



OPERAÇÃO CRUZADA DAS CALDEIRAS E TURBINAS DA CENTRAL TERMELÉTRICA SOL¹

Gustavo Queiroz de Souza²
Caio Henrique Vidigal³

Resumo

Com o intuito de se aproveitar ao máximo a flexibilidade operacional e os ganhos financeiros associados, a Arcelormittal Tubarão promoveu as ações necessárias para se trabalhar de forma cruzada com os turbo - geradores (TGs) da sua Central Termelétrica SOL. São dois TGs, de capacidade de turbina 98 MW operando em ciclo Rankine, acionados com o vapor gerado por 8 caldeiras de passagem (HRSGs) da Coqueria *Heat Recovery* associada à Termelétrica. A configuração normal é 160 fornos de coque/ 4HRSGs/1 turbina, o que em condições padrão produz 1,5 Mt/a de coque e 2x83 MW médios anuais. O propósito aqui é demonstrar e discutir as ações tomadas para se operacionalizar uma condição em que até 8 caldeiras possam fornecer vapor para apenas 1 Turbina, o que é uma configuração desejada nos casos de baixa produção de coque/vapor ou de indisponibilidade de 1 TG; serão também discutidos resultados econômicos e práticos.

Palavras-chave: Termelétrica; Cruzada; Flexibilidade; Ganhos.

CROSSED OPERATION BETWEEN BOILERS AND TURBINE IN SOL POWER PLANT

Abstract

In order to achieve maximum operational flexibility and the corresponding economic gains, Arcelormittal Tubarão configured its two SOL Power Plant Turbo-generators (TGs) to operate in crossed-over mode. SOL TGs consist of two 98 MW Rankine cycle turbines, that receive all the steam generated in Heat Recovery Steam Generators (HRSGs), from the Heat Recovery Coke Plant annex to it. Standard configuration is 160 coke ovens/4 HRSGs/ 1 turbine, which in nominal conditions result in 1,5 Mt/y of coke and 83 MW on average on a yearly basis. The purpose here is to demonstrate and discuss the steps taken to associate the steam produced in up to 8 HRSGs to one single TG, which is a desired configuration in cases of low coke/steam production or TG unavailability; economical and practical results will also be discussed.

Key words: Power plant; Crossed; Flexibility; Economic gains.

¹ *Contribuição técnica ao 33º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 27º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 22 a 24 de agosto de 2012, Belo Horizonte, MG.*

² *Engenheiro Eletricista. Especialista de Energia e Utilidades da ArcelorMittal Tubarão – Vitória – ES.*

³ *Engenheiro de Controle e Automação. Especialista de Manutenção Eletroeletrônica da Área de Energia da ArcelorMittal Tubarão – Vitória – ES.*



1 INTRODUÇÃO

A SOL Coqueria Tubarão deu início em 2007 à operação de uma Coqueria tipo *Heat Recovery* para atendimento à fase 7,5 Mta da Arcelormittal Tubarão. O empreendimento consiste de uma Coqueria composta por 4 baterias de 80 fornos cada, caldeiras de recuperação (HRSG), sistema de tratamento de gás e outros sistemas auxiliares, operada pela empresa Sun Coke East; uma Central Termelétrica – CTE SOL, composta por dois Turbo-geradores de capacidade nominal 98 MW cada, operando em ciclo de vapor Rankine, que recebem o vapor oriundo das caldeiras de recuperação da Coqueria, e operada pela Arcelormittal Tubarão.

Originalmente prevista para operar na configuração 160 fornos/4 caldeiras de recuperação / 1 turbo-gerador, a Termelétrica é dimensionada para recebimento de até 328 t/h de vapor superaquecido a 100 bar e 528°C por turbo - gerador. Nesta configuração, a produção correspondente de coque é da ordem de 1,5 Mt/a.

A carga de gás quente oriunda dos fornos de coque varia continuamente em função de todos os parâmetros operacionais da Coqueria: ciclo de enforamento/desenforamento, qualidade e quantidade dos carvões carregados, tempo de coqueificação, umidade das misturas de carvão, etc.; desta forma a quantidade de energia recebida pelo vapor nas caldeiras de passagem também é continuamente variável. Para estabilização do processo de geração de vapor, o sistema de controle concebido para estas plantas adota o controle da pressão do circuito de vapor, que é feito pelo controle de admissão de vapor para as turbinas. A válvula governadora trabalha continuamente modulando a quantidade de vapor admitida para a turbina, desta forma mantendo todo o trecho de tubulação entre turbina e tubulões das caldeiras sob pressão constante; da mesma forma, mas em menor escala e atuando para redução da pressão da linha, as válvulas *by-pass* para condensador também atuam de forma automática para ajudar a manter a pressão na faixa de trabalho. Desta forma garante-se um ambiente de pressão estável, qualquer que seja a energia originalmente transmitida às caldeiras pelo gás quente da Coqueria.

Sabendo da existência da possibilidade de indisponibilidade de um conjunto turbo – gerador por quebra, restrições etc., e a possibilidade de baixa produção de vapor quando da existência de restrições para a produção de coque, situação que poderia levar à parada da máquina por atingimento de limite técnico, fomos levados a investigar as possibilidades de se operar as Termelétricas na configuração 20 fornos/ oito caldeiras de recuperação / um turbo - gerador. Nesta configuração de operação usaríamos todo o vapor gerado por até oito caldeiras para acionar apenas um dos turbo - geradores.

Para chegar a este ponto seria necessário tomar as seguintes ações:

- garantir que o trecho de tubulação de alta pressão fosse devidamente submetido a procedimentos de limpeza (*flushing*), os quais não foram executados no período de montagem e comissionamento da planta; e
- determinar alterações nos sistemas de proteção e controle que garantissem segurança e performance operacional à planta.

Além disso, seria bastante importante desenvolver procedimentos para estabelecer a operação cruzada sem necessidade de parada dos turbo - geradores, efetuando a transição da operação separada para a operação cruzada de modo suave, sem causar distúrbios para os processos de energia e coqueria.



2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Limpeza da Interconexão de Vapor

Por definição, a operação de turbo geradores que trabalham a altíssimas pressões e temperaturas requer cuidados especiais com a qualidade da água e do vapor, de modo a preservar a integridade da turbina (Figura 1). Antes da primeira admissão de vapor para a turbina deve-se garantir que toda tubulação de alta pressão esteja livre de resquícios de material proveniente da montagem. Para isso são executados procedimentos padrão de limpeza, ou *blow-out*. O material mencionado pode se constituir de pedaços de solda, limalhas, carepa ou qualquer outro contaminante.

O caso em questão é uma variante desta situação: apesar dos dois turbo - geradores já estarem em operação, havia necessidade de certificação da completa limpeza do trecho de tubulação que interliga as duas tubulações de vapor de alta pressão principais (Figura 2), que não havia passado pelos procedimentos de limpeza durante o comissionamento dos TGs. Assim, algum tipo de procedimento de limpeza deveria ser adotado antes que o trecho fosse usado para a operação cruzada.



