



**Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
Educação a Distância da UFSM – EAD
Universidade Aberta do Brasil – UAB**

**Curso de Pós-Graduação em Eficiência Energética Aplicada aos
Processos Produtivos**

Polo: Novo Hamburgo

**EFICIENTIZAÇÃO DO SISTEMA DE ÁGUA GELADA PARA
CONDICIONAMENTO DE AR DA SALA LIMPA DE UMA INDÚSTRIA
DE SEMICONDUTORES ATRAVÉS DO CONTROLE DE
DIFERENCIAL DE PRESSÃO DAS BOMBAS DE DISTRIBUIÇÃO DE
ÁGUA**

POLETTO HÖEHR, Eduardo¹

HOFFMANN, Ronaldo²

MAYER, Flávio Dias³

RESUMO

Este projeto visa à melhoria energética do processo de condicionamento de ar para uma sala limpa de uma indústria de semicondutores através da redução do consumo de energia elétrica e da otimização do sistema de distribuição de água gelada utilizada.

O sistema de distribuição secundário da água gelada utilizada é controlado pela

¹ Engº Mecânico. Universidade de Santa Maria, Santa Maria, RS

² Dr. Engº Químico. Professor Orientador. Universidade de Santa Maria, Santa Maria, RS

³ Dr. Engº Químico. Coorientador. Universidade de Santa Maria, Santa Maria, RS

vazão e pelo diferencial de pressão de água entre entrada e saída do sistema através sete bombas de distribuição de água gelada. A fim de reduzir-se o consumo energético do sistema de condicionamento de ar, encontrou-se um *set point* com menor diferencial de pressão que possibilitou que as bombas entreguem ao sistema de água gelada apenas a quantidade de energia necessária para reduzir a água até a temperatura de 8°C possibilitando a redução da rotação dela sem sua utilização. Entre os dois casos estudados foram alcançados uma redução de consumo de energia elétrica de até 7,7% em relação à condição inicial sem afetar a operação do sistema. Para o circuito de água gelada dos MAHU a estimativa de economia é de até 12.878,89 kWh/ano, ou R\$ 3.357,62. Para o circuito de água gelada de PCW, UPW e CDA a economia estimada é de 12.099,94 kWh/ano, ou R\$ 3.154,54. Ao total pode ser estimada uma economia de até R\$6.512,16 por ano apenas com alterações de parâmetros operacionais, sem a necessidade de investimentos para esta melhoria de eficiência energética.

Palavras-chave: Condicionamento de ar, controle operacional, Eficiência energética.

ABSTRACT

This project aims to improve energetically the air conditioning process for a semiconductor industry clean room by reducing the energy consumption and the optimization of the chilled water distribution system. The secondary loop of chilled water used is controlled by the flow rate and the differential pressure between inlet and outlet water through seven pumps. In order to reduce the energy consumption of the air conditioning system, the proposal is to find a set point with a lower differential pressure that will provide only the necessary energy required by the system to reduce the water to 8°C enabling the reduction of their utilization. A reduction of energy consumption up to 7,7% was achieved compared to the initial condition with no effect on the system operation. For the MAHU chilled water circuit the estimated savings is up to 12.878,89 kWh/year, or R\$ 3.357,62. For the PCW, UPW and CDA chilled water circuit the estimated savings is 12.099,94 kWh/year, or R\$ 3.154,54. The total savings can be estimated up to R\$ 6,512.16 a year just on operational parameters changes without the need for investment to this improvement of energy efficiency.

Keywords: Air Conditioning, operational control, Energetic efficiency.

1 INTRODUÇÃO

Em uma indústria de semicondutores o processo de fabricação de chips é extremamente complexo e as dimensões de fabricação são muito pequenas, atingindo escalas micrométricas (μm) para fabricação dos circuitos integrados destes componentes.

Devido a este grande grau de precisão no processo de fabricação, o ambiente deve ser rigorosamente controlado em sua temperatura, umidade do ar e número e tamanho de particulados dispersos no ambiente. Este ambiente é chamado de “Sala Limpa”.

A Ceitec S.A (Centro Nacional de Tecnologia Eletrônica Avançada), localizada na cidade de Porto Alegre/RS, possui uma sala limpa com uma área de 1.794 m² classificadas como Classe ISO 5 e ISO 7 conforme a norma ISO 14644-1. Isto quer dizer que nas salas Classe ISO 5 é permitido no máximo 100 partículas de até 0,5 μm de tamanho por m³ e nas salas de classe ISO 7 até 10.000 partículas de até 0,5 μm de tamanho por m³. A temperatura de controle é de 21°C \pm 1,0 e umidade relativa de 45% \pm 3.

Este controle é realizado por duas unidades de condicionamento de ar que distribuem ao todo 66.500 m³/h de ar em um *plenum*, que é uma área livre acima da sala limpa onde a partir daí o ar é distribuído dentro das salas de fabricação através de um fluxo laminar de escoamento de ar. Abaixo do *plenum*, entre a sala e o forro existem filtros com serpentinas de resfriamento por água gelada com controle por válvulas reguladoras em função da temperatura da sala onde o ar flui do *plenum* para a sala limpa para um controle final de temperatura e particulados.

Na Figura 1 pode ser visualizado o esquema de funcionamento de controle de uma sala limpa, classes 5 e 7.

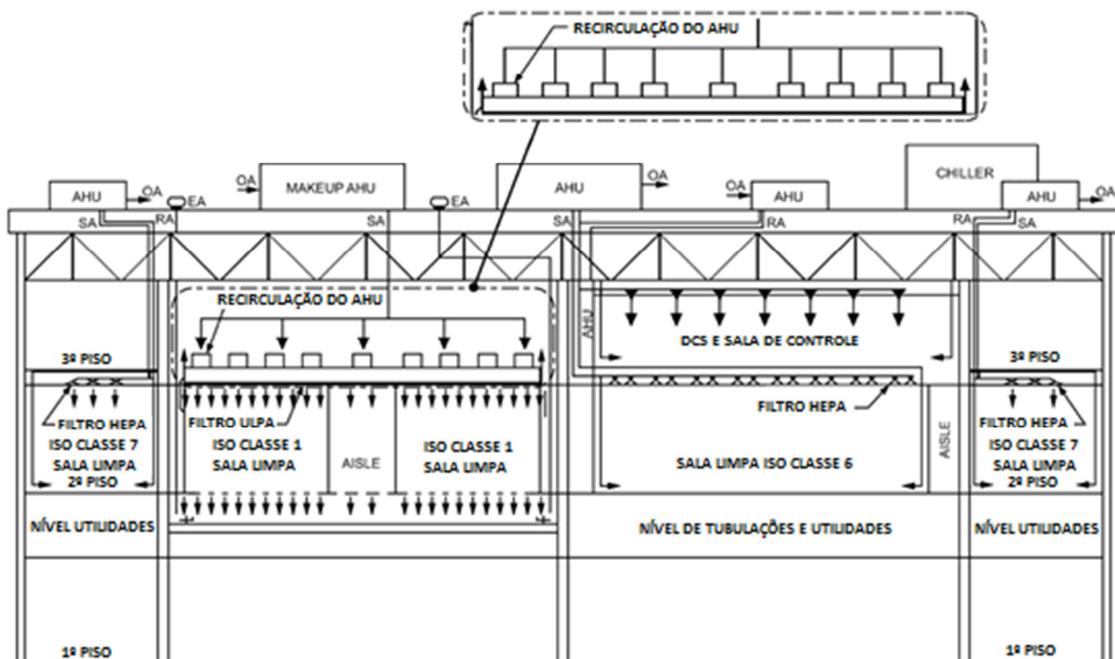


Figura 1 – Esquema construtivo de distribuição de ar de uma fábrica de semicondutores.

