



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

FI/GPT/12  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO - II**

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

**PROGRAMA DE AUMENTO DE DESEMPENHO TÉRMICO DA USINA NUCLEAR DE ANGRA 2 BASEADO NA  
RECONCILIAÇÃO DE DADOS DE PROCESSO – RESULTADOS OBTIDOS**

**Edson Prado Azola (\*)**  
**ELETRONUCLEAR**

**Marcelo de Souza Sampaio**  
**ELETRONUCLEAR**

**Leonardo Teixeira Marcos**  
**ELETRONUCLEAR**

**Eduardo D. Valdetaro**  
**ELETRONUCLEAR**

**RESUMO**

No SNPTTE do ano de 2009 este trabalho foi apresentado com o projeto ainda na fase de contratação. Este IT mostra os resultados finais após a implementação e comissionamento do projeto, o que somente ocorreu em meados de 2012. O resultado da implementação da reconciliação de dados foi um aumento na produção de energia elétrica entre 35-40 MW com geração adicional de um balanço térmico online para o circuito água-vapor, entre outros ganhos que serão descritos nos tópicos seguintes. O aumento na produção de energia elétrica foi responsável por uma receita adicional da ETN ocasionando tempo de retorno menor que 15 dias para o investimento feito na implantação do projeto.

**PALAVRAS-CHAVE**

Reconciliação de dados. Aumento de Desempenho Térmico, Produção de Energia Elétrica.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

No ano de 2001 foi terminado o teste de aceitação da usina de Angra 2, pertencente à Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA). Os resultados indicaram uma potência elétrica de 1348 MW para uma temperatura da água do mar de 27 graus Celsius e potência térmica na fonte primária (reator nuclear) de 3765 MW. A busca permanente por melhoria de desempenho levou a empresa a criação de um grupo de trabalho a partir do ano de 2007 com objetivo de acompanhar e monitorar o desempenho térmico da unidade.

**2.0 DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA TÉRMICA GERADA PELO REATOR**

Um desenho esquemático da planta está representado na figura 2.1. Na figura existe o circuito primário, formado pelo fluido refrigerante do reator, que circula no lado dos tubos dos geradores de vapor (GV's), e o chamado circuito secundário, ou circuito água-vapor, que flui do lado do casco dos GV's. Para controle de carga da planta existe uma malha de controle de potência elétrica, que controla a potência medida conforme o valor limite ajustado no controlador de potência. O elemento de controle final são as válvulas de controle de vazão de vapor que alimentam a câmara de impulso do estágio de alta pressão da turbina a vapor.

A produção de energia está limitada ao valor máximo de potência térmica do reator licenciada, portanto, o cálculo correto desta potência é muito importante. O método utilizado para cálculo da potência térmica do reator é o calorimétrico. O cálculo consiste em se determinar a carga térmica dos GV's, que é uma função direta da vazão de água de alimentação principal, e deduzir pequenas variações. A carga térmica dos GV's pode apresentar mudanças substantivas em função de variações de carga da planta, pois varia de forma diretamente proporcional à vazão de água de alimentação principal. Isto

(\*) Rua da Quitanda, n° 65 – sexto andar Gerência GSR.T – CEP 20091-906 Rio de Janeiro Brasil  
Tel: (02121) 2588-7615 – Fax: (021) 25887609 – email: eazola@eletronuclear.gov.br

implica em que erros de medição nesta variável são propagados para a potência térmica do reator. Adicionalmente a esse problema, foi constatada também uma grande dificuldade quando se executa balanços de massa e energia, em virtude da não convergência das equações, em face aos erros de medição existentes. Devido a estes fatos, a escolha da reconciliação de dados de processo foi a alternativa escolhida para o desenvolvimento de um programa de aumento de desempenho térmico com correção da potência térmica do reator e obtenção de balanço térmico on-line do circuito água-vapor da planta.

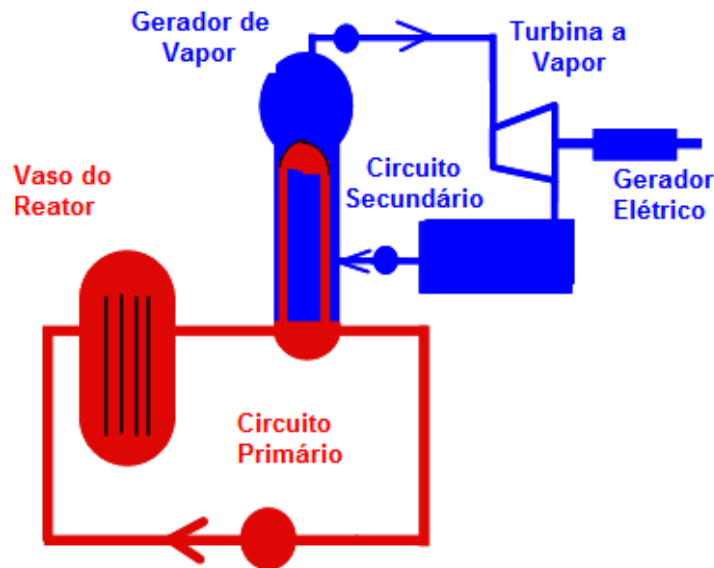


Figura 2.1 Desenho Esquemático dos Circuitos Primário e Secundário da Usina de Angra 2

### 3.0 METODOLOGIA DA RECONCILIAÇÃO DE DADOS DE PROCESSO

Normalmente, em qualquer processo, as variáveis estão relacionadas entre si através de restrições físicas ou materiais, tais como as leis da conservação de energia. Dado um conjunto de variáveis com suas respectivas restrições, um número mínimo de medições livres de erro, se faz necessário, a fim de que se possa calcular todos os parâmetros do sistema e suas variáveis. Se houver um número maior de medições do que o mínimo estabelecido, então existe redundância nas medições e estas podem ser exploradas.