Figura 1 -Exemplo de dano causado em turbina por contaminantes no vapor.



Figura 2 – Interligação de vapor TGs 5 e 6.



Para determinação dos procedimentos de limpeza da tubulação de interligação utilizou-se como referência procedimentos de limpeza dos super - aquecedores das Centrais termelétricas 1 e 2, as quais passaram por reforma no período Agosto 2010/ Abril 2011, bem como procedimentos de limpeza dos trechos de alta pressão das unidades 5 e 6 propriamente ditas, feitas durante comissionamento em 2007.

Tabela 1 – limpeza de trechos da vapor de alta pressão em CTEs da AMT

	Δ PRESSÃO	VOLUME SOPRADO	COMP. DO TRECHO
PROCEDIMENTOS KHI – CTEs 5 e 6	10 bar (de 50 para 40)	Aprox. 200 t/h	Aprox. 400 m
PROCEDIMENTOS MHI – CTEs 1 e 2	10 bar (de 40 para 30)	Aprox. 160 t/h	Aprox. 80 m

Nos dois casos montou-se tubulação provisória imediatamente antes da admissão para a turbina, para direcionar o sopro para atmosfera. Para verificação de eficácia da limpeza usa-se tanto a inspeção visual em filtro quanto em placas de prova, na saída do trecho soprado. Adaptando este método à realidade das instalações da CTE SOL, fizemos as seguintes considerações:

- montagem de uma tubulação de alívio para atmosfera demandaria recursos e um tempo de parada dos quais não dispúnhamos; e
- o trecho a ser limpo tem uma extensão pequena – aproximadamente 25 m.

Concluimos que não seriam usadas montagens especiais para canalizar os resultados dos sopros de limpeza para atmosfera; que o vapor gerado no processo seria a fonte para realização dos sopros, mas sem interferência com a produção de coque e energia e que dever- se- ia manter a estabilidade do TG em operação e de todo o conjunto de oito caldeiras durante o procedimento de *flushing*.

A análise dos desenhos P&I e levantamentos de campo mostraram que:

- realização dos sopros seria possível apenas com parada de um dos turbo geradores; seria usada a linha de uma unidade, funcionando, como fonte de vapor;
- delta de pressão: até 100 bar;
- expurgo dos resíduos: via válvula by-pass para condensador da unidade parada; e
- verificação dos resultados da limpeza seria indireta, através de inspeção visual da sede das válvulas *by-pass* (comprovando que nenhum resíduo de grande porte, a ponto de marcar a sede, estava presente no trecho); análise da qualidade da água do condensador da unidade parada (verificação de presença de cloreto, que seria uma consequência de eventual dano causado à parede do condensador por partículas que estivessem presentes no trecho).

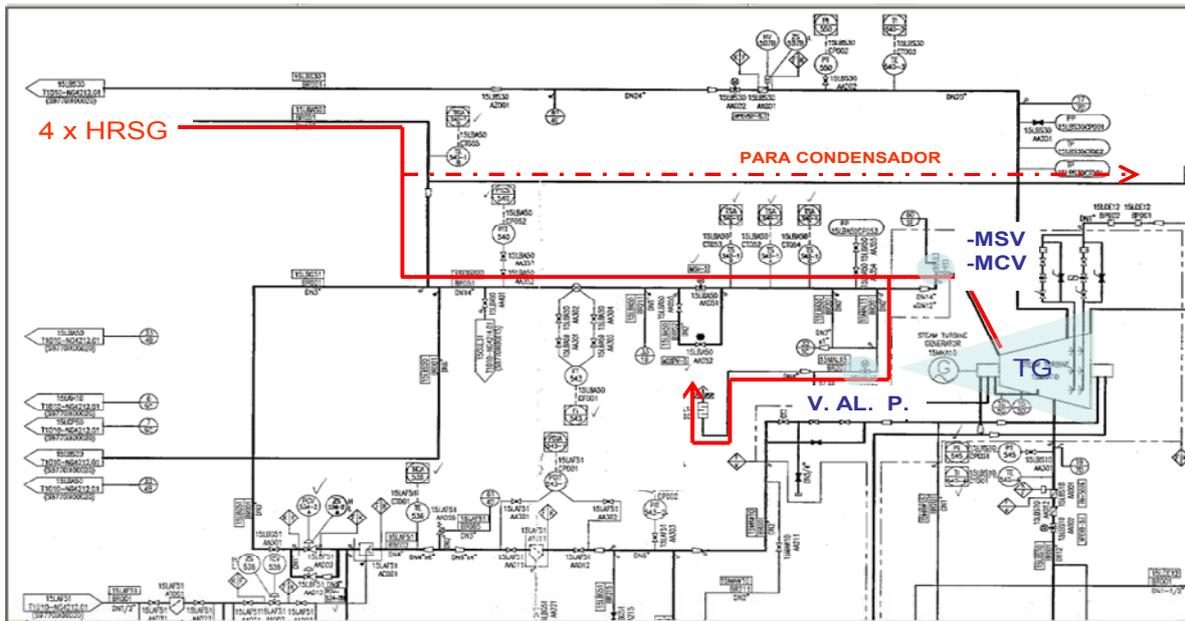


Figura 3 – Detalhe de P&I do circuito de vapor do TG.

Na Figura 3 está a linha principal de vapor para o TG, a derivação para condensador e trecho de alívio para a atmosfera, usado nos procedimentos de aquecimento da linha durante partida. Nas Figuras 4, 5 e 6 a sequência planejada.

