia mais econômica e estável, a longo prazo, que propicie a preservação de reservas de urânio e minimize o impacto ambiental associado à mineração e aos rejeitos radioativos.

Várias alternativas têm sido avaliadas envolvendo a reciclagem do urânio recuperado e do plutônio, tanto em reatores a água leve (LWR) (1,2,3) como em reatores a água pesada (HWR) (4). Dos vários ciclos avançados de combustíveis propostos, os que poderiam ser incorporados num futuro próximo são:

- Ciclo LWR fechado no qual o urânio e o plutônio são reciclados num reator LWR, seja via re-enriquecimento do urânio recuperado, seja pela queima do plutônio ou mesmo pela utilização de ambos. Boa experiência nessa área já é disponível na Europa(3).
- Ciclo HWR de urânio levemente enriquecido SEU ("slightly enriched uranium") utilizando enriquecimento de 1,2% em U-235. Tais combustíveis podem alcançar num reator HWR queima de extração de 22000 MWd/tU, três vezes superiores aos ciclos de urânio natural convencionalmente usados, e com excelente desempenho, se o elemento combustível for do tipo CANFLEX(5,6).
- Ciclo HWR CANFURL ("Candu Fuelled Uranium Recycled from LWR") no qual o urânio recuperado de reatores LWR, contendo aproximadamente 0,9% U-235 é queimado num reator HWR até 13000 MWd/tU(7).
- Ciclo TANDEM onde se utiliza o urânio e o plutônio recuperados de combustíveis LWR queimados. Tal material, com um conteúdo de elementos físeis de 1,5%, é adicionado ao urânio natural para se fabricar óxidos mistos (MOX) de urânio e plutônio, que podem atingir queimas de até 25000 MWd/tU num HWR(4).

Além dessas alternativas de ciclo envolvendo o urânio e o plutônio, outras, com base no tório, têm sido também estudadas para reatores HWR(8).

A opção por uma das várias rotas disponíveis envolvendo a reciclagem do urânio e do plutônio deve ser cuidadosamente analisada, considerando-se todos os fatores, tecnológicos ou não, que possam intervir na decisão de reprocessar o combustível queimado.

A tecnologia de reprocessamento foi desenvolvida, também, motivada pela dificuldade de armazenamento a longo prazo do combustível queimado como no caso dos combustíveis dos reatores Magnox na Inglaterra e Gás-Grafite na França, e pela necessidade de fornecer na usina aos reatores rápidos regeneradores (FBR) o excesso de plutônio disponível devido ao atraso no desenvolvimento e comercialização dos FBRs tem incentivado a reciclagem desse combustível em reatores térmicos. Deve-se considerar também que a reciclagem de urânio e plutônio em reatores térmicos leva a uma sensível redução no consumo de urânio natural, estimada, para um LWR, como sendo de 15 a 20%. No caso de um reator HWR, a reciclagem é eficiente neutronicamente chegando a dobrar a energia que pode ser extraída do combustível queimado.

A reciclagem deve ser enfocada também sob uma perspectiva de gerenciamento de rejeitos radioativos. Estima-se que uma redução de cinco vezes no volume de rejeitos de alta atividade possa ser atingida, o que resultaria em menor risco radiológico a longo prazo.

O risco de proliferação nuclear é um outro aspecto que tem sido considerado na decisão de reprocessar. A influência desse ponto pode ser abrandada com o uso de processo no qual o plutônio e o urânio são separados conjuntamente, evitando a purificação final do plutônio, como é o caso do co-processamento efetuado no ciclo TANDEM.

## 5. CICLO DE COMBUSTÍVEL LWR-HWR TANDEM

O ciclo de combustível TANDEM caracteriza-se pela utilização em reatores HWR do urânio e do plutônio recuperados de combustíveis queimados em LWRs, beneficiando-se do sinergismo dos reatores. A elevada queima de descarga dos combustíveis LWR e seu espectro neutrônico mais duro, resulta em uma maior concentração de plutônio no combustível queimado em relação ao produzido por um HWR, podendo-se até obter o dobro do plutônio em um combustível LWR em relação ao produzido no HWR, dependendo das queimas totais envolvidas.