Conforme já mencionado anteriormente, os erros que podem ocorrer em um processo podem ser classificados em dois tipos: erros sistêmicos (ou grosseiros, como também são chamados) e erros randômicos. O termo randômico implica que nem a magnitude nem o sinal do erro podem ser previstos com certeza. Em outras palavras, se a medição é repetida com o mesmo instrumento no âmbito do processo em condições idênticas, valores diferentes podem ser obtidos em função do resultado do erro randômico. A única forma possível de caracterização desses erros é a utilização de distribuições de probabilidade. Estes erros podem ser causados por uma série de diferentes fontes, tais como flutuações de alimentação de energia, rede de transmissão e conversão de ruído de sinal, filtragem de entrada analógica, mudanças em condições ambientais, etc.. Uma vez que estes erros podem surgir a partir de diferentes fontes, algumas das quais podem estar além do controle da engenharia de projeto, eles não podem ser completamente eliminados e sempre estarão presentes em qualquer medição. Estes erros são pequenos em magnitude com exceção de alguns picos ocasionais. Por outro lado, desvios não randômicos são causados por eventos como falha de instrumento (devido a uma má instalação do sistema de medição), descalibração, desgaste de sensores ou corrosão, sólido, depósitos, etc. A natureza não aleatória desses erros implica que a qualquer momento eles podem ter uma indicação falsa de certa magnitude e sinal, que pode ser desconhecida. Assim, se a medição é repetida com o mesmo instrumento em condições idênticas, a contribuição de um erro sistêmico ao valor medido será o mesmo. Pelas boas práticas de instalações e procedimentos de manutenção, é possível garantir que desvios sistêmicos não estejam presentes nas medições pelo menos por algum tempo. Desvios provocados pela descalibração do sensor podem ocorrer repentinamente num determinado momento e, posteriormente, permanecer em nível constante. Outras causas de erro sistêmico tais como desgaste ou incrustações de sensores, podem ocorrer gradualmente, ao longo de um período de tempo e, assim, a magnitude do erro sistêmico aumenta lentamente ao longo de um período relativamente longo. Assim, erros sistêmicos ocorrem com menor frequência, mas as suas grandezas são geralmente maiores que dos erros randômicos. O trabalho citado na referência /2/, apresentado no ICONE 19, descreve o algoritmo de detecção e correção de erros randômicos.

A reconciliação de dados é baseada na premissa de que somente erros aleatórios estão presentes nas medições que seguem uma distribuição normal (Gaussiana). Se um erro grosseiro, devido a uma falha de medição está presente em algumas medições ou se um processo de vazamento significativo estiver presente que não tenha sido contabilizado no modelo de restrições, os dados reconciliados podem ser muito imprecisos. Erros grosseiros podem ser detectados sempre que as medições violarem as restrições ou a magnitude das adaptações feitas para as medições em dados reconciliados preliminarmente ultrapassarem a faixa de valores esperados. Embora técnicas de detecção de erros grosseiros tenham sido desenvolvidas principalmente para melhorar a precisão das estimativas, elas também são úteis na identificação de

instrumentos que precisam ser substituídos ou recalibrados. Assim, o processamento de dados reconciliados e a detecção de erros grosseiros são aplicados em conjunto para melhorar a precisão dos valores medidos.

