

PLANILHA DE SIMULAÇÃO DO CIRCUITO SECUNDÁRIO DE ANGRA 1

Futuro F.L.*; Rucos J.*, Ogando A.*
Maprelian E.**, Bassel W. S.**, Baptista Filho B. D.**

* ELETROBRÁS TERMONUCLEAR S.A. - ELETRONUCLEAR
Rua de Candelária, 65 - CEP 20091-020 - Rio de Janeiro, RJ
e-mail; jrucos@eletronuclear.gov.br

** IPEN-CNEN/SP
Travessa, R 400 Caixa Postal 11049 - CEP 05422-970, São Paulo, SP
e-mail: emaprel@net.ipen.br

RESUMO

A operação eficiente de uma Central Nuclear requer a contínua identificação de desvios nos principais parâmetros de operação. A identificação e análise desses desvios permitem detectar condições de degradação de instrumentos ou mesmo de equipamentos. Para abordar esse problema, foi idealizada, pelo grupo de produção térmica da Gerência de Engenharia de Angra 1 da ELETRONUCLEAR, a utilização de uma planilha eletrônica baseada no aplicativo EXCEL, da Microsoft, para automatização do balanço térmico de Angra 1. A Planilha de Simulação consta de um conjunto de planilhas onde valores medidos, dos principais parâmetros de operação do Circuito Secundário, são comparados com os valores de projeto esperados para uma determinada condição de potência do Reator e pressão no Condensador. A Planilha fornece a potência e a eficiência nas turbinas, bem como o balanço térmico da planta. Este trabalho apresenta uma descrição geral das planilhas e um exemplo de análise de um caso real de operação da Usina de Angra 1, mostrando a sua precisão e facilidade de uso desta ferramenta.

Palavras-chave: circuito secundário, balanço térmico, potência.

I. INTRODUÇÃO

A operação eficiente de uma Central Nuclear requer a contínua identificação de desvios das condições ideais de operação. A degradação dessas condições para um dado componente, quer seja decorrente de fatores tais como incrustação, envelhecimento, descalibração de instrumentos, etc. pode ser identificada por meio da comparação dos valores atuais com os estabelecidos no projeto original. A realização de tais comparações geralmente requer o uso de programas de computador complexos e não totalmente adequados para tais análises.

Neste trabalho é apresentada a **planilha de simulação do Circuito Secundário de Angra 1**, desenvolvida pelo grupo de produção térmica da Gerência de Engenharia de Angra 1 da ELETRONUCLEAR [1] com a colaboração do Centro de Engenharia Nuclear do IPEN-CNEN/SP [2], [3], que se propõe a ser uma ferramenta prática, versátil e confiável para a realização de análises e comparações das condições operacionais da planta.

Nas seções seguintes é feita uma breve descrição da planilha, bem como uma verificação de seus resultados e

um exemplo de aplicação de um caso real de operação da Usina.

II. DESCRIÇÃO DA PLANILHA

A planilha (ou pasta) de simulação do Secundário de Angra 1 é composta por um conjunto de 21 planilhas MS Excel, sendo as principais descritas a seguir.

As planilhas **kdados** fornecem as condições de projeto de vazão mássica, entalpia, pressão e temperatura (ou título) para 97 pontos de operação do circuito secundário para as condições de 75 % e 100 % de carga (vazão mássica nos Geradores de Vapor (GV) em relação à nominal). As condições de projeto utilizadas têm como base documentação original da Westinghouse (kit térmico) [1], que consiste em estimativas da operação do Secundário com base em cálculos teóricos de projeto. Constam ainda nessa documentação algumas curvas características de desempenho teórico, utilizadas para a definição dos pontos de operação.

Uma importante planilha a ser destacada é a **cdados**, que reproduz, com um ótimo grau de confiança, as

condições de projeto para os 97 pontos mencionados acima, para outras condições de potência do reator e de temperatura da água do mar (ou pressão no Condensador (CD)) não constantes do kit térmico (**kdados**). No desenvolvimento da planilha **cdados**, foram utilizados os dados de projeto disponíveis na documentação da Westinghouse mencionada acima.

Os cálculos em **cdados** são feitos com base em equações estatísticas de ajuste de 1^o e 2^o graus com uma ou duas variáveis, balanços de massa e energia, correlações

empíricas e tabelas de propriedades termodinâmicas da água inseridos na pasta. Nesta planilha são calculadas ainda as potências entre extrações nas turbinas de alta e baixa pressão. Para efeito de verificação esta planilha também conta com um balanço de energia global no secundário, bem como com o cálculo da eficiência térmica da Planta.