Por outro lado, o combustível LWR queima do contém uma quantidade importante de U-235, oscilando em torno de 1% o enriquecimento final do urânio, enquanto que nos HWR o U-235 é queimado até valores próximos aos utilizados nas linhas de rejeito das usinas de enriquecimento, ou seja, em torno de 0,25%.

Devido às suas características neutrônicas, o HWR é mais eficiente na queima do material físsil, podendo extrair o dobro da energia do plutônio produzido em um LWR em relação à reciclagem desse plutônio no próprio LWR. O HWR pode ainda queimar diretamente o urânio ligeiramente enriquecido, recuperado do combustível LWR queimado.

Como vantagem adicional para o ciclo TANDEM em relação a outras alternativas para as fases finais do ciclo do combustível nuclear para LWR, indica-se o fato de não ser necessário separar urânio e plutônio recuperados, existindo somente uma fase de descontaminação química do combustível irradiado dissolvido, processo chamado de co-processamento, em contrapartida ao reprocessamento completo do combustível irradiado, necessário para a reciclagem do urânio e do plutônio em reatores LWR. O co-processamento tem como atrativo adicional, além da simplificação e consequente redução de custo, a menor complexidade quanto aos aspectos das Salvasguardas do material produzido, já que não se processa a purificação do plutônio.

Visando aprofundar a análise do ciclo TANDEM, os itens seguintes discutem alguns aspectos

das etapas desse ciclo. É importante notar que somente serão afetadas as etapas iniciais do ciclo HWR, o qual passará a utilizar combustível MOX ( $UO_2$ - $PuO_2$ ). Para o reator LWR as modificações ocorrerão nas etapas após a irradiação, resolvendo o problema da estocagem permanente do combustível irradiado. De forma a permitir um estudo mais objetivo, serão considerados os reatores CANDU e PWR para as discussões seguintes, enfocando o caso específico da Argentina e Brasil.

### 5.1. CO-PROCESSAMENTO, CO-CONVERSÃO E COMBUSTÍVEL MOX

No co-processamento o urânio e o plutônio existentes na massa do combustível irradiado dissolvido são processados conjuntamente, ou seja, o reprocessamento do combustível irradiado fica reduzido a uma etapa de descontaminação química, onde os produtos de fissão e os actínides superiores são separados do material combustível, não necessitando efetuar as etapas de partição urânio/plutônio e a posterior purificação do urânio e do plutônio.

Certamente que o co-processamento permite uma importante redução de custo, tendo sido demonstrado que se pode obter uma descontaminação mínima de  $10^7$  utilizando três etapas de extração por solvente PUREX, com TBP 30% em que rosene. Os resíduos de alta atividade são eliminados por imobilização em borossilicato vitrificado, utilizando-se embalagem em tambores de aço adequada à disposição final.

A etapa de co-conversão transforma a solução de urânio e plutônio, obtida no co-processamento, em um produto adequado à fabricação de combustível MOX, eliminando processos complicados e de grande risco, existentes na produção de combustível MOX, por via da conversão independente e posterior mistura mecânica de pós de  $UO_2$  e  $PuO_2$ , eliminando também o risco de pontos quentes no combustível devido a não-homogeneidade da mistura. Para transformar a solução de urânio e plutônio em pó de óxidos mistos de  $UO_2$  e  $PuO_2$ , pode-se utilizar a co-desnitração por micro-ondas com posterior redução a  $UO_2$  e  $PuO_2$ , implicando em uma via vantajosa sob o ponto de vista ambiental, já que todos os sub-produtos resultantes são integralmente reciclados no processo.