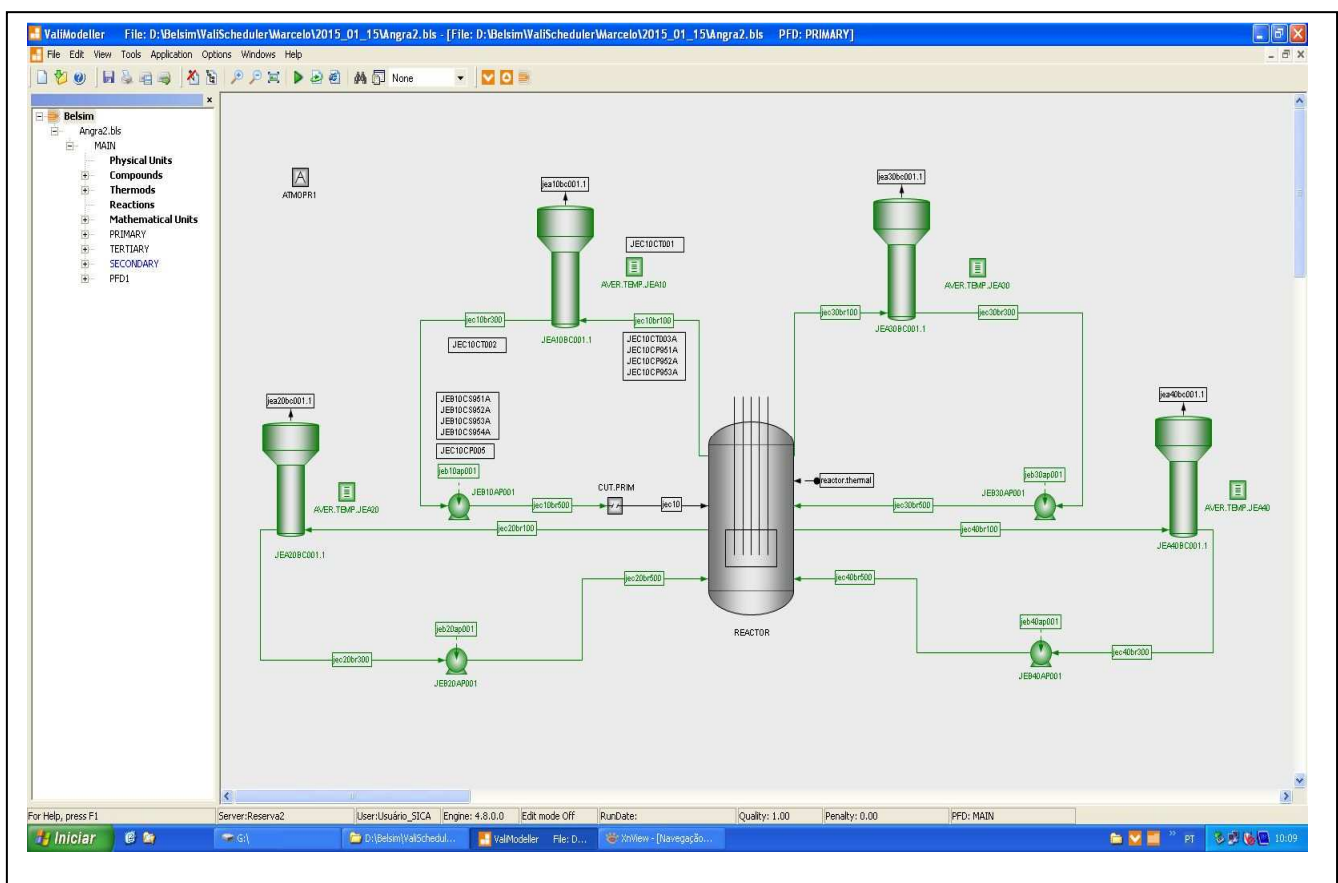
#### 4.0 CRIAÇÃO DO MODELO FÍSICO

A figura 5.1 apresenta a configuração básica da usina de Angra 2. Adicionalmente ao desenho, deve ser mencionado que o circuito primário é composto de 4 loops e a seção de baixa pressão da turbina a vapor é composta de três seções, o que também define três condensadores principais e três trens de pré-aquecimento de baixa pressão. A maioria das variáveis necessárias à aplicação da reconciliação de dados está disponível no computador de processo da usina.

Basicamente serão apresentados aqui os impactos do método no aumento de produção de energia elétrica, através da redução dos erros de medição observados nas vazões de água de alimentação e vapor principal. Neste contexto, pôde ser comprovado que a usina poderia operar com faixas menores de erro, e, portanto, com valores mais próximos dos limites operacionais (100% da potência térmica do reator), sem redução da margem de segurança operacional da planta. Todo o processo foi acompanhado pela CNEN e a aprovação final, para utilização da nova metodologia para o cálculo da potência térmica do reator, permitiu um aumento real na produção de eletricidade de cerca entre 35-40 MW.

A criação do modelo matemático baseou-se no modelo físico da planta, tendo sido construído em módulos conforme sua função térmica, dentro dos circuitos primário e secundário. Os seguintes módulos foram previstos para a construção do modelo final:

- Circuito primário
- Geradores de Vapor
- Seção de Alta Pressão da Turbina
- Seção de Baixa Pressão da Turbina
- Pré-Aquecedores de Alta Pressão
- Pré-Aquecedores de Baixa Pressão
- Condensadores Principais
- Outros módulos complementares ao balanço térmico do ciclo água-vapor.



gerada no reator é controlada. O objetivo é evitar aumento desordenado desta carga térmica, bem como uma indesejada operação abaixo da carga estabelecida de 100% em dias de reduzida temperatura da água do mar.

## 5.0 APLICAÇÃO DO MÉTODO E RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados da aplicação do modelo de reconciliação de dados para a usina de Angra 2 mostraram de imediato que as vazões indicadas da água de alimentação e vapor principal estavam mais de 1% acima do valor real. Esta correção permitiu a elevação do valor real da vazão de vapor vivo e, conseqüentemente, a elevação da potência térmica real do reator e a produção de energia elétrica. A figura 5.1 apresenta o balanço térmico após implantação e comissionamento final do programa, com a planta já contendo todas as correções sugeridas. Estas correções foram feitas durante o desenvolvimento do projeto com o objetivo de corrigir falhas ou implementar melhorias e foram executadas de acordo com as disponibilidades de tempo e recursos. As correções estão listadas a seguir.

- Instalação de medidores de pressão adicionais para aumentar a precisão nos cálculos das eficiências nos estágios de baixa pressão da Turbina;
- Instalação de medidores de pressão adicionais para aumentar a precisão nos cálculos das eficiências nas descargas das seções de baixa pressão da Turbina para permitir melhor monitoração do desempenho dos condensadores principais;
- Calibração de cerca de 300 medidores utilizados no processo de reconciliação de dados;
- Substituição dos medidores de potência elétrica bruta por medidores de maior precisão para melhorar a convergência no modelo de modo a permitir que os resultados do modelo sejam equivalentes aos valores reais utilizados para faturamento;
- Outras modificações no circuito água-vapor decorrentes das observações feitas durante implantação do programa.

