



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GPT/15
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - II

GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS- GPT

QUÍMICA DA ÁGUA DO CIRCUITO ÁGUA-VAPOR DE ANGRA 2– RESULTADOS OBTIDOS NOS ONZE PRIMEIROS CICLOS DE OPERAÇÃO COM O MODO AVT

**RÜBENICH, M.N.(*) MENEZES, M.F. LIMA, R.D.S. LENCASTRE, A.G.
ELETROBRÁS ELETRONUCLEAR**

RESUMO

O presente trabalho descreve os aspectos principais do conceito químico operacional aplicado ao circuito água-vapor da Usina Nuclear de Angra 2. Esse conceito tem a grande vantagem de utilizar um único condicionante químico volátil (hidrazina), exigindo, porém, minimização do ingresso de impurezas, o que só é conseguido se forem empregados condensadores de alta integridade, e se for usada água desmineralizada para enchimento e reposição, além de outras medidas aqui abordadas. Apresenta também os principais resultados obtidos no décimo primeiro ciclo operacional, que não diferem substancialmente dos obtidos nos dez ciclos anteriores, para ilustrar o acerto das opções feitas no passado, descritas em trabalho apresentado no XII SNPTTE (1).

PALAVRAS-CHAVE

Termonuclear, circuito água-vapor ou circuito secundário, química, corrosão, processos de purificação..

1.0 - INTRODUÇÃO

Angra 2 é uma das três usinas nucleares do tipo PWR (pressurized water reactor) que constituem o complexo nuclear CNAEA (Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto), localizado no município de Angra dos Reis – RJ. A entrada em operação comercial ocorreu no ano de 2001. A potência é de 1.350 Mw. No final do 11^o ciclo operacional (19/07/2004) havia sido contabilizada a produção de 136.100.890 Mwh. No momento em que esse trabalho é escrito, a usina encontra-se no 12^o ciclo operacional, que deve se encerrar em 26/09/2015.

Como toda usina desse tipo, apresenta dois circuitos térmicos fechados principais, o circuito primário e o circuito secundário ou circuito água-vapor, e um circuito aberto de refrigeração para os condensadores, que utiliza água do mar como fonte fria.

No primário, a energia liberada pelo processo de fissão nuclear é transferida para um volume de água mantido sob pressão, daí a designação “reator à água pressurizada”. No circuito secundário, ocorre a absorção do calor produzido no circuito primário, com produção de vapor que vai movimentar um conjunto formado por uma turbina de alta e três turbinas de baixa pressão, gerando energia elétrica que é transferida para a rede elétrica nacional. A condensação do vapor é feita em condensadores resfriados por água do mar (Figura 1).

Para a finalidade do presente trabalho, é importante realçar três aspectos.

O primeiro deles é a separação física que existe entre o circuito primário (que é radioativo) e o circuito água-vapor (não radioativo), propiciada pelos geradores de vapor, a qual impede a contaminação radioativa do secundário. A manutenção da integridade dos geradores de vapor é uma das principais metas da química tanto do circuito

(*) ELETROBRÁS ELETRONUCLEAR, GSR.T., Rua da Canabdelária, 65, 6^o andar, CEP 20091-906 Rio de Janeiro - RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 2588.7645 – Email: mruben@eletronuclear.gov.br

primário quanto do circuito secundário em usinas PWR.

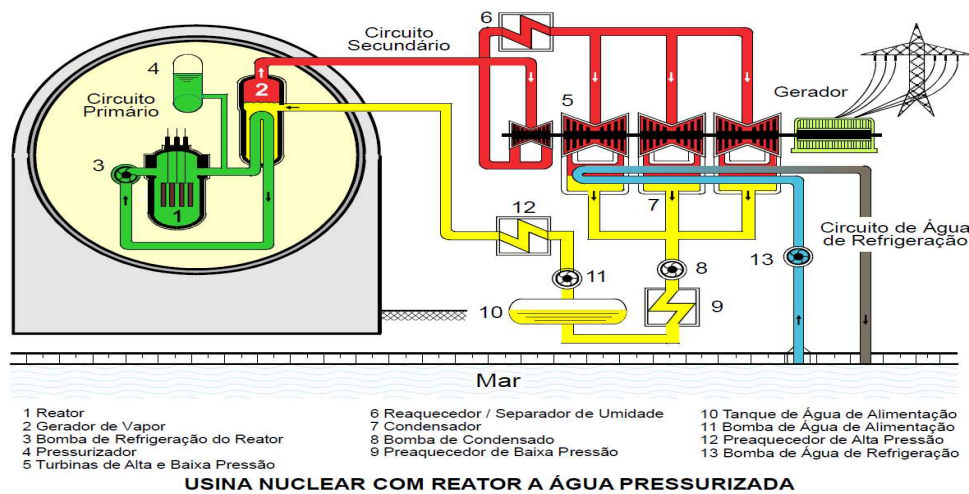


FIGURA 1 – Representação simplificada de Angra 2.