Na fase da irradiação no reator CANDU o combustível MOX (U,Pu) com 1,5% de material físsil pode atingir queimas de 25000 Mwd/tU, resultando numa energia extraída quatro vezes maior do que a obtida pela reciclagem do urânio e do plutônio no PWR. A fabricação do combustível MOX para o reator CANDU guarda também algumas simplificações em relação ao combustível MOX para PWR, já que o combustível CANDU tem dimensões menores e desenho mais simples, facilitando sua fabricação experimental, em pequena escala, em células com caixas de luva.

### 5.2. QUEIMA DE COMBUSTÍVEL MOX EM REATOR CANDU

Os estudos relativos à física dos reatores CANDU utilizando combustível ligeiramente enriquecido (EC-SEU), com 1,2% em U-235, abordam muitos dos problemas e soluções aplicáveis ao combustível MOX e indicam a viabilidade do uso desse tipo de combustível.

Aumentando o conteúdo de plutônio no núcleo pode-se variar, em função do inventário de plutônio e da queima, o valor de alguns parâmetros físicos do núcleo do reator, tais como a duração do ciclo, a concentração crítica, a reatividade do boro, os coeficientes de reatividade devidos à temperatura e à potência, bem como parâmetros locais relativos à distribuição de potência e às curvas de inserção de reatividade das barras de controle. A quantidade

de total de plutônio que pode ser utilizada no reator será determinada pela margem de desligamento disponível nas barras de controle.

Os gradientes de fluxo e de potência em um EC CANDU enriquecido com plutônio, são mais elevados que os existentes no EC CANDU ligeiramente enriquecido e maiores também que os do EC CANDU com urânio natural. No caso do urânio ligeiramente enriquecido (EC-SEU) foram desenvolvidos combustíveis com potência linear 20% menor, chamados CANFLEX, contendo 43 elementos em vez de 37 e com dois comprimentos de barras, indicando por semelhança com o EC SEU, a viabilidade do desenvolvimento de combustíveis MOX adequados.

Devido ao espectro neutrônico mais brando, o reator CANDU promove a absorção de nêutrons preferencialmente nos plutônios físséis (Pu-239 e Pu-241), reduzindo a absorção ressonante no Pu-240, o que é vantajoso para o uso do combustível MOX face à queima do plutônio nos reatores PWR. A formação de isótopos férteis de plutônio nos reatores PWR limita o número de reciclagens a duas, devido à necessidade de alto nível de enriquecimento em plutônio físsil requerido. Essa limitação não existe em um reator CANDU, o qual permite até 10 reciclagens do plutônio.

Também com relação ao controle e à segurança do núcleo, não são antecipados problemas para o uso do combustível MOX, considerando que seja escolhida uma distribuição razoável de potência axial, compatível com curvas de inserção de reatividade adequadas ao combustível MOX. Antecipa-se que os coeficientes de reatividade para uma queima média do núcleo não serão significativamente diferentes daqueles obtidos com o combustível de urânio natural. Análise de segurança preliminar indica que existem margens adequadas para atender o caso do acidente de perda de refrigerante, já que o pulso de potência maior, existente no combustível MOX, tende a ser compensado pelos mecanismos de realimentação de reatividade por temperatura e pela atuação mais eficiente das barras de controle.

## 6. ASPECTOS ECONÔMICOS DO CICLO TANDEM PWR-CANDU

Para as etapas do ciclo até a irradiação no núcleo do reator, chamadas de "front-end", a indústria nuclear é bem estabelecida, permitindo apropriações de custo baseadas na experiência empresarial, enquanto que para o "back-end" as incertezas envolvidas são consideráveis, existindo uma forte influência de espectros conjunturais, face a políticas de uso da energia nuclear.

A abordagem econômica do ciclo TANDEM não está isenta desses problemas sendo aqui analisados somente os espectros gerais, visando demonstrar o efetivo interesse na aplicação desse ciclo. Naturalmente que no caso específico de Argentina e Brasil, o aprofundamento dos estudos e as experiências já adquiridas nos respectivos programas nucleares basearão decisões futuras quanto aos custos envolvidos e a real conveniência do ciclo TANDEM.

