



# II SENCiR

Semana de Engenharia Nuclear e Ciências das Radiações



# INB

INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL

# Combustível de Alta Performance para ANGRA 1

## Um Projeto com Participação Nacional

**Eduardo Fernandes Faria**  
**Indústrias Nucleares do Brasil - INB**

II SENCiR – UFMG – Belo Horizonte/MG  
7 a 9 de Outubro de 2014

# Sumário

- Apresentação Institucional da INB
- Histórico do Projeto e Análise de Segurança do 16NGF
- Projeto Neutrônico
- Projeto da Vareta Combustível
- Projeto Termo-hidráulico
- Projeto Mecânico/Estrutural e Testes Físicos
- Novos e Futuros projetos

# Ciclo do Combustível





# INB Caetité



**INB CAETITÉ (LAGOA REAL/BA)**

**Capacidade Nominal: 400 t / ano**



# FCN – Reconversão, Pastilhas e Enriquecimento



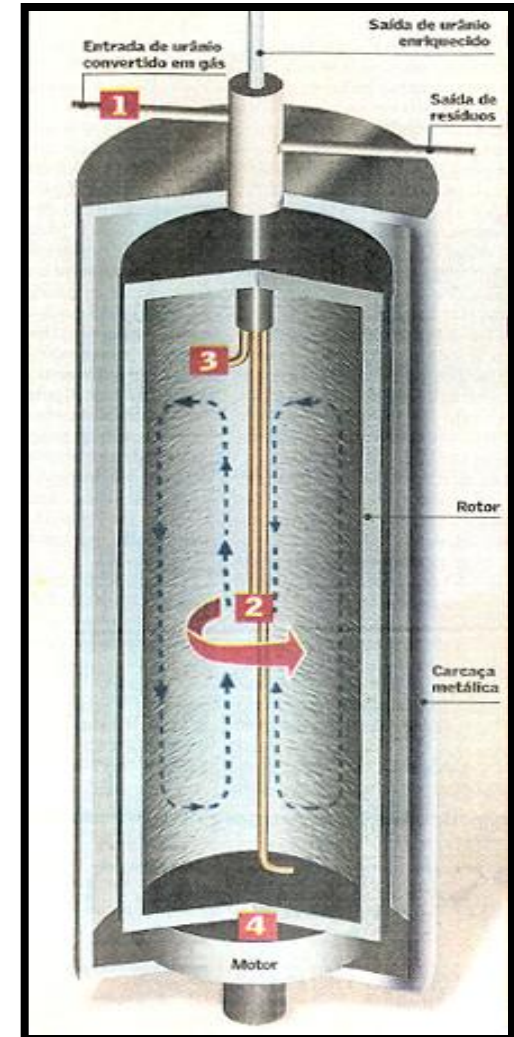
RESENDE, RJ



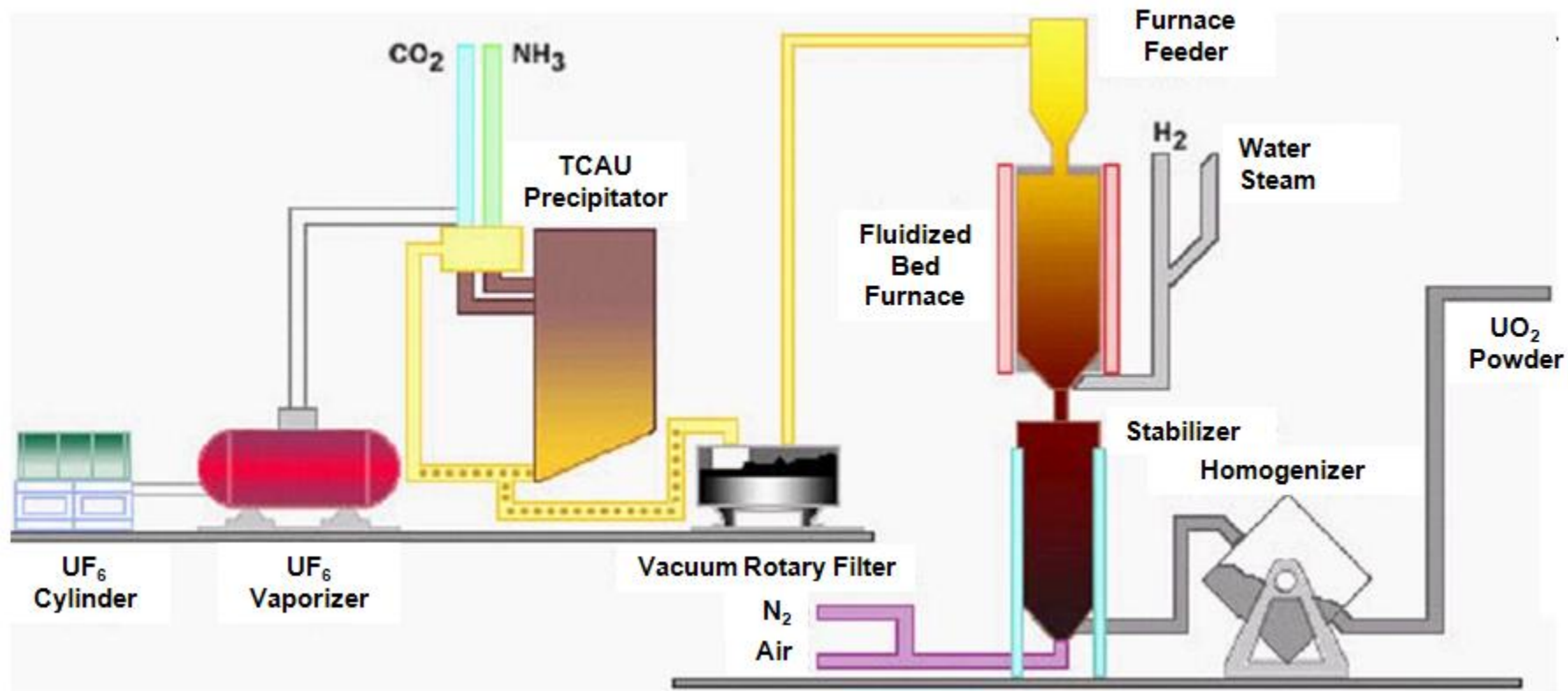
# Enriquecimento de Urânio

- Tecnologia desenvolvida pelo Centro Tecnológico da Marinha (CTMSP).
- Planta em escala industrial em implantação na INB – 3 cascatas em operação.

