



## AÇÕES DE MELHORIA DE EFICIÊNCIA DA ASU FORTAL<sup>1</sup>

Alexandre Pereira Torres<sup>2</sup>  
Jailson José Reis de Queiroz<sup>3</sup>  
Eduardo Alexandre Almeida<sup>4</sup>  
Marcelo Estevo<sup>5</sup>

### Resumo

O trabalho técnico descreve dois aspectos do programa de gestão da energia da ASU FortAL que envolvem ações de controle e manutenção da eficiência de trocadores de calor e ações de gestão do uso da energia elétrica na ASU como: i) Controle e manutenção da eficiência do trocador de calor E07 do sistema de pré-resfriamento descrevendo as ações do programa de manutenção da eficiência e seus impactos na eficiência energética e redução do custo operacional; e ii) ações relativas à gestão do uso da energia elétrica para redução da demanda e do consumo de energia elétrica no horário de ponta, envolvendo renegociação de contrato, ações de controle operacional e ações e procedimentos adotados para a contenção de desvios.

**Palavras-chave:** Eficiência; Trocador de calor; Gestão de energia; Horário de ponta.

### ACTIONS OF IMPROVEMENT OF EFFICIENCY OF ASU FORTAL

### Abstract

This paper describes two aspects of energy management program of FortAL ASU involving actions to control and maintain the efficiency of heat exchangers and management actions to use electricity at ASU as: i) control and maintain the efficiency of the heat exchanger E07 which belong to the pre-cooling system of ASU, describing all actions taken through the maintenance program of the efficiency of heat exchanger with has impacted on energy efficiency and lower operating costs; ii) actions for the management of electric power use to reduce demand and consumption of electric power at peak hours, involving renegotiation of the contract, operating actions and operating procedures to contain deviations.

**Keywords:** Efficiency; Heat exchanger; Energy management; Peak time.

<sup>1</sup> *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.*

<sup>2</sup> *Engenheiro Civil. Coordenador de Fábrica – Usina Fortaleza de Minas – Air Liquide Brasil Ltda.*

<sup>3</sup> *Tecnólogo em Mecatrônica. Técnico de Manutenção e Operação – Usina Fortaleza de Minas – Air Liquide Brasil Ltda.*

<sup>4</sup> *Tecnólogo Gestão Produção Industrial. Técnico de Manutenção e Operação – Usina Fortaleza de Minas – Air Liquide Brasil*

<sup>5</sup> *Técnico em Informática. Técnico de Manutenção e Operação – Usina Fortaleza de Minas – Air Liquide Brasil Ltda.*



## 1 AUMENTO DA CAMPANHA DE OPERAÇÃO DO TROCADOR DE CALOR E07

### 1.1 Introdução

O trocador de calor (E07) também denominado “pré-cooling” é do tipo casco e tubo o qual tem por objetivo reduzir a temperatura da corrente de ar proveniente do compressor de ar (C01) de 47°C para 14°C a mesma pressão. Este processo de redução da temperatura proporciona condições físicas para que a maior parcela de vapor de água “umidade” presente nesta corrente seja eliminada na forma líquida como condensado. A corrente de ar que sai do trocador segue para a peneira molecular (FEP) onde a parcela restante de vapor de água é retida pelo leito de alumina ativada.

A corrente de ar é refrigerada por uma corrente de água em contra fluxo em único passe no trocador. Neste trocador, a água circula pelo lado do casco e a corrente de ar pelo lado dos tubos.

A água que circula no trocador E07 faz parte do sistema denominado E60. Este sistema é composto por uma torre de refrigeração (E60) com bacia de 4 m<sup>3</sup>, uma bomba de circulação (P60) e um grupo frigorífico (X60). A Figura 1 mostra um esquema simplificado do sistema E60.