Fonte: Adaptado do ASHRAE Handbook (2007).

Os condicionadores de ar utilizados são chamados de MAHU, ou *Modular Air Handling Unit* e o processo de condicionamento do ar é realizado através das seguintes etapas:

- Amortecedores elétricos ativos – Objetivo: isolar o MAHU quando forem desligados.
- Pré-filtros – Objetivo: Primeira etapa de filtragem de ar – 10 μm .
- Serpentina de preaquecimento – Objetivo: aquece o ar (se solicitado) a um ponto definido a fim de condicionar o ar antes de adicionar umidade no umidificador. Também fornece proteção de congelamento para outras serpentinas.
- Filtros de saco – Objetivo: 2ª etapa de filtragem do ar – 1 μm .
- Serpentina de resfriamento (HTCH) – Objetivo: trabalha com a serpentina de preaquecimento a fim de condicionar o ar antes de umidificar.
- Umidificador – Objetivo: adiciona umidade ao ar para saturá-lo em 100%. O umidificador usa água de reposição UPW e uma lâmpada UV para prevenir formação de bactérias.
- Desumidificador – Objetivo: remove e adapta a umidade do ar para atingir a umidade desejada.
- Serpentina de reaquecimento – Objetivo: faz o ajuste final de temperatura para ser insuflado até a sala limpa.
- Ventiladores de abastecimento (2 por MAHU) – Objetivo: Leva o ar através do MAHU e fornece controle de pressão na sala – total de 66.500 m^3/hr .
- Filtros HEPA – Objetivo: Filtragem final do ar - 0.3 μm .

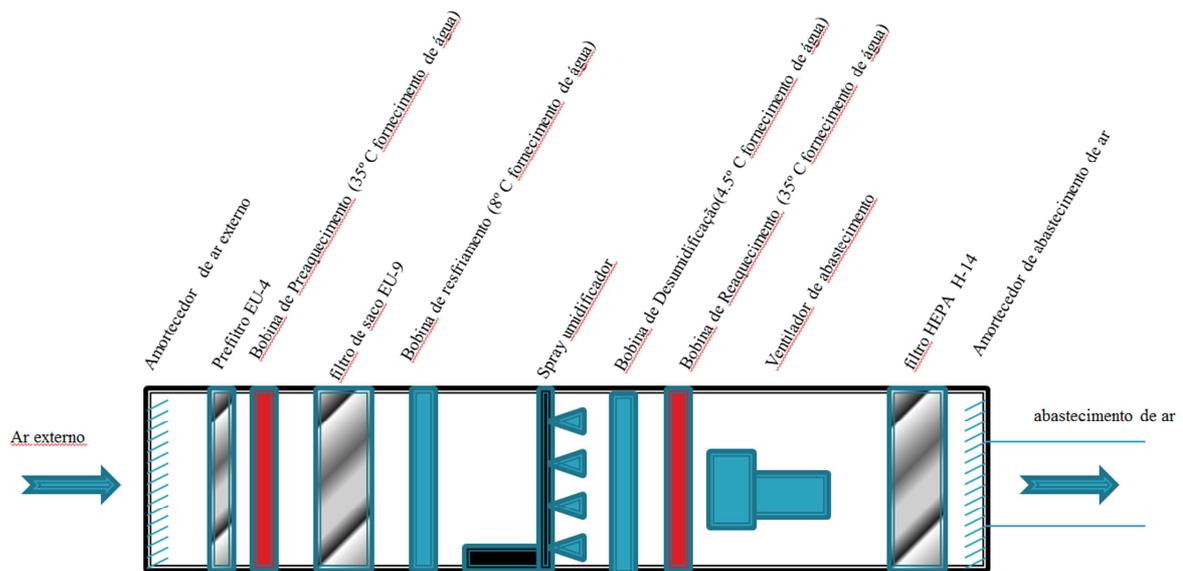


Figura 2 – Sequencia de funcionamento dos MAHU (Modular Air Handling Unit).

As serpentinas de resfriamento dos MAHU são alimentadas com água gelada, onde se utiliza um sistema de refrigeração de expansão indireta, contando com unidades resfriadoras de água do tipo chillers, torres de resfriamento, bombas de água gelada, bombas de água de condensação, aquecedores de água-boilers, bombas de água quente, trocadores de calor, válvulas de bloqueio e, válvulas de duas ou três vias. O sistema de água gelada instalado é do tipo primário-secundário, conforme visualizado na Figura 3.

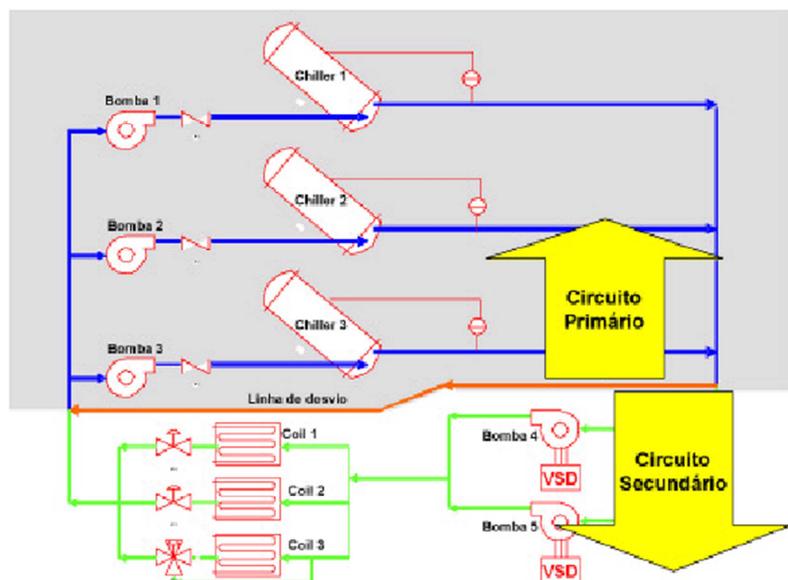


Figura 3 – Exemplo de sistema primário-secundário de água gelada

Fonte: Johnson Controls, 2006.

O circuito secundário do sistema de água gelada de alta temperatura da empresa Ceitec possui sete bombas de distribuição alimentadas por inversores de frequência VSD que são controlados por um set point de um sensor de pressão localizado na descarga da bomba para regular a vazão deste circuito.

Este estudo visa avaliar a possibilidade de redução do diferencial de pressão que controla os variadores de frequência das bombas, reduzindo seu consumo de energia elétrica, mas mantendo o pleno funcionamento do sistema.

Para isto, serão realizadas modificações de do diferencial de pressão a fim de medir as consequências desta modificação, como vazão e temperatura de água gelada com a finalidade de manter as condições operacionais do sistema e também medir a redução de frequência de utilização das bombas para calcular a redução do consumo energético do sistema de condicionamento de ar.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Busch (1998) inicia os primeiros estudos em busca de melhorias de eficiência energética em sistemas de condicionamento de ar e ventilação na indústria de semicondutores comparando duas instalações através de simulações no software DOE-2, selecionando uma situação padrão de instalação e comparando com uma situação com índices energéticos de melhor eficiência, calculando assim o potencial de ganho energético de instalações de indústrias de semicondutores. Um dos principais aspectos a serem observados neste estudo é a distribuição e potencial de redução de consumo da energia nos subsistemas de condicionamento de ar, mostrado na Figura 4.