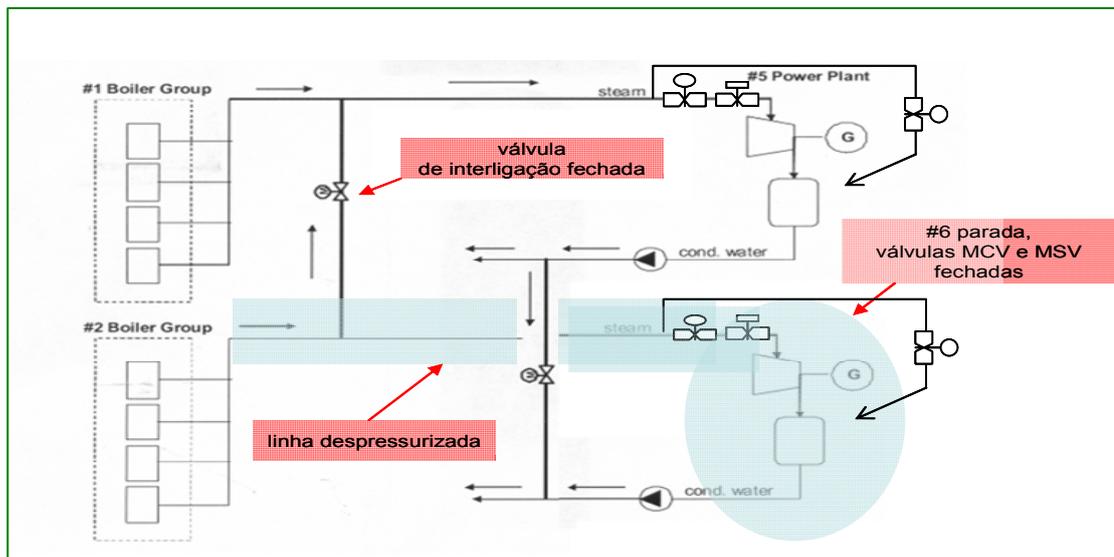


Figura 4: parada da #6 e despressurização da sua linha de vapor principal,

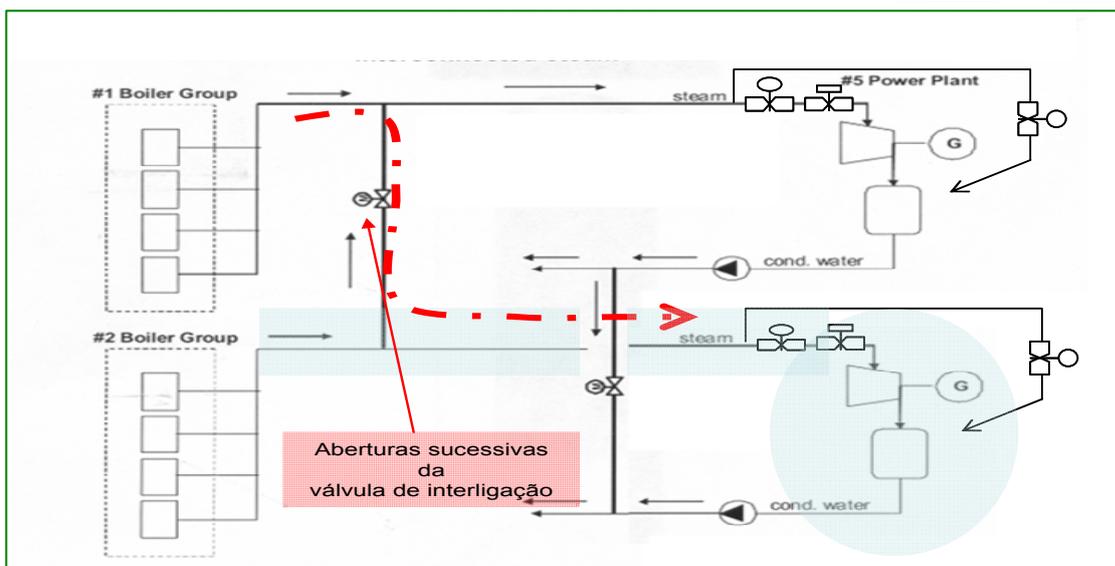


Figura 5: sucessivas aberturas rápidas da válvula de interligação, seguidas de fechamento e recuperação da pressão no circuito #5 e alívio da pressão pela válvula V.AL.P.

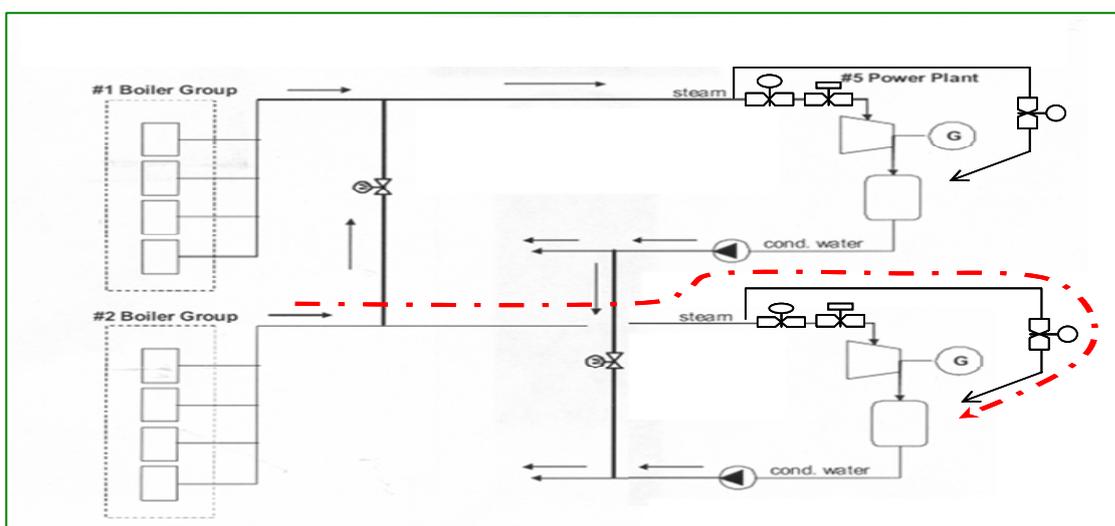


Figura 6: partida da #6 e arraste definitivo dos elementos do flushing para Condensador #6.

2.2 Determinação das Condições de Contorno para Segurança Operacional da Operação Cruzada

Para uma operação segura, os equipamentos da Central Termelétrica devem estar submetidos a um sistema de proteção contra parâmetros anormais. Um exemplo do conjunto das premissas que fazem com que atue o sistema de proteção pode ser visto na Figura 7.