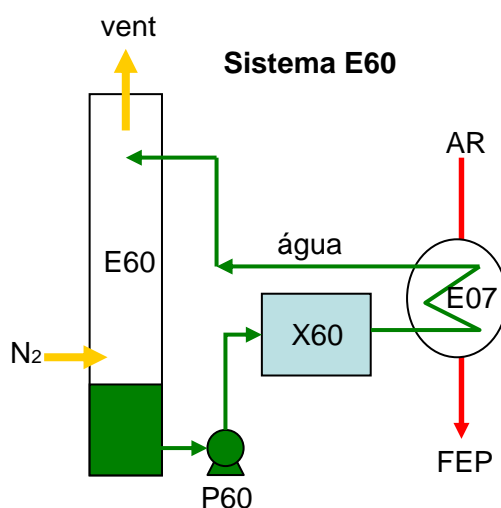
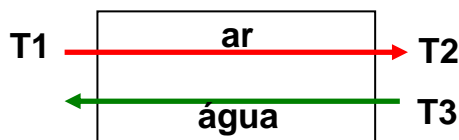


Figura 1: Esquema simplificado do Sistema E60.

A água que sai do trocador E07, é enviada para a parte superior da torre Chiller Tower (E60) e por gravidade, desce para a bacia da torre trocando calor com uma corrente de nitrogênio ascendente. A bomba P60 envia esta água para o trocador E07 passando antes pelo grupo frigorífico X60 que refrigera a água para aproximadamente 7°C.

A eficiência global deste trocador é medida pela relação entre as temperaturas de projeto e de trabalho da corrente de ar e da água conforme mostrado na Figura 2.

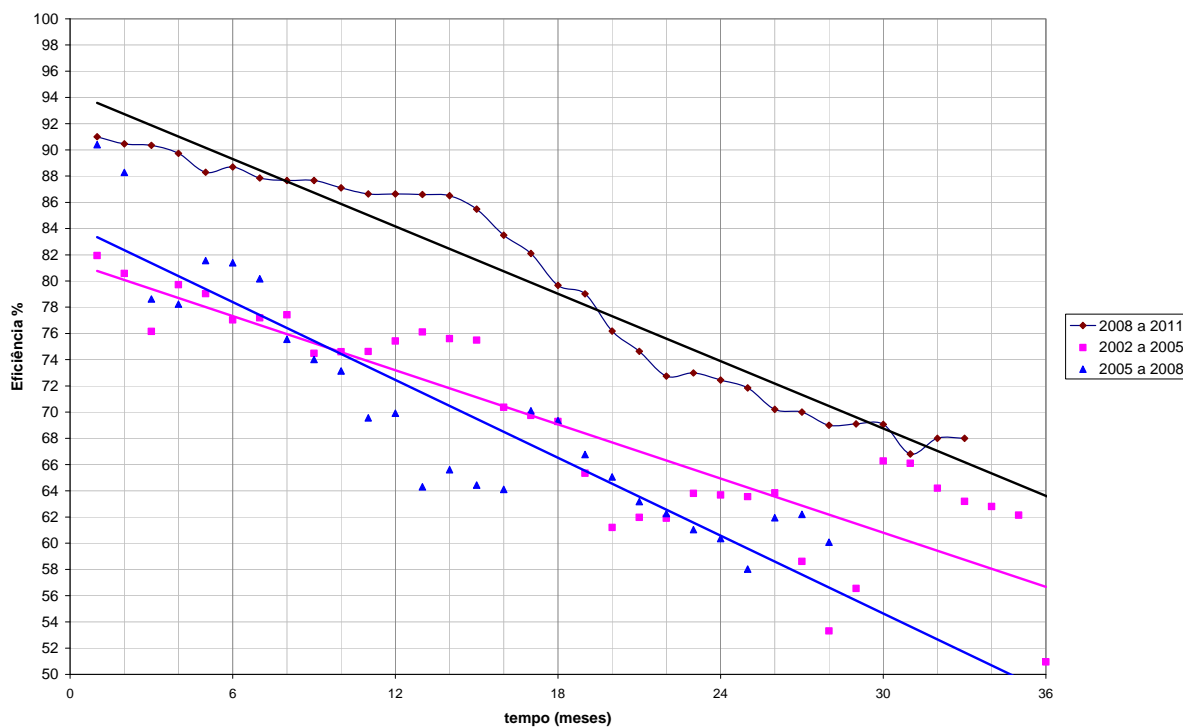


$$N = \frac{T1 - T2}{T1 - T3} \times 100$$

**Figura 2:** Fórmula para verificação da eficiência global do trocador E07 (Eficácia do trocador).

Esta eficiência é acompanhada mensalmente através de planilha eletrônica a qual através de recursos gráficos tem-se uma visão geral da tendência de mudança desta eficiência no tempo. O gráfico da Figura 3 mostra a eficiência do global do trocador nas três últimas campanhas ocorridas entre 2002 e 2011.