Conforme relatado por Rübenich e Fonseca no XII SNPTEE (1), a contínua avaliação dos problemas ocorridos em várias usinas PWR no mundo inteiro, com foco na integridade dos geradores de vapor, levou à introdução de uma série de modificações no conceito químico do circuito água-vapor de Angra 2, culminando com a adoção do conceito AVT (*All Volatile Treatment*), que utiliza um único condicionante químico volátil, a hidrazina. Em virtude do abandono do condicionamento dos geradores de vapor com fosfato de sódio, esse modo de operação só é realizável se for possível a manutenção de permanente alta pureza no circuito água-vapor.

O segundo aspecto a ser realçado é o uso de água do mar para resfriamento dos condensadores. Esse fato torna necessário reduzir a praticamente zero a possibilidade de ingresso de água de refrigeração no secundário, o que só é possível se os condensadores forem do tipo estanque ou de alta integridade.

O terceiro e último aspecto é a existência, entre os pré-aquecedores de baixa e os de alta pressão, de um tanque intermediário, o tanque de água de alimentação. Esse tanque permite uma desaeração mecânica adicional à que ocorre no condensador, já que a água proveniente dos pré-aquecedores de baixa pressão é nele introduzida através de um sistema que promove a liberação dos gases residualmente dissolvidos e a transferência dos mesmos para o condensador, de onde são expulsos pelo sistema de remoção de ar.

2.0 CIRCUITO ÁGUA-VAPOR

2.1 Componentes principais.

Na Figura 2 estão representados os componentes principais do circuito água-vapor de Angra 2. As vazões, pressões e temperaturas indicadas são valores aproximados para a potência indicada.

A 100 % de potência do reator, uma vazão mássica de 1320 kg/s de condensado, temperatura de 39,4, sai dos condensadores e passa por um primeiro estágio de pré-aquecimento de baixa pressão, entrando no tanque de água de alimentação com uma vazão mássica de 1399 kg/s, temperatura de 123,4°C e pressão de 6,7 bar. A partir desse tanque, as bombas de água de alimentação impulsionam 2055,6 kg/s de água através dos pré-aquecedores de alta pressão, chegando aos quatro geradores de vapor (GVs) com uma pressão de 77 bar e temperatura de 218,0°C.

Nos geradores de vapor ocorre a produção de vapor a 64,5 bar, título 0,9975 (280,3°C), que chega na turbina de alta pressão com um título de 0,9953 e pressão de 61,73 bar (277,4°C), passando em seguida por um par de reaquecedores/separadores de umidade, e chega a um conjunto de três turbinas de baixa pressão com uma pressão de 11,1 bar e temperatura de 234,4°C, de onde segue para um conjunto de 3 condensadores, retornando ao ciclo.

A estanqueidade ou alta integridade dos condensadores é dada pelo fato de os tubos percorridos pela água do mar serem feitos de material altamente resistente à corrosão (titânio) e de sua fixação em placas do mesmo material ser feita por calandragem e soldagem. Trata-se, conforme já mencionado na introdução, de uma condição **sine qua non** para a operação em modo AVT.

Outra premissa básica para o modo AVT é a utilização de água desmineralizada para enchimento dos circuitos e reposição de perdas. Detalhes sobre a produção desse insumo em Angra 2 são apresentados por Rübenich et al, nesse simpósio (2).

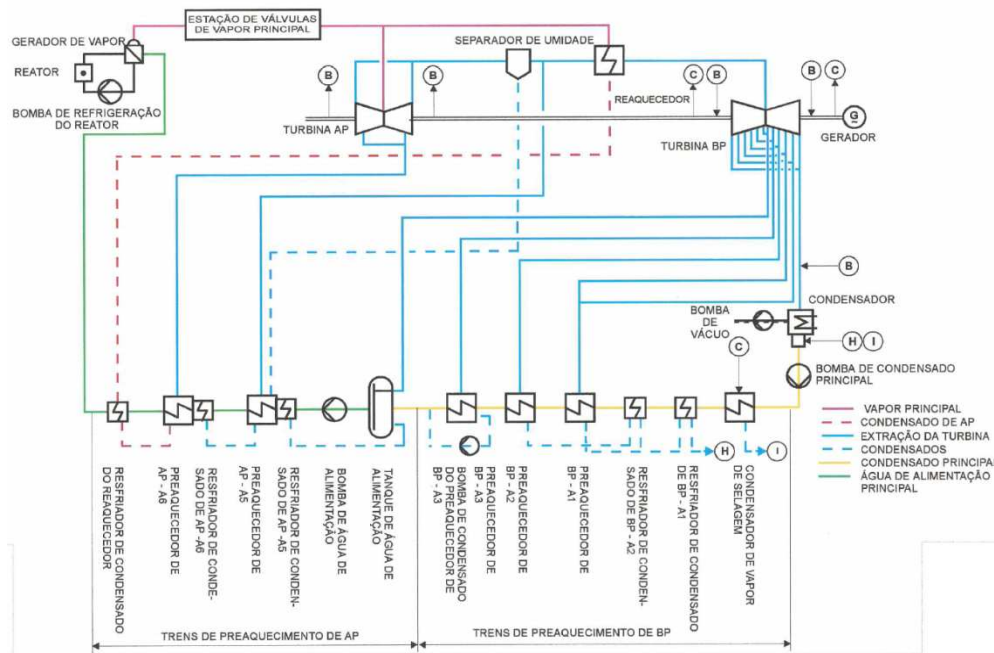
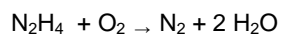


