



**DESENVOLVIMENTO E UTILIZAÇÃO DE ELEMENTOS
INSTRUMENTADOS E SISTEMAS DE INSPEÇÃO VISUAL PARA
REATORES NUCLEARES DE PESQUISA**

Walmir Maximo Torres
Pedro Ernesto Umbehaun
Benedito Dias Baptista Filho
José Eduardo Rosa da Silva
Carlos Zeituni
Antônio Teixeira e Silva

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP, Centro de Engenharia Nuclear – Divisão de Termo-Hidráulica e Análise de Segurança. Travessa R, 400, Cidade Universitária, 05508-970, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: wmtorres@net.ipen.br.

***Resumo.** Um simulador de elemento combustível instrumentado (DMPV-01 – Dispositivo para Medida de Pressão e Vazão) foi projetado e construído para medir a vazão nas diversas posições de elementos combustíveis do núcleo do reator nuclear de pesquisas IEA-R1. Esse elemento, fabricado em Alumínio na escala natural, possui tomadas de pressão estática e dinâmica, e foi calibrado em um circuito experimental obtendo-se a curva relacionando queda de pressão com vazão. Foram feitas medidas em 4 posições do núcleo e a distribuição de vazão obtida foi praticamente uniforme. Entretanto, as medidas mostraram que uma parcela considerável da vazão total era desviada do núcleo ativo. Um sistema de inspeção visual com câmera sub-aquática resistente a radiação foi então utilizado para a investigação das regiões do núcleo onde havia suspeita de desvio de vazão. Observou-se que alguns componentes do núcleo não estavam apropriadamente posicionados na placa matriz. Também foram realizados estudos sobre o sistema de medida de vazão do reator. Ações corretivas foram tomadas e novas medidas com o DMPV-01 foram realizadas, obtendo-se um representativo acréscimo de vazão nas posições dos elementos combustíveis.*

***Palavras-chave:** distribuição de vazão, reatores de pesquisa, análise de segurança de reatores*

1. INTRODUÇÃO

Um dos requisitos para que reatores nucleares operem de forma segura é manter as suas margens de segurança (MDNBR, ONB e temperatura máxima) dentro de limites adequados em qualquer condição de operação, garantindo assim a integridade dos elementos combustíveis (E.C's). As margens de segurança são calculadas na análise termo-hidráulica (TH) do núcleo, e para realizá-la é necessário o conhecimento de parâmetros, tais como: a) distribuição do fluxo de calor, que é uma função da potência de operação, da queima e da posição; b) geometria; c) materiais; e d) distribuição de vazão no núcleo. O reator IEA-R1 utiliza E.C's. de placas planas do tipo MTR (Materials Testing Reactors). Esses E.C's. são formados por 18 placas combustíveis fixas em duas placas suportes laterais formando 17 canais de escoamento independentes. A análise TH de núcleos que usam esse tipo de combustível feita por Umbehaun e Andrade (1999) é relativamente simples, pois nestes casos não ocorre redistribuição de escoamento como acontece nos núcleos com E.C's do tipo aberto com varetas, normalmente usados em reatores PWR de potência.

Em reatores de pesquisa do tipo piscina como o IEA-R1, é normal considerar que uma parcela entre 15 e 20% da vazão total do circuito primário seja desviada do núcleo ativo do reator através de irradiadores de amostras, furos secundários da placa matriz e etc.. O restante da vazão é dividido igualmente entre os E.C's e elementos de controle. A estimativa da parcela de desvio é feita com base em resultados experimentais e/ou em correlações disponíveis na literatura. Contudo, devido à relativa complexidade geométrica existente na região do núcleo, essas correlações podem levar a resultados estimados pouco confiáveis.

Com o objetivo de conhecer a vazão que efetivamente passa pelos E.C's. do reator IEA-R1, foi projetado e construído por Lima e Oliveira (2000), um elemento denominado DMPV-01 para medir a vazão que atravessa os E.C's.

2. ELEMENTO DMPV-01 E MEDIDAS EXPERIMENTAIS

O DMPV-01 é um elemento instrumentado que foi projetado e construído para medir a vazão e a pressão nos E.C's do núcleo do reator IEA-R1. Esse elemento foi construído em Alumínio, no tamanho real de um E.C. padrão usado no reator. Ele possui tomadas de pressão estática na região de entrada e no bocal de saída, e uma tomada de pressão dinâmica no centro do bocal de saída do elemento, conforme mostra a Fig. (1).