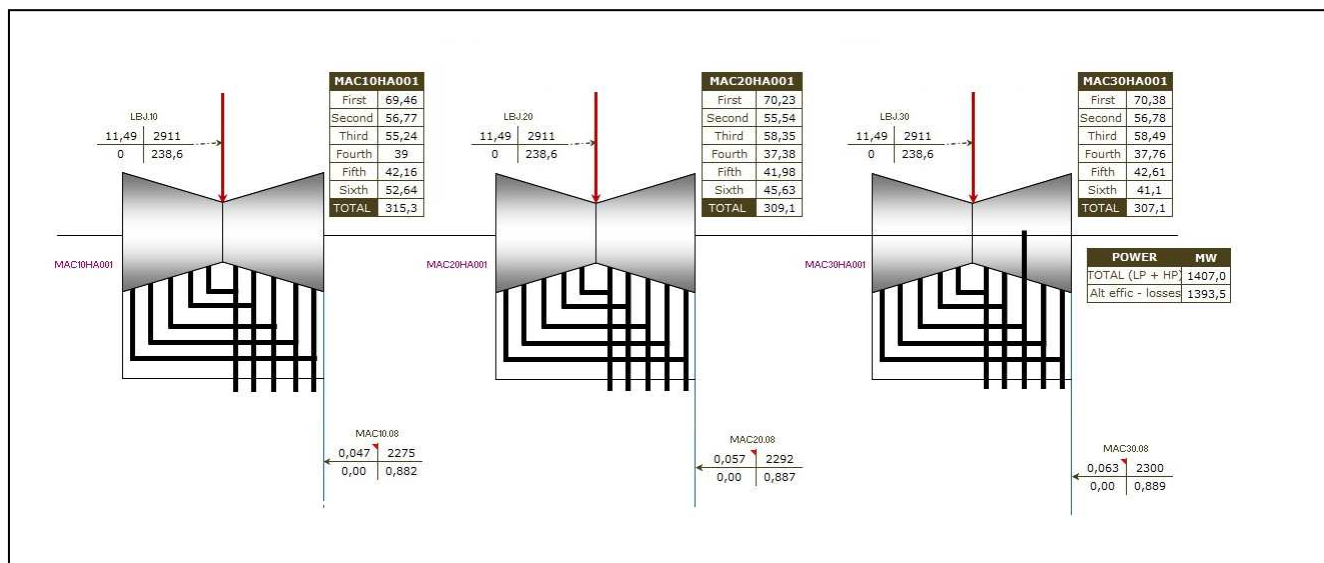


Figura 5.1 Balanço Térmico Validado. Cópia Parcial com Valores Referentes à Seção de Baixa Pressão da Turbina.

O programa com a aplicação do método foi comissionado no final de 2011, com a criação de um balanço térmico e monitoramento online das variáveis, conforme era desejado no início da implantação do programa. Porém, as modificações necessárias para pleno aproveitamento do processo foram implementadas ao longo do tempo e alteraram no momento de sua implementação a eficiência da planta em função da correção dos valores referentes à vazão de vapor vivo. As datas das modificações podem ser acompanhadas pelas alterações observadas nos gráficos obtidos exatamente após a implementação destas modificações. Três alterações afetaram diretamente a produção de energia.

- Melhoria na medição do vácuo do condensador (outubro de 2012)
- Instalação de medidores de potência bruta com tolerâncias menores (novembro de 2012)
- Retirada dos filtros de vapor vivo e instalação de separador de umidade na extração de vapor do pré-aquecedor de alta pressão (julho de 2014).

As figuras seguintes ilustram os resultados finais após comissionamento do programa, e os respectivos gráficos referentes à vazão bruta e reconciliada de vapor vivo, potência térmica do reator e potência elétrica bruta nos terminais do gerador elétrico, além da temperatura da água do mar ao longo dos anos de 2011, 2012, 2013 e 2014. O aumento substancial no valor da potência elétrica bruta se deve a correção efetuada pelo programa nas vazões de água de alimentação e vapor vivo, que indicou para os dados reconciliados valores inferiores a 100% de carga. A correção (elevação) dos valores reconciliados para o patamar de 100% teve como consequência um aumento efetivo na vazão de água de

alimentação/vapor vivo. Este aumento de vazão foi responsável pela elevação da potência elétrica bruta da ordem de 35-40 MW, para as mesmas condições de 100% de potência térmica observada no reator.