A tabela 1 apresenta um exemplo, apenas ilustrativo, do tipo de modelagem utilizado na planilha **cdados**.

TABELA 1- Planilha de Cálculo com as Equações dos Pontos de Monitoração

DADOS PARA PERFORMANCE TÉRMICA DE ANGRA I				
Pontos de Monitoração	Vazão (kg/s)	Entalpia (kJ/kg)	Pressão (bar)	Temperatura (°C)
Fluxo no GV	=SE(Potn>=0.75,a1*Potn+b1,a2*Potn+b2)	=SE(Potn>=0.75,a3*Potn+b3,a4*Potn+b4)	=a5*Potn^2+b5*Potn+c5	=tsat(cpflugv)
Retorno de água de alimentação	=cmdsep+cmsaq2+cmveaq2+cmextb1+cmart+cmedaq1-cmmuw	=chsaq1	=cpr108	=ctsaq1
CONDENSADOR				
Fluxo de entrada após exaustão da turbina	=cmass56+cmsetb-cmvaztb	=a6+b6*Potn+c6*Potn^2+(-d6+e6*prcondsi-e6*prcondsi^2)	=prcondsi	x
Saída de fluxo de água de alimentação	=cmstb+cmass6+cmass7+cmmuw+cmdaq6+cmdsel+cmass11	=fh_lsat_p(cpscon)	=cpstb	=tsat(cpr5)
TURBINA DE ALTA PRESSAO (TAP)				
Fornecimento de vapor de reauecimento	=SE(Potn>=0.75,a7*Potn+b7,a8*Potn+b8)	=chflugv	=a9*Potn^2+b9*Potn+c9	x
Vapor para a entrada da TAP	=cmeta	=cheta	=a10*Potn^2+b10*Potn+c10	=tsat(cpr15a)
TURBINA DE BAIXA PRESSAO				
Entrada da zona de remoção de um. interna	=cmass51-cmextb6	=SE(pcn>1, chextb6-(a11+b11*Potn+c11*Potn^2)+(d11+e11*pcn)+(f11+g11*pcn*cpetb), chextb6-(a12+b12*Potn+c12*Potn^2)+(d12*pcn+e12*pcn*cpetb))	=cpextb6*(a13+b13*Potn)	
CONDENSADOR DE SELAGEM				
Saída de água de alimentação	=cmscon	=(cmvsv*chvsv+cmvazn*chvazn+cmvaztb*chvaztb-cmdr*chdr)/(cmecsel)+checsel		=ft_p_h(cpsbom,chen70)
AQUECEDOR # 6				
Saída de água de alimentação	=cmeaq6	=fh_p_t(cpsbom,ctemp74)		=ctveaq6-dta6

Outra planilha a ser destacada é a **mdados**, estruturada para os mesmos 97 pontos (ou 388 valores) da planilha **cdados**. Nesta planilha, são inseridos 48 valores de vazão, pressão e temperatura medidos, obtidos através do sistema de aquisição de dados SICA [4]. Os restantes 340 valores da planilha são obtidos por balanços de massa e energia, tabelas de propriedades da água, expressões matemáticas e correlações de eficiências entre as extrações das turbinas, com base nas condições de projeto esperadas. A exemplo da planilha **cdados**, aqui também são determinadas as potências entre as extrações das turbinas, bem como o balanço de energia e a eficiência da planta.

A planilha **ddados** fornece a diferença entre os valores da planilha **mdados**, que representam os valores reais de operação, e os valores da planilha **cdados**, que representam os valores de projeto esperados.

A planilha **dados** funciona como uma área de trabalho onde são apresentados os valores da planilha selecionada na planilha de **controle**.

A planilha de **controle** permite ao usuário a seleção do tipo de operação escolhida, ou seja, a opção da apresentação na planilha **dados** dos valores calculados (**cdados**), medidos (**mdados**), de projeto (**kdados**) ou das diferenças (**ddados**). Esta planilha também fornece os valores dos dados de entrada de Potência Térmica do Gerador de Vapor, pressão no Condensador e vazão de Blowdown, bem como os valores de Potência elétrica medida e calculada.

A pasta conta ainda com 6 planilhas que representam o fluxograma de processo do circuito secundário. Nesses fluxogramas são fornecidos, ponto a ponto, as condições de operação relativas à seleção feita na planilha de **controle**. A Fig. 1 apresenta um exemplo com um dos fluxogramas.