**Histórico de Eficiência E07**



**Figura 3:** Eficiência do trocador E07.

As fotos mostradas nas Figuras 4 a 6 mostram a impregnação de lama no trocador no final de cada campanha nos anos de 2005, 2008 e 2011 respectivamente.



**Figura 4:** Impregnação de lama e sais nos tubos do trocador em 2005.



**Figura 5:** Impregnação de lama e sais nos tubos do trocador em 2008.



**Figura 6:** Impregnação de lama e sais nos tubos do trocador em 2011.

## 1.2 Material e Métodos

Conforme mostrado na gráfico da Figura 3 num período de 36 meses o trocador tem uma queda de eficiência. Esta queda é causada por vários fatores. Entre as principais temos: Qualidade e velocidade da água de refrigeração. A qualidade da água é garantida pelo tratamento químico realizado por uma tratadora contratada pela Air Liquide. A velocidade da água que circula no casco do trocador é limitada pela forma construtiva. No trocador E07, esta velocidade é muito baixa ( $< 0,3$  m/s) abaixo dos valores recomendados pela literatura e neste caso não tínhamos muito que fazer.



O tratamento químico da água era realizado pela tratadora aqui denominada como “Tratadora A” desde o 1999. O tratamento químico foi dimensionado com base nas características da água de reposição *make up* fornecida pelo cliente. Esta água de *make up* era do tipo água bruta, ou seja, de baixa qualidade o qual continha como principal contaminante Dureza- Ca conforme mostrado na Figura 7.

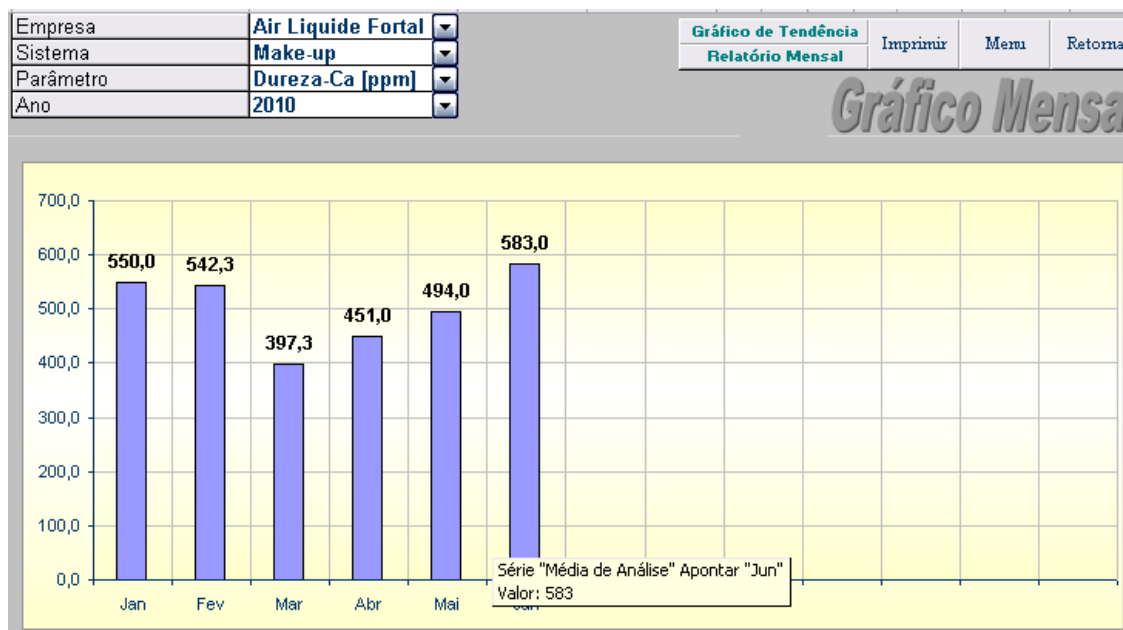


Figura 7: Dureza-Ca presente na água de bruta em 2010.