Sala de Controle



# Reconversão (Fabricação de pó de $\text{UO}_2$ )



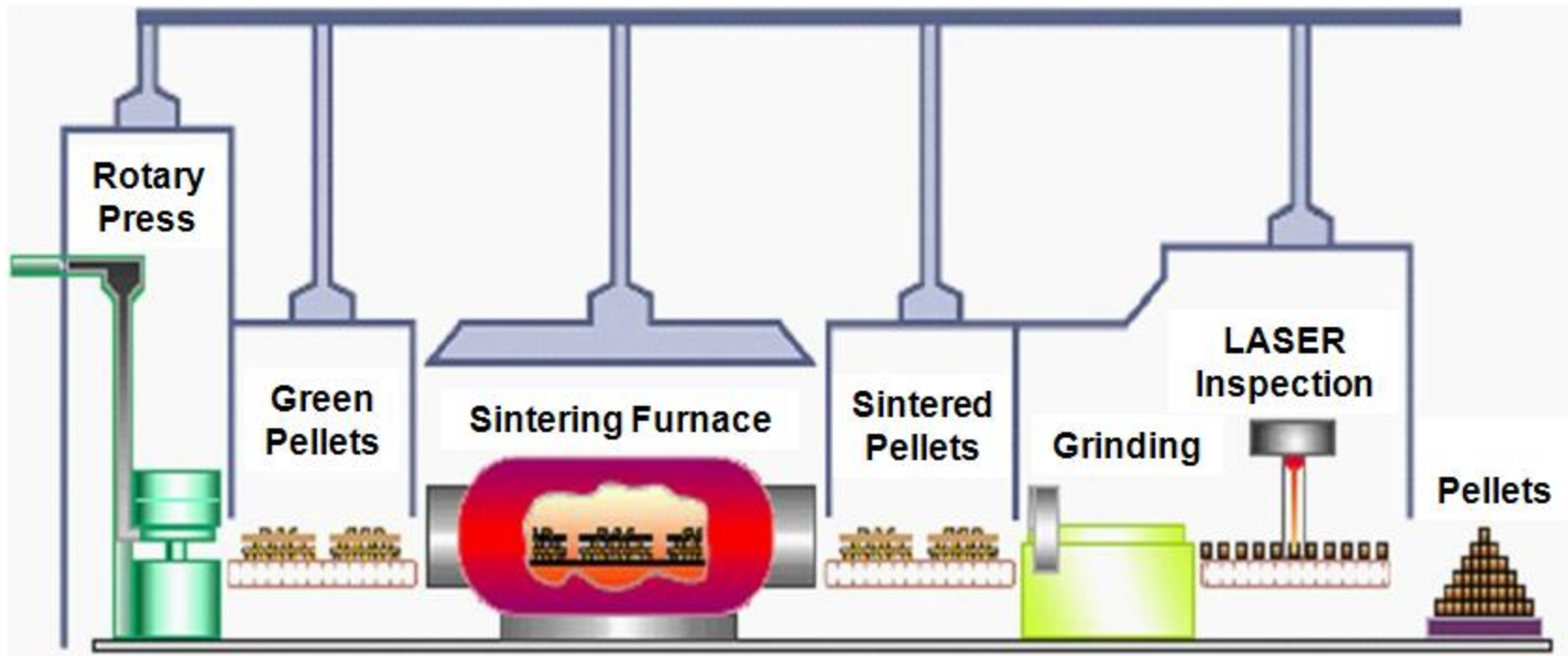
**Capacidade Nominal: 160 t / ano**

# Reconversão





# Fabricação de Pastilhas



**Capacidade Nominal: 120 t / ano**

# Fabricação de Pastilhas



RESENDE, RJ





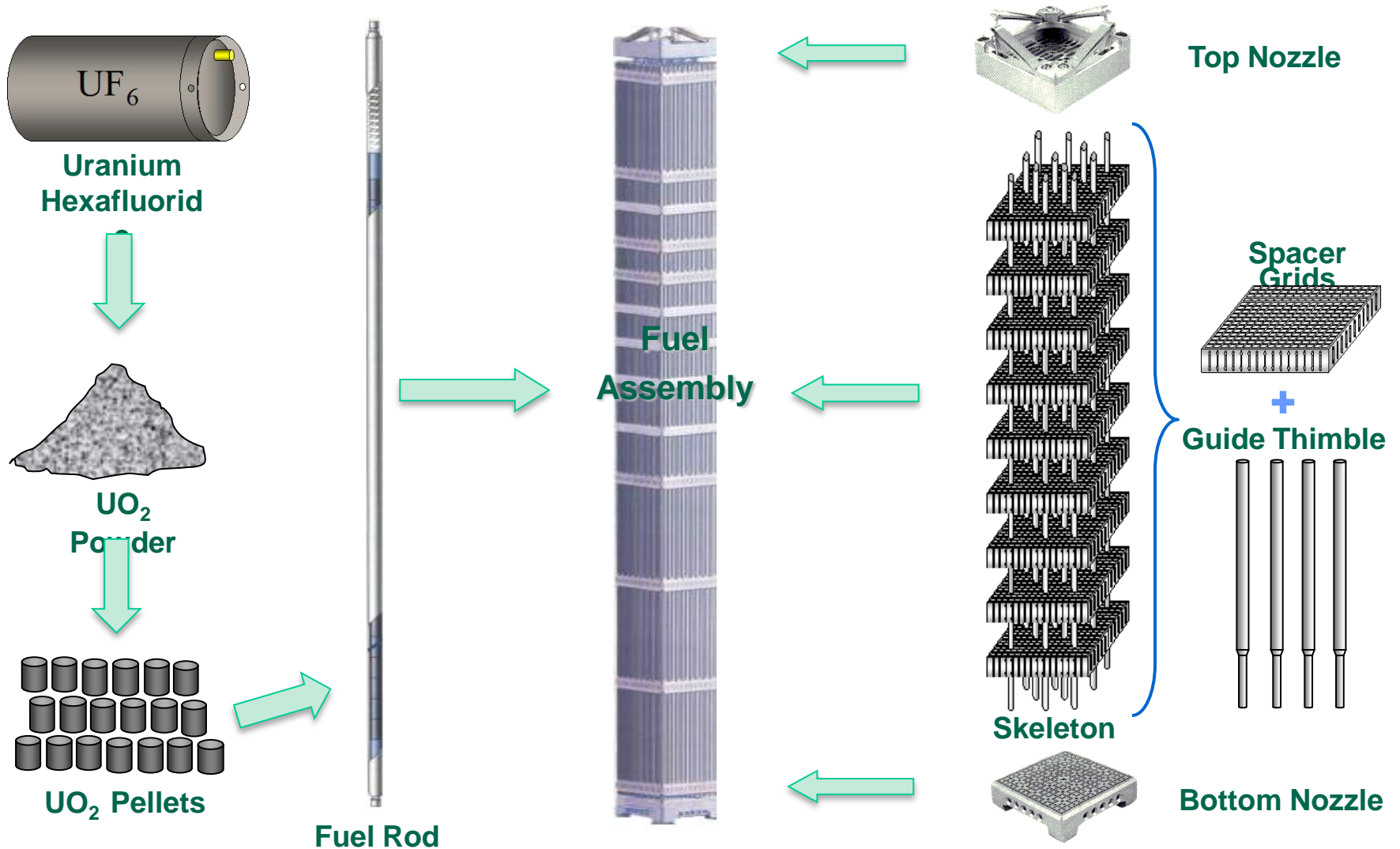
# FCN – Componentes e Montagens



RESENDE, RJ



# Componentes do Elemento Combustível



# Histórico do Projeto e Análise de Segurança 16NGF

# Histórico do Projeto e Análise de Segurança 16NGF

2000

➤ Apresentado trabalho no VIII CGEN (XII ENFIR)

“ANÁLISE DOS PARÂMETROS NEUTRÔNICOS RELACIONADOS À REDUÇÃO DO DIÂMETRO DA VARETA PARA O ELEMENTO COMBUSTÍVEL DE ANGRA 1”

2001

Acordo  
Comercial



INB / ETN (Brasil)  
KNF (Coréia)  
Westinghouse (USA)



# Histórico do Projeto e Análise de Segurança 16NGF

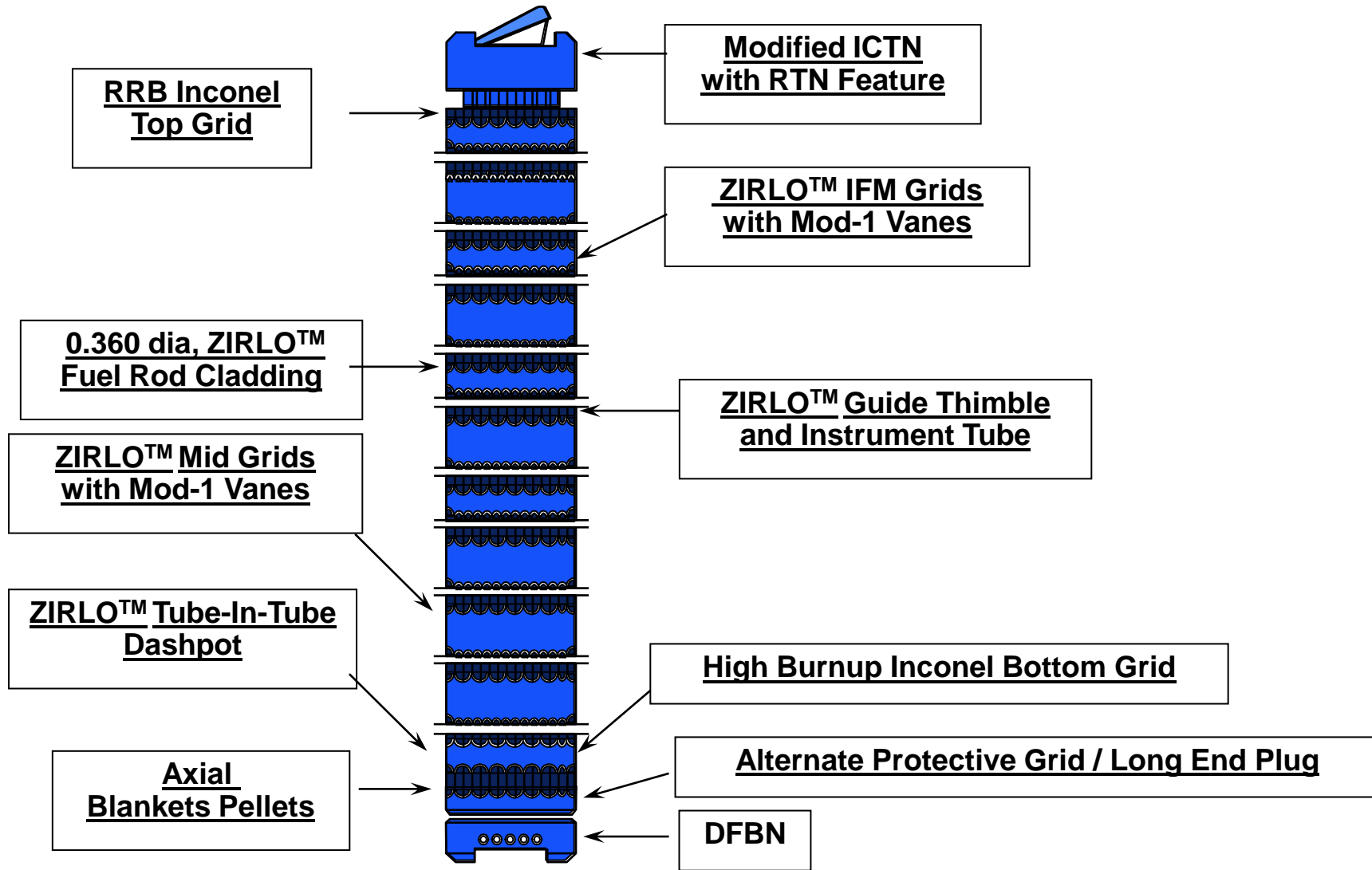
## ➤ Desenvolvimento (iniciado em Nov/2001)