Aquecedores 1 e 2, Tanque de

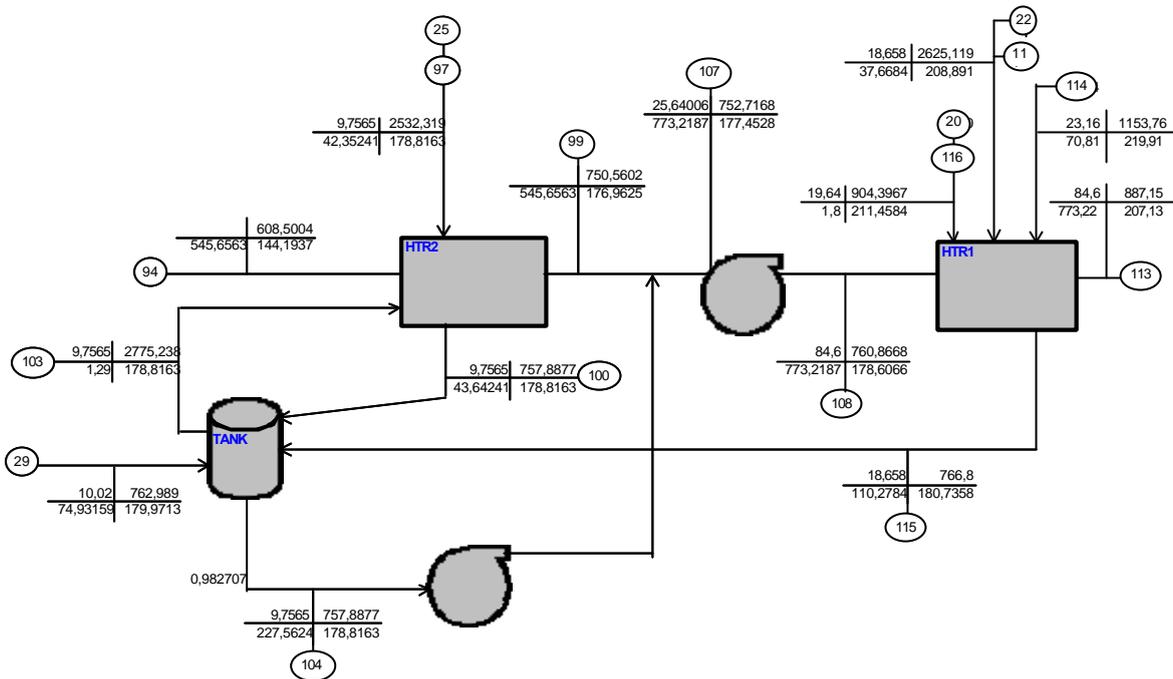


Figura 1- Exemplo de Planilha com Fluxograma de Pcesso do Secundário de Angra 1.

III. VERIFICAÇÃO DA PLANILHA CDADOS

Como mencionado acima a planilha **cdados** objetiva à reprodução das condições de projeto do secundário de Angra 1, portanto a sua verificação teve como base a comparação dos seus resultados em relação aos da planilha **kdados**.

A tabela 2 apresenta os resultados de vazão, entalpia, pressão e temperatura, para alguns dos pontos das planilhas **cdados** e **kdados**, nas condições de 100 % e 75 % de carga.

TABELA 2. Comparação entre Resultados de **cdados** e **kdados**

Parâmetro	cdados		kdados	
	75%	100%	75%	100%
Vazão no GV (kg/s)	773.2	1028.9	773.2	1028.9
Entalpia na entrada da TAP (kJ/kg)	2772.8	2777.7	2772.8	2777.7
Entalpia na saída do 1º estágio da TAP(kJ/kg)	2706.1	2745.8	2706.1	2745.8
Pressão na saída do 1º estágio da TAP(bar)	34.61	46.79	34.61	46.79
Vazão de Extração nº 1 (TAP) (kg/s)	38.18	65.33	38.18	65.33
Entalpia na entrada da TBP (kJ/kg)	2982.3	2958.7	2982.2	2958.2
Temperatura saída de água de alimentação - Aquecedor 1 (°C)	206.1	221.0	206.1	221.1

A tabela 3 apresenta as diferenças mínimas, médias e máximas, entre todos os resultados de vazão, entalpia, pressão e temperatura, obtidos na planilha **cdados** e os valores de projeto (**kdados**) para as condições de 100 % e 75 % de carga. As diferenças entre **cdados** e **kdados**, relativas aos resultados de vazão e entalpia para cada um dos pontos das planilhas, são apresentadas na figura 2.