FIGURA 2 - Visão geral do circuito água-vapor

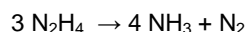
2.2 Condicionamento e supervisão química

No modo AVT, utiliza-se um único condicionante químico, a hidrazina, que é dosada em um ponto situado a jusante das bombas de condensado principal (ver Figura 3), com dupla finalidade:

- Reação com o residual de oxigênio dissolvido na água de alimentação após o tanque de água de alimentação:



- Na água de alimentação é mantido um excesso de hidrazina de aproximadamente 100 ppb. Parte desse excesso sofre degradação térmica de acordo com a reação abaixo. A amônia produzida garante a manutenção de condições alcalinas ao longo do circuito.



O efeito conjunto dessas duas reações é garantir condições operacionais ótimas ao longo de todo o circuito secundário, especialmente a manutenção de condições extremamente redutoras nos geradores de vapor – essencial para evitar o aparecimento de formas seletivas de corrosão – e a redução a um mínimo nas taxas de corrosão uniforme, reduzindo o transporte de produtos de corrosão para os geradores do vapor e seu acúmulo na região do espelho dos mesmos, o que também contribui para evitar o surgimento de condições que propiciem o aparecimento de formas de corrosão seletiva.

Sobre as formas e incidência de processos de corrosão nos geradores de vapor, ver, por exemplo, Stipan e Tapping (3)

A supervisão química é feita tanto por meio de medidores em linha quanto por amostragem e análise em laboratório.

A Figura 3 apresenta uma visão geral dos principais pontos utilizados para supervisão química do circuito água-vapor, com as análises respectivas. Nessa figura CA representa medidores em linha de condutividade catiônica, ou seja, condutividade medida a jusante de filtros catiônicos. Também é mostrado o ponto de injeção contínua de hidrazina, a jusante das bombas de condensado principal.

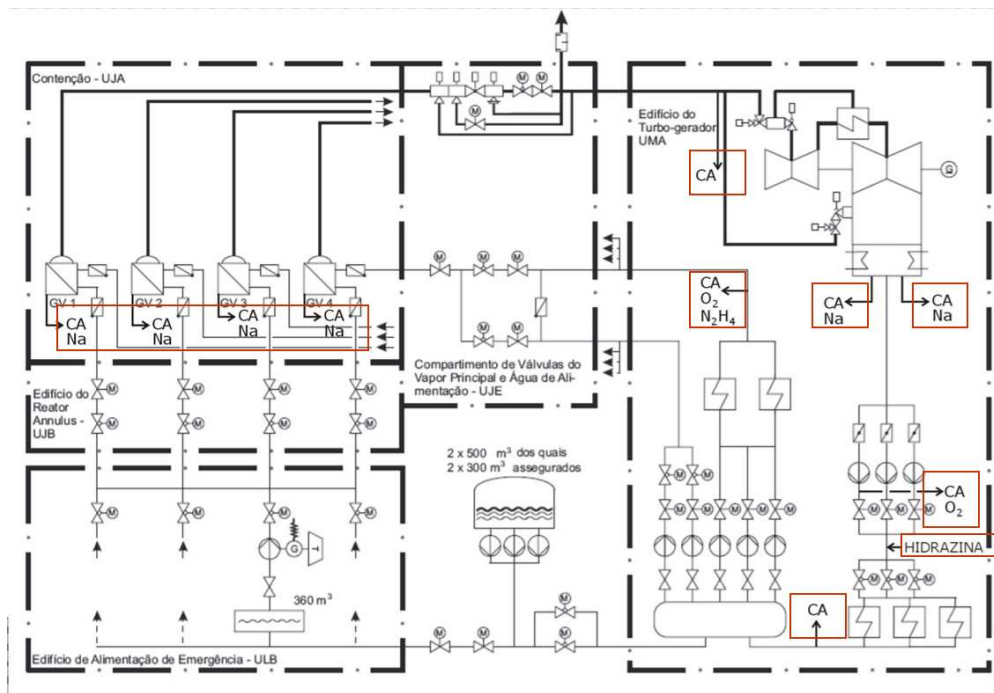


FIGURA 3 – Condicionamento e supervisão química.

