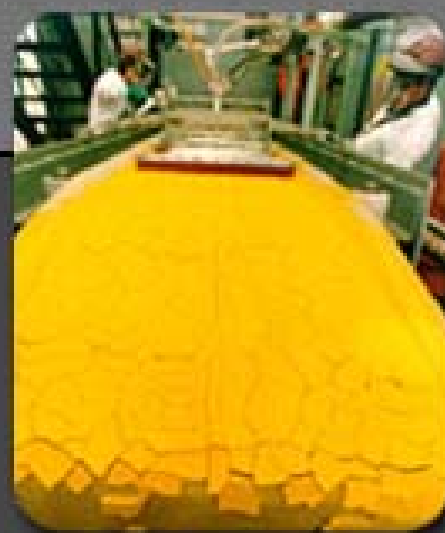


**Simpósio Anual da LAS**

**Planejamento Estratégico para o  
Ciclo do Combustível Nuclear**

**Roberto Garcia Esteves**

**Junho 2006**



Ministério da  
Ciência e Tecnologia

# CICLO DO COMBUSTÍVEL



# MISSÃO DA INB

- Garantir o fornecimento de combustível nuclear para geração de energia elétrica, no Brasil, através da **autonomia tecnológica e industrial** nas atividades do ciclo do combustível.

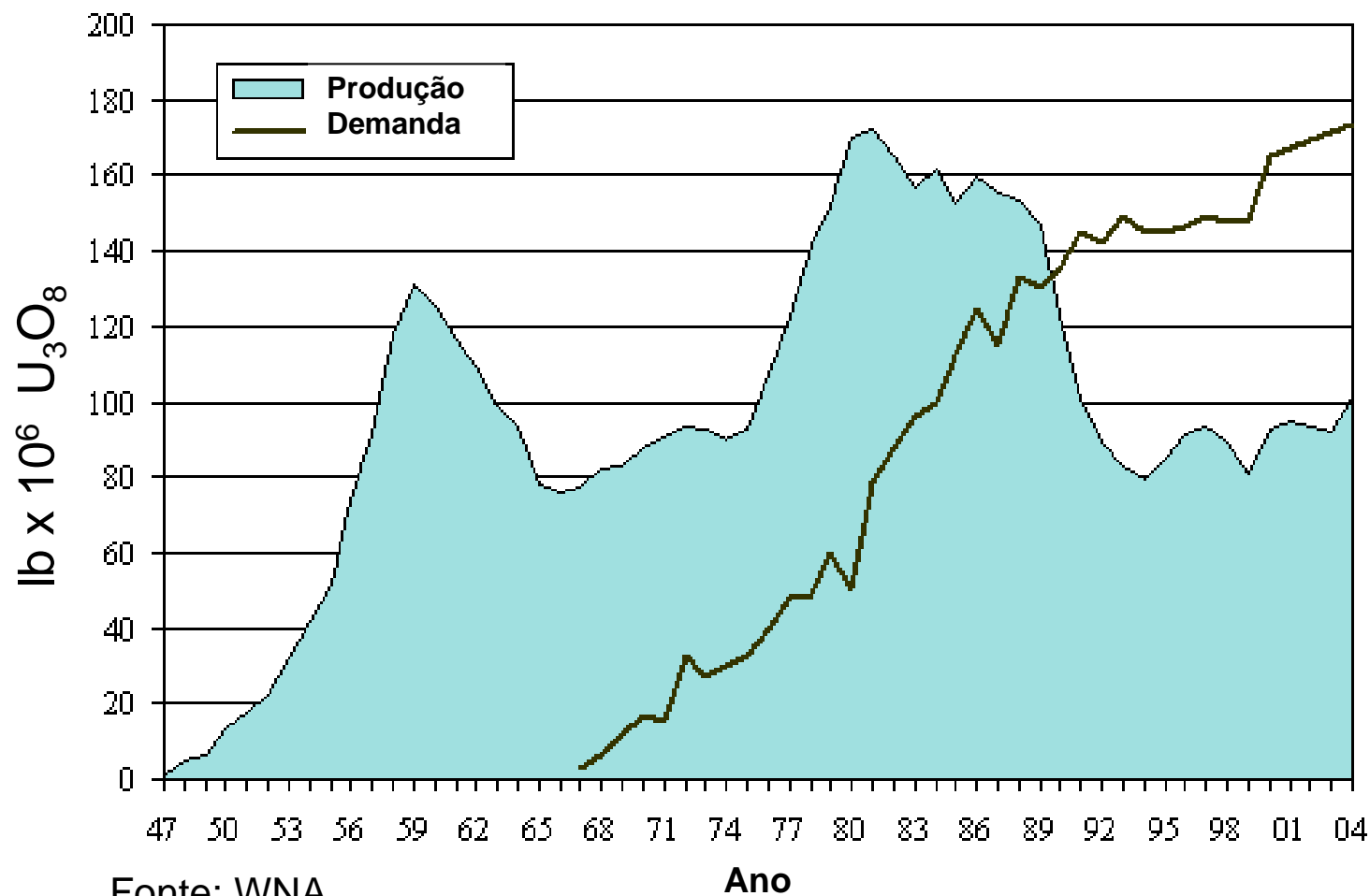
# Estágio atual do ciclo do combustível nuclear na INB

- Auto-suficiência em: prospeção, mineração, beneficiamento, fabricação de pó e pastilhas, fabricação de elementos combustíveis
- Dependência internacional:  
em **Enriquecimento** (em 2010 será 40% para Angra 1 e Angra 2) e total em **Conversão**.
- Exportações possíveis: serviços de pó e pastilhas, fabricação de elementos combustíveis e  $U_3O_8$