Baseado nesta qualidade a tratadora adotou um tratamento com ciclo de concentração de 4 e com dosagens de dispersantes para evitar a formação de cristais no sistema. O acompanhamento do tratamento químico era realizado semanalmente por um técnico da tratadora. Com o ciclo adotado, o consumo de água de reposição do sistema ficou em média 20 m<sup>3</sup>/dia.

Com o tratamento adotado, a campanha do trocador durava em média 36 meses e finalizava quando a eficiência era menor que 60%. Abaixo deste valor, a operação da peneira molecular (FEP) e a produção ficavam comprometidas.

A partir de 2010, iniciou-se um trabalho para estender a campanha do trocador de forma a diminuir o custo de manutenção com a limpeza mecânica que ocorria a cada 3 anos. Uma das propostas foi substituir a água bruta por uma água de boa qualidade e neste caso a utilização de um *blend* composto de água de condensado do próprio trocador E07 e água potável. Ao mesmo tempo foi substituída a tratadora de água.

O modelo de tratamento adotado pela nova tratadora, foi idêntico ao tratamento anterior com a utilização de água bruta, porém iniciou-se também um acompanhamento da qualidade da água do *blend*. Um estudo com consultoria da tratadora aprovou o uso deste *blend* em substituição da água bruta.

Um levantamento interno revelou que o volume de água de condensado gerado no trocador E07 era de 0,3 m<sup>3</sup>/h em média variando entre os meses secos (inverno) e os meses úmidos (verão). Este volume correspondia aproximadamente 30% do volume total de reposição do sistema.

De outubro de 2010 a janeiro de 2011 um projeto piloto com a adição de água condensada e complemento com água potável no sistema E60 foi realizado. Após



este período de testes, foi instalado um sistema definitivo de coleta e bombeamento de água condensada do E07 conforme mostrado na Figura 8.

Em fevereiro de 2011 durante a parada geral de manutenção, foi realizada uma limpeza mecânica do trocador E07 conforme mostrado na Figura 9.



**Figura 8:** Captação definitiva de água condensada do trocador E07.



**Figura 9:** Limpeza externa dos tubos do trocador E07 em 2011.

## 1.3 Resultados

### 1.3.1 Redução de consumo de água industrial

O primeiro resultado obtido com a mudança da água de reposição foi a redução imediata do consumo de água industrial em 62% conforme mostrado na Tabela 1.

A água de uso industrial após o projeto, ficou exclusivo para a utilização de reposição do reservatório de incêndio, descongelamento de flexíveis de enchimento de produto e limpeza da área.


**Tabela 1: Comparativo de consumo de água industrial 2010 e 2011**

Mês	Consumo diário de água industrial em 2010 (m³/dia)	Consumo diário de água industrial em 2011 (m³/dia)	Redução em %
JAN	20,70	5,84	72%
FEV	20,00	9,64	52%
MAR	22,00	13,61	38%
ABR	21,00	6,73	68%
MAI	20,32	5,35	74%
JUN	21,00	5,03	76%
JUL	19,35	12,84	34%
AGO	20,65	6,10	70%
SET	25,95	6,07	77%
OUT	28,65	11,06	61%
		<b>MÉDIA</b>	<b>62%</b>