- Projeto e testes (USA) - 2 anos e meio (Nov/2001 – Abr/2004)
  - Projeto preliminar (2001 e 2002)
  - Projeto final e testes (2003 e 2004)
- Análise de segurança (Brasil e USA) - 2 anos (2005 -2007)

## ➤ Implementação dos LTA e 1ª Região



# 16NGF



# Projeto Neutrônico



# Neutrônica

- Comparação 16STD e 16NGF
- Otimização do Diâmetro da Vareta Combustível
- Ganhos Econômicos com o uso de ZIRLO
- Otimização de Axial Blanket
- Estratégias de Recarga
- Venenos Queimáveis
- Análise de Segurança

# Comparação entre 16STD e 16NGF

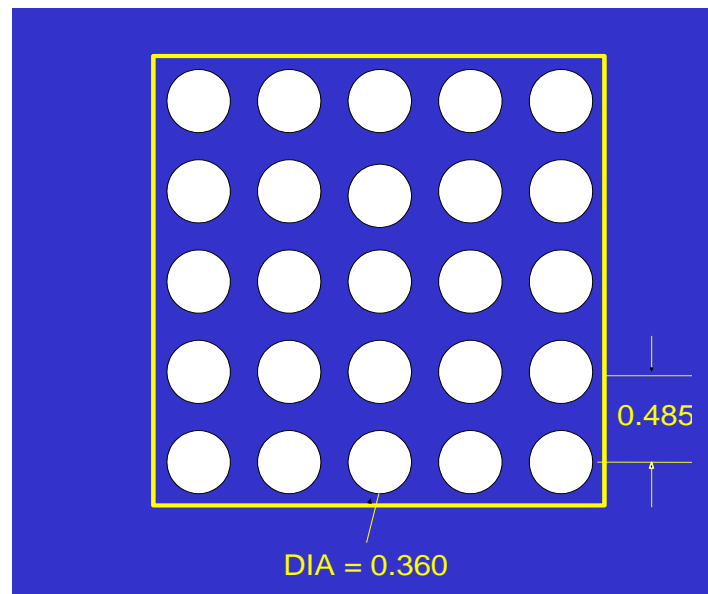
Parâmetro	16STD	16NGF
	ANGRA-1	ANGRA-1
Diâmetro da Vareta	0.374 in	0.360 in
Veneno Queimável	Pyrex	Gadolinia
Axial Blanket	NÃO	SIM (Opcional)
Aumento de Potência	NÃO	SIM

# Otimização do Diâmetro da Vareta

- Objetivo
  - Encontrar o diâmetro de vareta combustível que possibilite alcançar uma melhor performance técnica (neutrônica) resultando em ganhos econômicos no ciclo do combustível.
- Critérios para determinar o diâmetro de vareta ótimo
  - Menor custo para o ciclo do combustível
  - Atender aos critérios de segurança
  - Outras considerações
    - Impactos em outras áreas (T&H, Projeto Mecânico)
    - Experiência da WH com a vareta de diâmetro 0.360in
    - Licenciamento

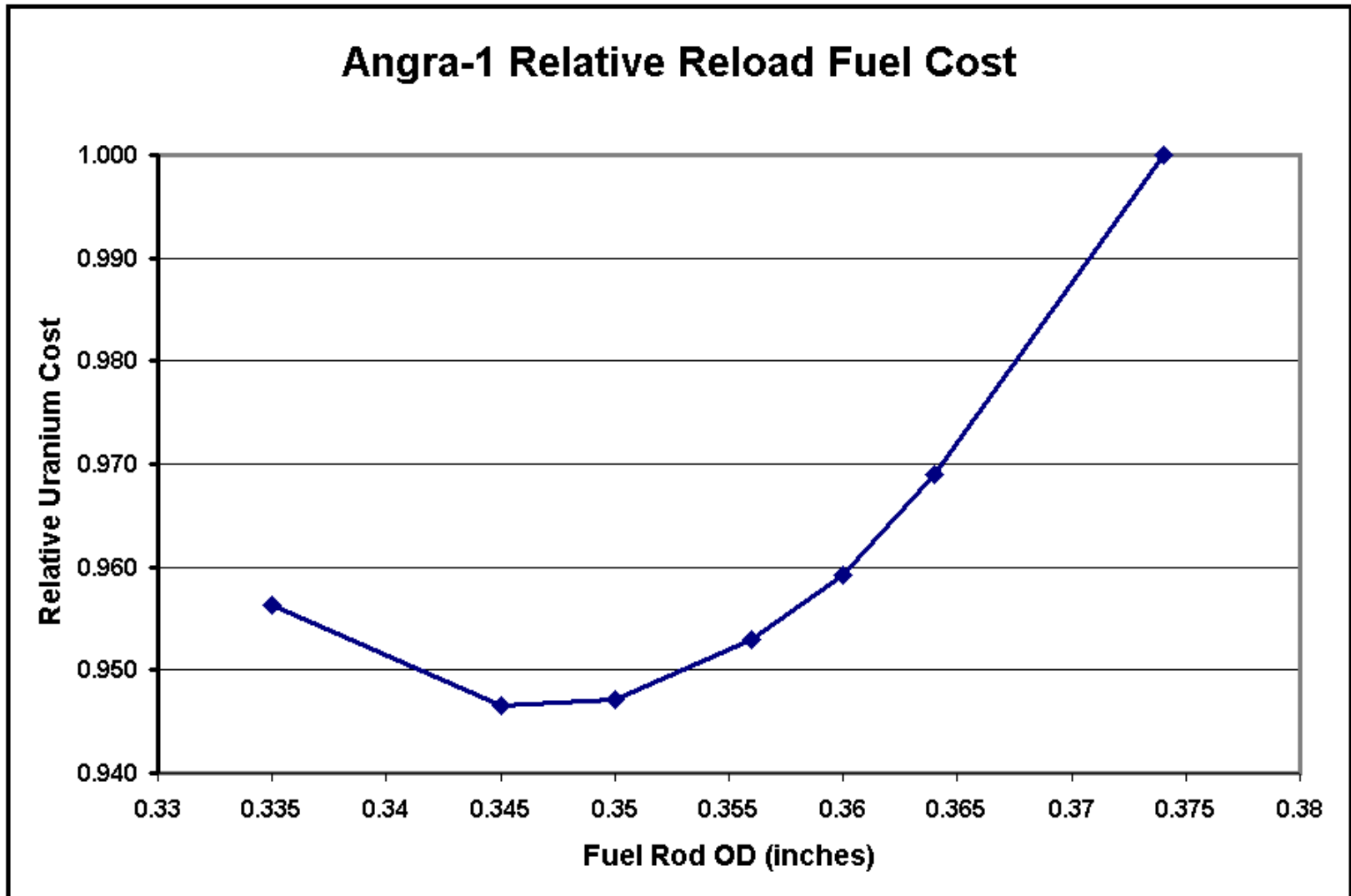
# Otimização do Diâmetro da Vareta

- Existe um razão H/U em que a reatividade é máxima
- O projeto 16STD de Angra 1 é muito conservativo
- Para se aumentar a razão H/U sem mexer nos internos do reator, precisamos reduzir o diâmetro da vareta
- Após estudos econômicos e técnicos reduziu-se de 0.374" (0.950mm) para 0.360" (0.914mm)