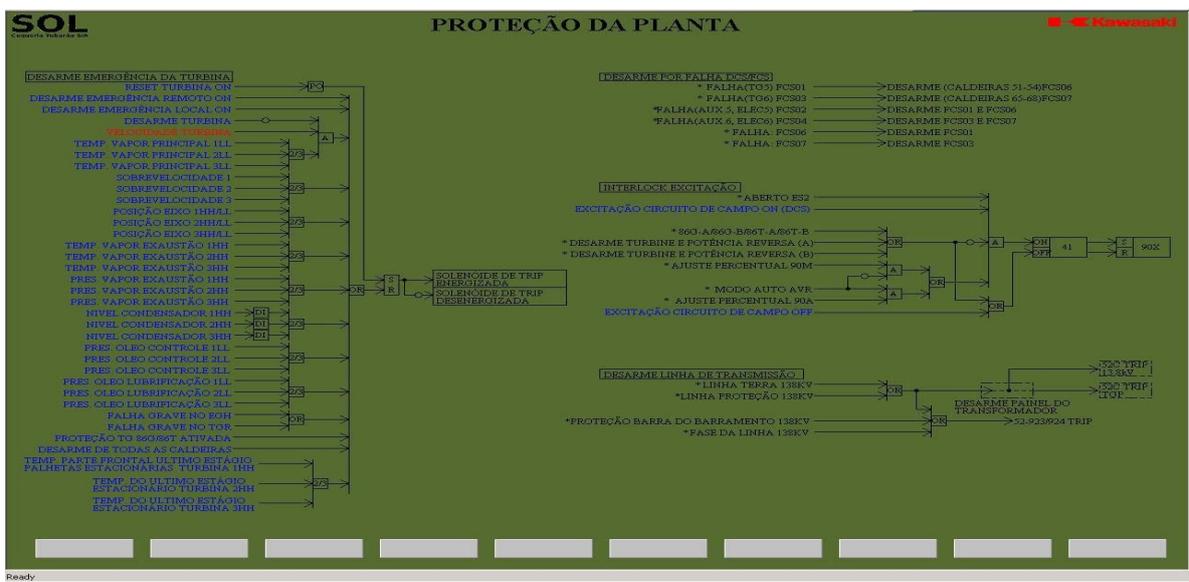


Figura 7 – Exemplo de diagrama lógico de proteção dos TGs.

Como premissa básica para a operação cruzada, mantivemos o mesmo nível de segurança existente para a operação separada. Analisando as lógicas de proteção acima, configuramos os intertravamentos de segurança para a operação cruzada; essas proteções referem-se a perda de vácuo, aumento do nível do tubulão e desarme total das caldeiras, como mostrado abaixo:

Tabela 2: Condições de segurança a serem implantadas para a operação cruzada

Descrição	Oper. Normal	Oper. cruzada	obs.
Trip por perda de vácuo	trip turbina e caldeira	refletir o trip para as caldeiras opostas	todas caldeiras desarmam por intertravamento
Trip por nível tubulão (qq caldeira)	desarmam as caldeiras por nível alto de qq caldeira	refletir o trip para a turbina oposta	turbina desarma por nível alto de qualquer caldeira
Desarme de todas as caldeiras	trip turbina	refletir o trip para a turbina oposta	-

2.3 Procedimentos de Transição, sob Carga, da Operação Separada para a Operação Cruzada

O objetivo do procedimento a ser desenvolvido seria fazer a transição sem necessidade de desligamento dos dois TGs e manter estável, durante as manobras de interligação, o TG que permaneceria em operação cruzada bem como as oito caldeiras. Isso se traduz em manter níveis dos tubulões das caldeiras, dos vasos do sistema TG (condensador, desaerador, etc.) e pressão do sistema TG + oito caldeiras na faixa de trabalho, 90 bar a 100 bar. São quatro estágios para efetivar o cruzamento:

- *estágio inicial:* operação separada (padrão), momento de preparativos de comunicação com a Coqueria, inspeções nas válvulas de interligação, verificação prévia dos procedimentos, equipamentos, sistemas envolvidos na manobra;
- *estágio de transição:* abertura gradual das interligações de água e vapor até o ponto em que os dois sistemas estejam operando em paralelo;

- *estágio de transferência de carga*: vapor de uma das unidades é desviado para a outra, gradualmente; para isso restringe-se geração de uma unidade e a outra passa a receber, naturalmente através da interligação feita na etapa anterior, o vapor correspondente à restrição. Aqui as válvulas de *by-pass* da unidade a parar ficam travadas em modo manual, fechadas, impedindo que o vapor restringido na entrada da turbina fosse canalizado para condensador; e
- *estágio operação cruzada*: após restrição completa da entrada da uma das turbinas, esta é desligada, sua válvula permanece fechada, a unidade passa a pelos procedimentos de desligamento; deste ponto em diante apenas uma máquina fica em operação, recebendo todo o vapor de todas as caldeiras.

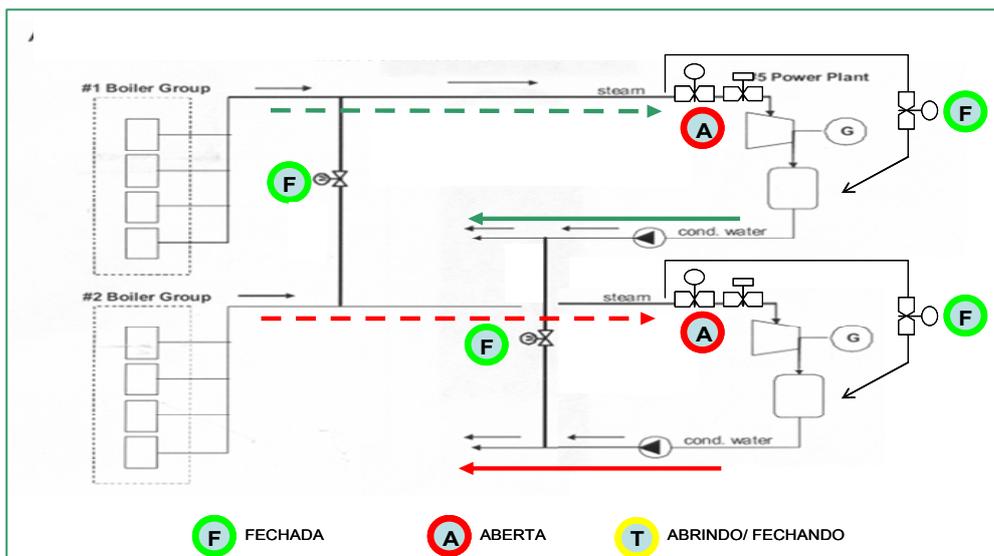


Figura 8 – Estágio inicial: operação separada.

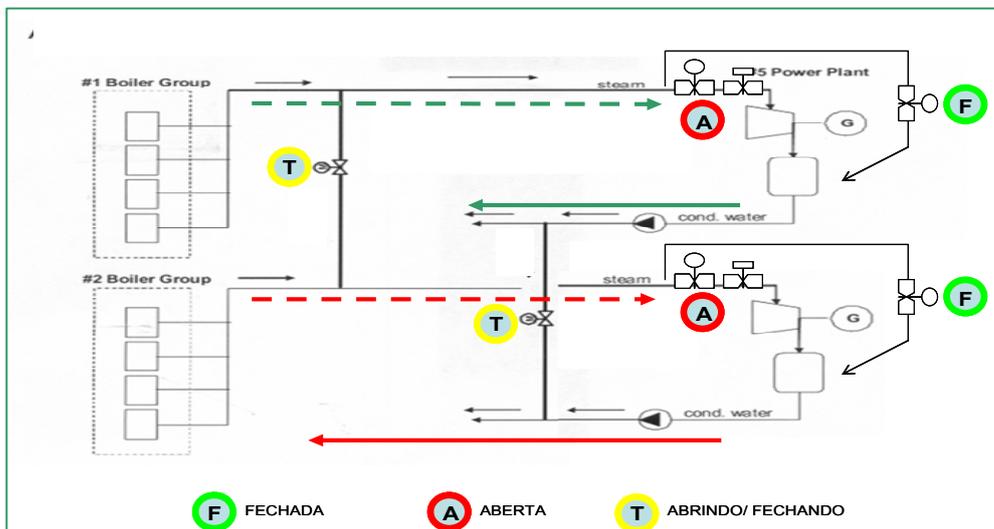


Figura 9 – Estágio de transição.