### 1.3.2 Melhora na eficiência no trocador E07

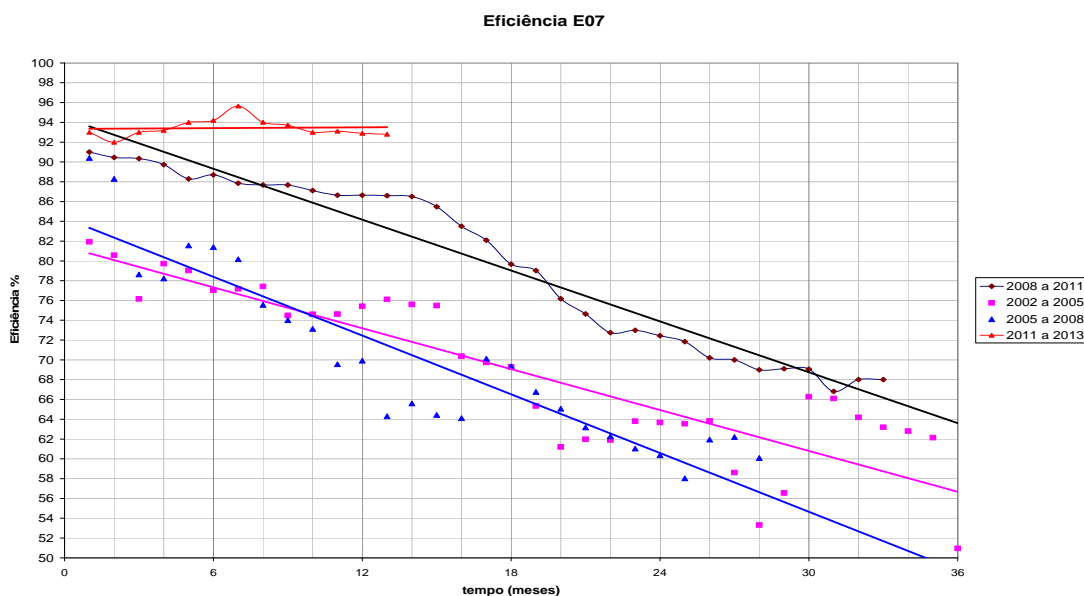
O segundo resultado obtido foi a manutenção estável ao longo dos últimos 12 meses da eficiência do trocador E07.

### 1.4 Conclusão

Comparando a campanha atual do trocador com as campanhas anteriores conforme o demonstrado na Figura 10, verifica-se que houve uma estabilização na eficiência do trocador (linha de tendência vermelha) o qual supõem-se que o objetivo de se estender a campanha do trocador para pelo menos 48 meses será alcançada.

O investimento para este projeto foi muito baixo resumindo-se no novo sistema de captação e bombeamento de água de condensado do trocador E07 e construção da rede de água potável para complemento.

Esta manutenção da eficiência do trocador E07 trouxe melhoria da eficiência energética e aumento da disponibilidade da ASU além de permitir a redução de consumo e demanda de energia elétrica no horário de ponta conforme exposto no item 2.

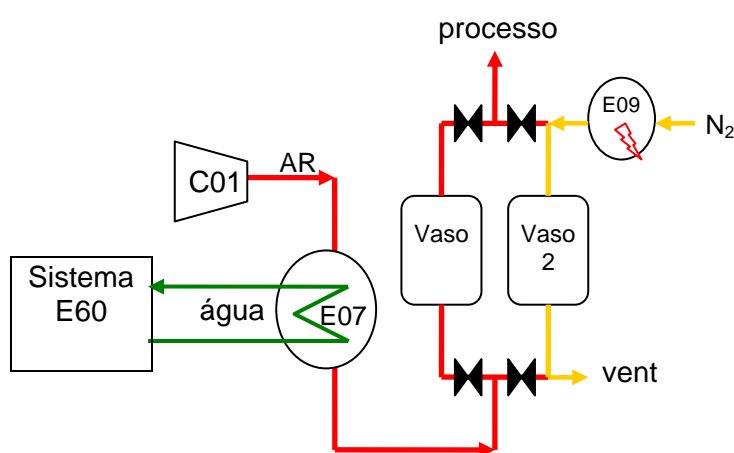

**Figura 10: Comparativo da eficiência do trocador E07.**



## 2 REDUÇÃO DE CONSUMO E DEMANDA CONTRATADA DE ENERGIA ELÉTRICA NO HORÁRIO RESERVADO DE PONTA

### 2.1 Introdução

A Unidade de Purificação do Ar (ou FEP para sigla em Inglês de Front End Purifier), tem como objetivo a retenção de contaminantes presentes na corrente de ar vinda do compressor de ar (C01) antes de entrar no processo criogênico. Os principais contaminantes retidos pela FEP são: vapor de água e Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>). Estes contaminantes são retidos por um leito de alumina ativada e por um leito de peneira molecular (molecular sieves) respectivamente. A Figura 11 mostra um fluxograma simplificado do processo.