# Otimização do Diâmetro da Vareta



# Otimização do Diâmetro da Vareta

## Conclusão

Baseado no custo da recarga e performance neutrônica o diâmetro otimizado encontrado foi próximo de 0.350in, porém, os seguintes fatores levaram a escolha da vareta de 0.360in:

Margem térmica (-)

Comprimento de Ciclo 18 meses ou mais (-)

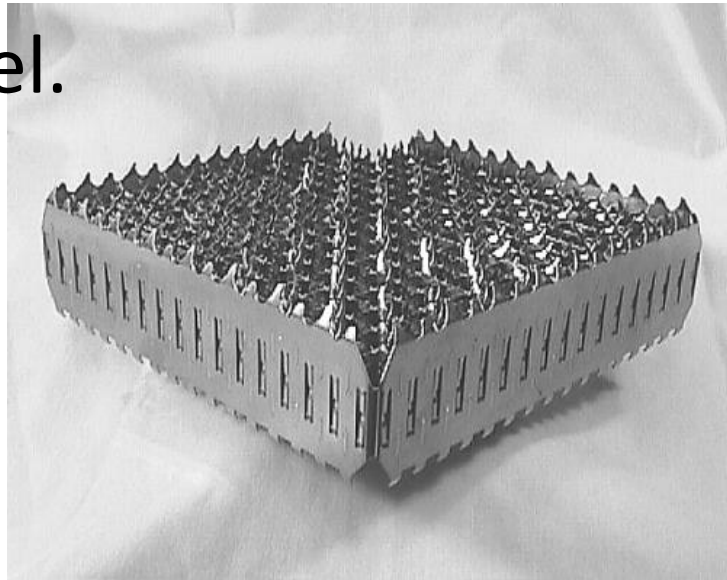
Experiência da Westinghouse com varetas  
0.360" (+)

0.360"

# Ganhos Econômicos com o uso de ZIRLO

- Objetivo

- Quantificar a economia no custo do ciclo do combustível com a utilização de grades intermediárias de ZIRLO™ ao invés de Inconel.



# Ganhos Econômicos com o uso de ZIRLO

Casos	Material das Grades Intermediárias	Enriquecimento U235 (w/o)	Custo da Recarga (%)
1	INCONEL	4.663	1,000
2	ZIRLO™	4.600	0,984

Com a utilização de grades de ZIRLO™ (caso 2) há um ganho de aproximadamente 1.6% no custo da recarga, comparando com o uso de Inconel (caso 1).



# Otimização de Axial Blanket

- **Objetivo**

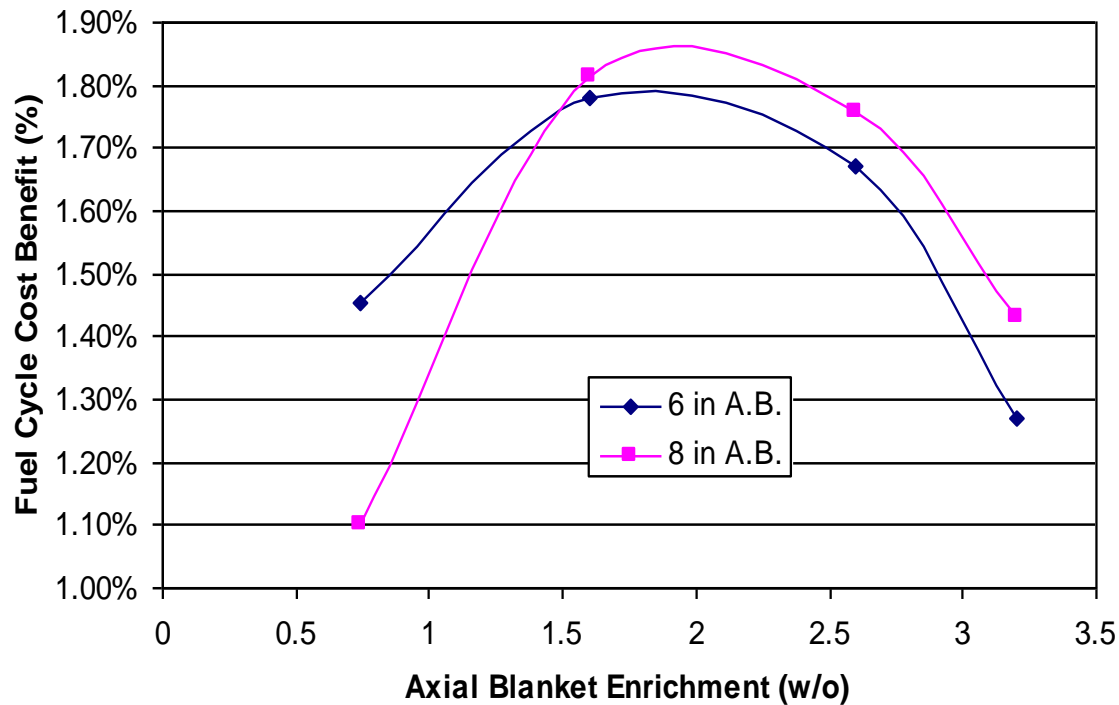
- Determinar o comprimento e o enriquecimento de Axial Blanket que forneça o maior benefício econômico.

- **Crítérios Considerados nos Casos Analisados**

- Comprimentos: 6 e 8 inches;
- Enriquecimentos: 0.74; 1.60; 2.60 e 3.20 w/o;
- Enriquecimento central do EC ajustado para o mesmo comprimento de ciclo;
- Pastilhas Sólidas;
- Comprimento de ciclo fixo em 444 EFPD (16 meses de operação).

# Otimização de Axial Blanket

Fuel Cycle Cost Benefit Vs  
Axial Blanket Enrichment



Casos	Axial Blanket Comprimento e Enriq. (w/o)	Enriq. do EC (w/o)	Custo Relativo (%)
Base	N/A	4.527	-
1	6in @ 0.74	4.793	1.45
2	6in @ 1.60	4.719	1.78
3	6in @ 2.60	4.638	1.67
4	6in @ 3.20	4.600	1.27
5	8in @ 0.74	4.925	1.10
6	8in @ 1.60	4.812	1.81
7	8in @ 2.60	4.697	1.76
8	8in @ 3.20	4.636	1.43

# Estratégias de Recarga

- Flexibilidade para atender as necessidades das centrais Angra-1, Kori-2 e KRSKO;
- Comprimento de ciclo de 12 e 18 meses;
- Aumento de potência e troca do gerador de vapor em Angra-1;
- Queima média do EC de 55 GWD/MTU
- Queima de pico na vareta de 75 GWD/MTU (62 GWD/MTU licenciado NRC);
- Uso de Axial Blanket de forma a reduzir o custo da recarga;
- Uso de Gadolínio.

# Venenos Queimáveis

- Opções de Venenos Queimáveis para o 16NGF
  - Gadolínio → INB, KNFC
  - IFBA (Integral Fuel Burnable Absorber) →  
Westinghouse