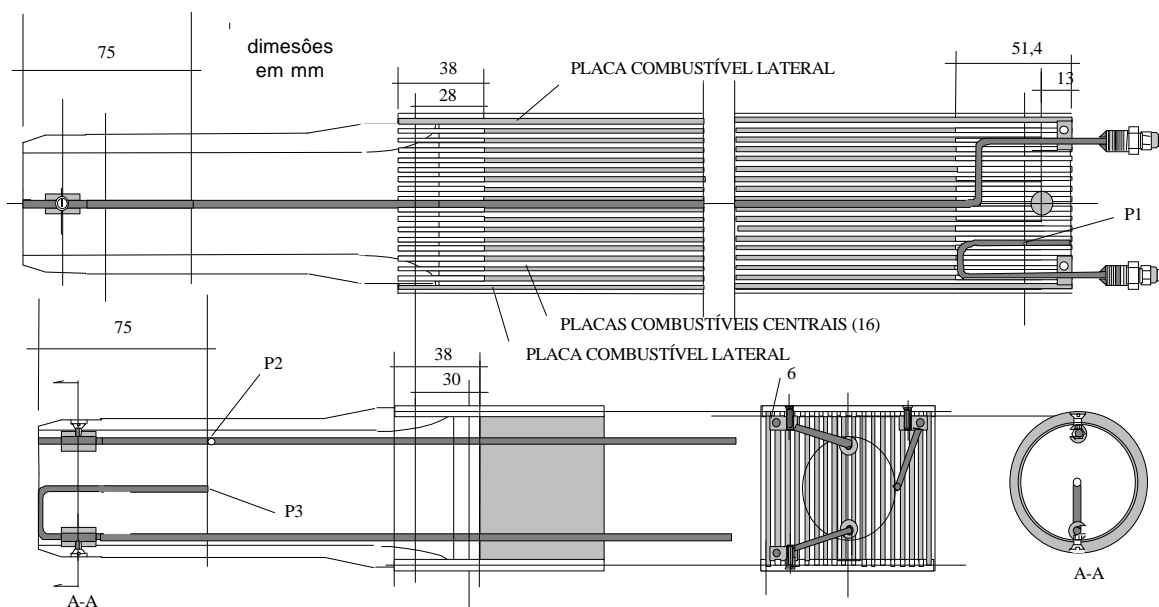


Figura 1. DMPV-01 – Elemento instrumentado para medida de vazão e pressão no núcleo do reator IEA-R1.

Esse elemento foi montado em um circuito experimental onde foram obtidos os dados para a construção de uma curva de calibração relacionando queda de pressão e vazão, Torres (2001). O DMPV-01 também permite que seja medida a velocidade de escoamento no centro do bocal de saída usando as medidas de pressão dinâmica e estática (tubo de Pitot). Essa medida é considerada como uma medida redundante da vazão que atravessa os E.C's. A Fig. (2) mostra o circuito experimental com o DMPV-01 montado. A vazão nesse circuito experimental é medida utilizando-se uma placa de orifício que foi previamente calibrada usando a técnica do volume calibrado e cronômetro. Essa calibração foi feita nesse mesmo circuito experimental, e adequadamente preparado para isso. A curva de calibração da placa de orifício e a equação ajustada são mostradas na Fig. (3).

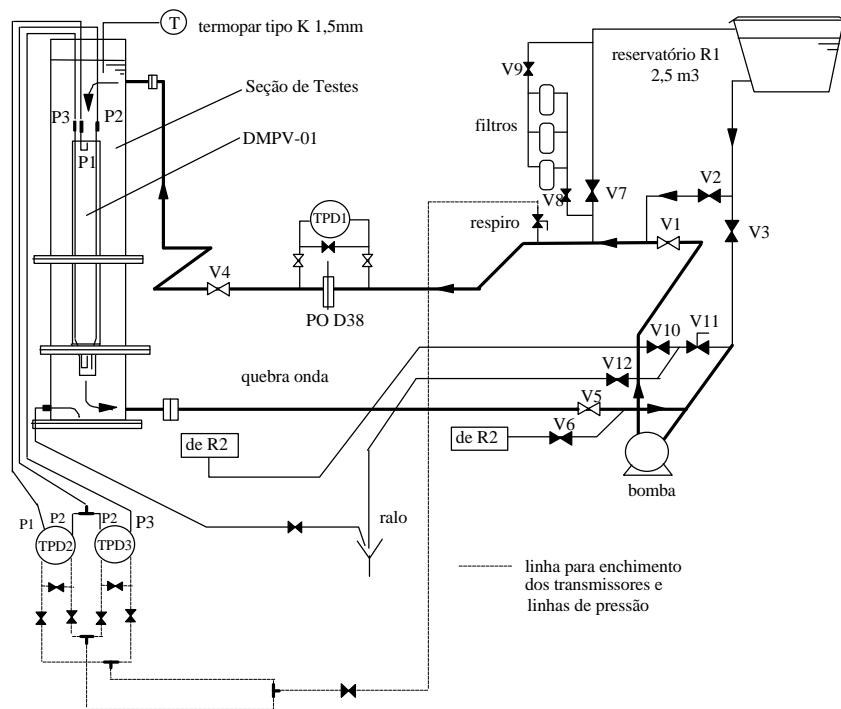


Figura 2. Circuito experimental, DMPV-01 e demais instrumentos usados.