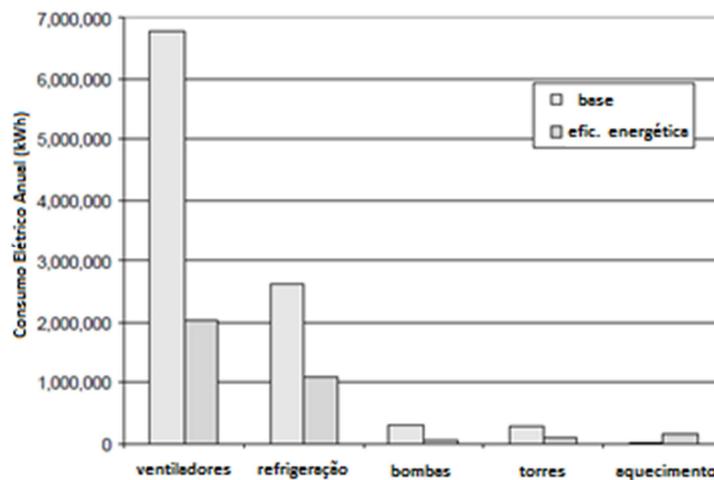


Figura 4 – Uso final de consumo anual de energia elétrica para dois casos de sala limpa

Fonte: Adaptado de Busch, 1998.

Matsuki e Tanaka (1998) fazem um estudo comparativo entre três sistemas de insuflamento e distribuição de ar em fluxo laminar em salas limpas de fábricas de semicondutores, comparando os sistemas FMU (*Fan Module Unit*), FFU (*Fan Filter Unit*) e RCF (*Recycle Fan*). A Figura 5 mostra o esquemático dos três sistemas apresentados.

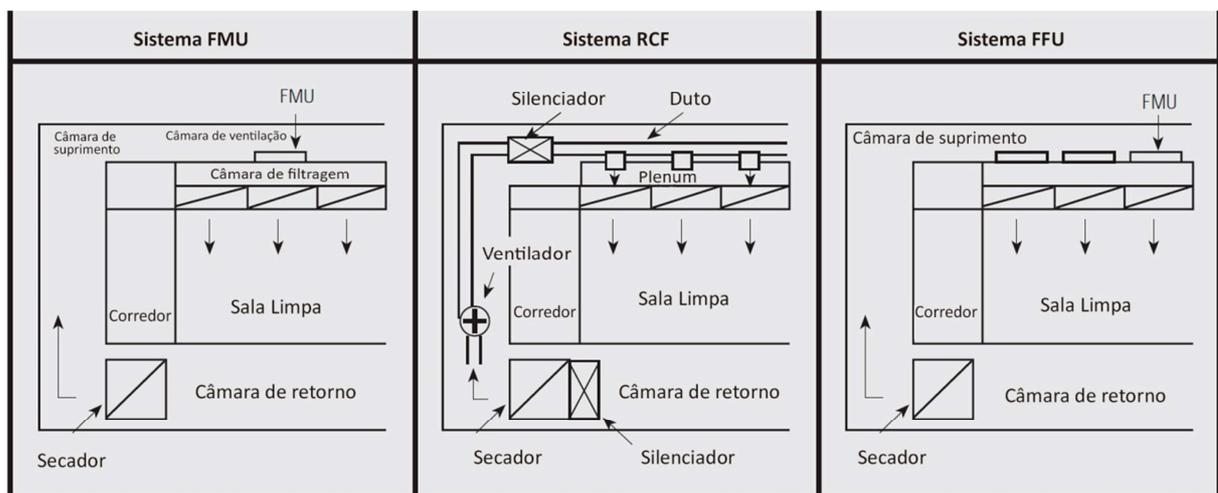


Figura 5 – Diagramas esquemáticos de sistemas de distribuição de ar

Fonte: Adaptado de MATSUKI M. e TANAKA N., 1998.

O sistema FMU consiste em ventiladores que insuflam ar para uma câmara de filtros assim distribuir o ar para sala limpa em fluxo laminar de escoamento sem a necessidade de dutos, integrado com o prédio. Cada ventilador tem a capacidade de insuflar ar para dois ou mais filtros. É o sistema que apresentou menor custo de operação, pois pode ser mais bem dimensionado por apresentar a menor perda de

carga entre os sistemas, reduzindo em até 53% o custo de energia com relação ao sistema RCF.

O sistema RCF é também chamado de “sistema central”, onde um ar condicionado central distribui o ar para dutos que são levados até a câmara de suprimento e sala limpa. Este sistema é de mais fácil instalação mas é mais robusto e solicita um maior pressão de ventilação devido as perdas de cargas dos dutos serem maiores, aumentando o custo de operação.

O sistema FFU é semelhante ao FMU, porém há um ventilador instalado para cada filtro, aumentando entre 5 e 10 vezes o número de ventiladores do sistema. Isto aumenta o custo de instalação, mas os custos energia e operação são semelhantes aos do sistema FMU. A fábrica da Ceitec possui instalado um sistema de insuflamento do tipo FFU.

Hu et al. (2008) realiza um *benchmarkt* em diversos subsistemas de *Facilities* (Utilidades) em fábricas de semicondutores em wafers de 8 in., montando índices de consumo de energia para os subsistemas da fábrica, como: sistema de água gelada, sistema de condicionamento de ar, exaustão geral, exaustão de solventes, exaustão de ácidos, exaustão de alcalinos, sistema de nitrogênio, ar comprimido, água gelada de processo, e água ultra pura. A partir destes índices, podem-se comparar sistemas de diferentes fábricas e mensurar se o consumo de energia para determinado sistema está dentro dos padrões de consumo de outras fábricas. Como exemplo, o índice de consumo para as bombas de água gelada e torres de resfriamento são de 0,058 kW/kW (consumo de eletricidade por carga térmica de resfriamento) no inverno e 0,064 kW/kW no verão.

O Guia de informações técnicas em *heating, ventilating and air conditioning* (HVAC) da Johnson Controls (2006), que é a fabricante dos chillers da Ceitec, realiza uma descrição técnica de sistemas de água gelada e detalha o funcionamento dos tipos de instalações, como circuito primário de água gelada, circuito secundário de água gelada e vazão variável de água com circuito primário-secundário, explicando a evolução e características de dos sistemas e apresenta as vantagens do sistema de circuito primário.

Taylor (2002) compara sistemas de água gelada de circuito primário e sistemas primário-secundário de vazão variável, indicando que os sistemas primários são mais modernos e apresentam uma maior eficiência energética, por

possuam um número menor de bombas em seu sistema, em uma instalação simplificada. Porém, seu funcionamento é mais complexo e exige mais atenção em sua operação, estando sujeito a falhas com maior frequência que sistemas primário-secundário, que possuem maior confiabilidade de operação.

Dissasekera (2010) apresenta um estudo para controle de equipamentos de suporte dos chillers, visando reduzir seu custo operacional, aumentar a estabilidade da temperatura e vida útil do equipamento. Este estudo avalia a utilização de parâmetros críticos com algoritmos que calculam a carga térmica necessária e ajusta variáveis de saída para otimizar o número de compressores e bombas de água em funcionamento, reduzindo assim o consumo energético do sistema. O principal ganho é o aumento de estabilidade de temperatura, que assim elimina picos de corrente de energia que podem reduzir em torno de 5% o consumo de energia elétrica.

Lu e Cai (2002) propõe uma nova forma de controlar os variadores de velocidade das bombas do circuito secundário de água gelada analisando a relação entre o diferencial de pressão e vazão de água gelada, através de uma série de *set points* que podem ser encontrados e controlados por estas variáveis, onde os *set points* das bombas de água fornecerão apenas a energia necessária para a realização da troca de calor, otimizando o funcionamento das bombas de água do circuito secundário e resultando em economia de energia.