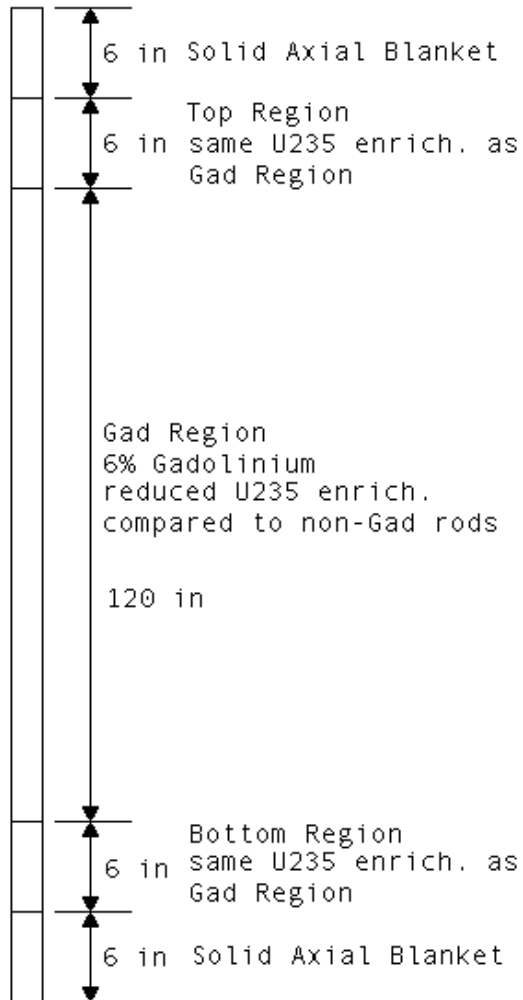


# Venenos Queimáveis

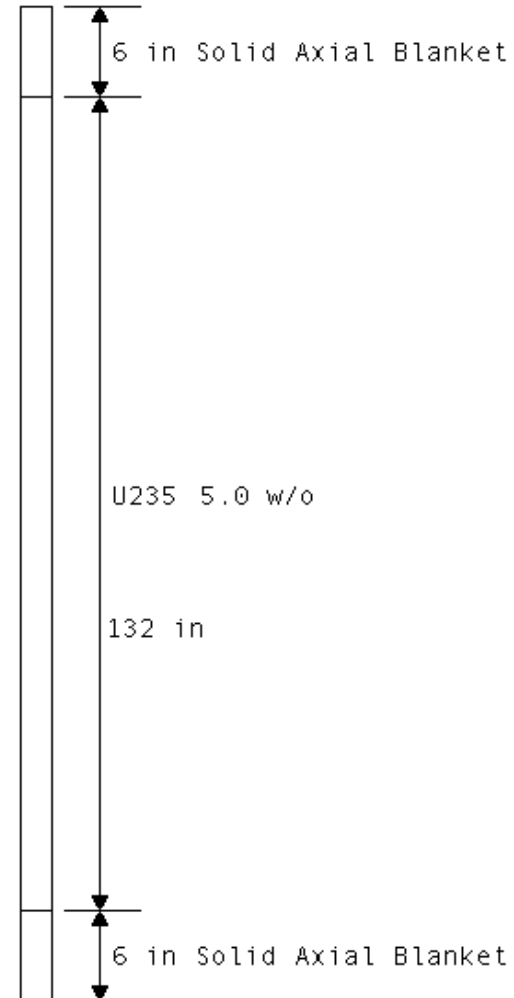
- Gadolínio
  - Integral (incorporado em algumas varetas combustíveis que compõem o EC);
  - Menor Enriquecimento de  $^{235}\text{U}$  nas varetas de Gadolínio devido a mistura com  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  (Condutividade Térmica);
  - Excelente no controle do excesso de reatividade no Início do Ciclo (IDC), porém, surgimento de picos de potência no Meio do Ciclo (MDC).

# Venenos Queimáveis

Gad Rod



Non-Gad Rod

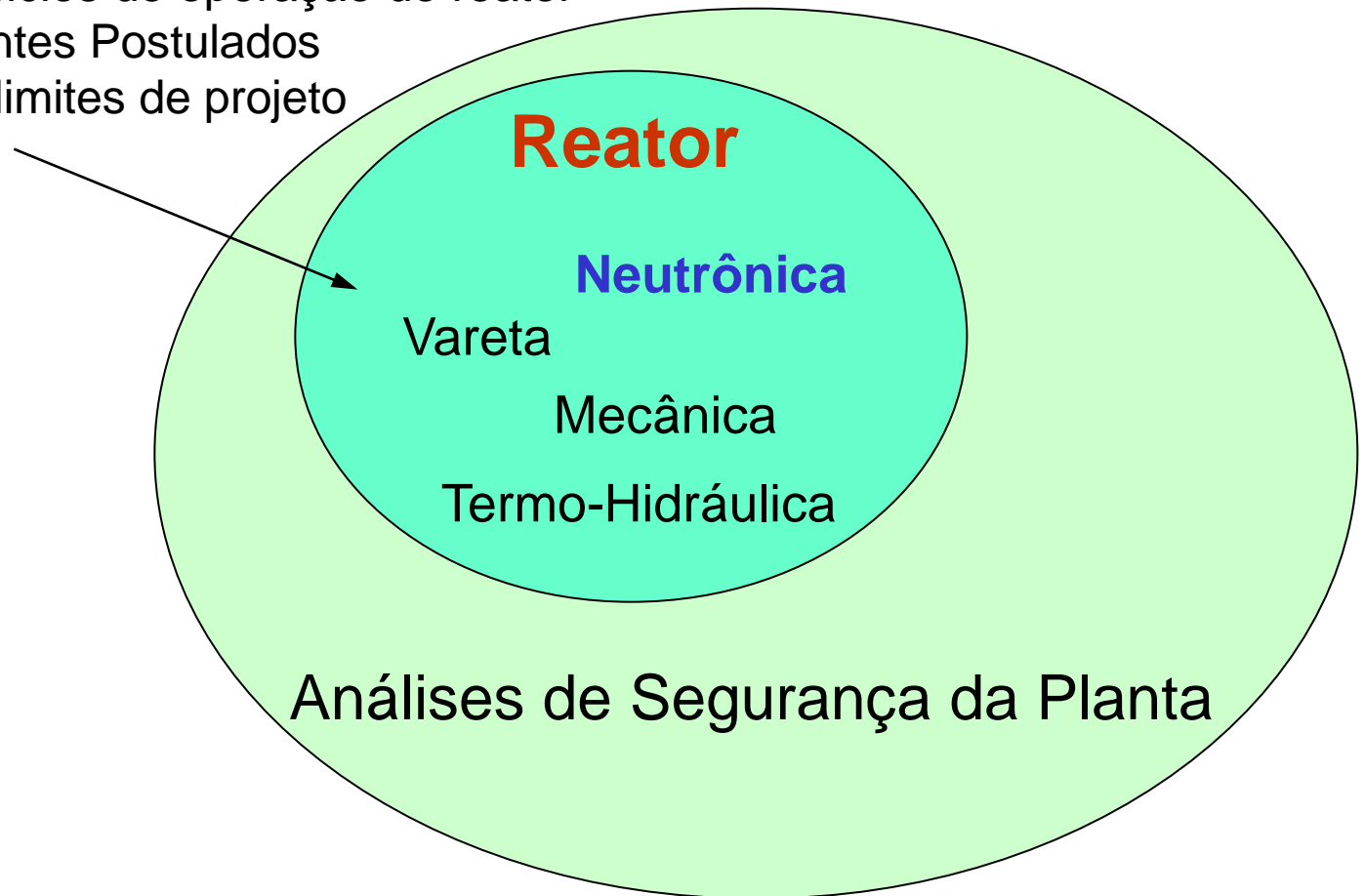


# Análise de Segurança

- Substituição dos Geradores de Vapor
- Alteração de combustível: 16STD → 16NGF
- Aumento de Potência (6.3%)
  - de 1876 para 1994 MWt
- Maior limite de queima, picos de potência, SDM, entre outros
- Uso de Axial Blanket e Gadolínio

# Interfaces da Análise de Segurança

Simulação de ciclos de operação do reator  
Análises Acidentes Postulados  
Verificação de limites de projeto





# Ciclos Hipotéticos e de Transição

- Cycle n
  - RSG, 16NGF 4 LTA`s e 16STD/Zirlo
- Cycle n+3
  - Aumento de potência, Ciclo de transição (1/3 NGF no núcleo)
- Cycle n+5
  - Aumento de potência, Alta queima, Alta concentração de Boro para IDC e núcleo completo com 16NGF

# Análises de Segurança - Neutrônica

## Análise para 16NGF, Uprate e Troca do Gerador de Vapor

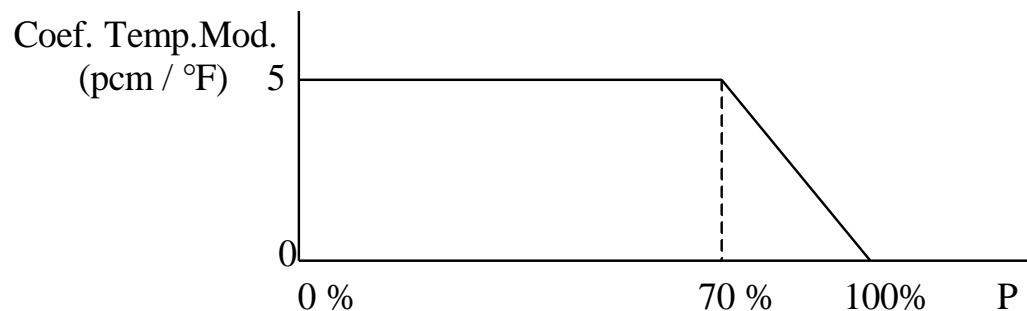
- **Ciclos Hipotéticos e de transição**

- Coeficientes temperatura do moderador
- Coeficientes de temperatura do combustível
- Beta efetivo
- Margem de Desligamento
- Trip Shape/Reactivity
- Rod Insertion Allowance (RIA)
- Peripheral Low Power Assembly
- Decay Heat
- Differential Rod Worth vs Rod Position
- Boron Worth Coefficients
- Rod Worth Calculations
- Rod Power Census for BELOCA