# Produção Mundial de Urânio

## Produção versus Demanda (1947-2004)

### Déficit a partir de 1989

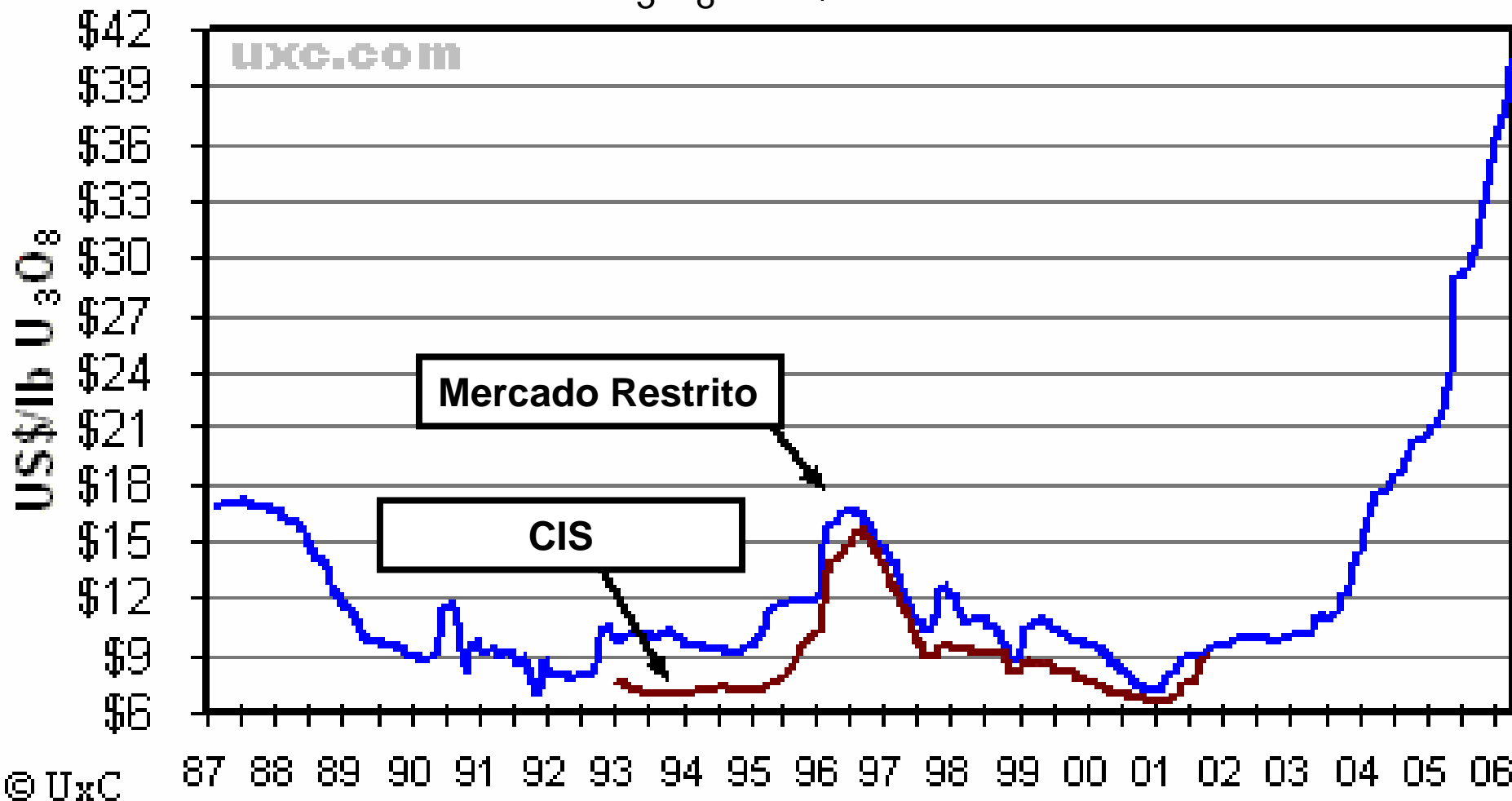


Fonte: WNA

Ano

# Varição do Preço do Urânio

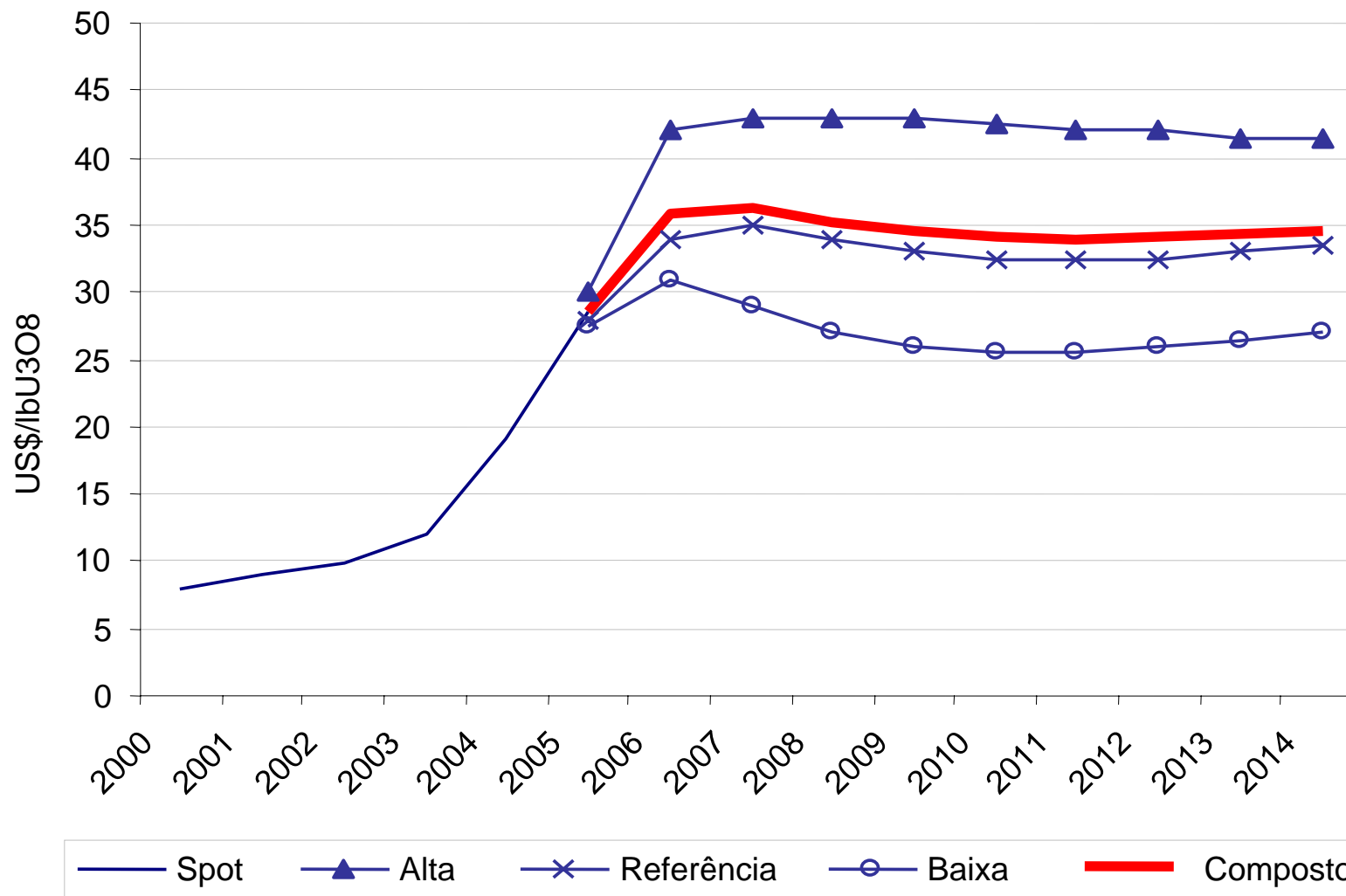
1.000t  $U_3O_8$  = U\$ 88 milhões



© UxC

Em junho de 2006 o preço atingiu 45 U\$/lb

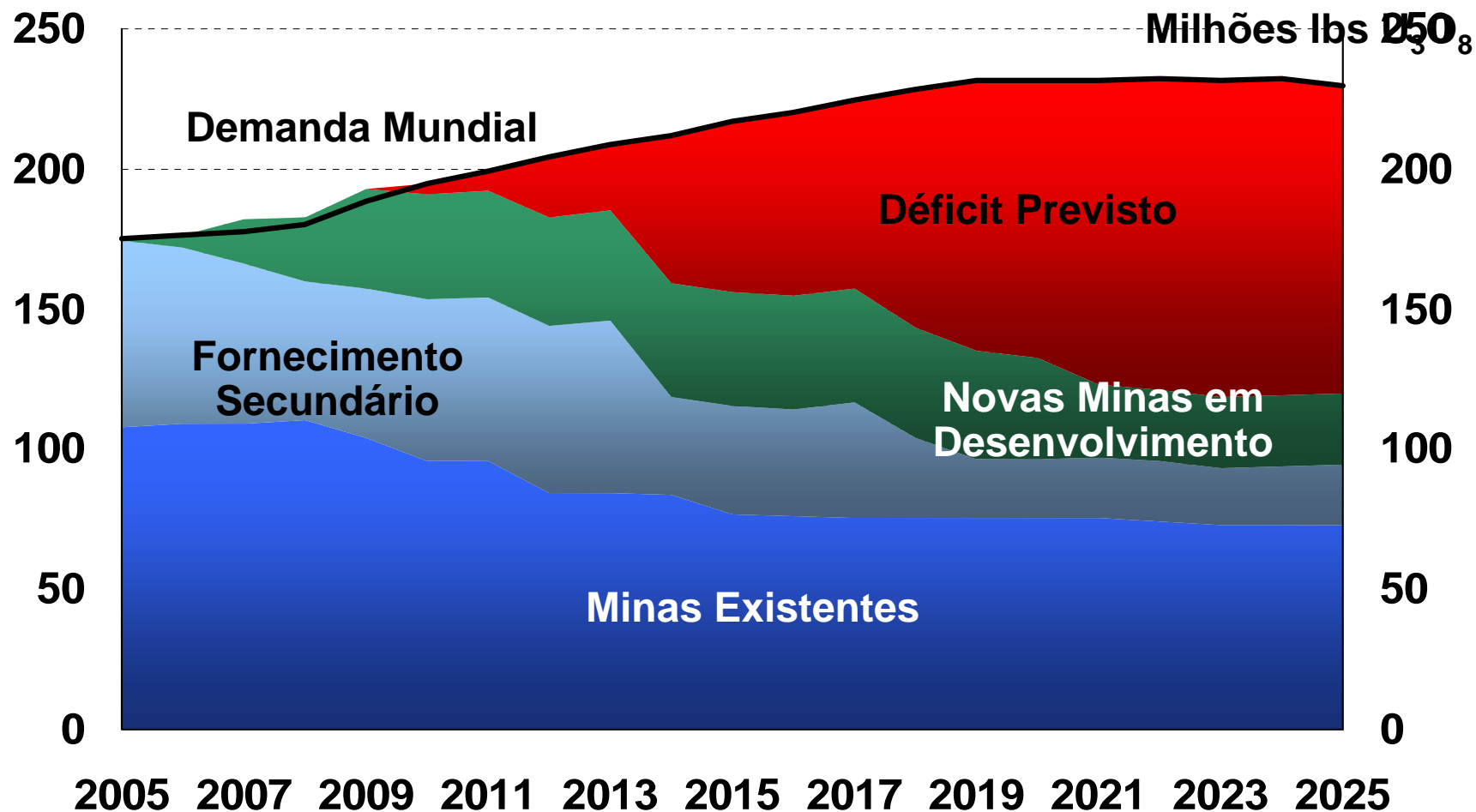
## Projeção de preços do urânio



Fonte: AREVA

# Demanda e Suprimento Mundial de Urânio

Déficit previsto até 2025



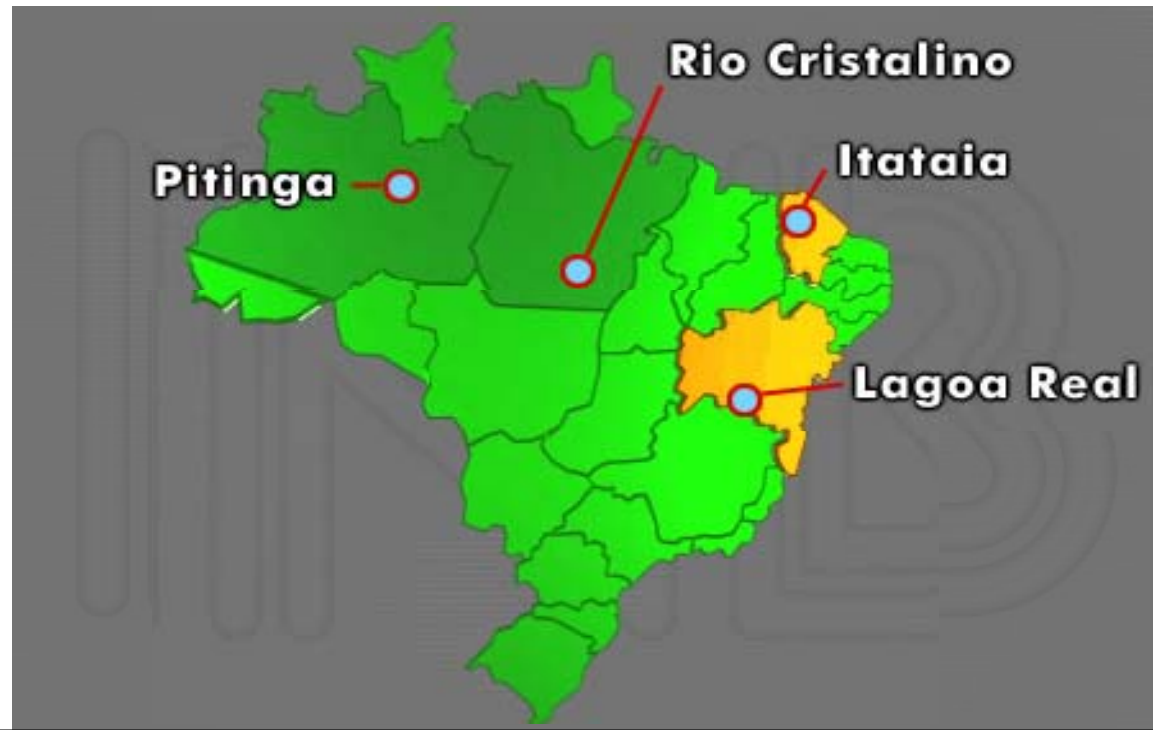
Fonte: Cameco



## Prospecção e Exploração de Urânio

- As reservas brasileiras conhecidas já são suficientes para as atuais centrais e para aquelas previstas a médio prazo.  
(**309 mil tU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>**) → Angra 1 + Angra 2 = 400 tU<sub>3</sub>O<sub>8</sub> ao ano
- Estas reservas geológicas são o resultado da prospecção de somente **25-30% do território nacional**
- Há necessidade de continuar a prospecção de urânio para aumentar as reservas. Investimento **R\$ 3 - 5 milhões/ano**
- Não há política de exportação de urânio. Existe apenas regulamentação para assegurar as **reservas/estoques estratégicos**.