O investimento é o item de custo que mais pesa na núcleo-eletricidade, com 50% do custo de geração, envolvendo a implantação inicial da unidade e seu descomissionamento. A necessidade do enriquecimento, o maior inventário inicial de material, a complexidade maior na fabricação dos elementos combustíveis, fazem os custos do ciclo PWR maiores do que para os reatores HWR. Por outro lado, no que diz respeito aos custos de operação e manutenção, a tendência é para que assumam importância maior nos HWR do que nos PWR. A Tabela 1, extraída de

estudo da AIEA<sup>(9)</sup>, ilustra a variabilidade do custo de geração para reatores HWR e PWR. Os dados indicam que a competitividade da energia nuclear como fonte alternativa é muito dependente de reduções nos custos de investimento, mas para usinas em operação a redução dos custos do ciclo do combustível pode trazer grandes economias.

Por razões técnicas, a quantidade máxima de combustível MOX carregada em um PWR é da ordem de 30% do inventário do núcleo, enquanto que no núcleo CANDU é possível utilizá-lo em 100% do núcleo. Além disso, o benefício da reciclagem do plutônio e do urânio recuperado é mais efetivo em núcleo CANDU do que em núcleos PWR, especialmente se o material for proveniente de combustível PWR irradiado, conforme discutido anteriormente nesse trabalho. Esses fatos aliados à menor complexidade das etapas "back-end" do ciclo, indicam que para usinas já em operação a expectativa de retorno econômico para o uso de combustíveis avançados MOX é maior nos reatores CANDU do que nos PWR. O ciclo TANDEM amplia essa vantagem, conforme Tabela 2<sup>(4)</sup>, onde são analisados os consumos de urânio natural para diversos sistemas PWR e CANDU nos ciclos de equilíbrio, indicando ganhos de 41% na utilização do urânio e de 73% na queima desse urânio, em relação ao obtido no ciclo PWR "once-through".

O ciclo TANDEM PWR-CANDU será percebido pelo PWR como um ciclo aberto do tipo "once-through" em que se elimina o custo da estocagem final do combustível irradiado e se recebem os créditos do plutônio e do urânio recuperados, eliminando ou no máximo compartilhando os custos do co-processamento. Para o CANDU o ciclo TANDEM permitirá obter material adequado ao uso em combustíveis avançados MOX por custo equivalente aos créditos do plutônio e do urânio recuperados do combustível PWR irradiado, assumindo integralmente ou compartilhando os custos do co-processamento e da estocagem final de rejeitos. Naturalmente que os ganhos econômicos nas vertentes PWR e CANDU do ciclo TANDEM devem ser balanceados de forma a beneficiar uniformemente as duas partes.

Para permitir uma quantificação grossiera dos possíveis ganhos envolvidos no ciclo TANDEM, apresentamos a Tabela 3<sup>(10)</sup> com componentes típicos dos custos do ciclo do combustível PWR. Sem entrar no mérito dos valores específicos face à competitividade do reprocessamento, o qual é indicado na tabela como desvantajoso economicamente para a reciclagem no próprio PWR, mostramos que a utilização do ciclo TANDEM pode levar os custos para a vertente PWR a 6,30 mills/kWh, com redução de 20% em relação ao ciclo "once-through". Concluímos também que o plutônio e o urânio recuperados, contendo 1,5% de material físsil, podem ser oferecidos à vertente CANDU por um custo que permita ao ciclo PWR retorno equivalente a 3,08 mills/kWh, de forma a cobrir o reprocessamento, a disposição final e os créditos do urânio e do plutônio recuperados, o que certamente é um valor muito baixo se comparado ao custo de 3,48 mills/kWh indicado para o urânio natural nesse ciclo.