A vigilância contra ingresso de impurezas é feita pelo controle da condutividade catiônica ao longo do circuito e do controle de teores de sódio em cada uma das seis metades do condensador e na purga dos geradores de vapor.

As medições nos condensadores servem para detectar eventuais entradas de água no mar no secundário, enquanto que as medições na purga dos geradores de vapor, onde ocorre uma concentração das impurezas por um fator da ordem de 100, constituem a principal vigilância mais sensível quanto ao ingresso de impurezas de qualquer origem.

Os parâmetros de controle – parâmetros que, se excedidos dão início imediato a ações corretivas – válidos para a purga dos geradores de vapor são condutividade catiônica $< 1,0 \mu\text{S}/\text{cm}$ e concentração de sódio $\leq 50 \text{ ppb}$.

Detalhando os limites válidos para o sódio:

- $\text{Na}^+ > 50 \text{ ppb}$, a usina entra em nível de ação 1;
- $\text{Na}^+ > 100 \text{ ppb}$ e/ou mais de quatro semanas em nível de ação 1, a usina entra em nível de ação 2 com redução de potência a 30 %;
- $\text{Na}^+ > 500 \text{ ppb}$ e/ou mais de uma semana em nível de ação 2, a usina entra em nível de ação 3 e deve ser desligada em 12 horas.

A manutenção das demais condições químicas do secundário é garantida pela vigilância em linha da concentração de oxigênio e do valor de pH na água de alimentação, com parâmetros de controle estabelecidos em $\leq 5,0 \text{ ppb}$ para o oxigênio e $\geq 9,8$ para o pH.

2.3 Purificação da purga dos geradores de vapor.

Conforme detalhado em (1), a última grande modificação introduzida no conceito químico do secundário de Angra 2 foi a eliminação da polidora de condensado.

Contudo, foi mantida a possibilidade de remoção de impurezas da purga dos geradores de vapor, onde, conforme já mencionado acima, as mesmas sofrem concentração por um fator de 100. Essa purificação é feita por meio da operação de dois trens paralelos de purificação, cada um dos quais apresenta componentes pertencentes a dois sistemas, o primeiro deles de resfriamento e purificação inicial, sistema LCQ, e o segundo que faz a purificação final, sistema GD, representados de maneira simplificada na Figura 4.

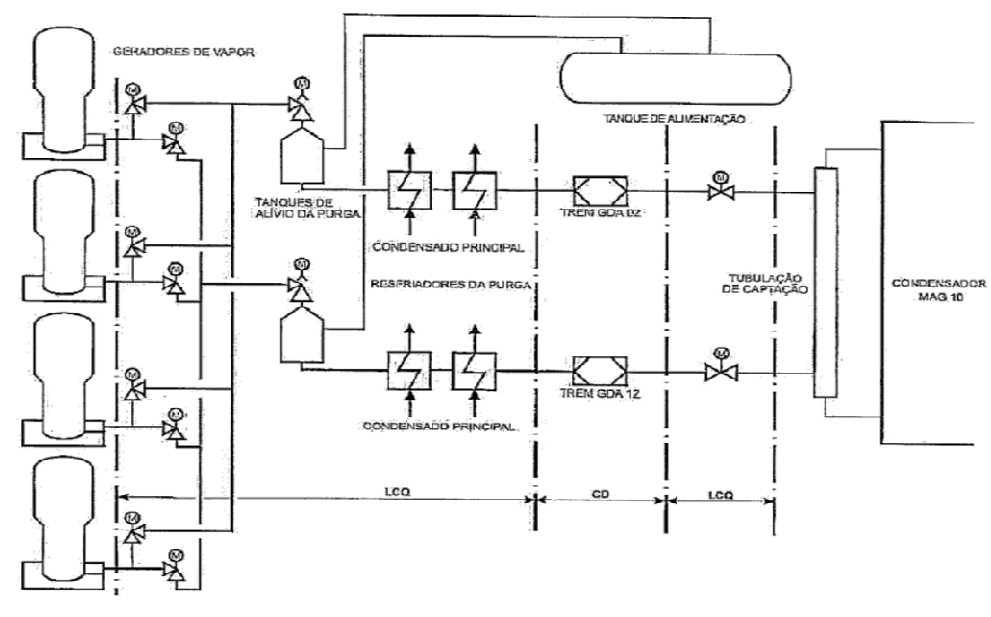


FIGURA 4 – Purificação da purga dos GVs

Em operação normal, cerca de 0,5 % da vazão total da água de alimentação, ou seja, 10,2 kg/s, são extraídos de maneira uniforme da região do espelho dos geradores de vapor, e conduzidos para tratamento em um dos trens independentes de purificação LCQ/GD.