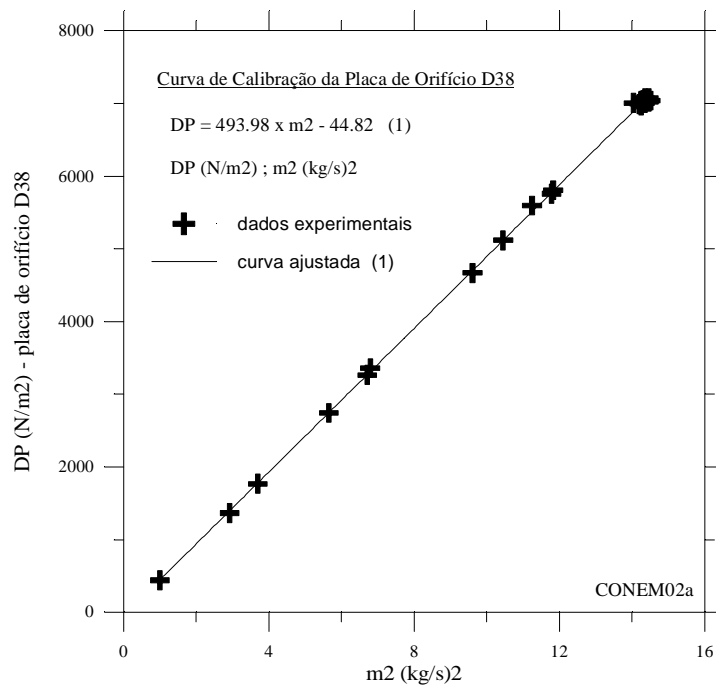


Figura 3. Curva de calibração da placa de orifício usada no circuito experimental.

A calibração do DMPV-01 foi feita na faixa de 1,0 a 6,0 kg/s, e sua curva de calibração é mostrada na Fig. (4). A Fig. (5) mostra as respectivas velocidades de escoamento medidas no centro do bocal de saída, e as compara com a velocidade média calculada com base na medida de vazão feita por meio da placa de orifício.

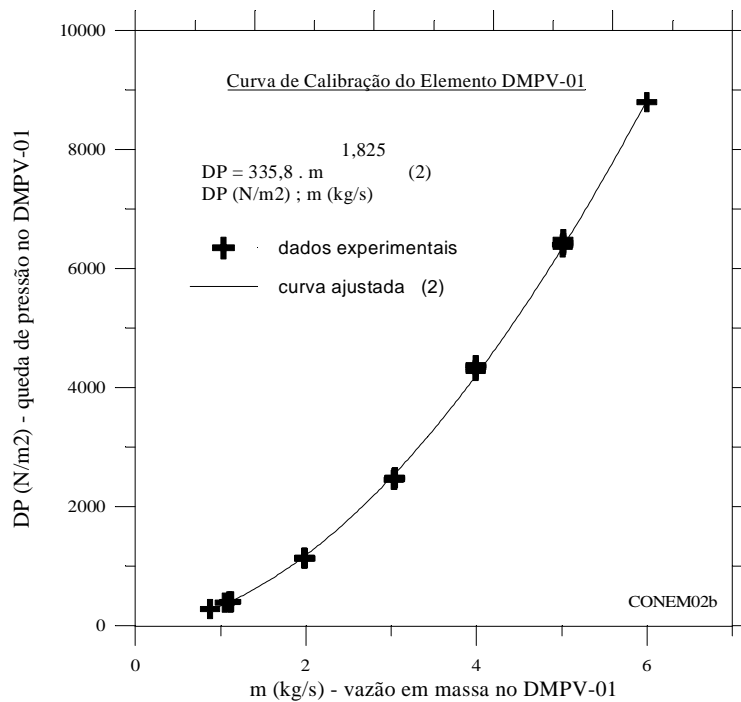


Figura 4. Curva de calibração do elemento DMPV-01.