## 7. CONCLUSÃO

Partindo dos programas nucleares já implantados por Argentina e Brasil nos campos da pesquisa tecnológica e de geração núcleo-elétrica, e considerando as linhas de reatores utilizados em ambos os países, esse estudo mostra a conveniência do ciclo TANDEM PWR-CANDU como forma de reduzir o custo de geração para ambos os países.

Tomando a potência das usinas Angra 1 e

TABELA 1. CUSTO DA GERAÇÃO NÚCLEO-ELÉTRICA (9) CONSIDERANDO VIDA ÚTIL DE 30 ANOS E TAXA DE ATUALIZAÇÃO DE 5% a.a.

PAÍS	TIPO DE REATOR	CUSTOS DA GERAÇÃO NÚCLEO ELÉTRICA (mill/kwh)						
		INVESTIMENTO		OPER. E MANUTENÇÃO		COMBUSTÍVEL		TOTAL
		CUSTO	% DO TOTAL	CUSTO	% DO TOTAL	CUSTO	% DO TOTAL	
CANADÁ	HWR	15,4	59%	7,6	29%	3,1	12%	26,1
ÍNDIA	HWR	15,0	45%	7,7	23%	10,6	31%	33,3
FRANÇA	PWR	12,9	47%	5,4	20%	9,1	33%	27,4
BRASIL	PWR	17,0	54%	5,9	20%	8,1	26%	31
ALEMANHA	PWR	21,4	54%	7,4	18%	11,1	28%	39,9

TABELA 2. UTILIZAÇÃO DE URÂNIO NATURAL E QUEIMA MÉDIA PARA CICLOS PWR E CANDU EM EQUILÍBRIO (4)

C I C L O	UTILIZAÇÃO DE URÂNIO NATURAL MgU/GWe	QUEIMA MÉDIA Mwd/kgU	MELHORIA PERCENTUAL EM RELAÇÃO AO CICLO PWR- "ONCE-THROUGH"	
			UTILIZAÇÃO DE URÂNIO NATURAL	QUEIMA MÉDIA
PWR ONCE-THROUGH	218	5,07	-	-
CANDU COM URÂNIO NATURAL	157	7,50	28%	48%
PWR COM URÂNIO RECICLADO ENRIQUECIDO	180	6,16	17%	21%
PWR/CANDU COM URÂNIO RECICLADO	161	6,98	26%	38%
PWR COM PLUTÔNIO RECICLADO	185	5,97	15%	18%
PWR COM URÂNIO E PLUTÔNIO RECICLADOS	157	7,07	28%	39%
PWR/CANDU TANDEM	129	8,78	41%	73%

Angra 2 como base para a integração inicial, e assumindo a título de exemplo, um pequeno ganho de 10% nos custos dos ciclos PWR e CANDU resultante do esquema TANDEM, implicando na redução de cerca de 0,8 mills/kwh no custo de ambas as vertentes, o retorno anual será de 20 milhões de dólares, quantia suficiente para subsidiar todas as pesquisas e as adaptações nas unidades necessárias à implantação das atividades. Como Argentina e Brasil planejam manter respectivamente as alternativas CANDU e PWR, e consideram que a núcleo-eletricidade poderá ter papel crescente na geração futura de eletricidade, as potências envolvidas na integração TANDEM podem ser muito aumentadas, indicando um significativo retorno financeiro. O ganho tecnológico para a indústria nuclear e para os centros de pesquisa de ambos os países, o encaminhamento de solução do complexo problema de estocagem dos combustíveis irradiados e dos rejeitos de alta atividade e a efetiva integração regional, benefícios que por si só justificam os esforços científicos e

os investimentos no ciclo TANDEM Argentina-Brasil, seriam obtidos sem custos diretos.