Ma e Wang (2009) realizou uma experiência em um prédio de 98 andares em Hong Kong trabalhando estratégias para sistemas com bombas de velocidade variada através de inversores de frequência em diferentes modelos. Neste estudo, utilizou-se um diferencial de pressão que variou de acordo com a necessidade de refrigeração do prédio, formulando um sistema de otimização de sequência de controle das bombas. Esta sequência determina o número ótimo de bombas a serem ligadas de acordo com o carregamento necessário. Também permite o controle das bombas do circuito primário, que alimenta os chillers, e mostrou que com estas modificações foi possível alcançar uma economia de 12% a 32% de energia elétrica nas bombas.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo foi realizar alterações no sistema de água gelada da fábrica através de modificações de parâmetros operacionais visando à redução do consumo energético do sistema de condicionamento de ar de uma indústria de semicondutores.

Os parâmetros estudados deverão ser ajustados de forma a trabalharem de forma otimizada, reduzindo o consumo de energia elétrica e evitando desperdícios e sobrecargas nos sistemas envolvidos.

3.2 Objetivo específico

- Diagnosticar o sistema tarifário (verde/azul) em que a empresa se enquadra ou está enquadrada (demanda e oferta);
- Adequar demanda da empresa à oferta da companhia distribuidora, se aplicável;
- Propor ações para redução do consumo de energia elétrica alterando o set point do diferencial de pressão que controla as bombas do circuito secundário da central de água gelada.
- Montar uma metodologia de medição e controle dos circuitos secundários de água gelada, de forma a avaliar a solução mais econômica.
- Avaliar a redução no consumo de energia elétrica.

4 METODOLOGIA

4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

De acordo com o manual técnico da M+W Zander (2008), a fábrica utiliza água gelada, na temperatura de 8 °C para as seguintes funções:

- Condicionamento de ar para sala limpa, alimentando trocadores de calor nos MAHU (*Modular Air Handling Unit*).
- Para diversos processos nos equipamentos de fabricação dos chips como água de refrigeração.

- Para refrigeração do sistema de geração de ar comprimido.
- No processo de tratamento de água Ultra Pura (UPW).
- Alimentando os trocadores de calor para controle de temperatura na sala limpa.
- Sistema de ar condicionado do prédio administrativo.

4.1.1 Descrição do sistema da central de água gelada – sistema de alta temperatura

A água é resfriada por uma central de água gelada (CAGHT) constituída por:

- 2 unidades resfriadores de alta temperatura – HTCH 1 e HTCH 2 (8-16 °C) com compressores centrífugos, evaporadores, condensadores resfriados a água.
- 4 bombas de água gelada primárias para o sistema de alta temperatura – CHWP 1, CHWP 2, CHWP 3, CHWP 4 (8-16 °C).
- 3 bombas de água gelada secundárias para o sistema de alta temperatura – HTCHWP 1, HTCHWP 2, HTCHWP 3, (8-16 °C) de ar condicionado dos MAHU e prédio administrativo.
- 2 bombas de água gelada secundárias para o sistema de alta temperatura HTCWP 4 e HTCWP 5 (8-16 °C) de processo, utilizados no sistema de ar comprimido (CDA – *Clean Dry Air*), água gelada de processo (PCW – *Process Colling Water*) e água ultra pura (UPW – *Ultra Pure Water*).
- 2 bombas de água gelada secundárias para o sistema de alta temperatura RCC – SCHWP 1, RCC – SCHWP 2 (12-18 °C) das serpentinas de recirculação das salas limpas.
- 2 tanques de expansão fechados para o sistema de alta temperatura.
- 3 torres de resfriamento CT1, CT2, CT3.
- Sistema de tratamento automático de qualidade de água de condensação das torres, com bombas, tanque de produtos químicos.
- 1 trocador de calor de água gelada - CHWX 1 (4,5-10 °C / 8-16 °C).
- Válvulas de controle, válvulas de bloqueio, tubulação e demais acessórios.
- Quadros elétricos na CAG.

A Figura 6 mostra o esquema do supervisor do sistema secundário de distribuição de água gelada com os três circuitos (MAHU,PCW/UPW e RCC) e seus parâmetros de controle.

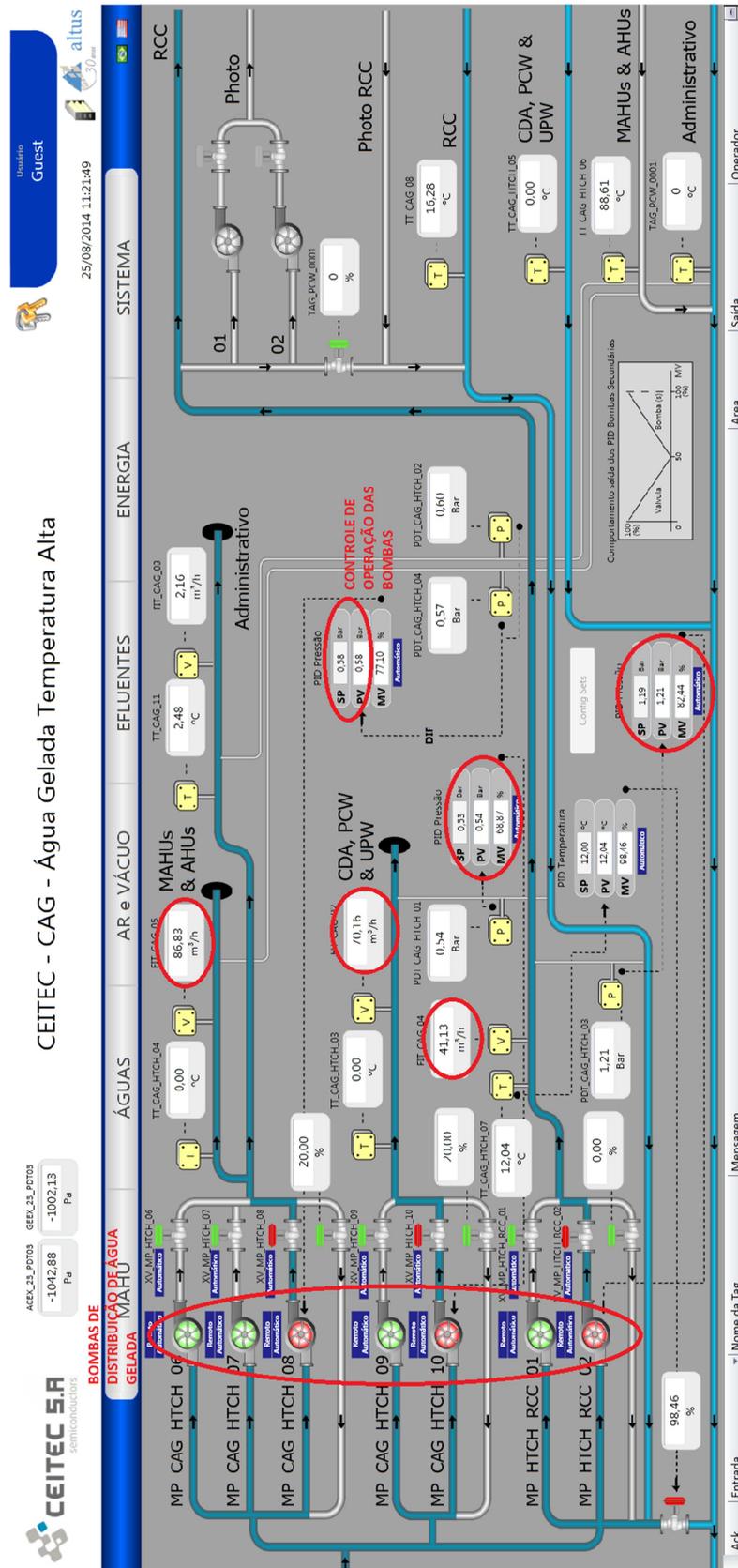


Figura 6 – Supervisório – Sistema secundário da Central de água gelada.