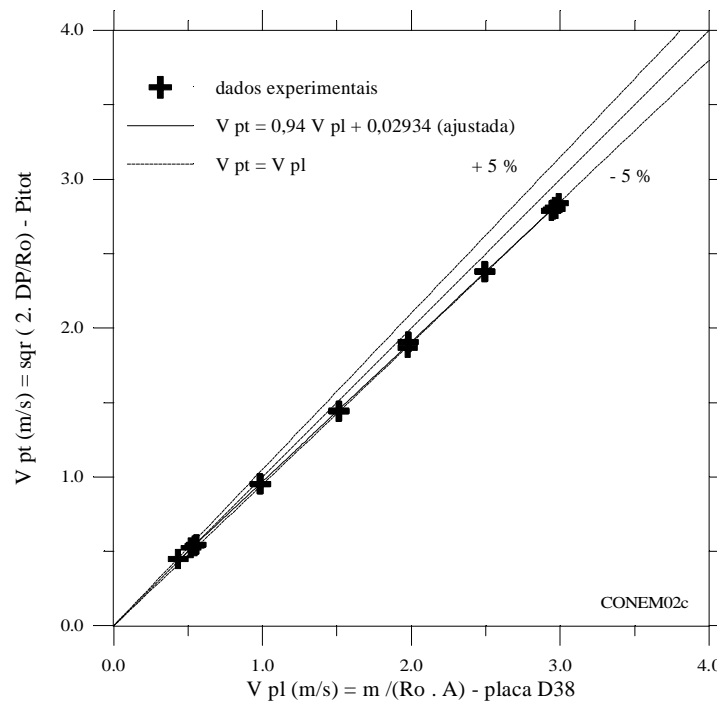


Figura 5. Velocidade de escoamento no centro do canal e velocidade de escoamento média.

Após a calibração, o DMPV-01 foi montado no núcleo do reator alternadamente na posição de 4 dos 20 E.C's do núcleo (EC153, EC169, EC170 e EC152). As Figs. (7) e (8) ilustram respectivamente, o núcleo e seus componentes, e a instalação do DMPV-01 no núcleo. Os resultados das medições foram apresentados por Torres et al (2001) e são mostrados na Fig. (9), juntamente com o valor de vazão estimado por Umbehaun e Andrade (1999) por E.C., ambas para uma vazão total no circuito primário de 188,4 kg/s (3000 gpm). Na mesma figura também são

mostrados os valores de vazão medidos após algumas alterações, descritas nos itens seguintes. Observou-se uma diferença da ordem de 30% entre o valor médio medido e o valor estimado. Com o objetivo de diminuir essa diferença foi realizado um processo de investigação para identificar, as causas de desvio de vazão do núcleo. As investigações são descritas nos itens seguintes e após as alterações feitas a diferença entre valores medidos e estimados praticamente desapareceu.

ΔP	T.D	T.D	T.D	T.D	T.D	T.D	T.S
T.S	T.S	T.S	T.S	T.S	T.S	T.S	LIN
R	T.S	R	EIRA	R	R	R	R
EIS	EIS	R	EIRA	R	GI	R	CF
EIS	EIS	EC 153	EC 168	EC 156	EC 160	EC 150	R
R	EIGRA I	EC 158	ECT 166	EC 169	ECT 180	EC 171	EIF
R	R	EC 164	EC 161	EIBE	EC 162	EC 163	R
R	EIGRA II	EC 159	ECT 179	EC 170	ECT 167	EC 154	R
S2	R	EC 152	EC 155	EC 157	EC 165	EC 151	S3
R	R	R	R	R	R	R	R

LEGENDA

ΔP = Medida de queda Pressão no núcleo
T.D. = tampão duplo ou plugue duplo
T.S. = tampão simples ou plugue simples
LIN = canal linear de medida de potência
R = refletor de grafite
EIRA = elemento de irrad. resfriado a água
CF = câmara de fissão
EIS = elemento de irradiação de Silício
EIGRA = elemento de irradiação de grafite
S2 e S3 = detectores de neutrons
EC = elemento combustível
ECT = elemento combustível de controle
EIBE = elemento de irradiação em Berílio
GI = guia de irradiação
EIF = elemento de irradiação de fios

Figura 7. Núcleo do reator IEA-R1 e seus componentes.