**Figura 11:** Esquema simplificado da Peneira Molecular.

A retenção dos contaminantes nos leitos do vaso ocorre gradativamente em função do tempo. Este tempo na unidade de Fortal varia de 180 a 240 minutos de operação do vaso que chamamos de ciclo total ou “CYCLE” e depende da massa e da temperatura do ar que entra no mesmo.

A temperatura do ar é muito importante, pois como o ar úmido na entrada da FEP é saturado, quanto maior é sua temperatura, maior a quantidade de vapor d’água contido no mesmo, e assim menor é o tempo de operação em adsorção de um vaso da FEP. Do mesmo modo, quanto menor a temperatura do ar, maior é o tempo de operação e vice-versa.

Para se alcançar a menor temperatura do ar, a eficiência do trocador de calor E07 deve ser a melhor possível. Na prática esta eficiência deve ser maior que 85% conforme definido no item 1.1 deste trabalho.

A regeneração do vaso após o período de operação em adsorção, para eliminação dos contaminantes retidos, é realizada utilizando uma massa de nitrogênio gasoso seco quente e a baixa pressão. Esta regeneração ocorre em duas etapas. A primeira etapa chamada de HEATING ocorre com a passagem de nitrogênio aquecido a 150°C pelo vaso por um tempo de 60 minutos. A segunda etapa chamada de COOLING ocorre pela passagem também de nitrogênio a temperatura ambiente por um tempo de 140 minutos.





Na etapa do *heating*, o nitrogênio é aquecido à 150°C pela resistência elétrica E09 que consome 550 kW de energia elétrica. Finalizada as etapas de *heating* e *cooling* o vaso é pressurizado e colocado em operação novamente e então inicia-se a regeneração do outro vaso, completando o ciclo de operação da FEP. O esquema de etapas de regeneração do vaso é demonstrado na Figura 12.

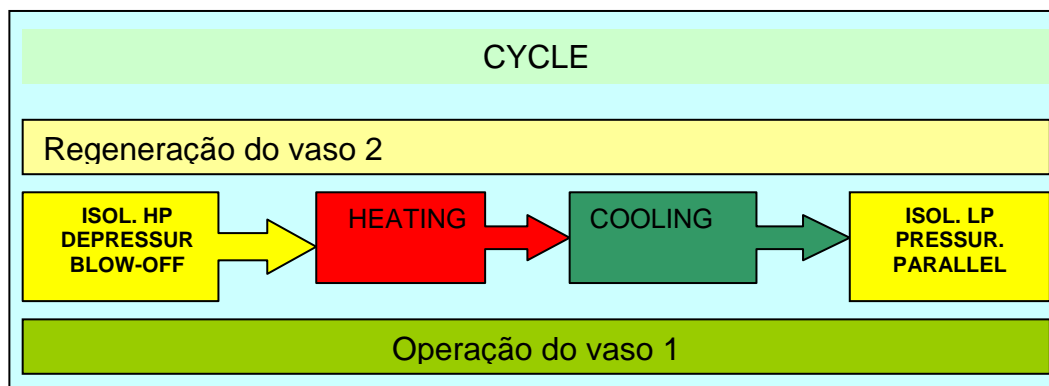


Figura 12: Esquema de regeneração da FEP.

O tempo de *heating* é fixado em 60 minutos e o tempo de *cooling* pode ser ajustado manualmente pelo operador conforme as condições do processo.

Com a manutenção da eficiência do trocador de calor E07 acima de 85% foi proposta a alteração do tempo *cooling* manualmente pelo operador de forma a adequar o tempo de *cycle* ao longo do dia para não permitir o ligamento da resistência elétrica E09 no horário de ponta.

## 2.2 Material e Métodos

Para adequação do tempo de operação do vaso ou *cycle* foi proposto a criação de uma tabela com horários pré-estabelecidos para início e final de cada etapa da regeneração a ser seguida pelo operador conforme Tabela 2.