Fonte: *print screen* da aplicação do software Blue Plant da Altus.

As Bombas de água gelada secundárias de alta temperatura para ar condicionado (8-16 °C) fazem a circulação da água entre o barrilete e os condicionadores de ar MAHUs, RCUs e FCUs do Prédio de Produção e alimentação de água para o Prédio da Administração.

Entre os barriletes de sucção e descarga destas bombas, existe uma válvula de 2 vias pressostática para uma vazão mínima de 67 m³/h, controlada pelo sensor de pressão da linha principal e pelo medidor de vazão.

As Bombas de água gelada secundárias de alta temperatura para processo (8-16 °C) fazem a circulação da água entre o barrilete e os equipamentos de processo situados nas salas de UPW (Ultra Pure Water), PCW (Process Colling Water) e CDA (Clean Dry Air) do Prédio de Produção.

Entre os barriletes de sucção e descarga destas bombas, existe uma válvula de 2 vias pressostática para uma vazão mínima de 40 m³/h, controlada pelo sensor de pressão da linha principal e pelo medidor de vazão.

As Bombas de água gelada secundárias de alta temperatura para ar condicionado das serpentinas de recirculação (12-18 °C) fazem a circulação da água entre o barrilete e as respectivas serpentinas das salas limpas do Prédio de Produção.

Entre os barriletes de sucção e descarga destas bombas, existe uma válvula de 2 vias pressostática para uma vazão mínima de 25 m³/h, controlada pelo sensor de pressão da linha principal e pelo medidor de vazão.

Para o desenvolvimento do trabalho foram utilizadas medições dos parâmetros de distribuição de água gelada do sistema de alta temperatura como temperatura a água gelada e diferencial de pressão do sistema para verificar as condições de funcionamento. Também foi medida a frequência de funcionamento das bombas de distribuição secundárias para medição e comprovação de redução de consumo de energia elétrica.

Todos estes parâmetros foram disponibilizados pelo sistema de automação Blue Plant (Altus) dos sensores instalados, que permite a visualização e registro dos dados através de um sistema de supervisório.

Os dados armazenados no supervisório para cada um dos parâmetros foi exportado para planilhas eletrônicas, onde foram calculadas as médias e desvio

padrões para serem analisados em um formato matematicamente fácil de ser visualizado, uma vez que o número de dados armazenado é muito grande.

Os parâmetros de controle medidos foram:

Diferencial de pressão (bar): É a medida do diferencial de pressão medido na saída da bomba do sistema secundário com a pressão de retorno da água após percorrer todo o sistema. Este é o parâmetro controlável no sistema e que influencia em todos os outros, onde é determinado um set point que controla o inversor de frequência da bomba d'água, aumentando ou diminuindo seu carregamento.

Percentual de carregamento do motor da bomba (%): Este parâmetro mostra o percentual de carregamento de cada motor elétrico, de acordo com a frequência do inversor determinada de funcionamento para cada condição de serviço. É através deste parâmetro que será calculado o custo de energia elétrica para cada situação de funcionamento.

Temperatura de água gelada (°C): Reflete se as condições de serviço estão dentro do parâmetro de controle e se está atendendo o processo. Este parâmetro poderá variar, pois depende também da mistura da água de retorno (16°C) pelo by-pass com a água de alimentação (8°C).

Temperatura externa do ambiente (°C): É monitorada para comparar a influência da temperatura ambiente com funcionamento do sistema.

Após a aquisição, os dados foram analisados e comparados em cada uma das situações. A potência consumida nos motores das bombas e a economia de energia elétrica foram calculadas através da rotação do inversor de frequência, quantificando-se os ganhos com as alterações realizadas e definindo-se qual o melhor *set point* de diferencial de pressão a ser adotado.

Foi realizada uma análise do período de 1º de agosto até 24 de outubro de 2014, onde foi definido set points do diferencial de pressão e verificados seus efeitos no sistema, verificando os parâmetros definidos anteriormente através do banco de dados do supervisor do sistema de automação da empresa para os sistemas secundários de água gelada que distribuem para os MAHU/Prédio administrativo e para alimentação de água gelada de processo (PCW – *Process Cooling Water*) /UPW (Água Ultra Pura). A linha de distribuição para o circuito RCC não será analisada neste trabalho, por ser uma linha de vazão pequena (7 m³/h) e pouca potência do motor da bomba comparando com as demais, não havendo um

consumo de energia elétrica significativo para o sistema de água gelada.

Para o cálculo de estimativa de consumo de energia elétrica anual foi utilizada a Equação (1), retirada do material da disciplina de EAD1653 - Economia, Gestão e Auditorias da Energia deste curso de Especialização em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos.

$$E_{\text{consumido (ano)}} = \frac{\%carga \times P_{\text{nom}}}{\eta \% \times n^{\circ}_{\text{horas/dia}} \times n^{\circ}_{\text{dias/ano}}} \quad (1)$$

Onde:

% Carga – porcentagem da carga nominal, em uso efetivo;

P_{nom} – Potência nominal entregue no eixo, em kW;

η – Porcentagem do rendimento da bomba;

n° horas/dia – tempo de uso diário;

n° dias/ano – número de dias em uso por ano.

O cálculo de valor economizado em energia elétrica é calculado pela equação (2), onde se devem verificar proporcionalmente os consumos de horários de ponta e fora ponta.

$$E_{\text{economizada(ano)}} = V_{\text{ponta}} \times E_{\text{econom.ponta}} + V_{\text{fora ponta}} \times E_{\text{econom.fora ponta}} \quad (2)$$

Onde:

V_{ponta} = Valor do kW.h no horário de ponta, em R\$;

$E_{\text{econom.ponta}}$ = Energia elétrica economizada em horário de ponta, em kW.h;

$V_{\text{foraponta}}$ = Valor do kW.h no horário fora de ponta, em R\$;

$E_{\text{econom.foraponta}}$ = Energia elétrica economizada em horário fora de ponta, em kW.h.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Sistema tarifário de energia elétrica da empresa

Atualmente a empresa está enquadrada na classificação tarifária Horo-Sazonal Verde, Subgrupo A4 (2,3 kV/25 kV) industrial e possui uma demanda contratada de 2.300 kW.

Devido ao grau de controle e precisão das condições ambientais e de

processo da fábrica, o consumo de energia elétrica se mantém praticamente constante durante todo o ano, havendo alguma variação de consumo entre o inverno e verão para manter a temperatura e umidade relativa do ar constante. Por este mesmo motivo, o funcionamento da fábrica ocorre 24 horas por dia, 365 dias por ano, não havendo diferenciação entre o consumo de ponta e consumo fora de ponta. A Figura 7 apresenta o consumo mensal de energia elétrica para os anos de 2013 e 2014.