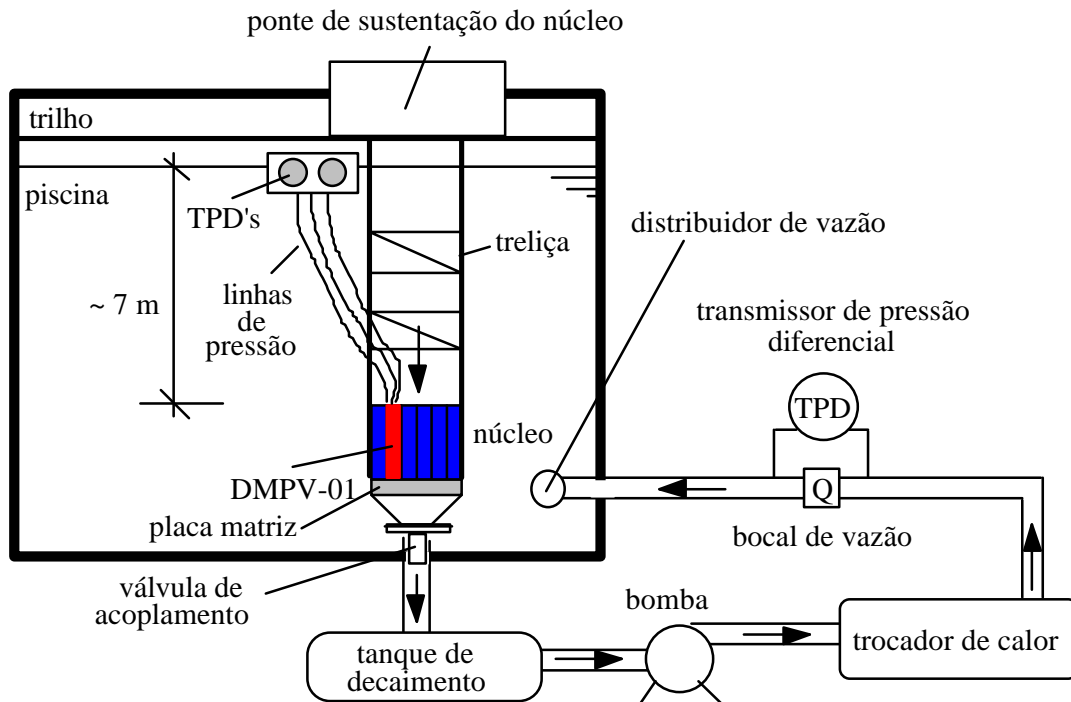


Figura 8. Instalação do DMPV-01 no núcleo.

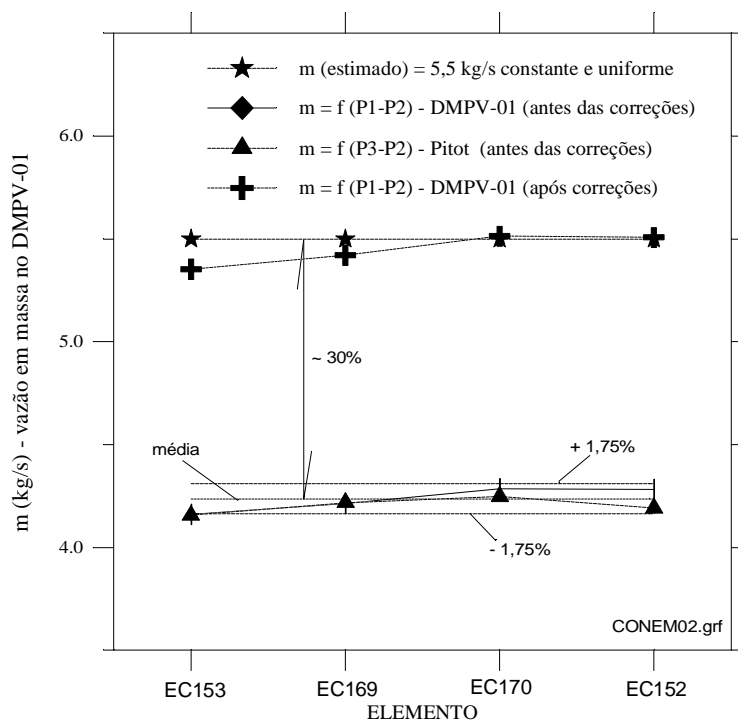


Figura 9. Medidas experimentais de vazão e valores estimados.

3. SISTEMA DE MEDIDA DE VAZÃO DO REATOR

Conforme mostrado no item anterior, observou-se uma diferença de 30% entre a vazão medida e a vazão estimada por E.C. do núcleo do reator IEA-R1. A primeira providência foi verificar o sistema de medida de vazão do circuito primário do reator composto por um bocal de vazão e um transmissor de pressão diferencial. O transmissor envia um sinal de 4-20 mA para o painel na sala de controle, de acordo com a queda de pressão no bocal, que é uma função da vazão no circuito primário. Esse sinal em corrente é transformado num sinal de tensão de 1-5 V e posteriormente em vazão, em galões por minuto (gpm). A Eq. (1) era usada até então para transformar o sinal de tensão em vazão.

$$Q = 2254 [V-1]^{1/2}, \text{onde } Q(\text{gpm}) \text{ e } V(V). \quad (1)$$

Investigações nos cálculos da equação do bocal de vazão do circuito primário indicaram a utilização de um valor incorreto de β (β = diâmetro da garganta do bocal/diâmetro interno da tubulação), que acarretou em uma diferença na vazão medida da ordem de 13%, ou seja, a vazão que era mostrada no painel da Sala de Controle usando a Eq. (1) era aproximadamente 13% maior do que a vazão real que ocorria no primário. Os cálculos foram revistos e uma nova equação (Eq. (2)) foi implementada ao sistema e é atualmente usada para transformar o sinal de tensão em vazão. Essa alteração produziu um efeito direto na vazão pelos E.C's. do núcleo.

$$Q = 2000 [V-1]^{1/2}, \text{onde } Q(\text{gpm}) \text{ e } V(V). \quad (2)$$

O reator possui um dispositivo com um transmissor de pressão diferencial para medir a queda de pressão no núcleo. Caso ocorra uma diminuição da vazão no circuito primário, esse dispositivo, que é ajustado para um determinado "set-point" de queda de pressão, envia um sinal para o desligamento do reator. Com a utilização da Eq. (2), também foi alterada a queda de pressão no núcleo do reator e o transmissor de pressão diferencial teve que ser calibrado para uma nova faixa de pressão e um novo valor de "set-point" foi implementado.