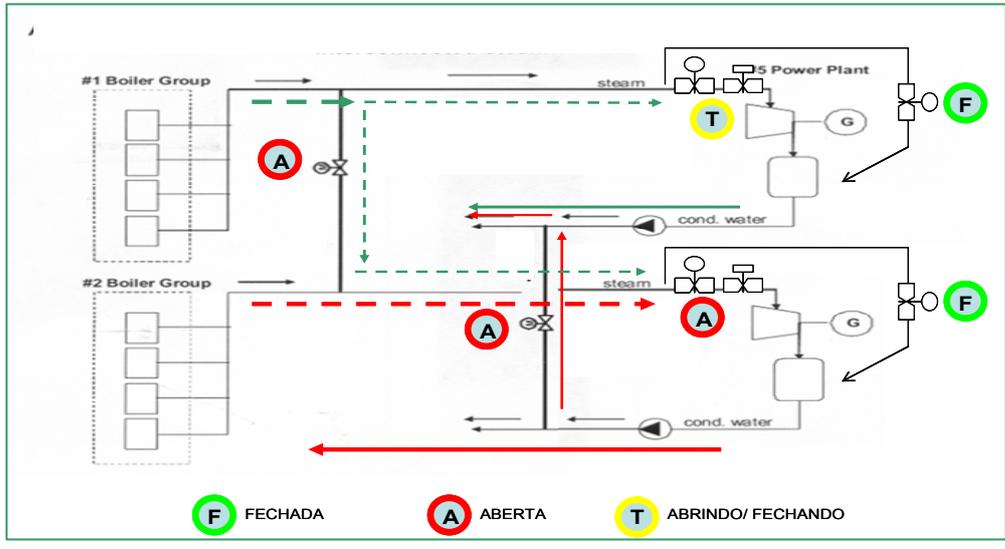


Figura 10 – Estágio de transferência de carga.

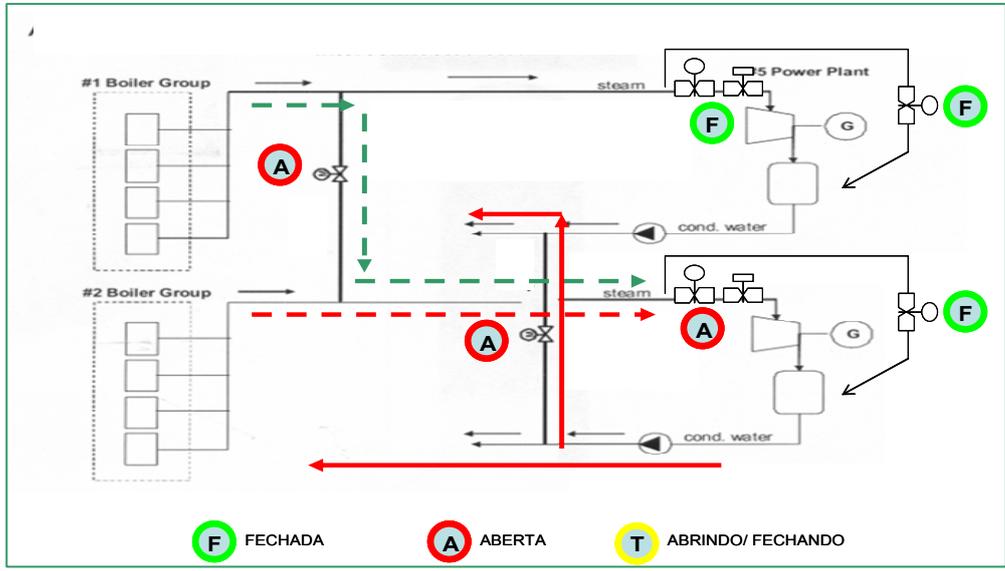


Figura 11 – Operação cruzada.

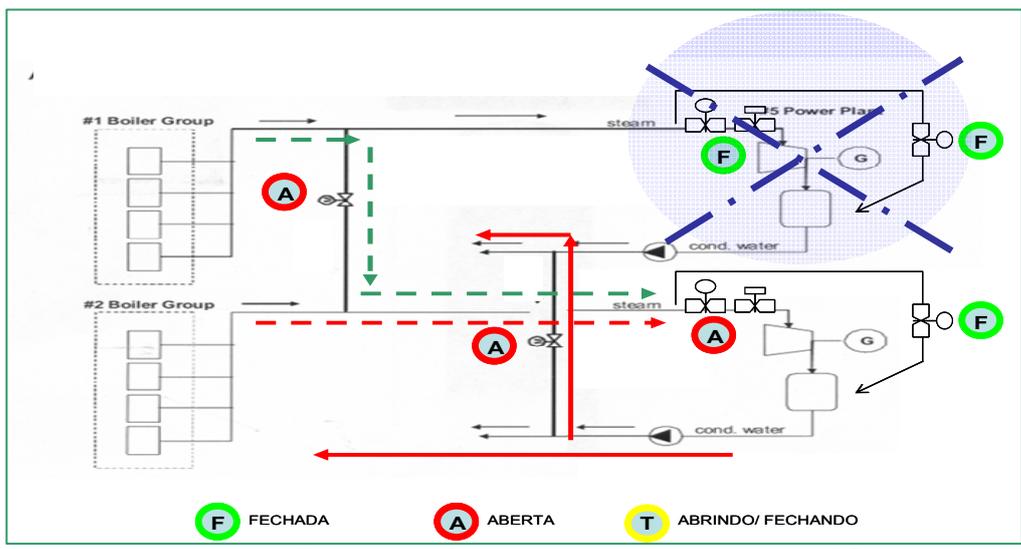


Figura 12 – Operação cruzada, parada de 1 TG.



3 RESULTADOS

3.1 Aplicação dos Procedimentos de Limpeza e Resultados

O procedimento de limpeza da interligação de vapor mostrado na seção 2.1 foi aplicado com os resultados mostrados na Figura 13.