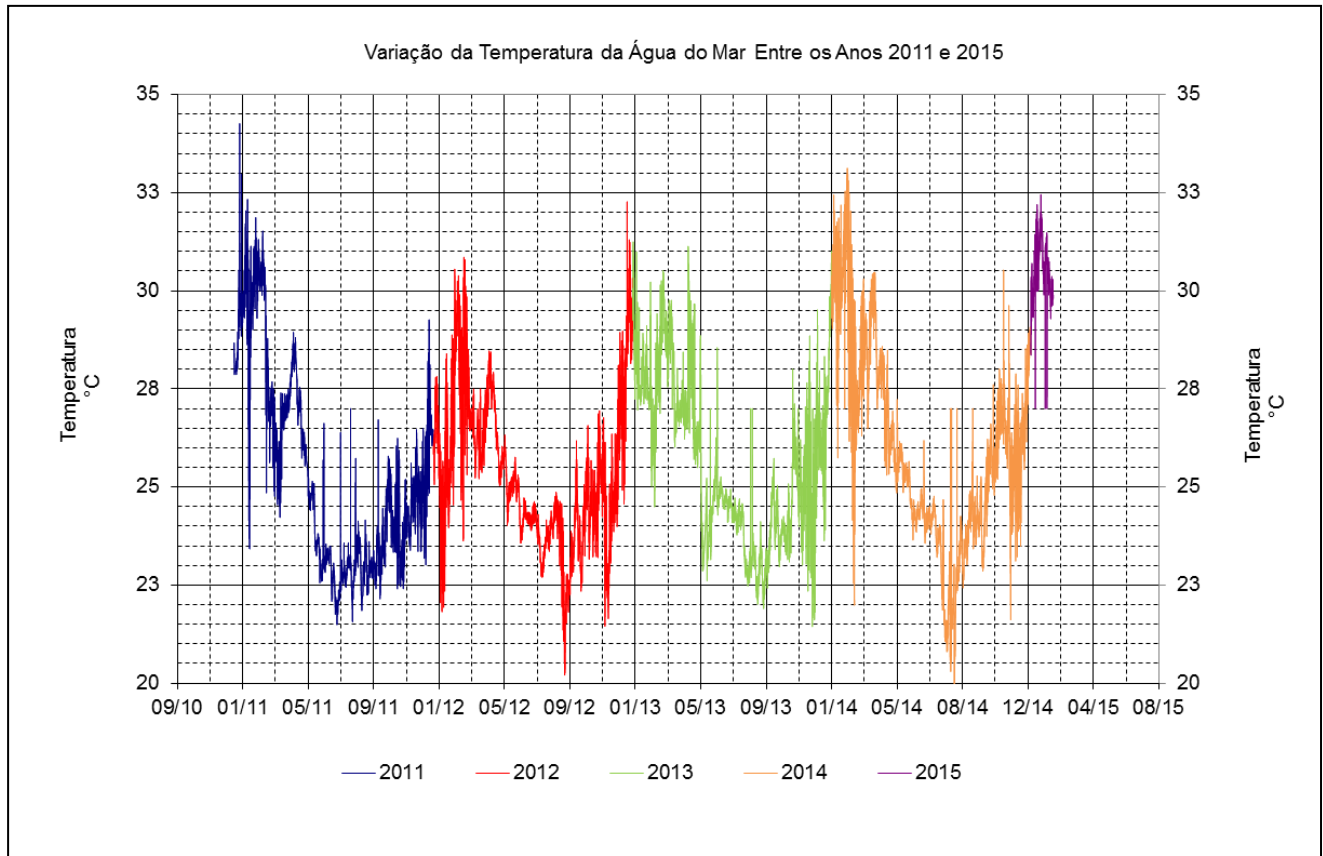


Figura 5.2 Variação da Temperatura da Água do Mar no Período 2011-2014

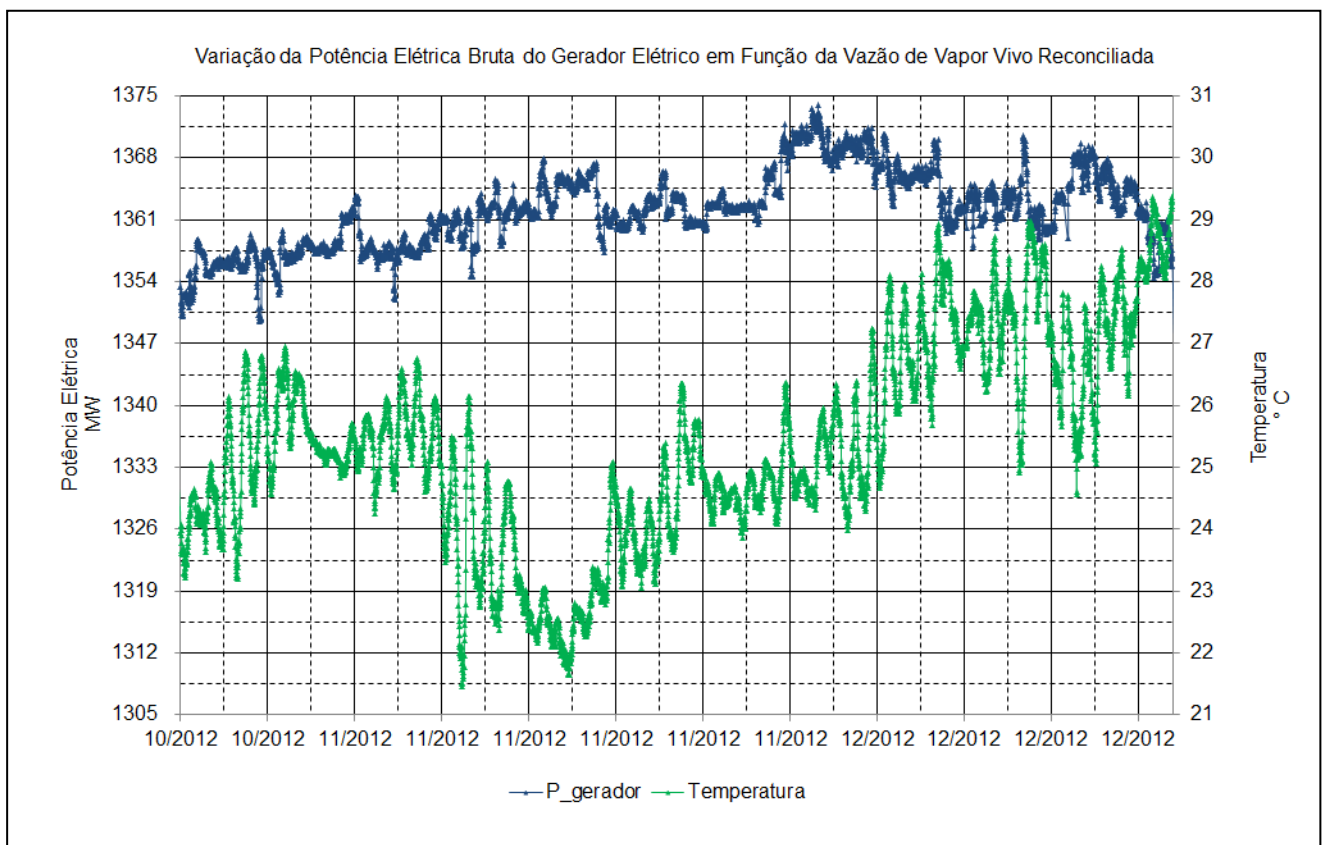


Figura 5.3 Influência da Temperatura da Água do Mar na Produção de Energia Elétrica