A potência do reator P (W) é medida por balanço térmico ($P = m c_p \Delta t$), onde m é a vazão em massa (kg/s), c_p é o calor específico (J/kg°C) e Δt (°C) é a diferença entre temperatura de entrada e saída. Se a vazão real é 13% menor que a vazão medida, então a potência real também é menor na mesma proporção, portanto agindo a favor da segurança. Por outro lado, o coeficiente de transferência de calor (h) é proporcional à vazão elevada a um expoente 0,8, conforme estabelece a relação de Sieder e Tate (1936) para escoamento turbulento plenamente desenvolvido. Se a vazão real é menor, então o h também é menor e portanto, para um mesmo fluxo de calor (q'') na parede, a temperatura externa da parede será maior, portanto agindo contra a segurança. Sobrepondo-se os dois efeitos tem-se uma diminuição de 2,75% na temperatura da parede.

Uma vez corrigida a medida de vazão no circuito primário (13%) e conseqüentemente a medida da potência, permanece ainda influência do desvio de vazão do núcleo ativo, que no caso é da ordem de 17%, conforme mostra a Fig. (9). Neste caso, o desvio de vazão tem influencia apenas no coeficiente (h) acarretando num aumento de 16% na temperatura da parede, portanto agindo contra a segurança.

4. INVESTIGAÇÃO COM O SISTEMA DE INSPEÇÃO

O núcleo do reator IEA-R1 localiza-se na piscina à uma profundidade aproximada de 7 m da superfície, como ilustra a Fig. (8). A movimentação de E.C's., irradiadores de amostras, refletores, etc., é feita manualmente à distância utilizando-se hastes de Alumínio especialmente projetadas para essa finalidade. Normalmente, para verificar se os componentes do núcleo estão adequadamente encaixados na placa matriz são feitas observações com um binóculo. Contudo, devido às condições de visualização (distância, movimentação da água, distorções, etc.), não é possível obter-se uma informação precisa do encaixe desses componentes. Para realizar uma melhor observação e identificar possíveis caminhos de desvio de vazão na região do núcleo do reator foi utilizado um sistema de inspeção visual sub-aquático composto por: a) um conjunto formado por câmera de vídeo (branco e preto) resistente a radiação modelo Westinghouse IST-REES ETV 1250 com um jogo de lentes de 22 – 90 mm e um sistema de iluminação com duas lâmpadas de 75 W cada, com recursos que permitem ajustar remotamente a intensidade de luz, o foco, e também a movimentação angular em torno dos eixos vertical e horizontal; b) um monitor de vídeo branco e preto marca Panasonic; c) um gravador de videocassete Panasonic modelo AG-1980P; d) uma vídeo impressora marca Sony modelo UP-880; e) uma placa de vídeo com recursos de aquisição de imagens da marca Vitra VGA mais TV Combo Board; e f) haste tubular em Alumínio para fixação da câmera e sistema de iluminação, além de cabos de energia e sinal.

Com o auxílio desse sistema de inspeção visual subaquático foram feitas observações de alguns componentes e regiões do núcleo onde se suspeitava que houvesse desvio de vazão. Um resumo dessas observações e das ações corretivas feitas é apresentado à seguir.

4.1. Tampões ou plugues

Foram inspecionados os tampões simples e duplos que estão no núcleo e observou-se que alguns não estavam bem encaixados nos furos da placa matriz, causando desvio de vazão, conforme mostra a Fig. (10). Esses tampões foram retirados e recolocados na placa matriz até que se conseguisse o melhor encaixe possível.

4.2. Refletores de grafite

Os refletores de grafite posicionados na periferia do núcleo ativo foram inspecionados e observou-se também que alguns não estavam bem encaixados na placa matriz, conforme mostra a Fig.(11). Eles também foram retirados e recolocados até conseguir-se o melhor encaixe possível.

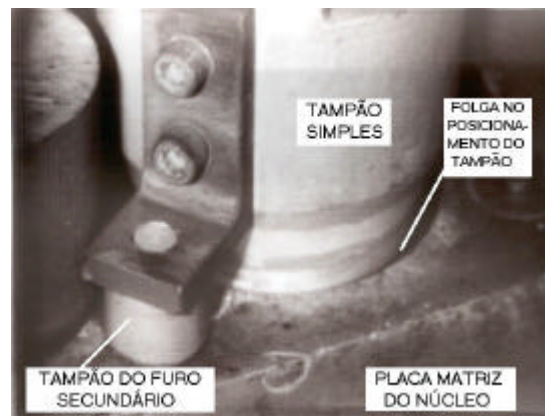


Figura 10. Tampão simples mal encaixado no furo principal da placa matriz.