A primeira etapa de purificação ocorre no tanque de expansão do sistema LCQ. O vapor (cerca de 2,0 kg/s) é retornado ao circuito secundário via tanque de água de alimentação. O condensado desse tanque sofre resfriamento posterior em um par de trocadores de calor ainda pertencentes a esse sistema, de onde segue para purificação final no sistema GD, retornando ao circuito água vapor via condensador.

A purificação no sistema GD, na taxa de 8,2 kg/s, é feita inicialmente por retirada de impurezas eletromagnéticas sólidas (magnetita) em um filtro eletromagnético, seguida por remoção de impurezas iônicas (sódio, cloreto, sulfato, ferro) e de sílica em um filtro de leito misto.

Caso seja necessário, a vazão de purga e de purificação pode ser aumentada até atingir o limite do sistema GD (10,0 kg/s). Além disso, em situações especiais, como na partida da usina e em eventuais entradas de impurezas via condensador, os dois trens de purificação LCQ/GD podem ser colocados em operação simultaneamente.

Uma última situação prevista em manual de operação, que até agora não ocorreu e acreditamos que não venha ocorrer ao longo da vida útil da usina, é a colocação simultânea dos dois trens operacionais em caso de vazamento do primário para o secundário.

2.4 Remoção periódica da lama acumulada no espelho dos geradores de vapor

Apesar de todas as medidas acima descritas, aliadas à alta qualidade do trabalho executado pelo pessoal de operação, de manutenção, de supervisão química e de supervisão de engenharia, há um desgaste inevitável por corrosão uniforme das superfícies internas (aço carbono) que predominam no circuito água-vapor. Os óxidos formados são conduzidos ao longo do circuito, e acabam ingressando nos geradores de vapor, e a parte que não é removida no sistema LCQ/GD acaba formando depósitos nos espelhos desses equipamentos.

Como última medida para evitar o surgimento de condições que promovam fenômenos de corrosão seletiva e para reduzir o "fouling" dos tubos dos geradores de vapor, periodicamente é realizada, durante as paradas da usina para troca de elementos combustíveis, a remoção desses óxidos por um processo conhecido como "tube sheet lancing". Esse processo emprega jatos de água de alta pressão, com recirculação da água e retenção dos óxidos em filtros adequados. Para tal, é obedecida uma sistemática de drenagem a quente, secagem, enchimento com água fria, drenagem, lanceamento sob alta pressão com filtragem e recirculação da água, inspeção final, secagem dos filtros e determinação do peso de lama seca removida. Essas sequências são executadas alternadamente em cada um dos quatro geradores de vapor, durante paradas para manutenção e troca de elementos combustíveis.

A periodicidade de execução depende de circunstâncias operacionais e do acompanhamento da experiência operacional de usinas similares. Em Angra 2 ela foi realizada em 2001, na parada D 100, após a conclusão dos testes de 100 % de potência, e nas paradas P2 (2003), P5 (2007) e P9 (2012). A próxima execução está prevista

para a parada P13, ou seja, para a 13ª parada para manutenção e troca de elementos combustíveis, que deverá ocorrer em 2016.

2.5 Resultados

Apesar de terem ocorrido pequenos vazamentos nos condensadores, que exigiram contra medidas, como, por exemplo, a operação simultânea de dois trens de purificação LCQ/GD, os recursos operacionais disponíveis, bem conhecidos e utilizados pelo pessoal de operação e de manutenção, mostraram ser suficientes para propiciar excelentes resultados ao longo dos 11 primeiros ciclos da usina.

Em primeiro lugar, em nenhum momento houve necessidade de interrupção de operação por desvio de parâmetros químicos estabelecidos para o circuito água-vapor. Igualmente positivo é o fato de não terem sido detectados desgastes de origem química nos tubos dos geradores de vapor, nas inspeções periódicas feitas nas paradas.

Por outro lado, a evolução dos parâmetros químicos também foi positiva ao longo de todos os onze primeiros ciclos operacionais. Por uma questão de clareza de apresentação, as figuras abaixo mostram apenas dados do último ciclo.

A Figura 5 mostra, por exemplo, os valores medidos para a concentração de sódio na purga dos geradores de vapor medidas no Ciclo 11. São registros dos valores medidos em linha na purga de cada um dos quatro geradores de vapor, correspondentes aos pontos de extração LCQ 11, LCQ 21, LCQ 31 e LCQ 41. Note-se que a escala da abscissa é logarítmica, e que todos os valores são inferiores a 2 ppb, para um parâmetro de controle de 50 ppb.