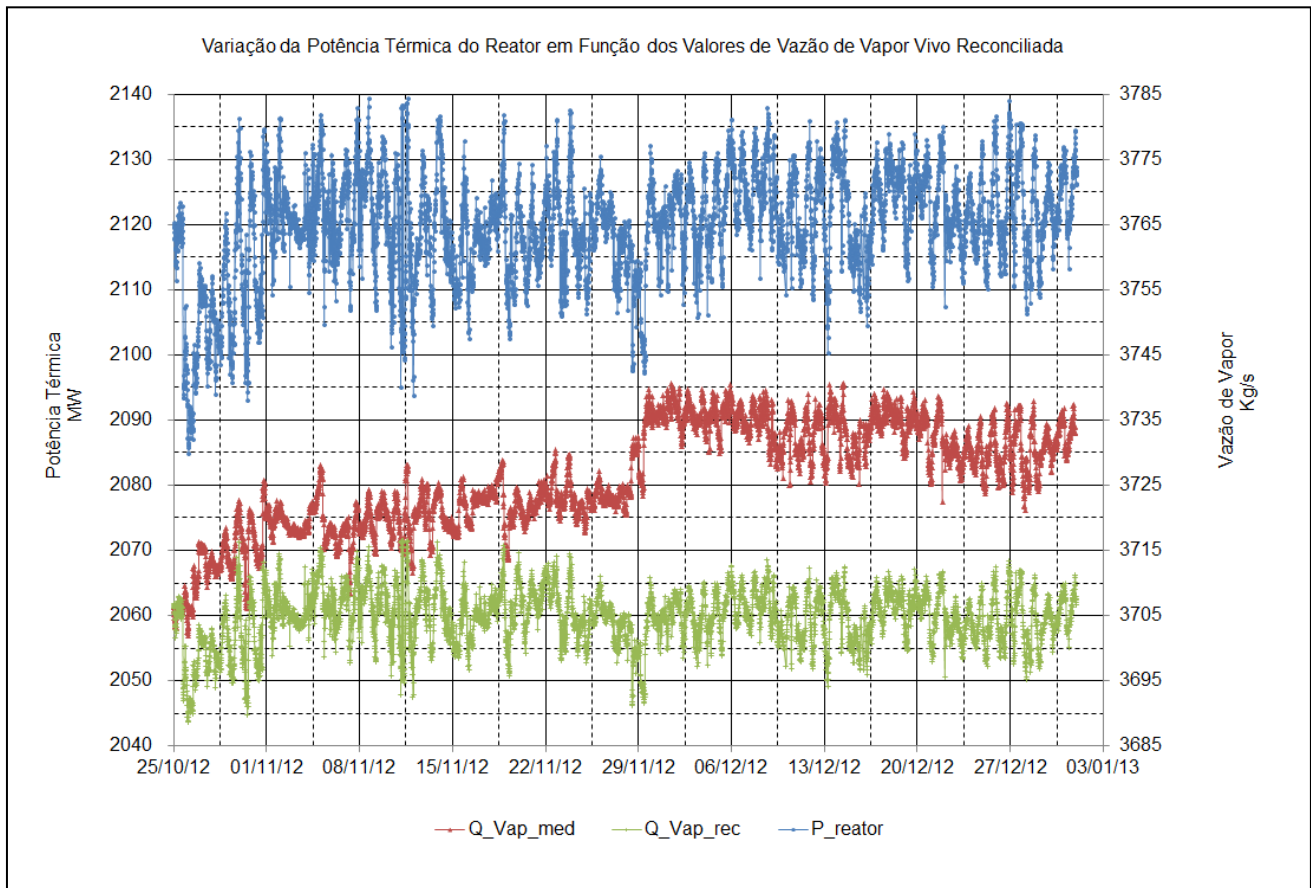


Figura 5.4 Influência da Reconciliação de Dados na Potência Térmica do Reator

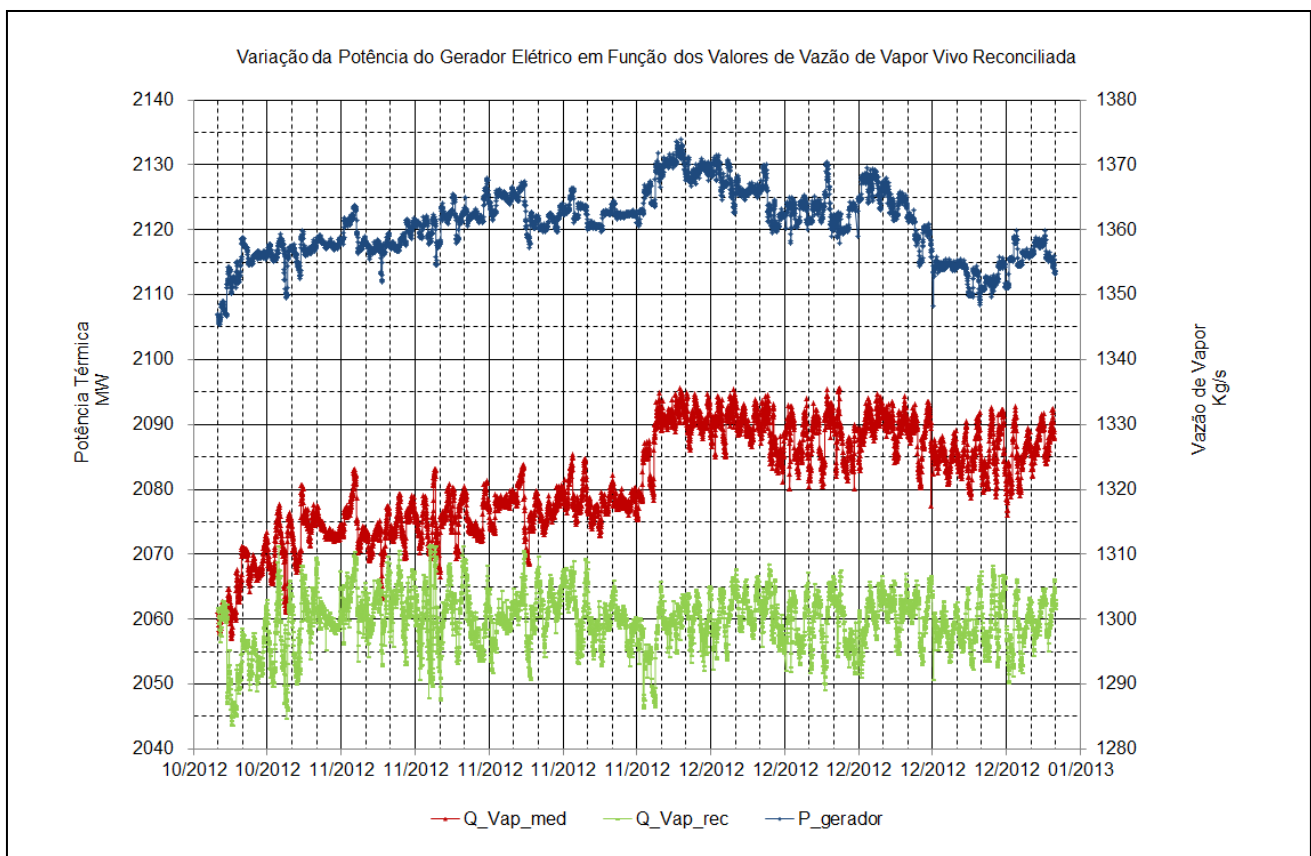


Figura 5.5 Influência da Reconciliação de Dados na Produção de Energia Elétrica

## 6.0 CONCLUSÃO

O gráfico mostrado abaixo indica o ganho de potência elétrica ocorrido após ajuste do programa feito outubro de 2012, com melhorias no vácuo dos condensadores e no processo de medição da potência elétrica bruta.