- O preço do urânio deverá estar no seu patamar mais alto nos próximos **5- 8 anos** (WNA, NUKEM): **> \$40/lbU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>**

# RESERVAS GEOLÓGICAS DE URÂNIO



Ton U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	MEDIDAS E INDICADAS	INFERIDAS	TOTAL
<b>DEPOSITOS</b>			
LAG. REAL CAETITE (BA)	94.000	6.700	100.770
ITATAIA (CE)	91.200	51.300	142.500
OUTRAS	39.500	26.600	66.100
<b>TOTAL</b>	<b>224.700</b>	<b>84.670</b>	<b>309.370</b>
<b>ADICIONAL ESTIMADO</b>			
PITINGA E RIO CRISTALINO	> 150.000		

# MINERAÇÃO E PRODUÇÃO DE CONCENTRADO DE URÂNIO



**INB CAETITÉ (LAGOA REAL/BA)**

**Produção atual: 400 t/ano**



# Projeto Santa Quitéria

## Jazida de fosfato com urânio agregado

### Caracterização da Jazida

- ⇒ Reserva total de minério            80 milhões t
- ⇒ Teores médios                            11%  $P_2O_5$   
    0,1% de  $U_3O_8$
- ⇒ Reservas de Fosfato                    9 milhões t  $P_2O_5$
- ⇒ Reservas de Urânio                    80 mil t  $U_3O_8$
- ⇒ Produção de  $U_3O_8$                     800 t  $U_3O_8$ /ano