- FAC Analysis
- PBOT and PMID for BELOCA
- Maximum hot assembly average relative power (PHA)
- Transient Power Limits
- Boron Dilution
- Stuck Rod Coefficients
- Gd Power Suppression Factors
- RWFS/RWAP
- Rod Misalignment
- Single Rod Withdrawal
- Rod Ejection
- Steamline Break
- Dropped Rod

# Limites de Projeto para o 16NGF

Parâmetro	Limite Atual	Novo Limite 16NGF
Fator de Canal Quente - $F_{\Delta H}$	1,55	1,70
Fator de Canal Quente - $F_Q$	2,34	2,50
Dens. Linear Potência (kW/ft)	18	22,4
Margem de Desligamento (pcm)	2000	1600
Coef. Temperatura do Moderador (pcm/°F)	< 0	Fig. 1
Queima Máxima do EC (MWD/MTU)	42000	55000
Queima Máxima da Vareta (MWD/MTU)	50000	75000



**Figura 1.** Limite para Coeficiente de Temperatura do Moderador

# Projeto de Vareta Combustível

# Projeto de Vareta Combustível

	16STD	16NGF	Conseqüência
Queima VC [MWd/KgU]	50	75	+ oxidação materiais + liberação de gases fissão + crescimento materiais + inchamento pastilhas + exposição componentes
Potência [MW]	1876	1994	+ oxidação dos materiais + liberação de gases fissão
Veneno Queimável	Discreto (Pyrex)	Integral (Gd)	Análise de VC contendo $UO_2/Gd_2O_3$



# Projeto de Termoidráulico

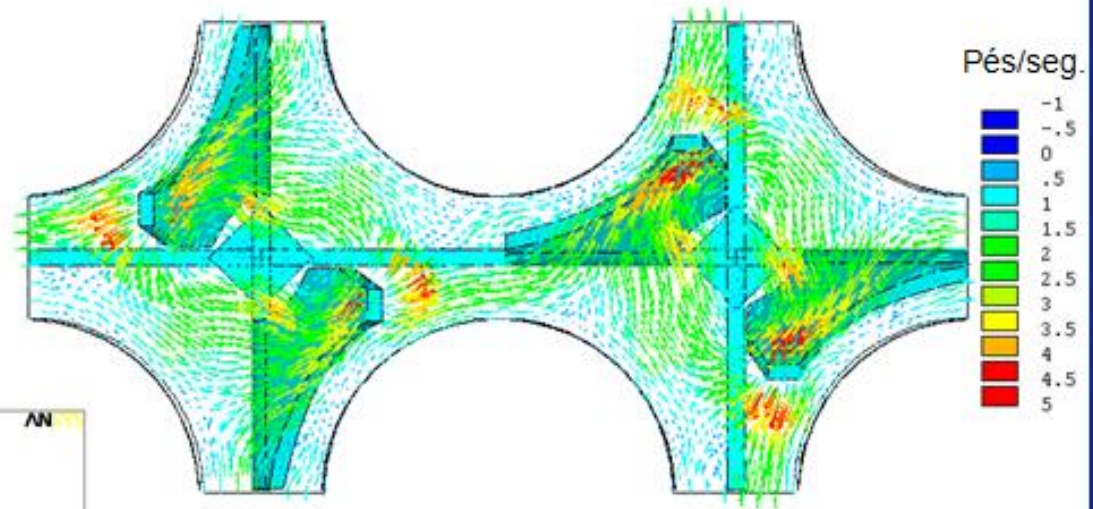
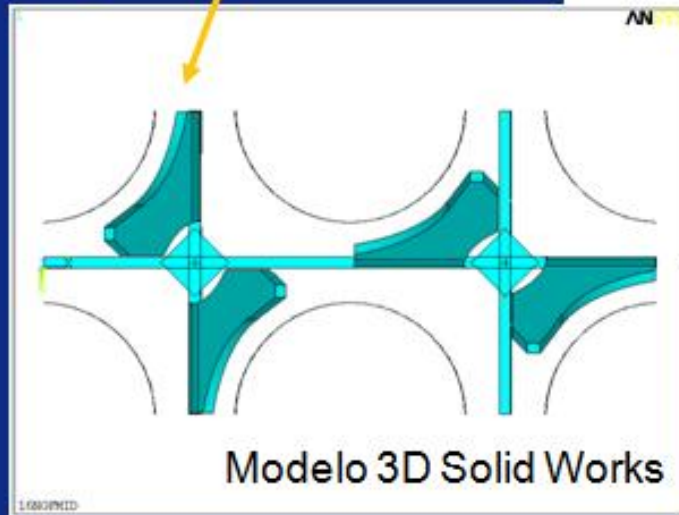
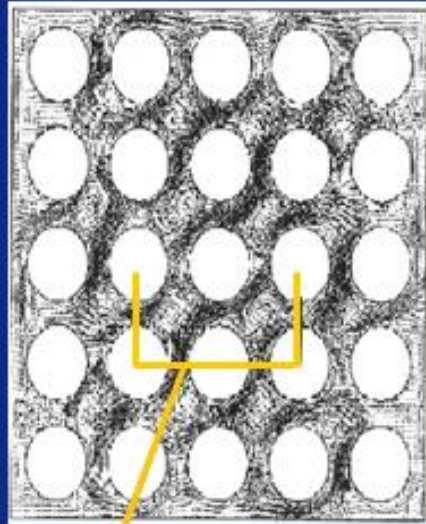
# Objetivos Termoidráulica

- Obter mais do que 10% em margem de potência em comparação com o atual elemento combustível, 16STD ( ↑ potência do reator ou ↑ flexibilidade de gerenciamento do combustível durante a recarga).
- Demonstrar compatibilidade entre o 16NGF e o elemento combustível atual nas usinas Angra 1, KRSKO, e Kori 2.

# Objetivos Termoidráulica

- Análises Preliminares [2002]
  - Modelos analíticos, CFD, Testes preliminares, etc.
- Testes e Análises Confirmatórias [2003]
  - Teste de perda de carga hidráulica ( Loop FACTS)
  - Teste do Fluxo de Calor Crítico (CHF\_Nova York)
  - Análises Finais (Fluxo cruzado, Bypass, Forças de arraste, Instabilidade, Penalidade durante núcleo de transição, etc.)