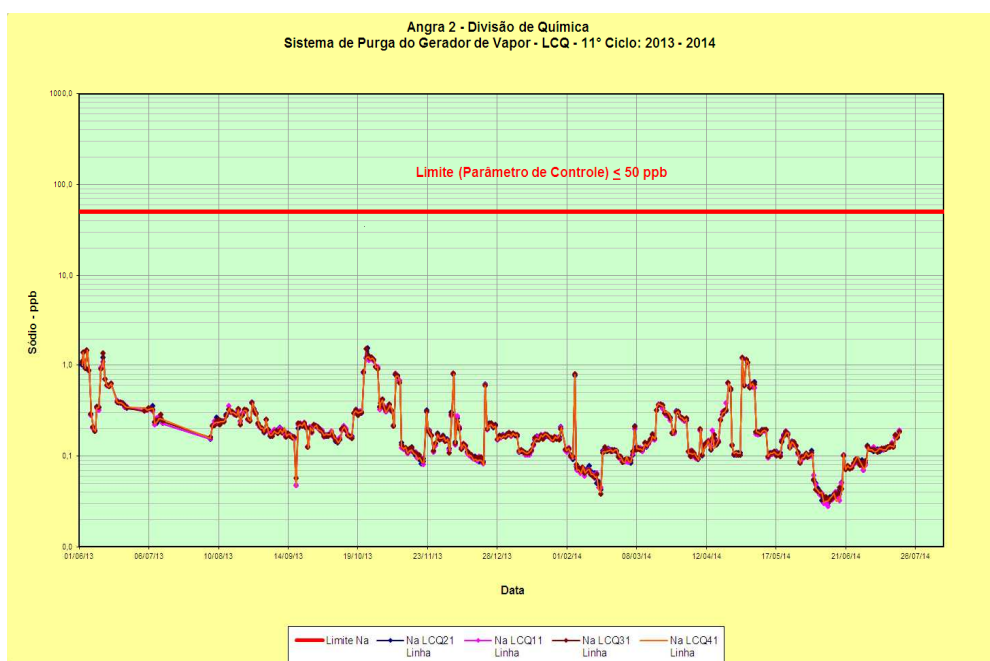


FIGURA 5 – Sódio na purga dos GVs – Ciclo 11.

Da mesma forma, a concentração de sílica na purga dos geradores de vapor manteve-se bem afastada, ao longo dos 11 primeiros ciclos, do limite de 1 ppm, estabelecido como parâmetro de diagnóstico (ou seja, parâmetro que, se excedido, não implica em possibilidade de danos ao sistema, mas cuja origem deve ser investigada e corrigida). Na Figura 6 apresentamos os valores medidos no ciclo 11. Note-se que novamente utilizamos escala logarítmica para o registro das concentrações.