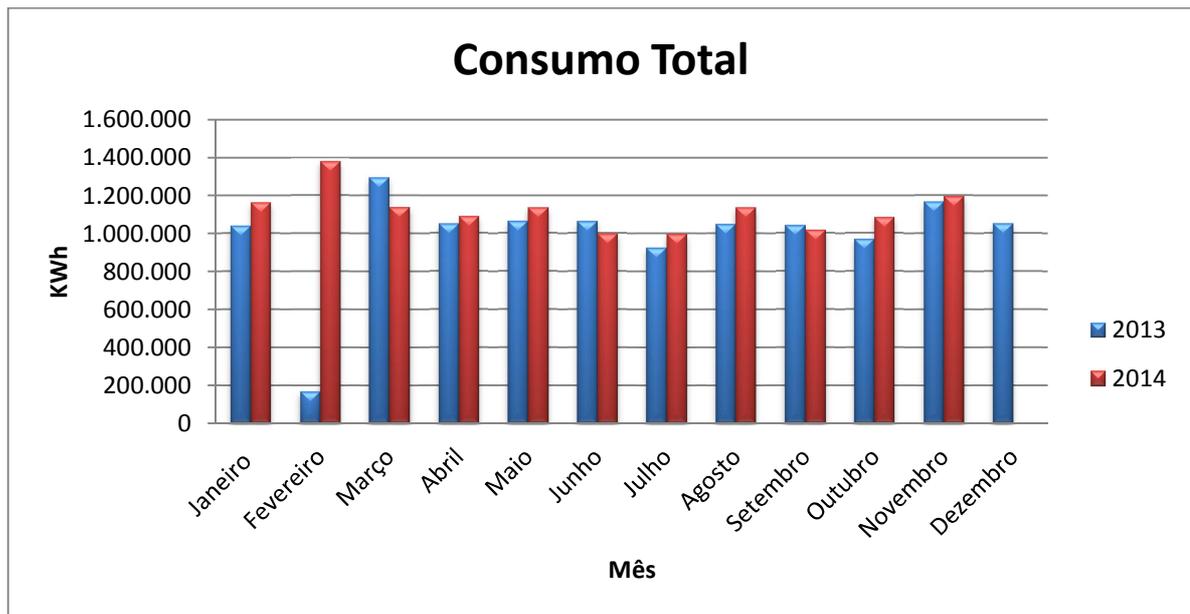


Figura 7 – Consumo de energia elétrica da fábrica em KWh x mês.

Pode-se observar na Figura 7 que no mês de fevereiro de 2013 o consumo foi muito abaixo do normal. Isto ocorreu por problemas de medição da concessionária, sendo que este dado deve ser desconsiderado.

Tabela 1 – Tarifas do Grupo A da CEEE-D

SubGrupo	Modalidade Tarifária	Encargo	Unidade	Valor em R\$
A4	AZUL	Demanda Ponta	kW	22,06000
		Demanda fora Ponta	kW	7,21000
		Energia Ponta	kWh	0,28425
		Energia Fora Ponta	kWh	0,18066
	VERDE	Demanda	kW	7,21000
		Energia Ponta	kWh	0,82104
		Energia Fora ponta	kWh	0,18066

Fonte: CEEE-Distribuidora

Na Tabela 1, podem-se verificar os custos de energia da distribuidora para os dois casos em que a Ceitec pode ser enquadrada, no grupo tarifário A4 Azul ou Verde.

A partir destes dados, determinou-se qual grupo resulta em menor custo de energia elétrica, de acordo com as características de consumo da empresa. Dessa forma, escolheu-se um mês típico para realizar o cálculo. O mês típico foi escolhido com sendo o mês mais próximo da média encontrada no período analisado. Neste caso será estudado o mês de outubro de 2014. Os cálculos não incluem os impostos.

A partir da fatura deste mês, podem-se extrair os seguintes dados para o cálculo estimativo da fatura:

Tabela 2 – Comparação de estimativa das tarifas azul e verde para o mês de outubro de 2014

		CUSTOS (R\$)					
Dados da fatura	Modali dade Tarifári a	Demanda ponta	Demanda fora ponta	Consumo ativo ponta	Consumo ativo fora ponta	Custo total	
Demanda contratada	2.300 kW						
Demanda lida	1.828 kW	AZUL	50.738,00	16.583,00	27.441,21	178.376,46	273.138,67
Consumo ativo ponta	96.539 kWh						
Demanda							
Consumo ativo fora ponta	987.360 kWh	VERDE		16.583,00	79.262,38	178.376,46	274.221,84

Os resultados dos cálculos mostram em um primeiro momento que as tarifas azul e verde se equivalem, tendo uma diferença na conta de 0,37% entre as duas, sendo a tarifa horo-sazonal azul a de menor valor total.

Isso mostra que é recomendado realizar um estudo mais profundo em toda sistemática da fábrica em busca de adequá-la para a tarifa azul antes de realizar qualquer modificação. Esta adequação pode ser principalmente em busca de diminuir a demanda de ponta, pois o impacto financeiro deste tipo de redução é maior.

Este estudo deve envolver todos os aspectos de operação da fábrica para que em uma eventual redução da demanda contratada de ponta, não se ultrapasse o valor contratado de demanda para evitar pesadas multas que colocaria todo o trabalho a perder.

5.2 Estimativa de economia de energia

Com o resultado das experiências realizadas nos dois circuitos secundários de água gelada, pode-se estimar a quantidade de energia elétrica economizada anualmente com as modificações dos parâmetros de diferencial de pressão para um valor de melhor eficiência energética. Para isto basta somar as energias

economizadas estimadas nos dois casos.

Utilizando os valores da tabela de tarifas da concessionária, pode-se calcular a economia financeira estimada das modificações realizadas, que para tarifa verde são:

Custo energia ponta: R\$ 0,82104;

Custo energia fora ponta: R\$ 0,18066.

De acordo com a Resolução Normativa ANEEL nº 414/2010 o horário ponta corresponde a três horas diárias e o período fora ponta as outras 21 horas do dia. Ou seja, do consumo total estimado economizado, 12,5% corresponde ao horário de ponta e 87,5% no horário fora de ponta, considerando que os consumos sejam os mesmos dentro destes horários.

5.3 Sistema secundário de água gelada do MAHU e prédio administrativo

Neste sistema normalmente opera uma das bombas com 40 HP de potência nominal que funciona modulada pelo inversor de frequência através de *set points* de diferencial de pressão pré-definidos. As características desta bomba podem ser visualizadas no Anexo 1.

As médias e desvio padrão dos parâmetros para cada situação de *set point* adotado é demonstrada na Tabela 3, abaixo:

Tabela 3 – Parâmetros do sistema secundário de distribuição de água gelada dos MAHU e Prédio Administrativo

Set point Δp (bar)	% carga do motor		Temper. externa (°C)		Temper. Água gelada(°C)	
	Σ	σ	Σ	σ	Σ	σ
0,74	79,46	3,86	16,90	4,56	11,72	0,76
0,69	76,68	3,80	15,30	3,48	11,14	0,63
0,58	75,32	3,97	19,30	4,57	10,82	0,77
0,66	77,26	2,65	20,04	2,26	10,75	0,58

A Figura 8 apresenta os dados do sistema secundário dos MAHU e Prédio Administrativo:

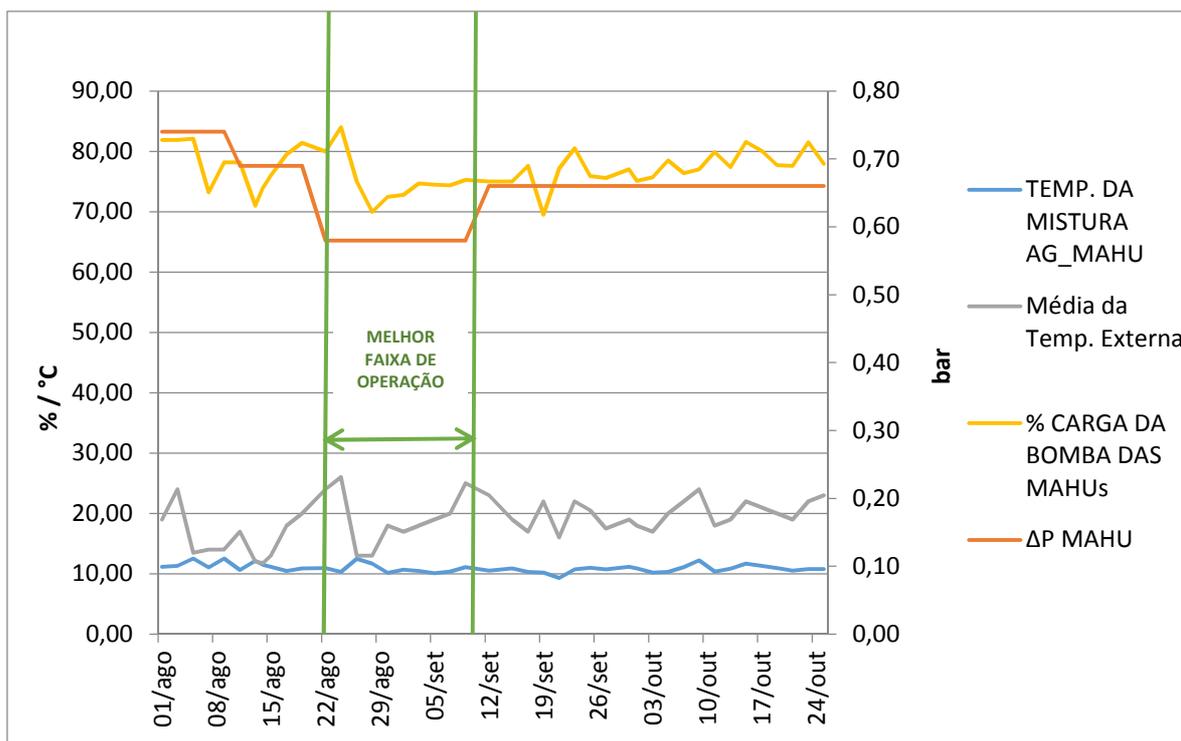


Figura 8 – Parâmetros do sistema secundário de distribuição de água gelada dos MAHU e Prédio Administrativo.

Através da Figura 8, podem-se visualizar as diferentes situações de acordo com o diferencial de pressão adotado, sendo que podem ser observadas algumas características deste circuito do sistema secundário de água gelada, como:

Devido a este circuito estar alimentando as centrais de condicionamento de ar do prédio fabril e prédio administrativo, pode-se observar através da Tabela 3 que a temperatura externa influencia bastante no carregamento do circuito, verificado que pela variação de temperatura encontrada através dos valores de desvio padrão também resulta em um valor de desvio padrão semelhante no percentual de carregamento dos motores.

Outra constatação que pode ser verificada é que um *set point* de diferencial de pressão elevado além de consumir mais energia desnecessariamente, prejudica o circuito com o aumento da vazão solicitada para manter o diferencial de pressão alto, e acaba utilizando maior quantidade de água de retorno (16°C) na mistura com a água de alimentação (8°C) elevando a temperatura da mistura. Isto pode ser visualizado na temperatura da mistura de água gelada a 11,72°C que também prejudica a troca de calor nas serpentinas dos condicionadores MAHU.

Dentre as situações observadas, pode-se verificar que a melhor situação de

desempenho do sistema é a de 0,58 bar, resultando num menor carregamento médio do motor da bomba (75,32%), mesmo apresentando maior adversidade relativo as temperaturas externas médias, que apresentaram maior variação justamente neste período de amostragem.

O próximo passo é calcular a capacidade de economia de energia elétrica anual adotando-se estes novos parâmetros de funcionamento, comparando o consumo da situação inicial de set point a 0,74 bar com a situação mais econômica de 0,58 bar, onde os resultados são demonstrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Estimativa de Economia de Energia Elétrica para o circuito dos MAHU/Prédio Administrativo

Dados dos motores		Diferencial de pressão	% de carregamento do motor	Consumo anual	Energia Economizada estimada	Valor economizado estimado
Potência nominal	29,83 kW	0,74 bar	79,46%	247.187,6 kWh/ano	0,0 kWh/ano	R\$ 0,00
Rendimento nominal	84%	0,58 bar	75,32%	234.308,7 kWh/ano	12.878,9 kWh/ano	R\$3.357,62
nº horas/dia	24 h	0,69 bar	76,68 %	238.539,4 kWh/ano	8.648,1 kWh/ano	R\$2.254,64
nº dias/ano	365 dias	0,66 bar	77,26 %	240.343,7 kWh/ano	6.843,8 kWh/ano	R\$1.784,24

A economia de energia elétrica entre a situação inicial e a de menor consumo estimado é de 12.878,89 kW. h por ano, ou seja, 5,2%, sendo um valor significativo para o circuito adotado.

5.4 Sistema secundário de água gelada de PCW, UPW e CDA

Neste circuito opera normalmente uma das bombas com 25 HP de potência nominal que funciona modulada pelo inversor de frequência através de *set points* de diferencial de pressão pré-definidos. As características desta bomba podem ser visualizadas no Anexo 2.

As médias e desvio padrão dos parâmetros para cada situação de *set point* adotado é demonstrada na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros do sistema secundário de distribuição de água gelada do PCW, UPW e CDA

Set point: Δp (bar)	% carga do motor		Temper. externa (°C)		Temper. Água gelada(°C)	
	Σ	σ	Σ	σ	Σ	σ
0,76	75,04	0,79	16,90	4,56	11,68	0,77
0,70	73,80	0,28	15,30	3,48	11,40	1,25
0,66	72,43	0,46	19,30	4,57	10,95	0,59
0,53	69,26	0,62	20,04	2,26	10,83	0,61

Fonte: Supervisório Blue Plant – Ceitec S.A

A Figura 9 apresenta as características de funcionamento do circuito secundário de PCW e UPW.