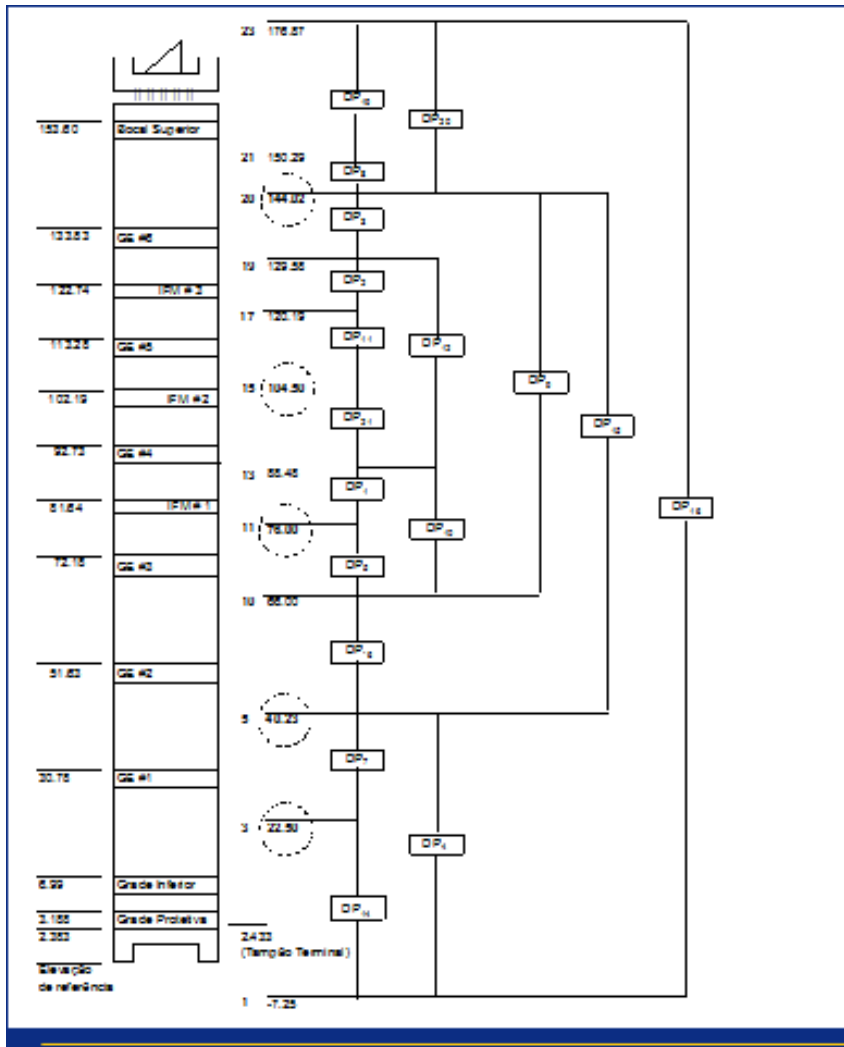
# Modelos 16NGF



Perfil vetorial do campo de velocidades no topo das aletas

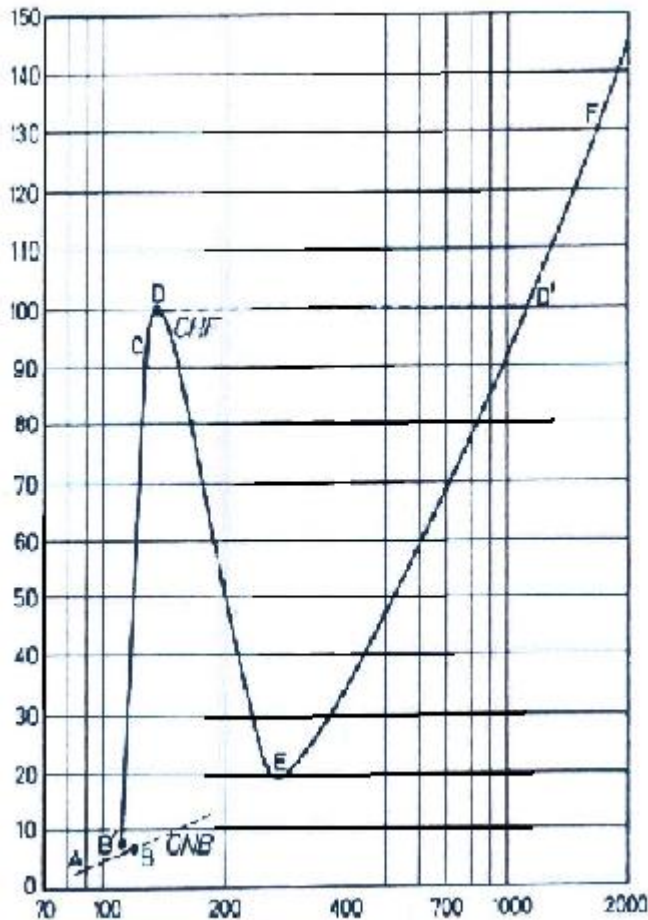
**Objetivo** : Otimizar as aletas das GE's (Transferência de calor, minimizar resistência hidráulica, entre outros)

# Teste de Compatibilidade



**Objetivo** : Medir os Coeficientes de Perda de Carga finais (Resistência ao escoamento hidráulico) necessário em diversas análises do comportamento do 16NGF no núcleo

# Teste de CHF



Definição: Fluxo de Calor a partir do qual há a formação de um “filme de vapor” na superfície da VC isolando-a de troca de calor com o fluido refrigerante

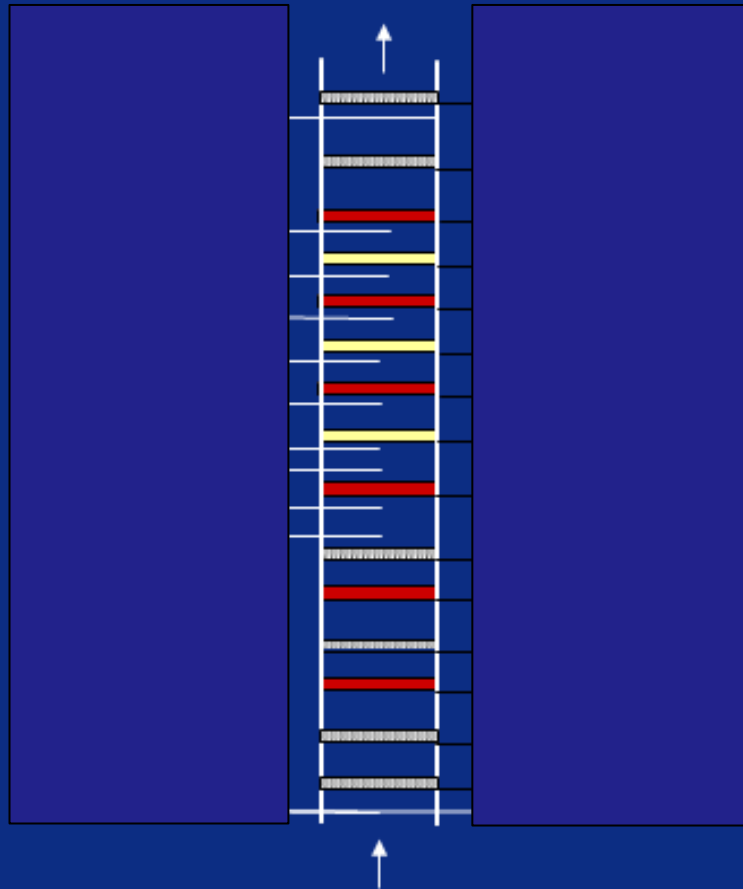
Efeito : Súbito aumento de temperatura da parede do tubo, gerando falhas da VC