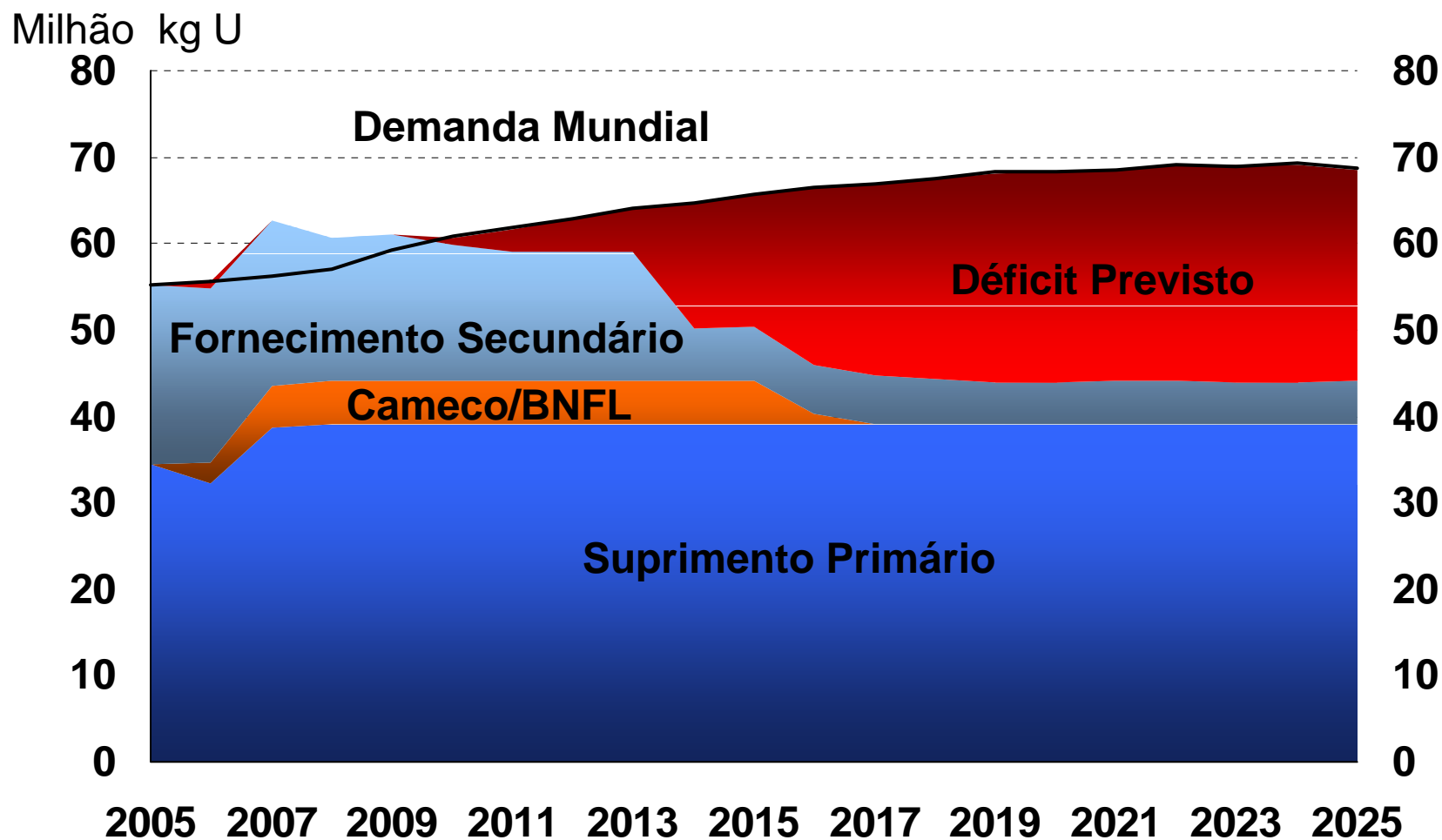


## Etapa de Conversão na INB

- Tecnologia dominada (CTMSP):  
*break-even-point* > 1.000 t/a → Angra 1 e Angra 2 = 400 t/a
- Para suprir o mercado interno: só com fins estratégicos.
- Para mercado externo: justifica se for possível a exportação do urânio com maior valor agregado, por exemplo, enriquecido.
- Preço no mercado *spot*: US\$ 11,5 / kg U
- Déficit de suprimento previsto a partir de 2006: pode indicar aumento de preço no futuro

# Demanda e Suprimentos Mundial

## Serviços de Conversão - previsão de déficit

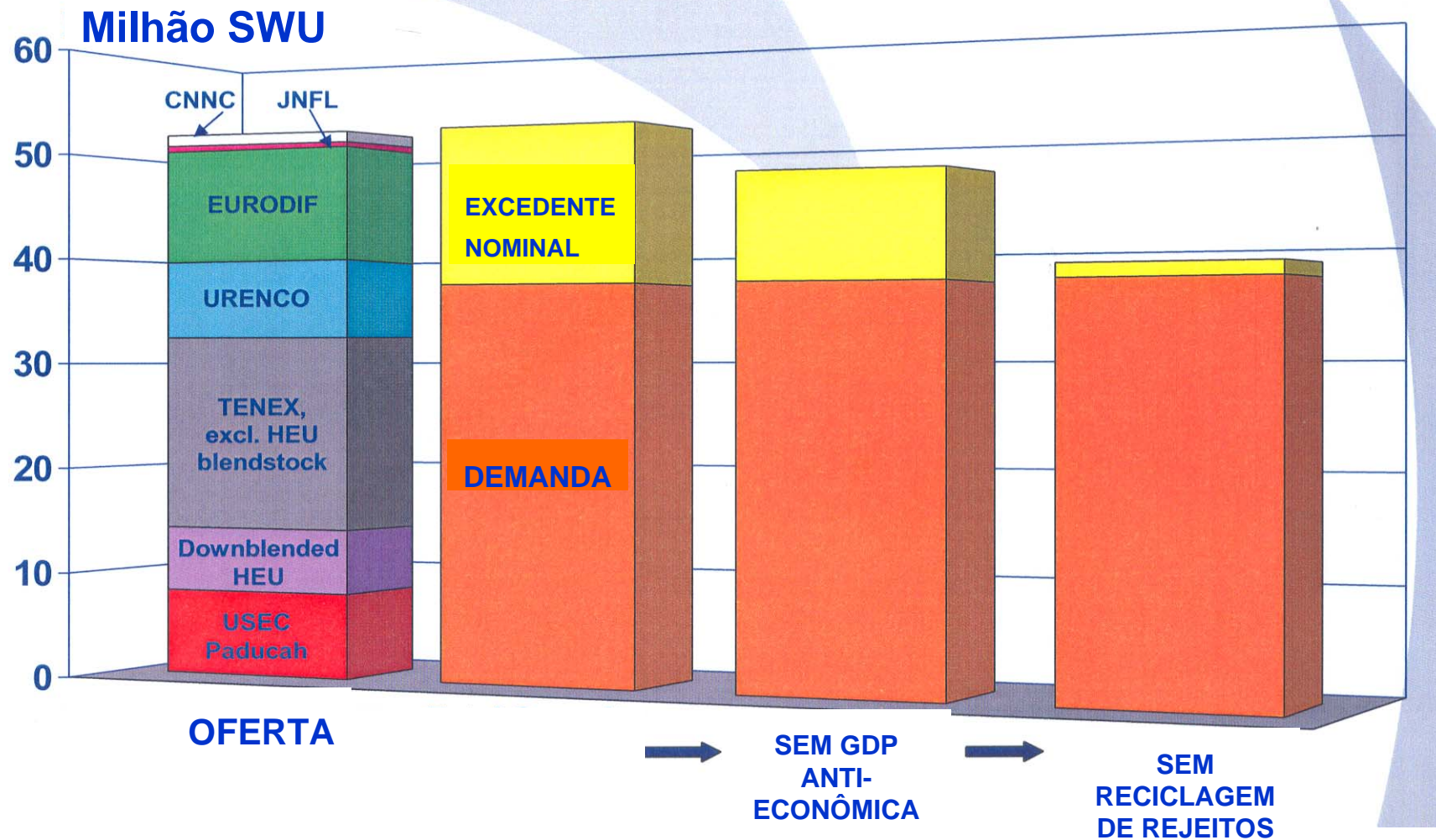


Fonte: Cameco

## Enriquecimento do Urânio na INB

- Tecnologia desenvolvida pelo Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP) e IPEN.
- Planta industrial em fase de implantação na INB.
- Para ter capacidade de exportação necessita de **alto investimento** para aumento da produção.
- Para maior valor agregado ao urânio pode ser conveniente investir em uma planta de conversão.
- Preço no mercado *spot* : US\$ 127/SWU

# Demanda e Suprimento Mundiais de Enriquecimento



Fonte: URENCO - 2004



# Programa Enriquecimento na INB

---

<b>Ano</b>	<b>2012</b>	<b>2015</b>
<b>Capacidade da Usina (SWU)</b>	<b>114.000</b>	<b>203.000</b>
<b>Percentagem das necessidades</b>	<b>60%</b>	<b>100%</b>
<b>100% das necessidades de Angra 1 e 2 em 2015</b>		

---

# FÁBRICA DE COMBUSTÍVEL NUCLEAR

Engenheiro Passos  
Município de Resende - RJ



Unidade 2

Unidade 1



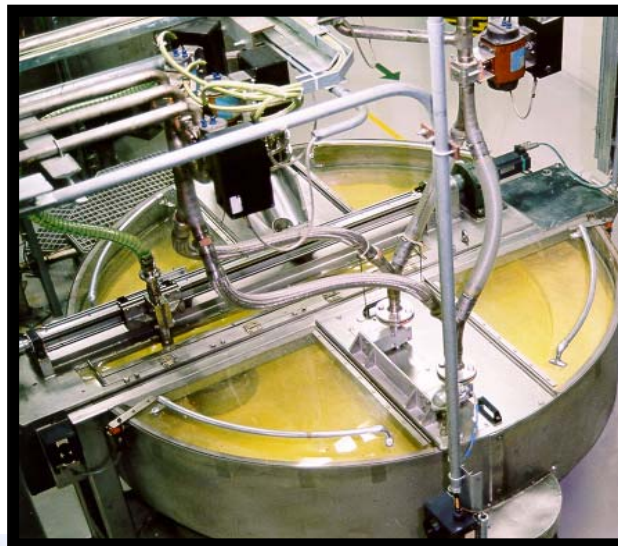
FCN Reconversão, Pastilhas e Enriquecimento - Unidade 2