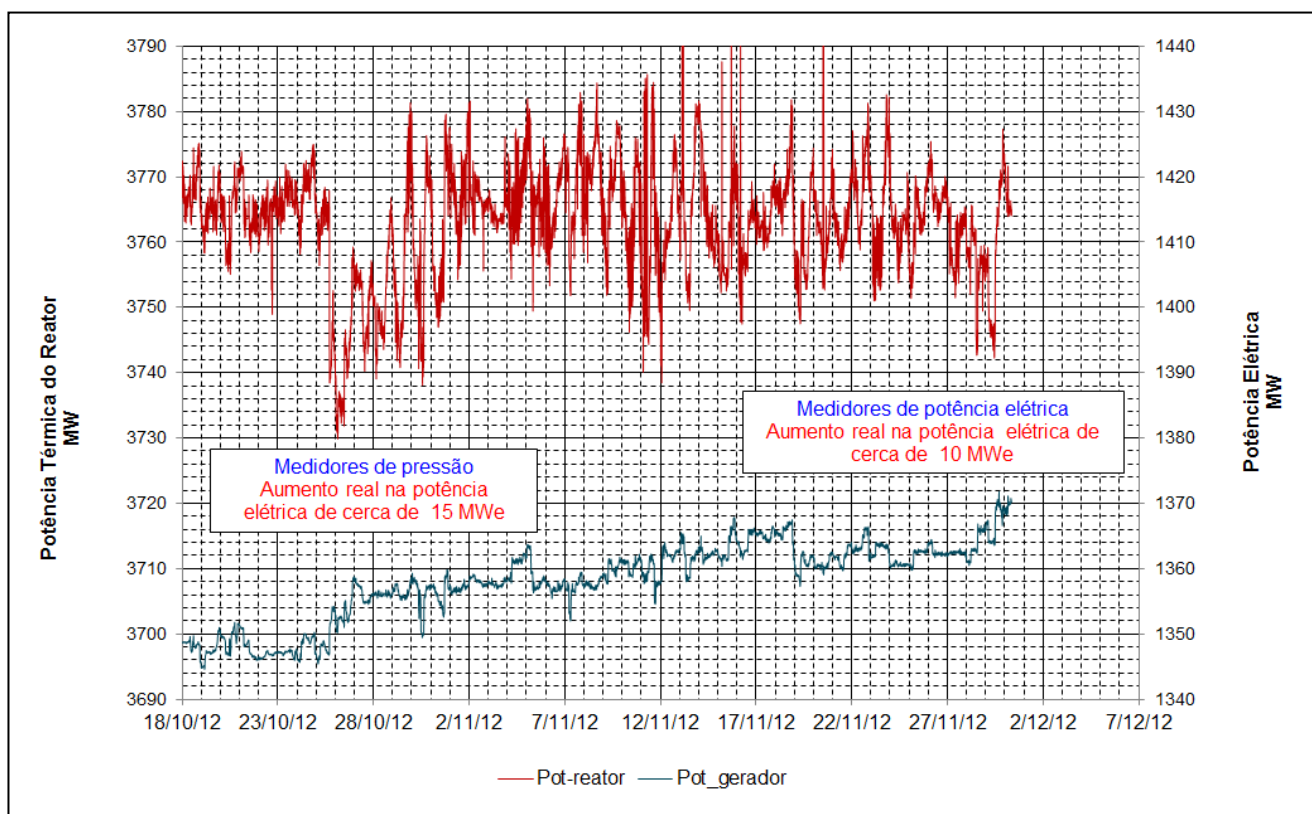


Figura 5.6 Aumento da Potência Elétrica da Planta Após Ajuste da Potência Térmica do Reator

Após a parada programada de 2014 e introdução de modificações adicionais (remoção dos filtros de vapor vivo e instalação de separadores de umidade nas linhas de extração com teor de umidade maior que 16%), bem como após a calibração final dos medidores de energia para faturamento por meio da Plataforma Integrada de Medição (por solicitação da ANEEL), ganhos adicionais foram incorporados a potência elétrica bruta, tendo como consequência um aumento na eficiência global da unidade. A Figura 5.7 indica a evolução da curva de desempenho da planta desde os testes pré-operacionais realizados durante o comissionamento feito em 2001 até final de 2014.

A Figura 5.1 apresenta o balanço térmico “online” obtido em 08/2014, que indica uma potência elétrica de 1393,5 MW, 3761,5 MW de potência e 22,5 °C de temperatura na água do mar. Este valor corrigido para os dados do teste de aceitação (3771 MW no reator e 22,8 °C na água do mar) é de 1395 MW. Baseado nestes dados e na potência elétrica de 1356 MW obtidos no comissionamento da planta verificou-se um ganho de 39 MW em relação ao valor entregue pelo fabricante (Siemens) para o cliente (Eletronuclear). Na verdade, a curva é uma referência para indicação de desempenho, pois os valores medidos podem oscilar entre  $\pm 3,5$  MW. Valores fora desta faixa de medida podem indicar mudanças na eficiência térmica da planta,

Considerando que o contrato de fornecimento de energia da Eletronuclear contempla apenas 80% da energia elétrica líquida e que o restante é vendido de acordo com a variação do PLD, o tempo de retorno verificado para o projeto de reconciliação de dados foi menor que 15 dias.

Além do benefício econômico propiciado pelo aumento de potência em virtude do projeto de reconciliação de dados, outros benefícios foram evidentemente obtidos. Como exemplos podem ser citados:

- Obtenção do balanço térmico “online” que permite verificação imediata de qualquer desvio em relação aos parâmetros operacionais esperados;
- Indicação das medições com erros grosseiros ou com necessidade de calibração;
- Acompanhamento de desempenho de componentes ao longo do tempo, dentre outros.