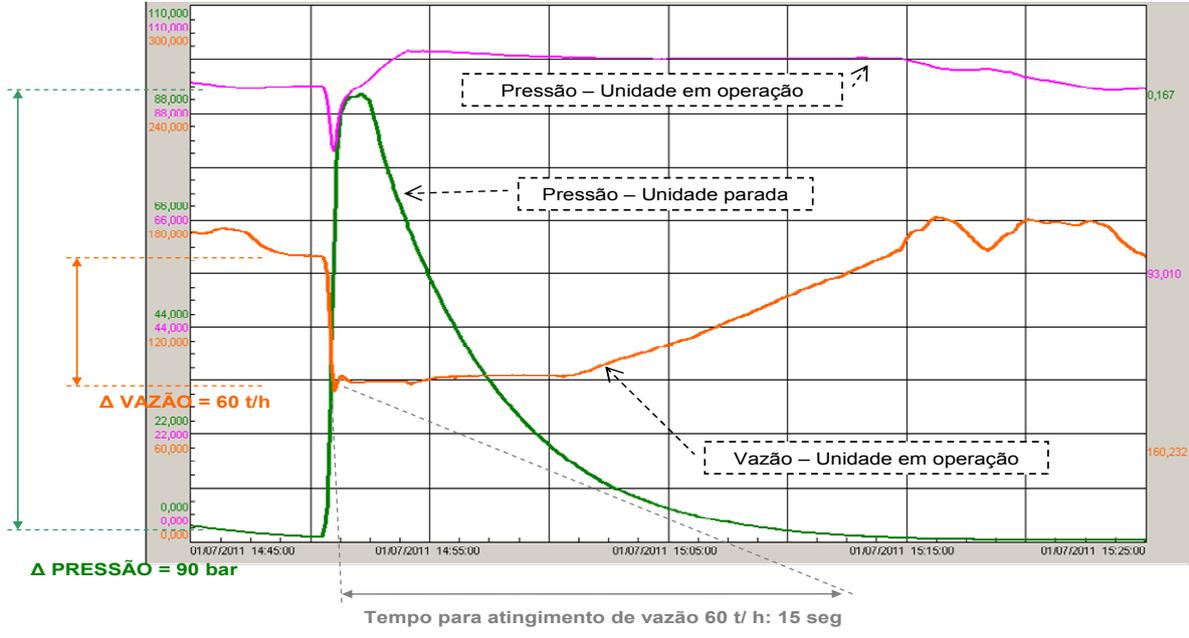


Figura 13 – Procedimento típico de *flushing*.

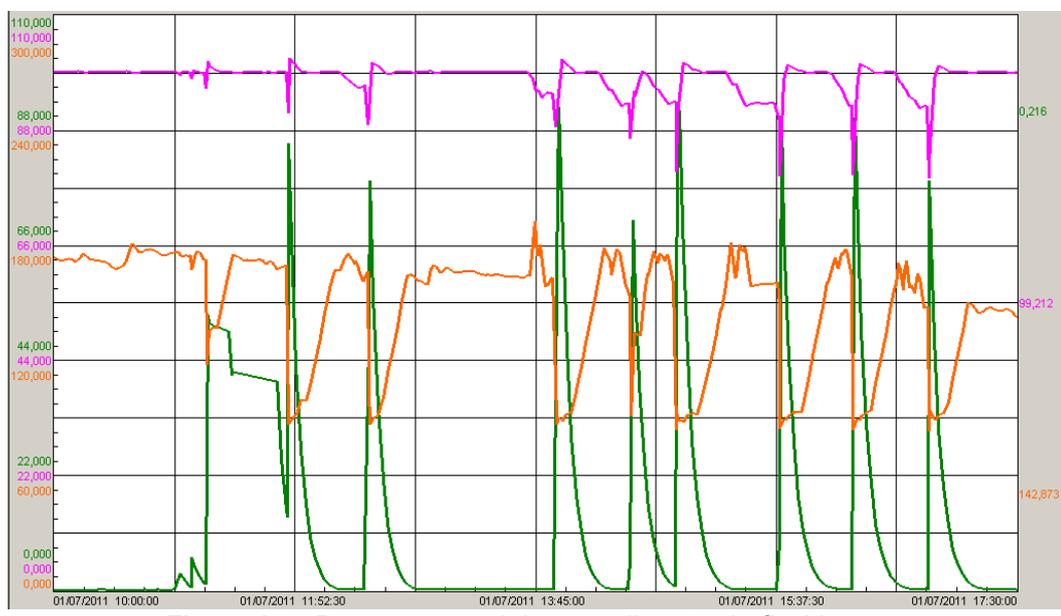


Figura 14 – Panorama geral do procedimento de *flushing*.

O sopro foi feito através da abertura rápida da válvulas de interligação, criando uma diferença de pressão de 90 bar que impôs ao trecho uma vazão instantânea de 60 t/h; este procedimento foi repetido 8 vezes, como mostrado na Figura 14. Como planejado, a válvula de interligação foi fechada 5 segundos após abertura, evitando queda muito acentuada da pressão da unidade em operação.



Por fim foi feita a partida padrão da #6, na qual o vapor das caldeiras #6 foi direcionado pelas válvulas “by-pass” para o condensador, a uma taxa de 150 t/h por 1 hora (Figura 15); desta forma eventuais materiais depositado na tubulação de vapor de alta da #6 na etapa anterior de sopros foram carregados para o condensador.

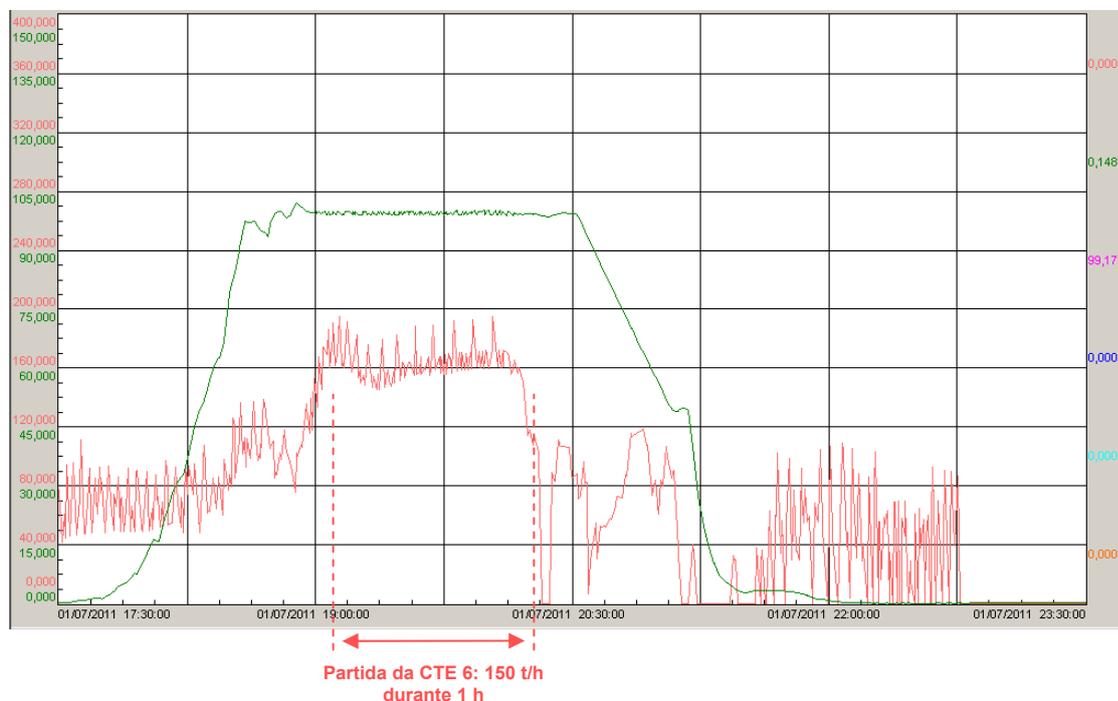


Figura 15 – Etapa final do procedimento de *flushing*.