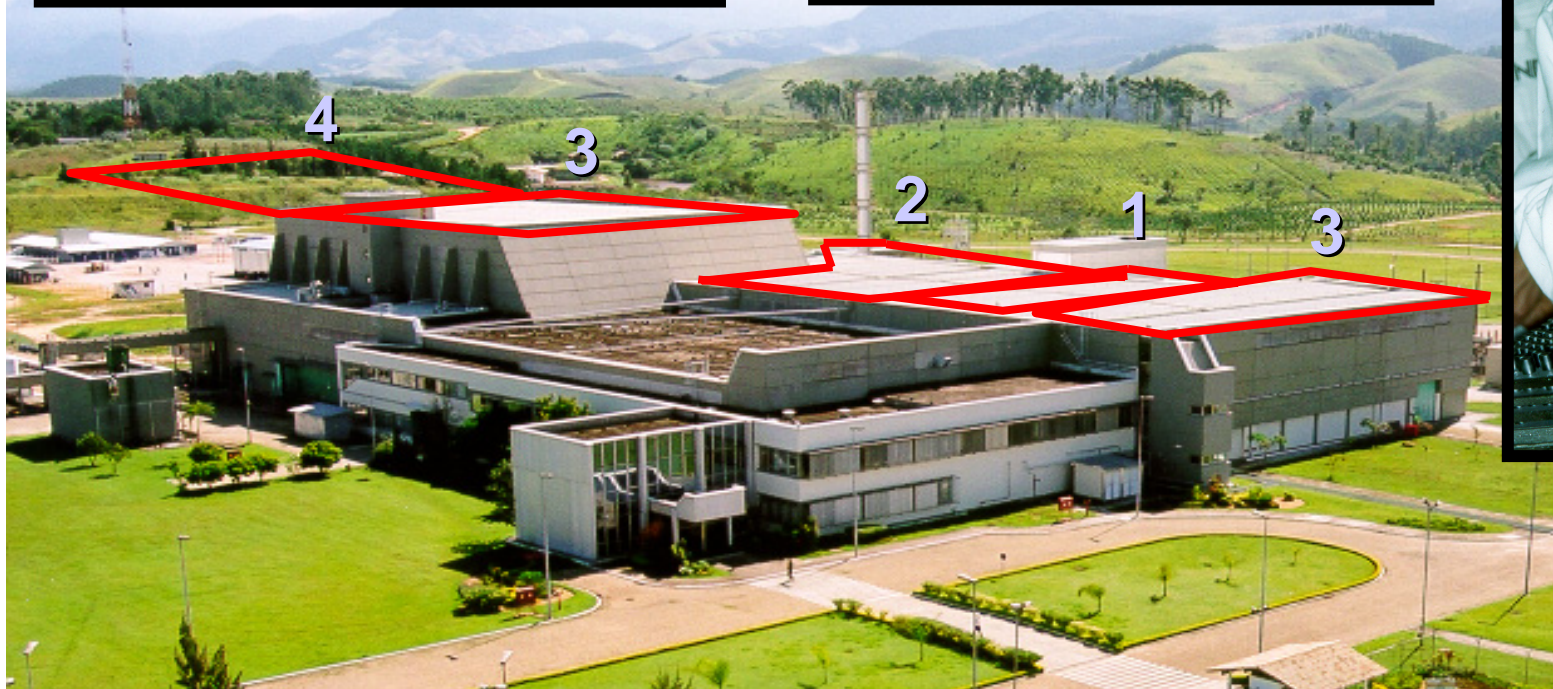
FCN Componentes e Montagem  
Unidade 1



# FCN ENRIQUECIMENTO, RECONVERSÃO E PASTILHAS



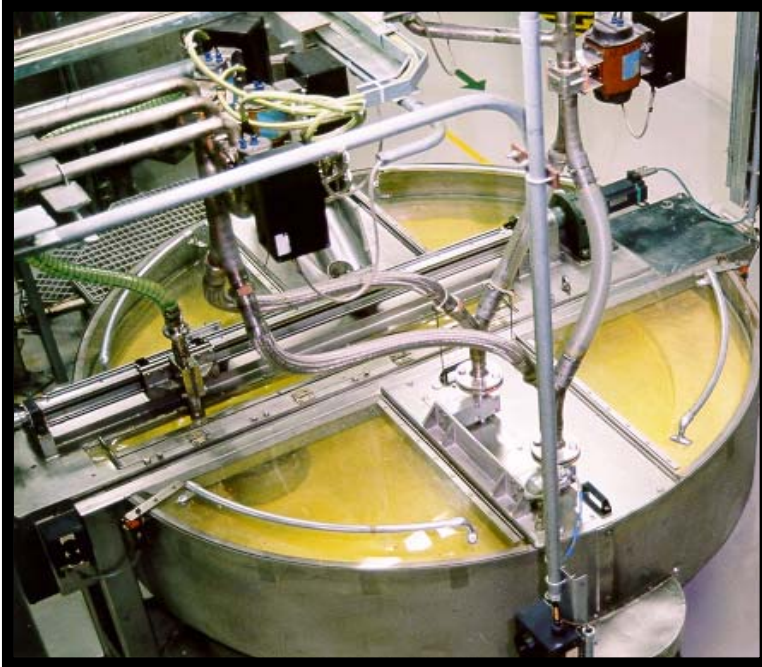
**RESENDE**  
**Unidade 2**  
**(1) - RECONVERSÃO**



**(2) - PASTILHAS**



# FCN RECONVERSÃO



**Capacidade instalada:  
160 toneladas/ano de dióxido de urânio  
enriquecido**





# FCN PASTILHAS



**Capacidade instalada:  
120 toneladas/ano  
de urânio enriquecido**

# FCN ENRIQUECIMENTO

**Contrato:**  
**INB / Centro Tecnológico**  
**da Marinha em São Paulo - CTMSP**  
**Implantação de forma modular**

**Instalação da 1ª Cascata**  
**- November, 2005**



**Sala de Controle**



# FCN - COMPONENTES E MONTAGEM



# Capacidade Tecnológica - INB

## Projeto

- Capacidade atual em Projeto do Combustível
  - **Domínio atual do estado-da-arte sem autonomia**
- Necessidades para domínio do estado-da-arte com autonomia
  - **Capacidade Teórica (códigos, laboratórios,...)**
  - **Capacidade de executar/gerenciar testes**

## Fabricação

- Capacidade atual em fabricação do combustível
  - **Autonomia parcial (testes, qualificação de fornecedores e novos processos, licenciamento)**