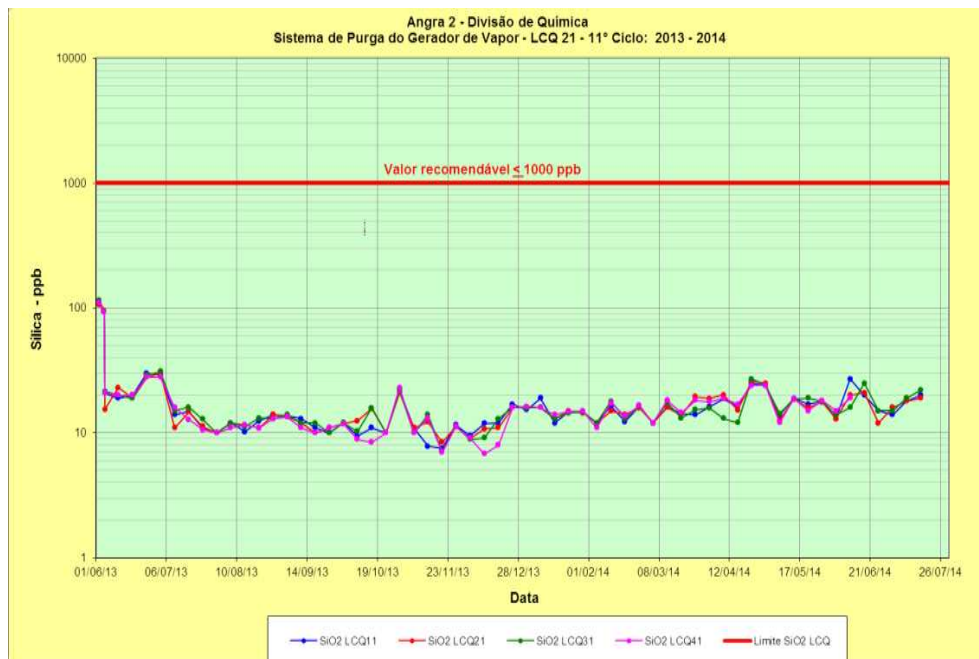


FIGURA 6 – Sílica na purga dos GVs – Ciclo 11

Outro parâmetro relevante é a concentração de oxigênio na água de alimentação. A Figura 7 mostra os valores medidos no ciclo 11. Como se pode ver, há apenas dois valores acima do valor limite de 5 ppb, valores esses medido no início do ciclo, o que é considerado normal levando em conta as operações de drenagem de equipamentos que ocorrem nas paradas, que requer reenchimento com água saturada de oxigênio.

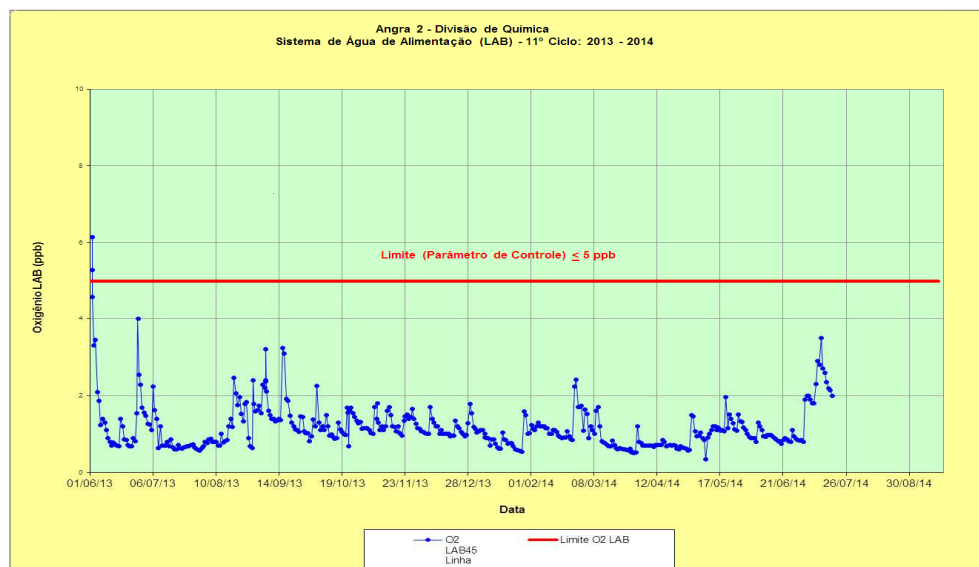


FIGURA 7 – Oxigênio na água de alimentação – Ciclo 11

A manutenção de padrões químicos elevados reflete-se nas baixas taxas de corrosão uniforme das superfícies de aço carbono que constituem o circuito água-vapor. Uma das evidências são os baixos valores medidos para o teor de ferro em suspensão na água de alimentação, conforme ilustrado na Figura 8 abaixo para o Ciclo 11.

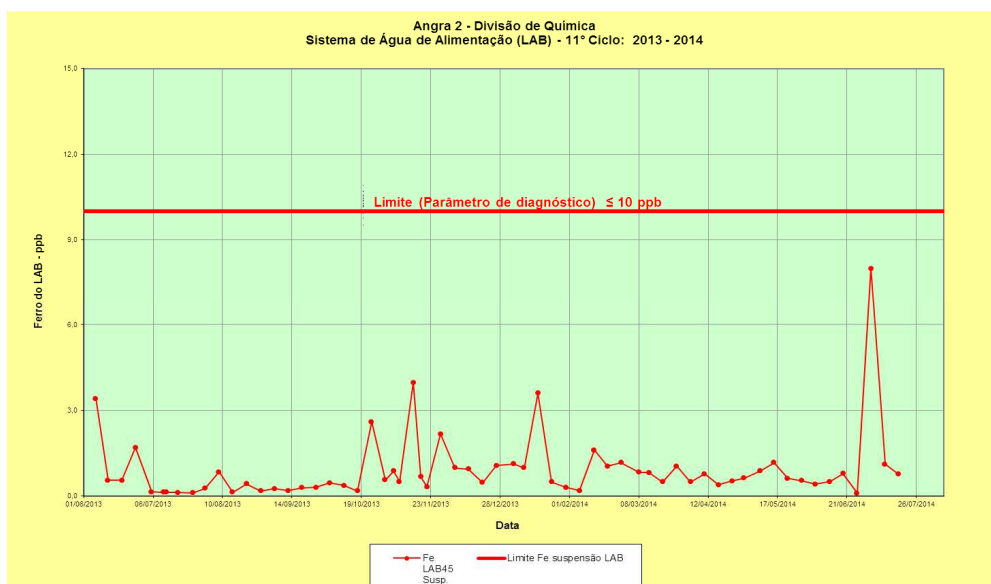


FIGURA 8 – Ferro em suspensão na água de alimentação – Ciclo 11

Um último dado que serve para avaliação é a quantidade de lama seca removida nas limpezas periódicas dos geradores de vapor, respectivamente 32,5 kg na D100, 49,9 kg na 2P2 (cerca de 25 kg por ciclo operacional), 33,1 kg na 2P5 (cerca de 11 kg por ciclo operacional) e 67,9 kg na 2P9 (cerca de 17 kg por ciclo operacional).