Para verificação de possíveis danos ao condensador fez-se análise de cloreto da água do condensador, comparada com resultados aleatórios de antes da sopragem.

Tabela 3 – Amostras de água do condensador #6 após procedimento de limpeza

Data da amostra	Cloretos (mg/L)	Condutividade específica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
30/06/2011(antes)	0,18	6,14
01/07/2011 (depois)	< 0,10	1,61



3.2 Implantação dos Intertravamentos de Segurança

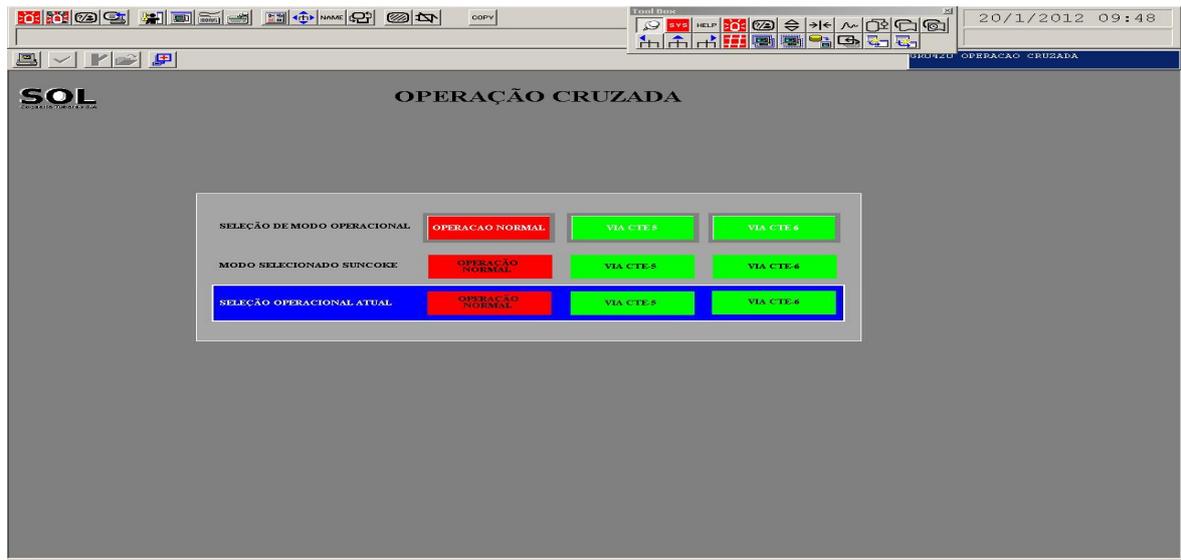


Figura 16 - Implantação dos intertravamentos de segurança no sistema de controla das plantas.

Como mostrado em 2.2, foi desenvolvida a tela operacional mostrada na Figura 16; esta interface fica disponível aos operadores para fazerem a ativação da proteção, quando se entra no modo de operação cruzada. O sistema de controle apenas ativa a proteção para a operação cruzada quando cada uma das equipes operacionais (da termelétrica – TGs e da Coqueria – HRSGs) faz a ativação do “modo operação cruzada” na tela acima.

3.3 Resultados das Manobras de Transição da Operação Separada para Operação Cruzada

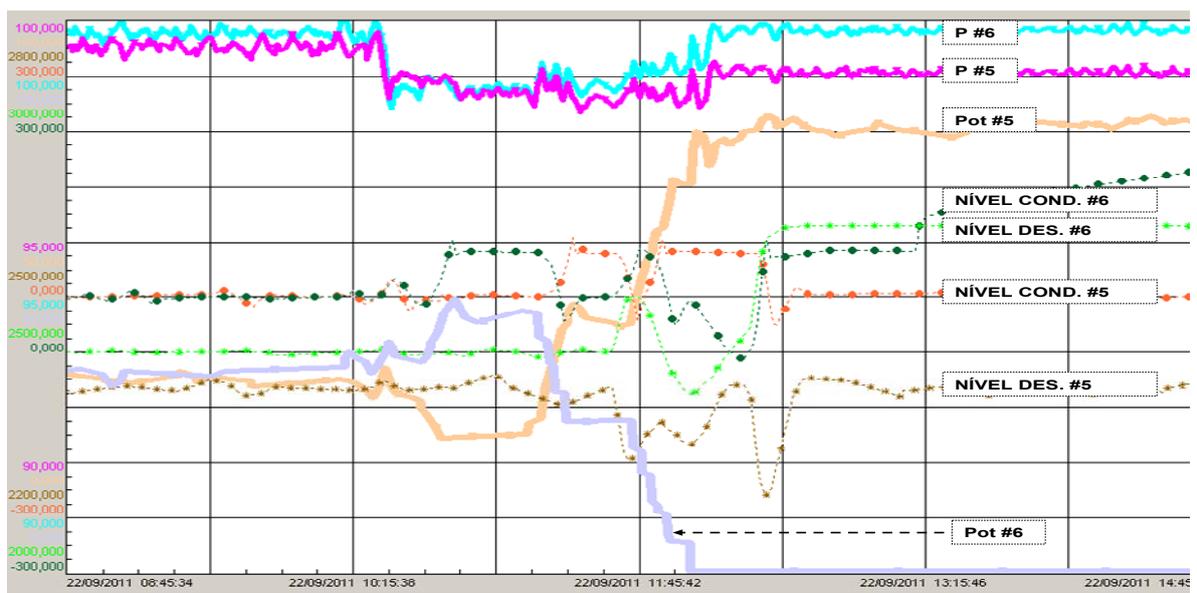


Figura 17 – Transição de carga de um TG para outro, e níveis e pressões estáveis

A aplicação das manobras planejadas está sintetizada na Figura 17; aí estão as principais variáveis envolvidas nos processos; o objetivo das manobras para levar à



operação cruzada era fazê-lo sem distúrbios para os processos em operação, tanto o TG que continuaria em operação quanto as oito caldeiras; variáveis acompanhadas:

- Pressão do vapor da Linha 5 e Linha 6;
- Nível dos condensadores 5 e 6; e
- Nível dos desaeradores 5 e 6.