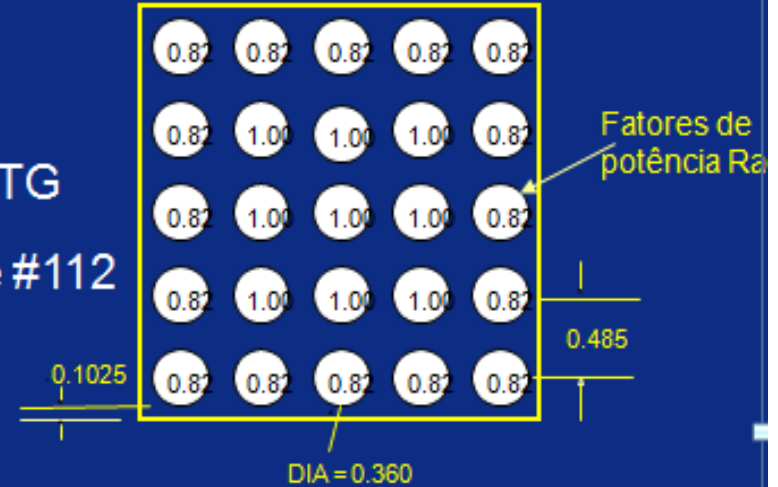
# Teste de Fluxo de Calor Crítico

## Geometria do Protótipo do 16NGF

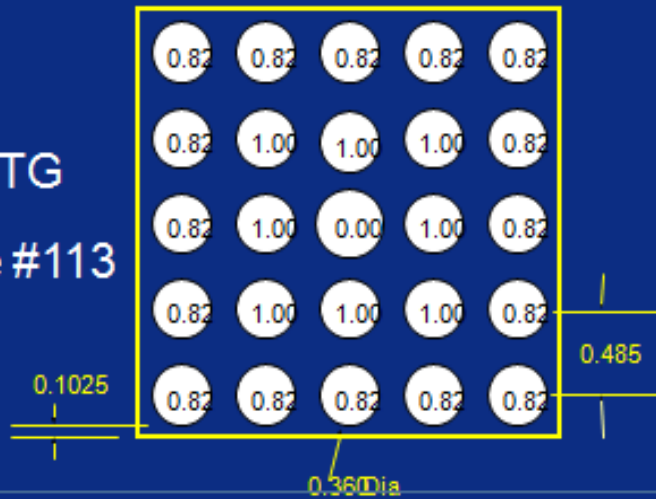
Geometria Axial



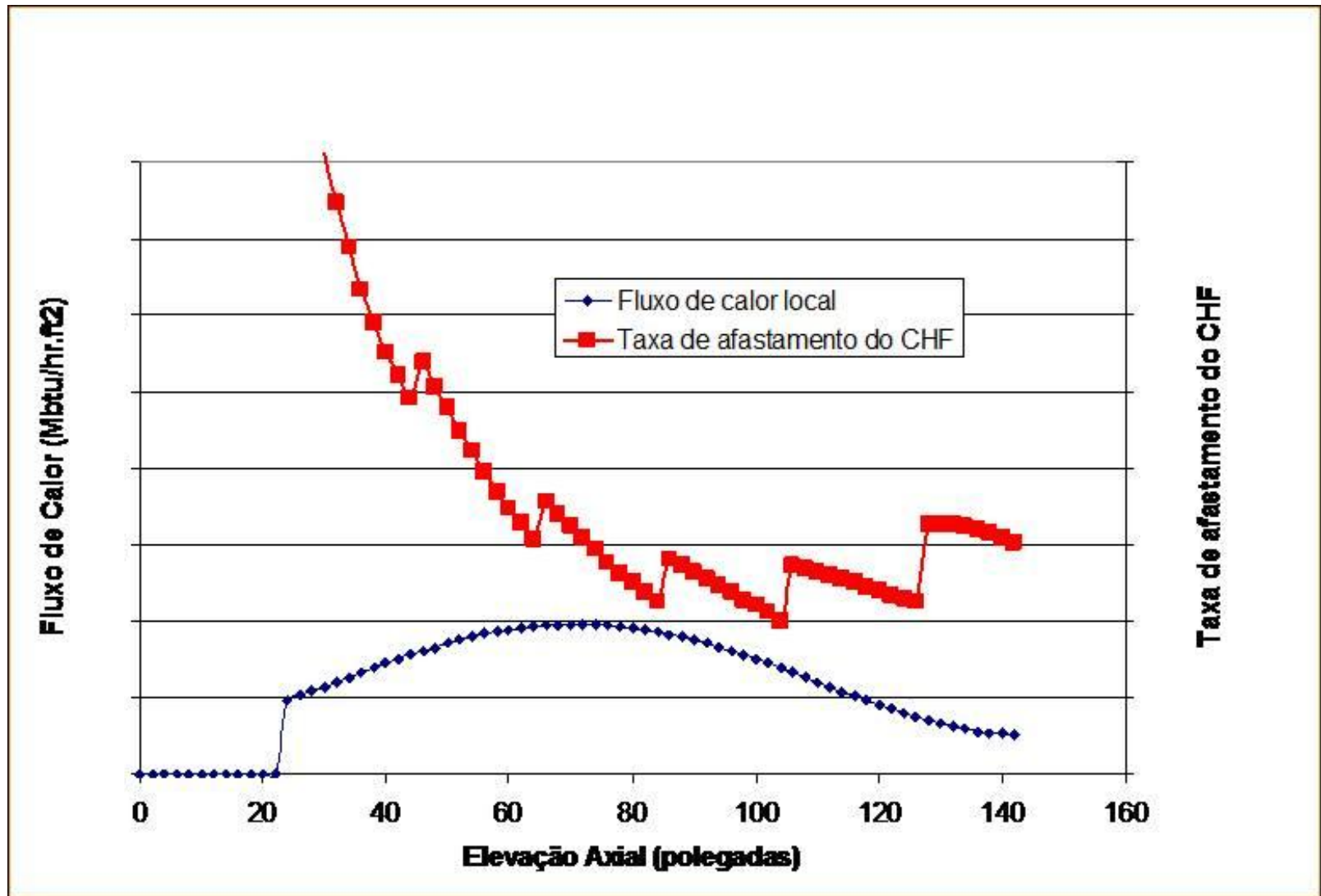
Sem TG  
Teste #112



Com TG  
Teste #113



# Teste de Fluxo de Calor Crítico - CHF



# Projeto Mecânico

# Fases do Projeto

- Conceitos e Implicações (C&I) - Jan. 2002/Jun. 2002
  - Estabelecer as características e inovações
  - Avaliar as implicações
- Projeto Preliminar (D&M) - Jul. 2002/Dez. 2002
  - Características e inovações incorporadas ao 16NGF
  - Cálculos preliminares
  - Simulação numérica
  - Desenhos de projeto (X-DWG)
  - Fabricação de Componentes
  - Testes preliminares
- Projeto Final (Closeout) - Jan. 2003/Dez. 2003
  - Análises confirmatórias
  - Fabricação de 3 protótipos de EC para testes
  - Testes confirmatórios
  - Desenhos de fabricação (P-DWG)

# Conceitos e Implicações (C&I)

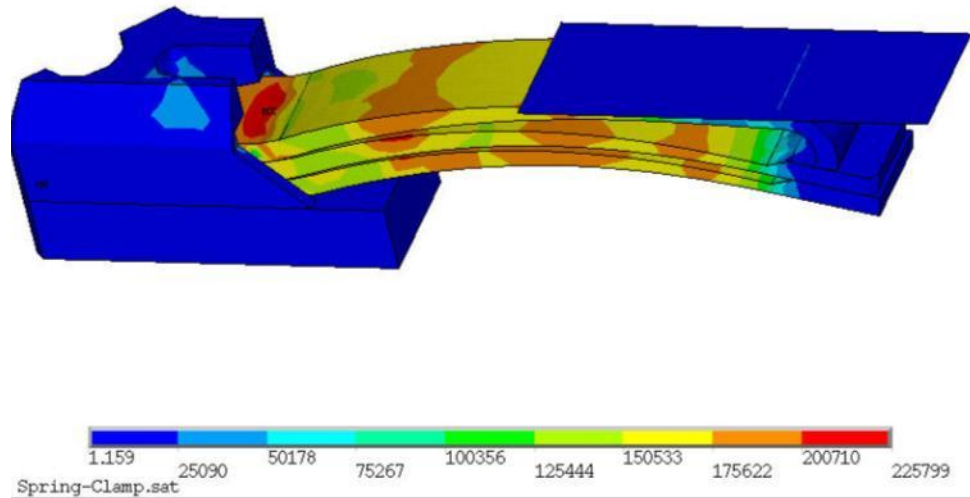
## ➤ Características e inovações incorporadas ao 16NGF

Item	16STD	16NGF	Melhoria/Vantagem
Vareta Combustível	Zircaloy-4	ZIRLO™	Alta queima (62 GWD/MTU) e ciclos longos
Grade Intermediária	Inconel 718	ZIRLO™ Novo conceito de mola (tipo I)	Resistência ao “fretting”, melhor performance térmica e melhor condição anti-engastamento
Grade Misturadora	Não	3 IFM’s	Melhor performance térmica
Tube-Guia	Zircaloy-4 Amortecedor integrado	ZIRLO™ Tubo interno	Robustez e resistência contra IRI
Bocal Superior	BS soldado ao esqueleto	“Clamp” integral e RTN	Eliminação do parafuso de fixação da mola e possibilidade de remoção
Bocal Inferior	DFBN	DFBN Com grade protetora Tampão terminal sólido e longo	Filtragem de “debris”

# Projeto Preliminar

- Características e Inovações → Projeto Preliminar
- Cálculos preliminares
  - Simulação numérica
  - Desenhos de projeto (X-DWG)
  - Fabricação de componentes
  - Testes preliminares

Exemplo:  
Simulação numérica  
do conjunto mola e  
torre de fixação





# Projeto Final e Testes Confirmatórios

➤ Projeto Preliminar  Projeto Final e Teste Confirmatórios

- Análises confirmatórias
- Fabricação dos 3 protótipos de EC para testes
- Testes confirmatórios
- Desenhos de fabricação (P-DWG)

# Ganhos com 16NGF

- *Formação de pessoal - qualificação nas metodologias de projeto*
- *Fornecimento cruzado de componentes*
- *Redução de pagamento de Royalties*
- *Estado da arte em tecnologia para o 16NGF*

# Novos e Futuros Projetos

- *Fabricação de Varetas de Gadolínio*
- *Duplicação das linhas de Reconverção e Pastilhas*
- *Construção da planta de conversão*
- *Nacionalização de materiais e componentes*



# II SENCiR

Semana de Engenharia Nuclear e Ciências das Radiações



# INB

INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL

Obrigado.

Eduardo Faria  
faria@inb.gov.br

II SENCiR – UFMG – Belo Horizonte/MG  
7 a 9 de Outubro de 2014