**Tabela 2:** Horários de início e fim das etapas de regeneração do vaso

HORA TROCA VASO	FINAL ISOL HP / DEPRESS / BLOWOFF INICIO HEATING	FINAL HEATING INICIO COOLING	FINAL COOLING	FINAL ISOL LP/ PRES	FINAL PARALELO	FINAL REG	CYCLE TOTAL
INICIO	TEMPO	TEMPO	TEMPO	TEMPO	TEMPO	TEMPO	TEMPO TOTAL S/CO2
0	10	60	147	18	5	0	240
12:20	00:10	01:00	02:27	00:18	00:05	00:00	04:00
12:20	12:30	13:30	15:57	16:15	16:20	16:20	
16:20	16:30	17:30	19:57	20:15	20:20	20:20	
20:20	20:30	21:30	23:57	0:15	0:20	0:20	
00:20	0:30	1:30	3:57	4:15	4:20	4:20	
04:20	4:30	5:30	7:57	8:15	8:20	8:20	
08:20	8:30	9:30	11:57	12:15	12:20	12:20	
12:20	12:30	13:30	15:57	16:15	16:20	16:20	
16:20	16:30	17:30	19:57	20:15	20:20	20:20	
20:20	20:30	21:30	23:57	0:15	0:20	0:20	
00:20	0:30	1:30	3:57	4:15	4:20	4:20	
04:20	4:30	5:30	7:57	8:15	8:20	8:20	
08:20	8:30	9:30	11:57	12:15	12:20	12:20	
12:20	12:30	13:30	15:57	16:15	16:20	16:20	
16:20	16:30	17:30	19:57	20:15	20:20	20:20	
20:20	20:30	21:30	23:57	0:15	0:20	0:20	

Com os horários definidos, os operadores realizam manualmente o ajuste do tempo de *cooling* para adequação do horário de troca dos vasos conforme à tabela. Após 30 dias de operação seguindo a tabela de horários, foi solicitado ao Gerente de Eficiência Industrial, a redução de demanda contratada no Horário de Ponta (HP) em 500 kWh. A redução foi requerida junto a concessionária e teve início a partir de junho de 2011.

Para garantir que a demanda não ultrapassasse o novo valor contratado foi implantado um controle de redução de carga pelo Controlador de Demanda (CCK). O controlador foi programado para desligar automaticamente 1/3 da potência da resistência elétrica sempre às 17h30. A potência restante (2/3) é desligada automaticamente pelo CCK se a tendência de demanda atingir 3% acima da demanda contratada não permitindo assim a ultrapassagem que implicaria em multa contratual. A Figura 13 mostra o esquema de controle do CCK.

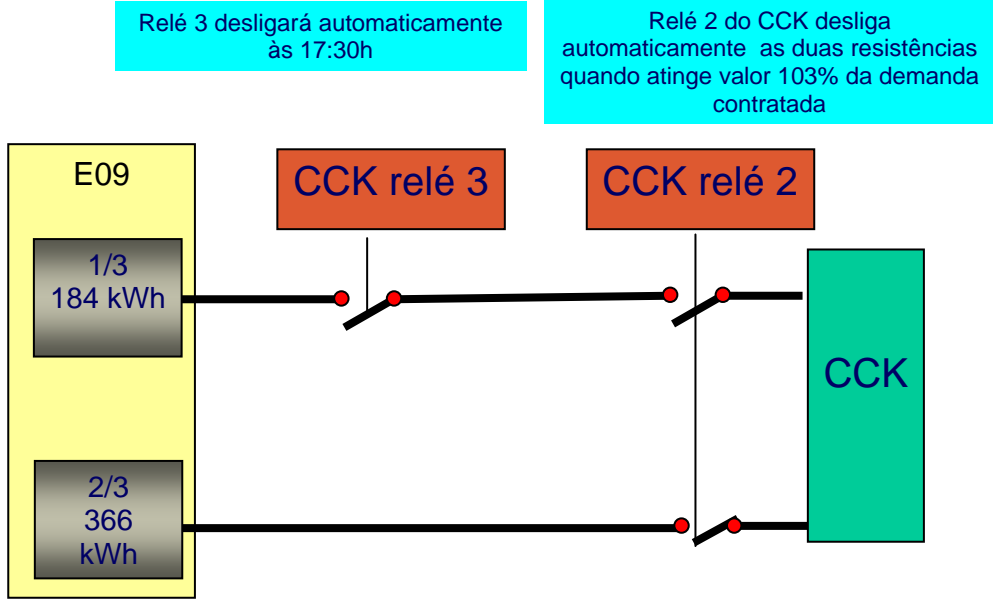


Figura 13: Esquema de controle do CCK.