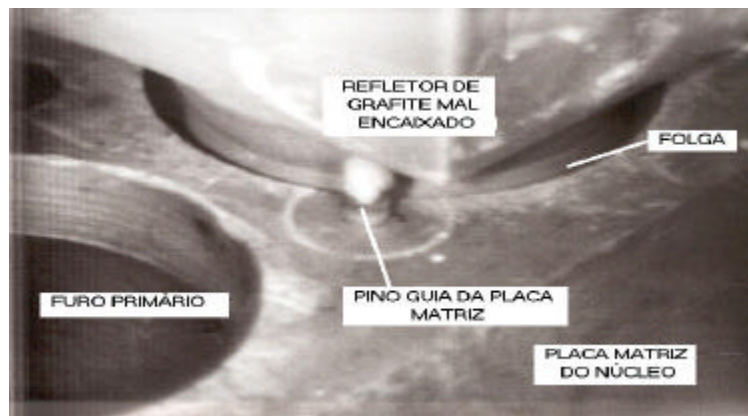


Figura 11.- Refletor de grafite mal encaixado na placa matriz.

4.3. Elemento de irradiação de Silício

O EIS, mostrado na Fig. (7), foi observado e verificou-se que os seus dois bocais em diagonal não se encaixavam na placa matriz porque a parte inferior da caixa ficava assentada sobre os pinos guia da placa matriz, deixando um caminho livre para a passagem de água através dos dois outros furos da placa matriz, conforme mostra a Fig. (12).

Para solucionar esse problema foi projetada e construída uma placa de alumínio com dois furos em diagonal para encaixe dos bocais do EIS e com os furos para encaixe dos pinos guia da placa matriz. Essa placa foi colocada entre a placa matriz e a parte inferior do EIS, tapando os dois outros furos que permitiam a passagem de água, conforme mostra a Fig. (12).

4.4. Acoplamento da válvula de convecção

Foram feitas observações do acoplamento da válvula de convecção (header) com o flange inferior do cone de redução. Notou-se que o acoplamento da válvula não é perfeito pois existe um desalinhamento entre essas duas peças, conforme mostra a Fig.(13). Isso já havia sido observado anteriormente e foram feitas tentativas de alinhamento, sem contudo obter-se sucesso. A Fig. (13) mostra também que a borda do anel de vedação do header estava visivelmente deformada, podendo estar contribuindo para o acoplamento inadequado e desvio de vazão. O núcleo foi deslocado de sua posição e o “header”foi removido da piscina e providenciado o desamassamento do anel de vedação.

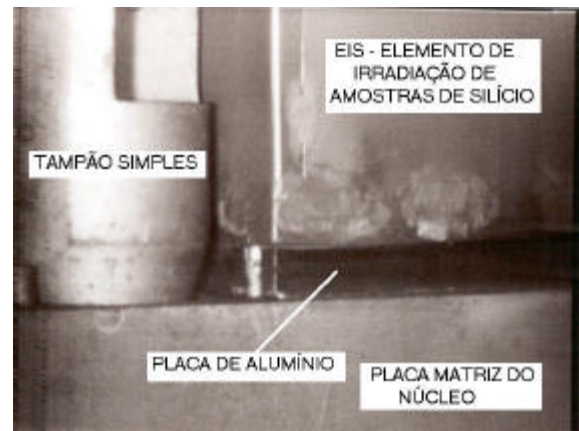
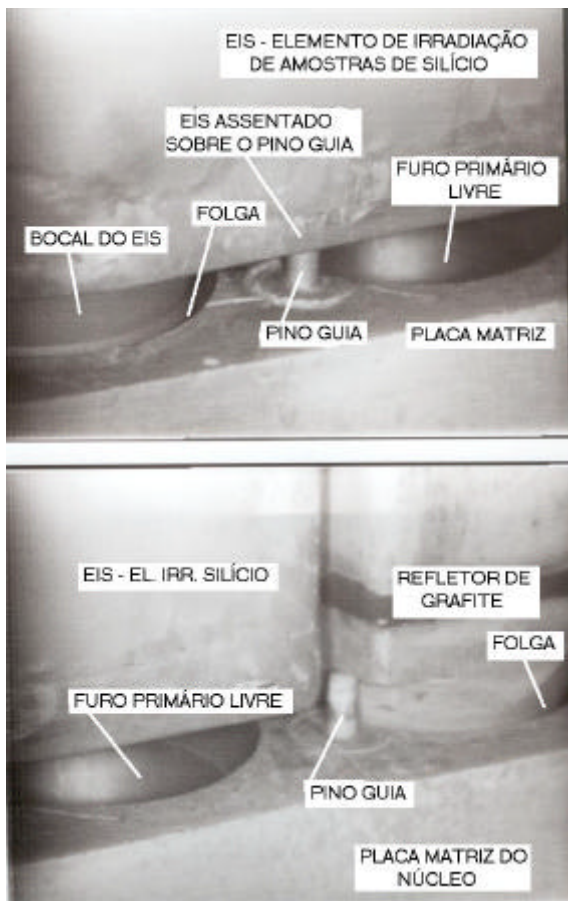