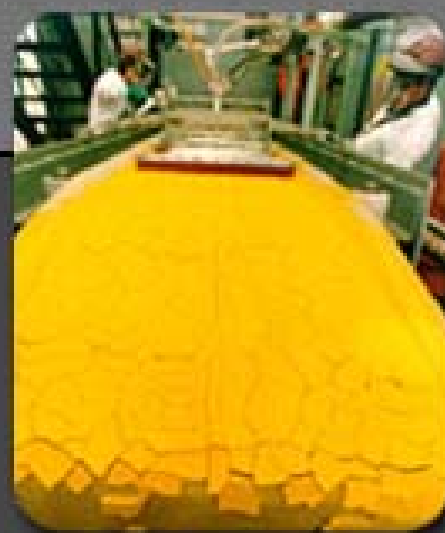


**Simpósio Anual da LAS**

**Planejamento Estratégico para o  
Ciclo do Combustível Nuclear**

**Roberto Garcia Esteves**

**Junho 2006**



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



# **Desenvolvimento de um Elemento Combustível Avançado Tipo PWR 16x16, para Angra 1-16NGF**

Paper apresentado na “2005 International Nuclear Atlantic Conference - INAC

Prêmio de Melhor Publicação do ano de 2005, pela Latin American Section da ANS

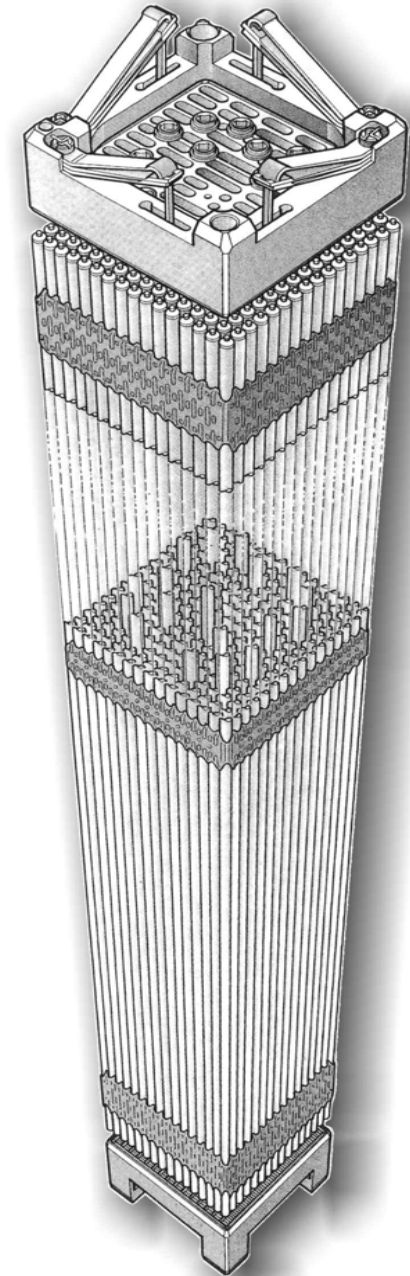
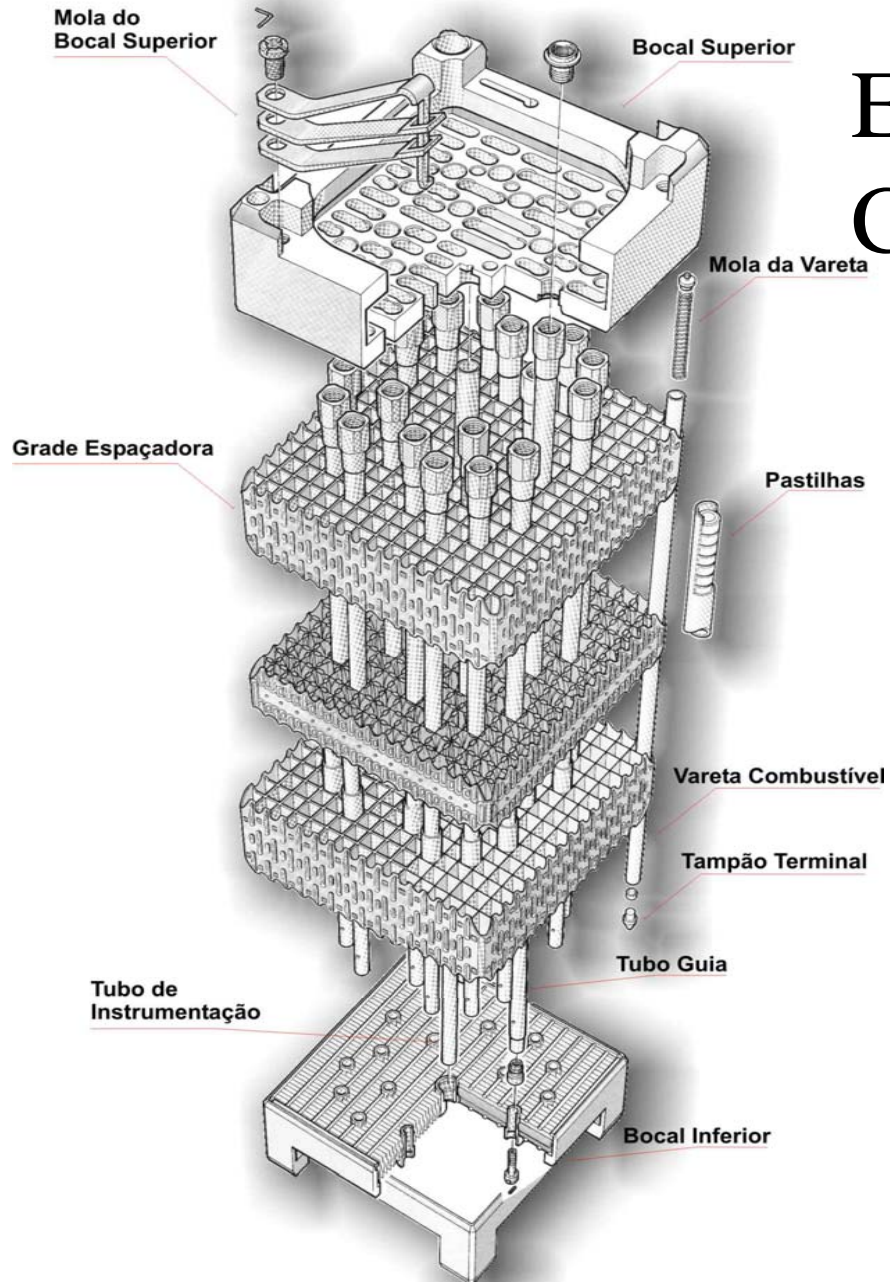
Junho 2006



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



# Elemento Combustível



# Diâmetro da Vareta

- Existe um razão H/U em que a reatividade é máxima
- Por uma questão de estabilidade e segurança os reatores são projetados com H/U menor que o valor ótimo (reatores são sub-moderados).
- O EC de Angra 1 é um projeto muito conservativo
- Para se alterar a razão H/U sem mexer nos internos do reator deveríamos variar o diâmetro da vareta
- Após estudos econômicos e técnicos, a INB publicou em 1998 um trabalho propondo aumento de reatividade no combustível de Angra 1 com a redução do diâmetro da vareta. ( $>H/U$ )

# Diâmetro da Vareta

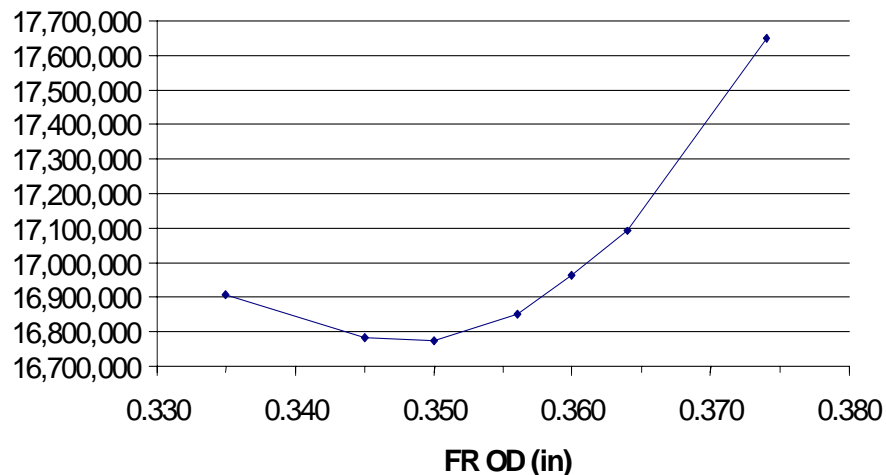
- O combustível de Angra 1 serve nas centrais de Krsko, na Slovênia e de Kori 2, na Corêia do Sul .
- Em 2000, foi feito um acordo entre W, KNFC e INB para dividir os custos do desenvolvimento de um combustível novo para Angra 1, Krsko e Kori 2.
- O projeto começou em Novembro de 2001 nas instalações da W, com pessoal de INB, KNFC e W.
- O projeto foi terminado em meados de 2004.