Esses valores são similares aos obtidos em usinas alemãs de mesmo porte e conceito químico.

É importante notar que houve um aperfeiçoamento no método, permitindo remoção de maior quantidade de produtos de corrosão. O método aperfeiçoado foi empregado somente na 2P9, daí o significativo aumento no total removido em comparação com a execução anterior.

3.0 CONCLUSÃO

Conforme já mencionado em (1), em 1995 já era registrado o fato de o emprego de condensadores estanques ou de alta integridade ter se tornado rotina em reatores nucleares, e que o emprego de condicionamento AVT no circuito secundário levava a índices baixos de degradação de tubos de geradores de vapor, independente da existência ou não de uma polidora de condensado.

O presente trabalho mostra que os resultados operacionais obtidos em Angra 2 confirmam o acerto das decisões tomadas no passado.

Expressamos nossa convicção de que a experiência de Angra 2 pode ser aproveitada em usinas térmicas convencionais que optem pela adoção do modo AVT R (reduzidor, como em Angra 2) ou AVT O (oxidante, como algumas usinas térmicas convencionais europeias e americanas), enfatizando a necessidade de um suprimento confiável de água desmineralizada, do uso de condensadores de alta integridade com dispensa de polidora de condensado, de supervisão química em linha de parâmetros relevantes e de equipes de operação, de manutenção, de supervisão química e de supervisão de engenharia bem treinadas.

4.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) RÜBENICH, M.N. e FONSECA, A.L., Química da água do Circuito Água-Vapor de Angra II: Evolução do Conceito Operacional e o Cancelamento do Sistema de Polimento do Condensado, XII SNPTEE, GPT/12, Florianópolis, 1995.
- (2) RÜBENICH, M.N., MENEZES, M.F., FREITAS, S.R.P., SAMPAIO, J.V.J. e COSTA, D.S., Água desmineralizada – Insumo essencial para otimização química dos circuitos primário e secundário de Usinas Nucleares – A Experiência de Angra 2
- (3) STIPAN, L.M., TAPPING, R.L. – Tube plugging: looking behind the trends, Nuclear Engineering International, January, 1995.

5.O – DADOS BIOGRÁFICOS

Milton Norberto Rübenich, Montenegro – RS, 07/01/1949, Químico, UFRGS, 1972, Mestre em Ciências de Engenharia Nuclear, COPPE/UFRJ 1976, Químico da ETN desde 1975, atuando nas áreas de química e de processos químicos dos circuitos primário, secundário e auxiliares.

Trabalhos: Operational Experience with Zinc Injection at Angra 2, Stellwag,B., Rübenich,M., Oliveira,M., Menezes,M. ,Schneider,V., Staudt,U., 2006 ISOE ALARA Symposium, Essen, Germany).

Maurílio Fonseca Menezes - Químico, Souza Marques – Rio, 1987, Mestre em Química Inorgânica/Analítica, I.Q. UFRJ, 1996, Doutor em Química Inorgânica/Analítica, I.Q. UFRJ, 2014, Químico da CNEN – Rio, Químico Pesquisador CETEM/CNPq – Rio, Químico da ETN desde 1999, atualmente Chefe da Divisão de Química de Angra 2.

Trabalhos:

Vários trabalhos publicados a nível nacional e internacional.

Mais recente: Cs-137 in sand and seawater samples from Piraquara Beach, Brazil: Discharge site of the effluents from the Angra dos Reis Nuclear Power Plant, Internation Journal of Chemistry, Vol. 6, n^o 4 (2014)

Rodrigo da Silva Lima, Rio de Janeiro – RJ, 08/01/1978, Bacharel em Química, UFRJ, 2008, Químico da ETN desde 2001, atuando nas áreas de controle químico dos circuitos primário, secundário e auxiliares

Adérito Luiz Guerra Lencastre, Rio de Janeiro – RJ, 19/12/1963, Técnico em Química, Usina Termoelétrica de Santa Cruz, Angra 1, e, desde 2000 em Angra 2, atuando na áreas de controle químico dos circuitos primário, secundário e auxiliares.