#### 8. REFERÊNCIAS

- [1] GALIMBERTI, M. & PONTICQ, M. The EDF strategy of U and Pu recycling in PWR's. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Recycling of plutonium and uranium in water reactor fuels: proceedings of a Technical Committee Meeting, held in Cadarache, 13-16 Nov., 1989.
- [2] GALIMBERTI, M. Plutonium recycling: EDF experience and program. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Recycling of plutonium and uranium in water reactor fuel of a Technical Committee Meeting, held in Pierrelate, 14-18 Oct., 1991.

TABELA 3. CUSTO DAS ETAPAS DO CICLO DO COMBUSTÍVEL PWR(10)

ETAPA DO CICLO	CUSTOS DAS ETAPAS (mills/kWh)		
	CICLO "ONCE-THROUGH"	CICLO COM REPROCESSAMENTO	CICLO TANDEM (VERTENTE PWR)
. Obtenção do urânio	3,48	3,48	3,48
. Conversão para UF <sub>6</sub>	0,17	0,17	0,17
. Enriquecimento	2,28	2,28	2,28
. Fabricação do EC	0,88	0,88	0,88
. Transporte EC irradiado	0,14	0,14	0,14
. Estocagem EC irradiado	0,65	0,17	0,17
. Reprocessamento	-	2,18	0,00 a 1,09*
. Disposição EC irradiado	0,18	-	-
. Disposição dos rejeitos	-	0,08	0,00 a 0,04*
. Crédito de urânio	-	-0,54	-0,54
. Crédito de plutônio	-	-0,28	-0,28
T O T A L	7,78	8,56	6,30 a 7,43

\* etapas compartilhadas com a vertente CANDU.

[3] RESTEIGNE, L. Economics of U and Pu recycling and status of MOX fuel utilization. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Recycling of plutonium and uranium in water reactor fuels of a Technical Committee Meeting, held in Pierrelate, 14-18 Oct., 1991.

[4] BOCZAR, P.G.; HASTINGS, I.J.; CELLI, A. Recycling in CANDU of uranium and/or plutonium from LWR fuel. Chalk River, Ontario, Atomic Energy of Canada, 1989. (AECL 10018).

[5] BOCZAR, P.G.; McDONNELL, F.N.; LANE, A.D. Slightly enriched uranium in CANDU: an economic first step towards advanced fuel cycles. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Nuclear powder performance and safety: proceedings of an international conference, held in Vienna 28 Sept.-02 Oct., 1987. Vienna, 1988. V.5, p.351-370.

[6] HASTINGS, I.J.; LANE, A.D.; BOCZAR, P.G. CANFLEX-an advanced fuel bundle for CANDU. Availability improvements in nuclear power plants: proceedings of an international conference, held in Madrid, Spain, 10-14 April, 1989. (AECL-9929).

[7] SLATER, J.B. & GRIFFITHS, J. Physics and economic aspects of the recycle of LWR uranium in LWR and CANDU. Proceedings 5th Annual Canadian Nuclear Society Conference, Saskatoon, Saskatchewan, 04-05 June, 1984.

[8] MILGRAM, M.S. Thorium fuel cycles in CANDU reactors. Chalk River, Ontario, Atomic Energy of Canada, 1984. (AECL-8326).

[9] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Projected costs of nuclear and conventional base load electricity generation in some IAEA member states. IAEA-TECDOC 569(1990).

[10] COUTURE, J. & GUAIS, J.C. Economic aspects of the back end: reprocessing or once through. In: GEARY, N., ed. Nuclear technology international, 1987. London, Sterling Publ. 1987.P.137-8.

[11] KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH. Program of research and development on the thorium utilization in PWR's, final report 1979-1988).

#### SUMMARY

The LWR and HWR advanced fuel cycles with potential for implementation in coming years are briefly described. The TANDEM fuel cycle is analysed in more detail with respect to economics, chemical decontamination and conversion, as well as, aspects related to reactor physics, isotopic composition and management of the enriched fuel charge. The integration of Brazilian PWR and Argentine CANDU cycles, via the application of the TANDEM fuel cycle is analysed based on the existing experience in both countries, as a way to reduce the costs of nuclear electricity in these countries.