# Otimização do Diâmetro da Vareta

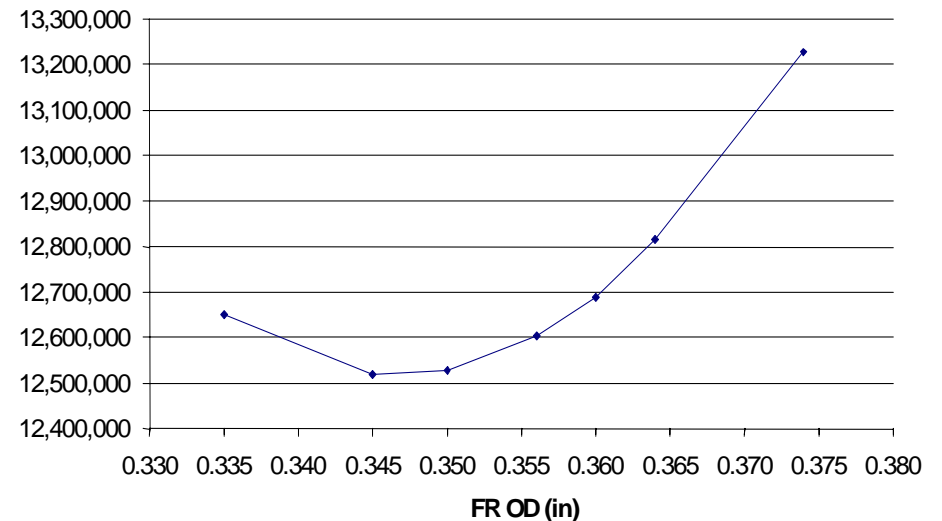
## Resultados

- Incidência do diâmetro nos custos pertinentes em uma recarga

**Kori-2 Reload Pertinent Cost  
(430.7 EFPD; 48 FA's Feed)**



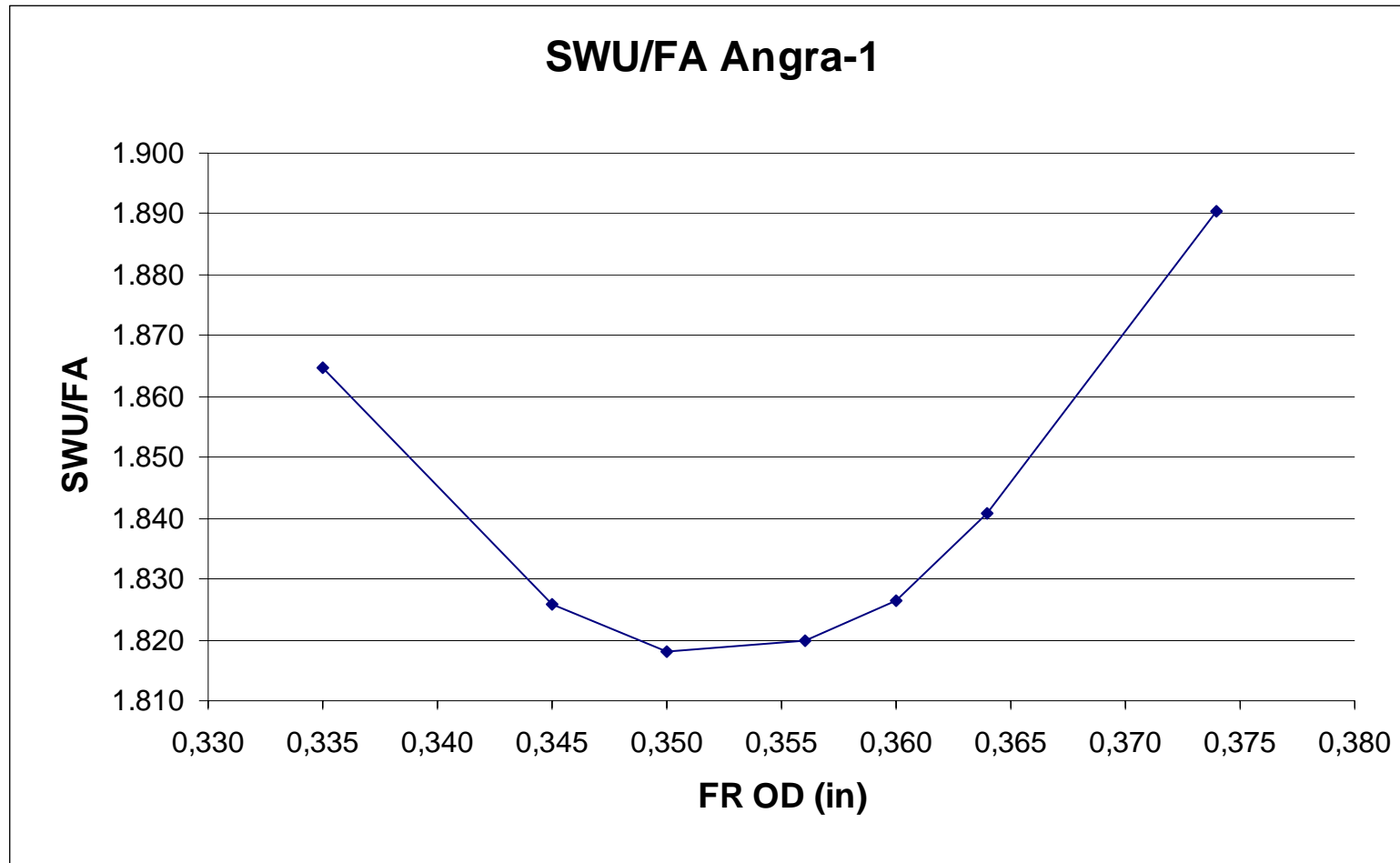
**Angra-1 Reload Pertinent Cost  
(340 EFPD; 40 FA's Feed)**