O programa está sendo implantado no ano de 2015 na unidade 1 da CNAAB e também será implantado na unidade 3 após seu comissionamento.

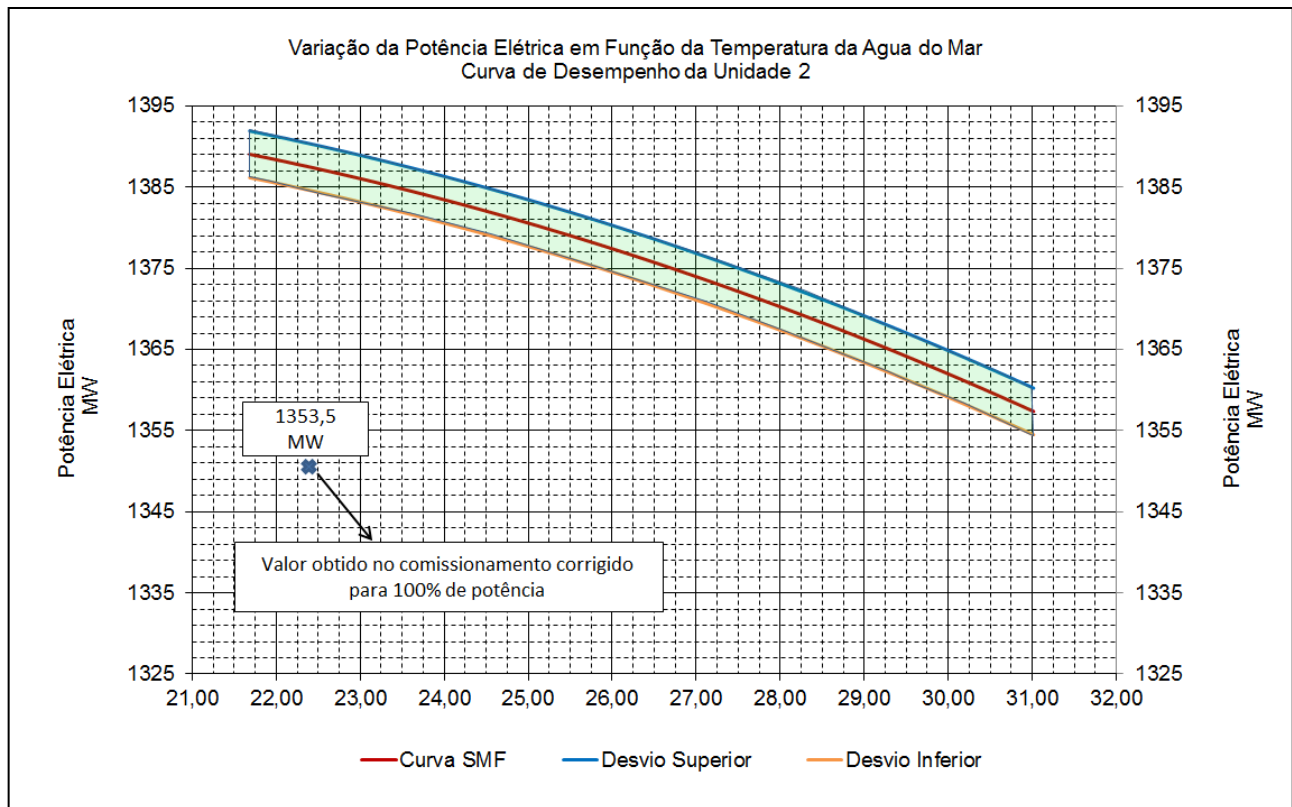


Figura 5.7 Evolução da Curva de Desempenho da Usina de Angra 2 desde o Comissionamento da Planta em 2001 até Dezembro de 2014.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- /1/ Utilização da Reconciliação de Dados Para Implementação de um Programa de Aumento de Desempenho da Unidade 2 da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto.  
Azola Edson, Sampaio Marcelo, Valdetaro Eduardo.  
XX SNPTTE Seminário Nacional de Produção e Distribuição de Energia Elétrica  
Recife, Novembro de 2009.
- /2/ Nuclear Power Performance Monitoring Using Data Validation and Reconciliation (DRV) – Application at the Brazilian Angra 2 Power Plant.  
Tran Q. Anh Tho, Azola Edson, Closos Herve, Chares Robert.  
Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Conference on Nuclear Engineering - ICONE19.  
May 16-19, 2011, Makuhari, Chiba, Japan.

#### AUTORES

Edson Prado Azola  
Graduado em Engenharia Química em 1977 pela UFF  
Pós-graduado em Engenharia Nuclear pela UFRJ em 1978.  
Empresa: Eletronuclear desde 1978  
Atua nas áreas de Engenharia de Processos e Análise de Desempenho Térmico.

Eduardo Damianik Valdetaro.  
Graduado em Engenharia Elétrica com Ênfase em Sistemas em 1984 pela PUC.  
Mestrado em Engenharia Elétrica em 1990 pela COPPE/UFRJ.  
Doutorado em Engenharia Nuclear no Departamento de Engenharia Nuclear da COPPE/UFRJ em 2012.  
Empresa: Eletronuclear, Gerência de Operação de Angra 2, Setor de Computadores de Processos desde 1996.

Marcelo de Souza Sampaio  
Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro em 1997  
Mestrado na UERJ, tese defendida em 2001.  
Doutorado na UERJ, tese defendida em 2006.  
Empresa: Eletronuclear desde 2004, na gerência de Engenharia de Sistemas e Suporte de Reator (GDD.O).  
Área de Atuação: Engenharia de Sistemas e Desempenho Térmico de Usinas Nucleares.

Leonardo Teixeira Marcos  
Graduado em Engenharia Elétrica com Ênfase em Eletrônica em 2006 pela Universidade Gama Filho – Rio de Janeiro, R.J.  
Empresa: Eletronuclear, Gerência de Manutenção de Angra 2, desde 1996.  
Atuação nas áreas de Instrumentação e Controle, Operação e Gerência de Manutenção.