TABELA 3. Diferenças entre as Planilhas **cdados** e **kdados**

	Erro Mínimo		Erro Máximo		Erro Médio	
	%		%		%	
POTÊNCIA	75%	100%	75%	100%	75%	100%
Vazão	0	0	0.69	1.31	0.17	0.25
Entalpia	0	0	7.59	4.24	0.55	0.36
Pressão	0	0	1.85	2.68	0.53	0.48
Temperatura	0	0	7.60	4.22	0.70	0.57

A tabela 4 apresenta ainda as diferença entre as principais potências trocadas pelo Circuito Secundário, nas condições de 75 % e 100%.

Da análise dos resultados apresentados nas tabelas 3 e 4, e na fig 2, pode-se verificar uma ótima concordância entre os valores de **cdados** e **kdados**. A ocorrência de algumas diferenças mais significativas em alguns poucos pontos, não apresentou influência ou conseqüências significativas nos resultados globais da planta, como visto

na tabela 4.. Mesmo a diferença de 2,83% observada na potência das bombas para a condição de 75 % de carga, não têm influência significativa, visto que o seu valor absoluto é da ordem de 0,5 % da potência do GV.

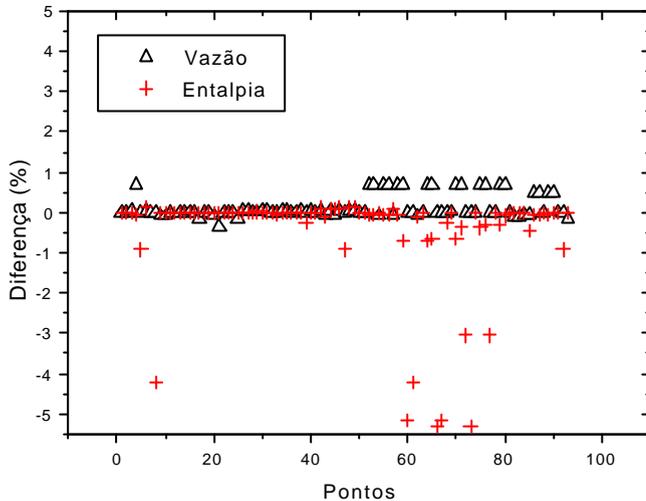


Figura 2 Diferenças entre **cdados** e **kdados**

TABELA 4- Comparação entre Potências de **cdados** e **kdados**

POTÊNCIA	DIFERENÇA (%)	
	75%	100%
Potência no GV	0.006	0.001
Calor Trocado no CD	0.032	0.07
Potência nas Turbinas	0.03	0.04
Potência das Bombas	2.83	0.04

Um exemplo de estudo paramétrico realizado através da planilha **cdados** é apresentado na fig. 3, onde se pode observar o comportamento da eficiência térmica do secundário em função da potência no Gerador de Vapor.

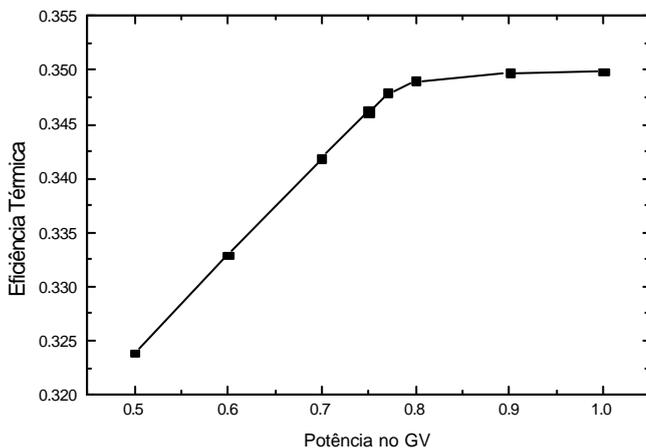


Figura 3. Eficiência Térmica Calculada por **cdados**

IV. ANÁLISE DE CASO REAL

Para demonstrar a utilidade da Planilha de Simulação, foi analisado um caso real de operação da planta, na condição de 95% da potência nominal do reator, (sem as perdas no desvio de vapor e na sangria dos GV's).

A tabela 5 apresenta um resumo com alguns dos principais resultados obtidos nas planilhas **cdados**, **mdados** e **ddados**.