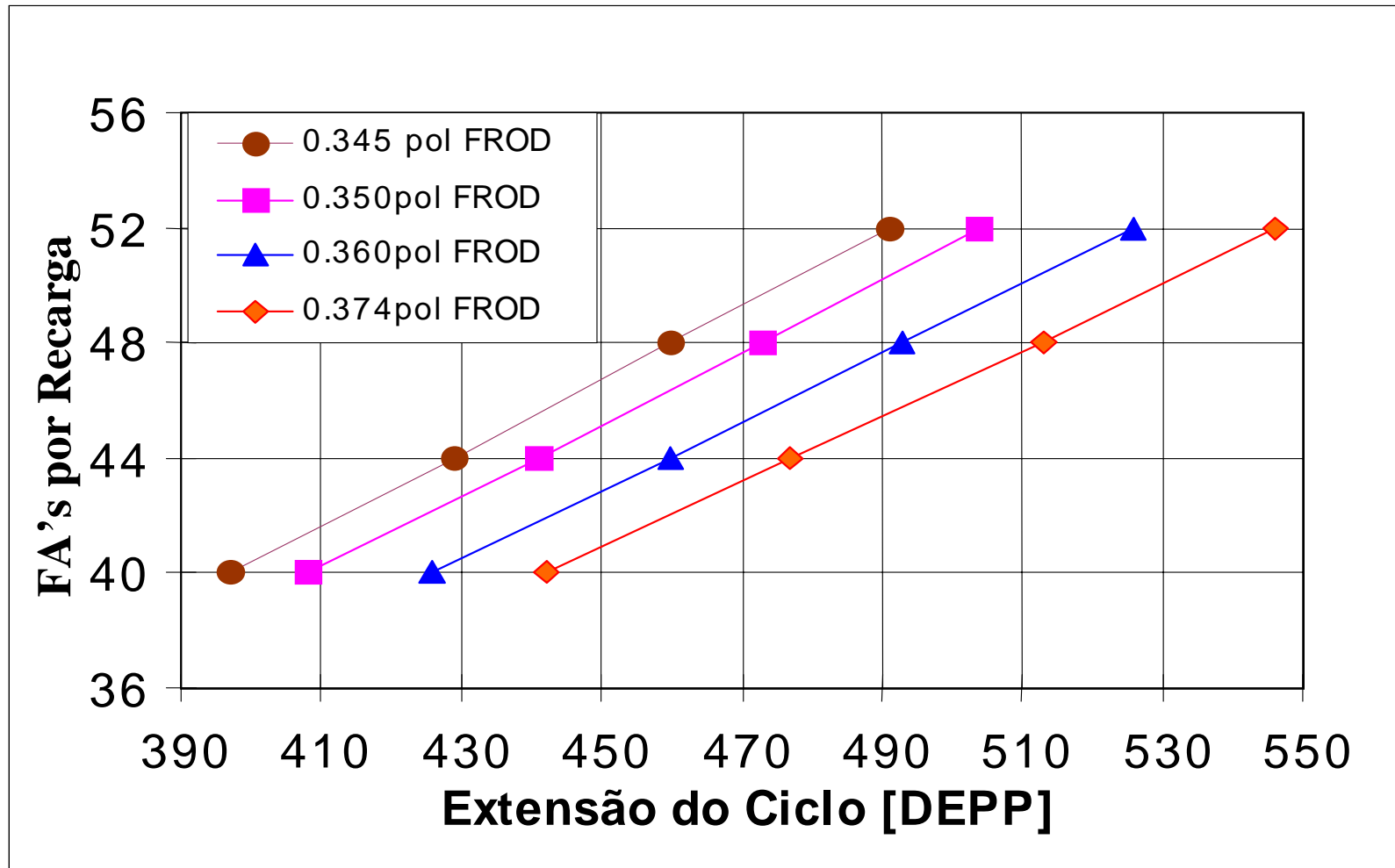
# Otimização do Diâmetro da Vareta

SWU's para 340 DEPP, 40 EC's / recarga para diferentes diâmetros da Vareta



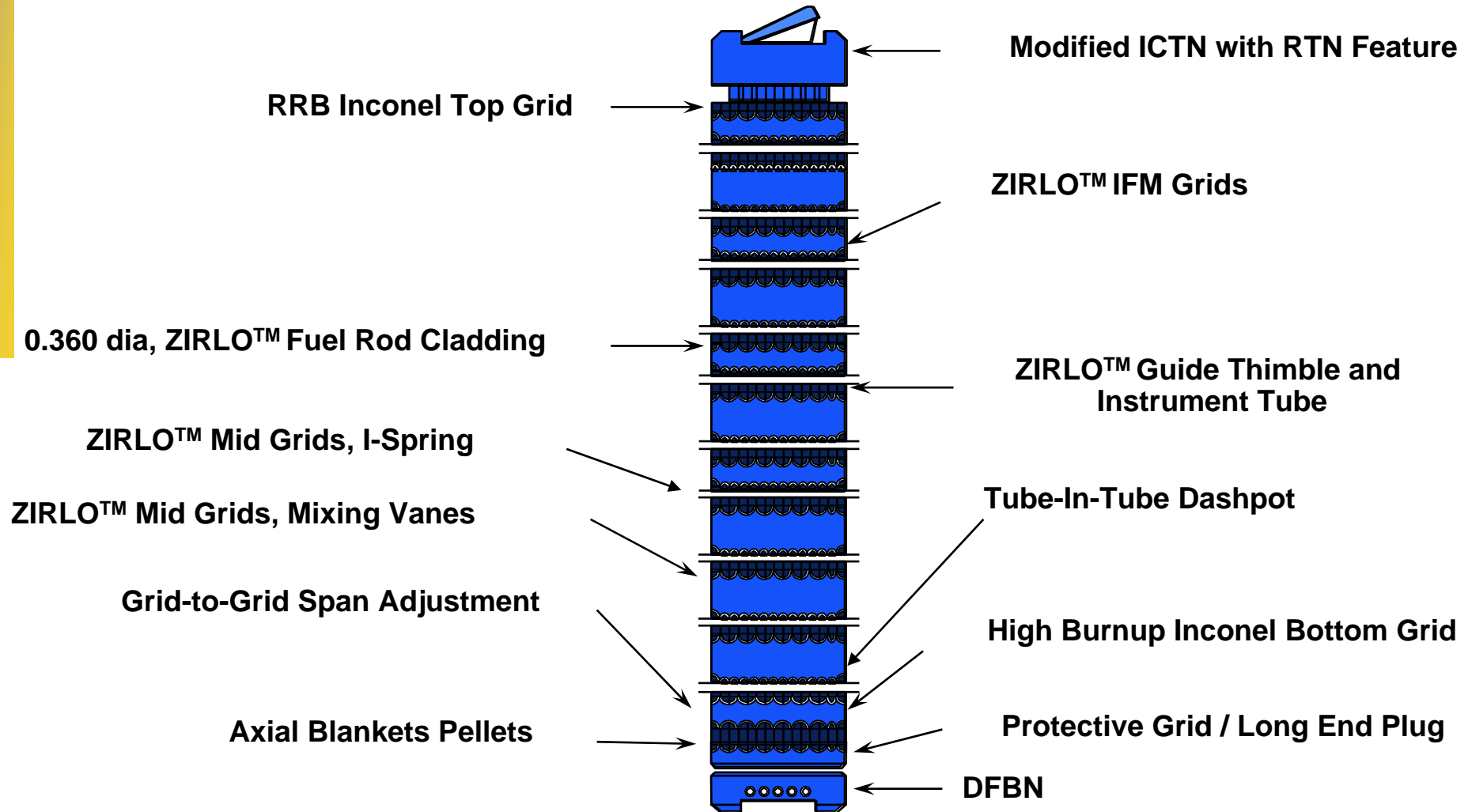
# Otimização pela extensão do ciclo

com enriquecimento máximo = 5%





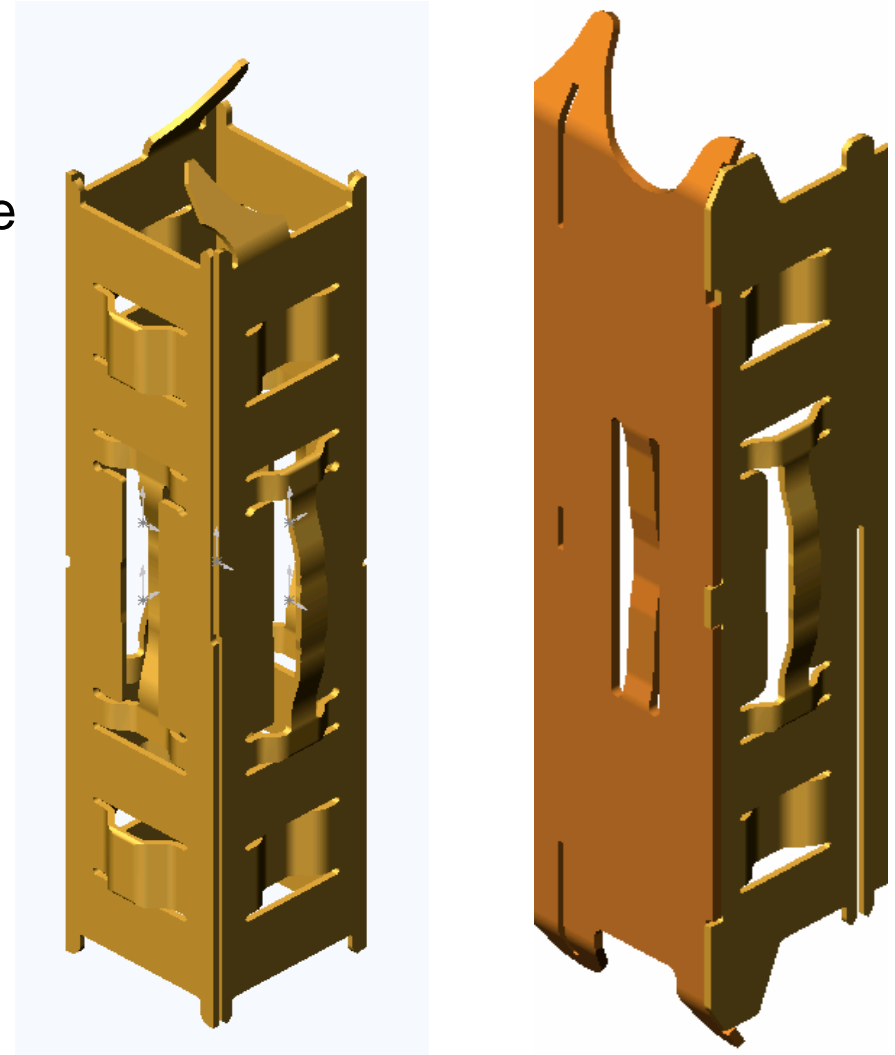
# 16NGF - Características Principais



# 16NGF - Grade Intermediária

- **Vista de uma Célula**

- Tira de Zirlo estampada transversalmente
- Vantagens do Projeto
  - Maior resistência ao cisalhamento
  - Maior área de contato com a vareta
  - Aumento da margem de Fretting
  - Melhor escoamento do fluxo
    - na mola e no dimple
  - melhor margem para Rod Bow
- RFA Mod-1 Vane
  - Melhor margem para DNB



# 16NGF - Performance Comprovada do Projeto

- Aumento em cerca de **30%** de energia por KgU no EC.
- Redução de **~9%** na massa de U por EC.
- Menos **rejeito por Kwh** gerado
- Aumento de mais de 20% na margem de DNB e de mais de 10% na margem de sobre-potência com relação ao 16STD - Permite aumentar a potência de Angra 1 em **10%**.
- Aumento da resistência dinâmica à *flambagem* e da rigidez das grades o suficiente para atender aos critérios de projeto sísmico durante LOCA
- Demonstração da compatibilidade entre o 16NGF e o 16STD

# Globalização da Fabricação

- A fabricação do combustível foi acertada de ser globalizada entre as partes:
  - **A Westinghouse fornece os tubos;**
  - **A KNFC fornece as grades;**
  - **A INB fornece os bocais.**
- Atualmente existem 4 Elementos Combustíveis, fabricados desta maneira, inseridos em Kori 2 para homologação do projeto.
- Após 1 ano de operação os resultados da inspeção foram satisfatórios.
- O combustível deve operar por 3/4 anos em Kori 2.



# **Desenvolvimento de um Elemento Combustível Avançado Tipo PWR 16x16, para Angra 1-16NGF**

Paper apresentado na “2005 International  
Nuclear Atlantic Conference - INAC

Prêmio de Melhor Publicação do ano de 2005,  
pela Latin American Section da ANS

Junho 2006