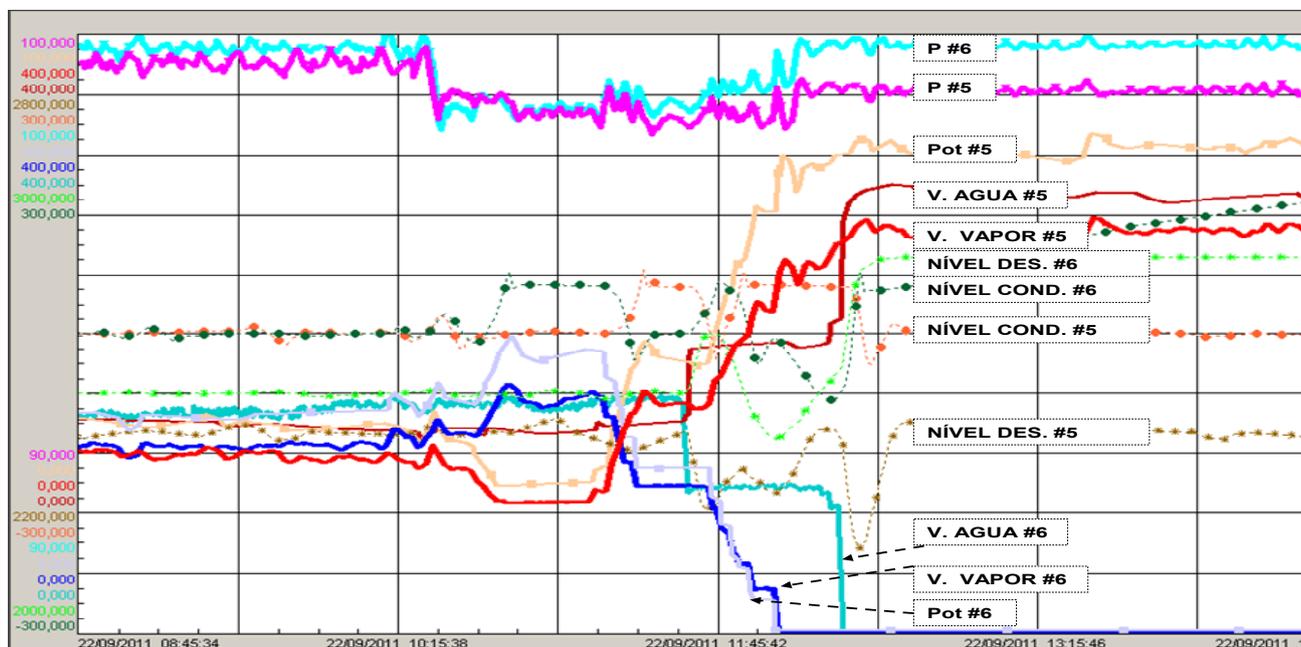


Figura 18 - Visão completa de todos os parâmetros de interesse.

4 DISCUSSÃO

4.1 Procedimento de Limpeza

Foi bem sucedido, tendo sido usada a própria instalação física existente. O trecho de tubulação que foi limpo, com aproximadamente 25 m de extensão, é expressivamente menor e menos complexo que os trechos objeto de limpezas anteriores, tanto das CTEs 1 e 2 quanto CTEs 5 e 6. A aplicação de variações de pressão da ordem de 90 bar, associada a fluxos instantâneos de 60 t/h se mostraram eficazes para realizar a limpeza; os resultados dos testes de concentração de cloreto e a própria inspeção visual da sede da válvula by-pass, onde não foi encontrado nenhum indício de marcação, garantem essa conclusão.

4.2 Adequação dos Intertravamentos de Segurança

O desenvolvimento da tela de interface para a transição entre operação separada e operação cruzada foi fundamental para que a segurança da planta fosse mantida, sem que para isso fosse necessária uma intervenção de grandes proporções das equipes de instrumentação e automação das plantas a cada vez que se fosse estabelecer a configuração cruzada ou quando se fosse sair dela; com a comutação *on-line* entre proteções para configuração normal e padrão, e vice-versa, a proteção da planta mantém-se disponível em tempo integral.



4.3 Procedimentos de Transição para a Operação Cruzada

Foi aplicado um procedimento de transição gradual de transferência de carga, utilizando-se as facilidades disponíveis na planta, referentes ao controles automáticos de pressão e de potência. A meta de evitar oscilações de pressão no circuito de alta pressão das caldeiras foi plenamente atendida, bem como a manutenção da estabilidade dos níveis dos equipamentos do TG que permaneceu em operação.

5 CONCLUSÃO

Aplicamos o procedimento de transição para operação cruzada no dia 22 Setembro 2011, mantendo a unidade 6 parada, em regime de conservação e em *stand-by* por um período de 2 meses. Em 22 de Novembro foi feita sua partida, para teste; permaneceu em operação por 3 dias e voltou a entrar em conservação.

O motivo para a parada da unidade 6 foi a baixa carga de vapor que passou a ser gerada pela SOL Coqueria, que a partir de Agosto 2011 entrou em redução de carga para adequação ao ritmo de produção de aço. A carga de vapor entregue chegou a 115 t/h por unidade, e o atingimento de 75 t/h significaria a necessidade de parada do TG por limite técnico.

A retomada da produção de coque no final de Dezembro 2011 possibilitou a partida da unidade 6 novamente em 12 de Janeiro de 2012.

Portanto foram duas manobras de cruzamento de vapor e parada de unidade e duas manobras de separação de vapor e partida de unidade, feitas de forma bem sucedida e controlada, sem interferência com a produção de coque, interferência mínima para a produção de energia, e com manutenção da integridade dos equipamentos.

Do ponto de vista econômico, apenas no último trimestre de 2011 o ganho obtido com a melhora da eficiência do TG, que passou a operar em um ponto mais favorável da sua curva de carga, foi da ordem de 1 %, equivalente a US\$ 183 mil com a energia gerada a mais com o mesmo vapor entregue pela Coqueria; o ganho obtido pela redução do consumo de auxiliares da planta, de 3 MW, foi de US\$ 527 mil. Ganhos obtidos sem nenhum investimento.

O *know-how* desenvolvido internamente para essas manobras, aperfeiçoado através do uso, foi motivo de aumento de conhecimento e incentivo à melhoria contínua dos processos da área de Energia e Utilidades da Arcelormittal Tubarão.

Agradecimentos

Queremos agradecer aos funcionários e supervisores das equipes operacionais e de manutenção, que implantaram na prática o projeto e sem os quais ele não teria sido realizado.

Agradecemos também ao corpo gerencial da Gerência de Produção de Energia da ArcelorMittal Tubarão, cujo incentivo e especial atenção aos detalhes da concepção e da implantação do projeto contribuíram para sua realização.