TABELA 5. Resumo Comparativo das Planilhas

	Cdados	mdados	Ddados
Vazão de vapor no GV (kg/s)	977.6	971.7	0.60 %
Pressão saída do GV (bar)	64.5	65.08	0.90 %
Temperatura de entrada da TBP (°C)	261.9	262.5 C	0.90%
Temperatura na extração 3 da TBP (°C) SEM CORREÇÃO	186.1	230.6	23.9 %
Temperatura na extração 3 da TBP (°C) CORRIGIDA	186.1	195	4.8 %
Balço de Energia (MW)	0.33	1.26	-
Eficiência térmica (%)	34,7	34.5	
Potência Total nas Turbinas (MW)	634.7	628.5	0.97 %

Observando-se os resultados da tabela 4, pode-se chegar às seguintes considerações:

- o balanço de energia no secundário apontou para um desbalanceamento muito pequeno (da ordem de 0.018 % a 0.07 % da potência do GV) em ambas as planilhas, sendo um bom indicador do equilíbrio e confiabilidade das mesmas;
- a diferença de 6 kg/s (0.6%) nas vazões de vapor no GV das planilhas **cdados** e **mdados**, tem influência direta sobre a potência total gerada nas turbinas. Forçando-se a correção do valor da vazão de vapor de **mdados** para o valor de projeto (**cdados**) tem-se um aumento de 5MW na potência total, praticamente igualando os valores das duas planilhas;
- a grande diferença encontrada na temperatura de extração número 3 da TBP, e sua influência no balanço térmico de **mdados**, conduziu a realização de verificação deste valor através de medições no campo, e a constatação de que se fazia necessária a calibração do instrumento. O valor da temperatura em **mdados** foi corrigido.

Deve-se ressaltar a praticidade da utilização da planilha de simulação. Em ambiente amigável, a planilha permite fácil alteração nas condições de entrada, bem como em valores e modelos internos. A visualização dos resultados também é feita de forma simples.

V. CONCLUSÕES

A Planilha de Simulação do Secundário de Angra 1 apresentou-se como uma ferramenta prática e confiável para a verificação e análise das condições operacionais da planta.

Sua utilização permite a rápida identificação de possíveis desvios das condições medidas em relação aos valores de projeto esperados, para diferentes condições de potência do reator e temperatura da água do mar, fornecendo subsídios para a tomada de medidas como calibração de instrumentos ou manutenção de equipamentos.

Como seqüência do trabalho espera-se implementar um maior refinamento nos modelos dos equipamentos (turbinas, aquecedores e GV) para o aprimoramento da planilha, onde seja permitida uma modelagem mais conceitual bem como a consideração mais detalhada da influência de desgastes ou perdas de eficiências nos equipamentos ou sistema.

REFERÊNCIAS

[1] Futuro, F., L., **Detecção de Perdas na Geração Eletro nuclear: Simulação do Circuito Água-Vapor de Angra 1**, V Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, Foz do Iguaçu, Brasil, 19 a 23 de setembro de 1999.

[2] Maprelian, E., Bassel, W. S., **Planilha de Cálculo para a Simulação do Secundário de Angra 1** IPEN-CNEN/SP, Projeto nº PSE-RAT.ELETRONC.020, Documento nº RELT.001.R00, outubro de 1999.

[3] Maprelian, E., **Revisão da Planilha MDADOS do Secundário de Angra 1** IPEN-CNEN/SP, Projeto nº PSE-RAT.ELETRONC.020, Documento nº RELT.001.R00, março de 2000.

[4] SICA 2.0 Sistemas Integrados dos Computadores de Angra 1 versão 2.0 - Especificação Funcional do Sistema de Supervisão de Parâmetros de Angra 1 (SSPA) - outubro 1997 - LMP- PEN/COPPE.

ABSTRACT

The efficient operation of a Nuclear Power Plant (NPP) requires the continuous identification of deviations in the main operating parameters. The identification and analysis of those deviations allow someone to detect the degradation of instruments or even of any equipment. In order to study this problem, the group of thermal generation of Angra 1 NPP, devised the use of a Microsoft EXCEL spread sheet for the automation of Angra 1 thermal balance. In the set of simulation spread sheets, measured values of the secondary system main parameters were compared with project values for a given reactor power level and condenser pressure. The spread sheets provide the turbines power and efficiency and do the plant thermal balance. This work presents a general

description of the spread sheets set and a real case analysis of Angra 1 NPP, showing its precision and use easiness.