A operação dos vasos seguindo a tabela de horário poderia ser afetada se uma eventual parada da planta ou problemas de processo ocorresse. Para evitar que a demanda fosse ultrapassada pelo ligamento da resistência E09 dentro do horário de ponta, um procedimento operacional foi estabelecido, fazendo com que a vazão do compressor de ar fosse ajustada para reduzir a potência consumida neste intervalo. Um teste conforme mostrado na Figura 14 foi realizado e verificou-se que a vazão de ar do compressor deveria ser reduzida uma hora antes de se iniciar o horário de ponta. Passando o tempo de *heating*, a vazão de ar poderia retornar ao valor anterior.

Registro de consumo EE durante teste da operação de 2/3 resistência no HP

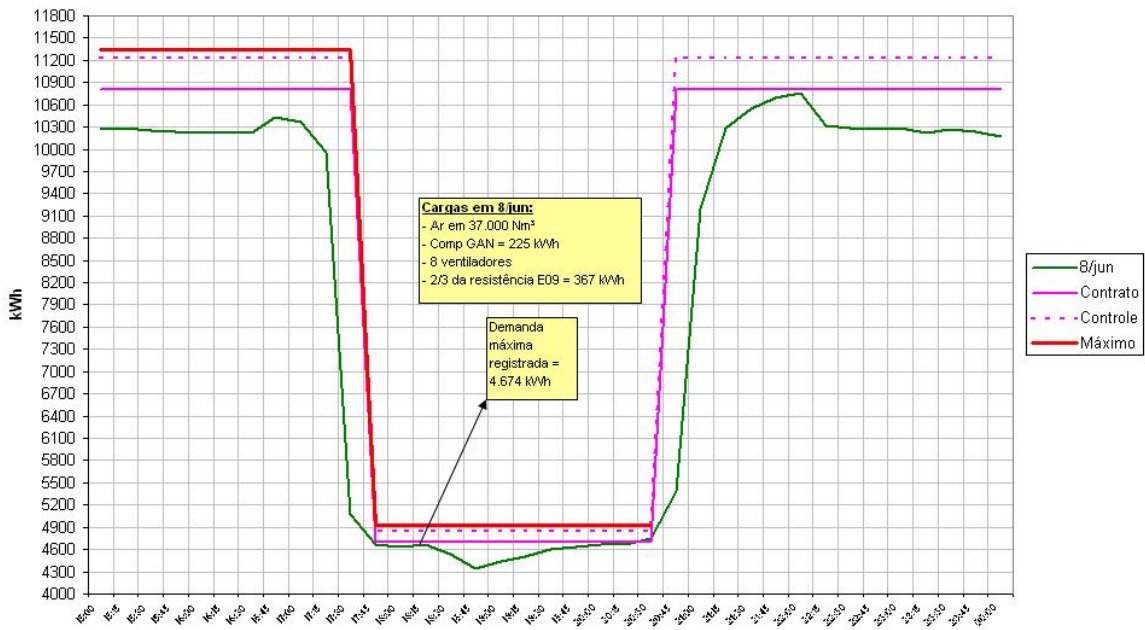


Figura 13: Teste de redução de demanda.



## 2.3 Resultados

O resultado obtido com a implantação da tabela de horário de funcionamento da FEP foi positivo, pois não houve dificuldades de adaptação pelos operadores e redução no custo variável com energia elétrica foi imediato. Os ganhos foram:

- economia de consumo médio de energia elétrica de 550 kWh/h durante o horário de ponta; e
- redução de 500 kW de demanda contratada no horário de ponta.

## 2.4 Conclusão

O objetivo do trabalho proposto foi alcançado sem nenhum investimento financeiro, pois o controlador de demanda (CCK) já existia na usina.

O projeto fica dependente da manutenção da eficiência do trocador de calor E07 acima de 85%.

## Agradecimentos

Agradeço a todos os colaboradores da unidade ASU de Fortaleza de Minas, ao Gerente Industrial Oeste José Milton da Silva, aos colaboradores da Air Liquide Eng. Paulo Barros e Eng. Bruno Penteado e ao Gerente de Eficiência Industrial Flavio Kano.