Figura 12 – EIS assentado sobre o pino guia e refletor mal encaixado; com a placa de alumínio especialmente fabricada

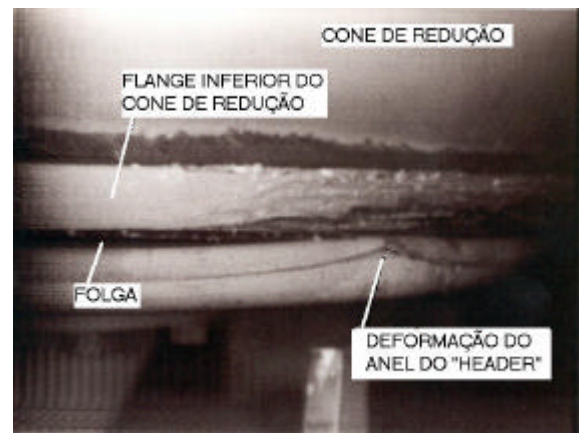


Figura 13. Desalinhamento entre o flange do cone de redução e deformação do anel do “header”

5. CONCLUSÕES

Este trabalho mostra a importância da utilização de um elemento instrumentado para a medida de distribuição de vazão no núcleo de reatores de pesquisa do tipo piscina. A partir dos primeiros resultados das medidas foi possível verificar a influência de irradiadores de amostras que estavam desviando uma parcela considerável de vazão do núcleo e também foi iniciado um processo investigativo de causas. As causas dos desvios foram identificadas e corrigidas sempre que possível. Para a identificação das causas, o sistema de inspeção visual sub-aquático foi de fundamental importância, possibilitando a visualização de irregularidades e a resolução de problemas de encaixe na placa matriz, de alguns componentes do núcleo.

6. REFERÊNCIAS

- Lima, R.M., Oliveira, F.S., 2000, “Relatório Descritivo de Fabricação do Elemento DMPV-01”, Relatório Descritivo de Fabricação n°. RDF-DMPV-01/01 – R:00 – Relatório Interno IPEN
- Sieder, E.N., Tate, C.E., 1936, “Heat Transfer and Pressure Drop of Liquids in Tubes”, Ind. Eng. Chem., Vol.28, pp.1429.
- Torres, W.M., 2001, “Desenvolvimento do Elemento DMPV-01 para Medida de Vazão no Núcleo do Reator IEA-R1”, Relatório Técnico IPEN n°. PSE.CENT.IEAR1.001.00 – RELT.003.00
- Torres, W.M., Umbehaun, P.E., Baptista F^o, B.D., Almeida, J.C., Souza, J.A.B., Silva, D.G., 2001, “Distribuição de Vazão no Núcleo do Reator de Pesquisas IEA-R1”, Anais do XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil
- Umbehaun, P.E., Andrade, D.A., 1999, “Reavaliação das Condições Termo-Hidráulicas do Núcleo do Reator IEA-R1 para Produção de Molibdênio”, Relatório Técnico. n°. PSI.ROI.IEAR1.055 – RELT.001.00 – Relatório Interno IPEN

DEVELOPMENT AND USE OF DUMMY ELEMENTS AND VISUAL INSPECTION SYSTEMS TO NUCLEAR RESEARCH REACTORS

Walmir Maximo Torres
Pedro Ernesto Umbehaun
Benedito Dias Baptista Filho
José Eduardo Rosa da Silva
Carlos Zeituni
Antônio Teixeira e Silva

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP, Centro de Engenharia Nuclear – Divisão de Termo-Hidráulica e Análise de Segurança. Travessa R, 400, Cidade Universitária, 05508-970, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: wmtorres@net.ipen.br.

***Abstract.** A dummy element DMPV-01 was designed and constructed to measure flow through the fuel elements of IEA-R1 reactor core. This element is made of Aluminum in actual size with taps to measure static and dynamic pressures. It was calibrated in an experimental circuit and a pressure drop versus mass flow curve was obtained. DMPV-01 was used to measure the flow in 4 core positions and the distribution was quite uniform. However the values measured were lower than those estimated, indicating a bypass flow higher than expected. An inspection system with underwater radiation resistant video camera was very important to the investigation of the core regions. It was observed that some core components were not fitted in the matrix plate. It was also carried out studies on the primary flow measurement system. Corrective actions were taken and other measurements were carried out in order to obtain a flow increase through the fuel elements.*

Keywords: flow distribution, research reactors, reactor safety analysis