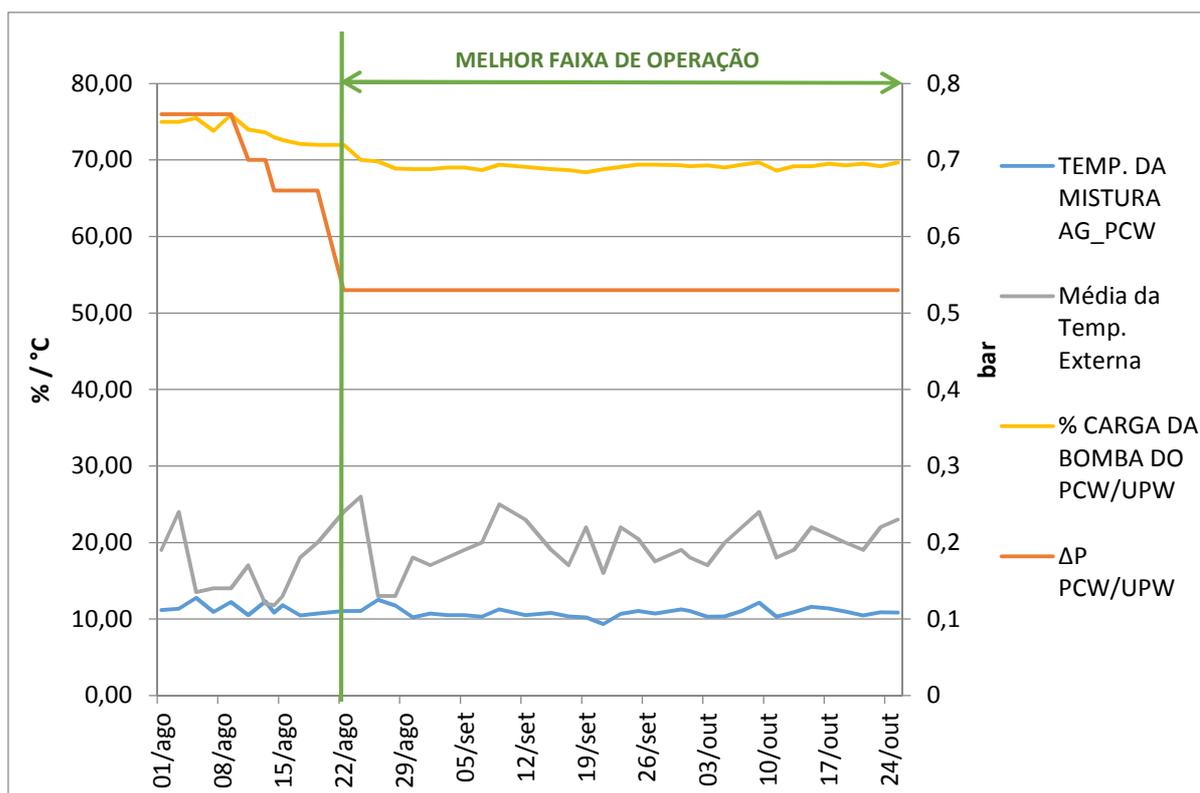


Figura 9 – Parâmetros do sistema secundário de distribuição de água gelada de PCW, UPW e CDA.

Analisando os dados e gráficos deste circuito, pode-se verificar que diferentemente do circuito dos MAHU, ele sofre uma baixa influência da temperatura externa. Isto se explica por ser um circuito fechado de refrigeração de água para os processos de fabricação de chips e de água ultra pura, onde já se trabalha em ambientes controlados.

Isto significa que neste circuito o processo é muito mais estável, sendo comprovado pelos baixos valores de desvio padrão encontrados, facilitando o controle de temperatura e vazões de água para distribuição ao processo.

Igualmente ao outro circuito, pode-se verificar que um número alto de diferencial de pressão leva a ter uma maior mistura da água de alimentação (8°C) com a água de retorno (16°C) aumentando a temperatura da água que retorna para o processo. Isto é comprovado, pois quanto menor o diferencial de pressão, menor é a temperatura da água gelada que alimenta o processo.

Dentre os valores observados, a melhor alternativa de diferencial de pressão a ser adotado é de 0,53 bar, onde se obteve menor valor de carga no motor, consumindo assim menos energia elétrica, além de reduzir a mistura da água de alimentação do processo.

A Tabela 6 demonstra o comparativo de consumo de energia entre os diferenciais de pressão adotados.

Tabela 6 – Estimativa de Economia de Energia Elétrica para o circuito de PCW/UPW e CDA

Dados dos motores		Diferencial de pressão	% de carregamento do motor	Consumo anual	Energia Economizada estimada	Valor economizado estimado
Potência nominal	18,64 kW	0,76 bar	75,04	157.089,9 kWh/ano	0,0 kWh/ano	R\$ 0,00
Rendimento nominal	78%	0,53 bar	69,26	144.989,9 kWh/ano	12.099,9 kWh/ano	R\$ 3.154,54
nº horas/dia	24 h	0,70 bar	73,80	154.494,1 kWh/ano	2.595,8 kWh/ano	R\$ 676,75
nº dias/ano	365 dias	0,66 bar	72,43	151.626,0 kWh/ano	5.463,8 kWh/ano	R\$ 1.424,46

A economia estimada neste caso é de 12.099,94 kW.h/ano, sendo que o consumo é 7,7% menor que a condição original.

Pode ser também verificado neste caso que o ganho de rendimento foi maior. Isto pôde ser alcançado devido ao processo ser mais estável e com menos variações de temperatura e carga térmica no circuito.

6 CONCLUSÕES

Através do trabalho realizou-se uma estimativa de economia de energia para as bombas do sistema secundário de água gelada. Por não possuir medidores de energia específicos para este sistema não foi possível realizar a medição real da energia economizada, porém a estimativa é válida, pois a aquisição, tratamento dos dados e cálculos para se chegar aos resultados foram bastante consistentes.

As estimativas de economia de energia do circuito dos MAHU de 5,2% e do circuito de PCW/UPW/CDA de 7,7% encontradas são significativas para seu sistema, e devido ao tamanho dos motores e bombas instalados representam um valor considerável de energia elétrica com potencial de economia. Novas situações devem ser continuamente estudadas e monitoradas para manter o sistema dentro de parâmetros econômicos de operação.

Para o circuito de água gelada dos MAHU, a estimativa de economia é de até 12.878,89 kWh/ano ou R\$ 3.357,62. Para o circuito de água gelada de PCW, UPW e CDA, a economia estimada é de 12.099,94 kWh/ano ou R\$ 3.154,54. Ao total pode ser estimada uma economia de até R\$6.512,16 por ano.

Foi montada uma metodologia para medir e estudar os dados para uma melhor condição de trabalho para os circuitos secundários de água gelada visando melhorias econômicas e operacionais através da determinação do melhor set point de diferencial de pressão a ser adotado.

Esta metodologia pode ser usada continuamente para medir novas situações com set points diferentes de diferencial de pressão além dos analisados neste trabalho, a fim de obter uma melhoria constante do sistema e obter resultados ainda melhores.

A metodologia aplicada neste trabalho também pode ser facilmente adaptada para outras centrais de água gelada do tipo circuito primário-secundário sem maiores problemas, buscando para cada instalação o melhor ponto de trabalho partindo da condição estabelecida na instalação até chegar a um valor otimizado para cada caso.

É importante salientar que qualquer alteração que seja realizada deve ser de forma gradual e controlada, para que os parâmetros de controle de água gelada do sistema não sejam prejudicados e se mantenha a operação normal do sistema da central de água gelada.

7 REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. **Resolução nº 414, de 2010**. Brasília: Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 2010.

American Society of Heating, refrigerating and Air-Conditioning Engineers - ASHRAE. **ASHRAE Handbook - HVAC Applications. Chapter 16 Clean Space**. Atlanta: ASHRAE, 2007. 20 p.

BUSCH J. **Cleanroom of the Future: An Assessment of HVAC Energy Savings Potential In a Semiconductor Industry Facility**. Berkeley: Environmental Energy Technologies Division Lawrence Berkeley National Laboratory, 1998. 9 p.

Companhia Estadual de Energia Elétrica – CEEE. **Tabela de Tarifas – Grupo A**. Porto Alegre: CEEE Distribuidora, 2014. Disponível em: <<http://www.cee.com.br/pportal/cee/archives/Tabela%20de%20Tarifas%20do%20Grupo%20A.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2014.

DISSASEKERA, M. **Electricity Saving and Cost Reducing Through Chiller System Optimization**. International Conference on Information and Automation for Sustainability (ICIAFs), 5. 2010, Colombo, Sri Lanka: 2010. p. 244-249.

HEATING & COOLING TECNOLOGIA TÉRMICA LTDA. **Manual de Operação e Manutenção do Sistema de Ar Condicionado**. São Paulo: 2008.

HU, S. et al. **Power consumption benchmark for a semiconductor cleanroom facility system, Energy and Buildings**. Energy and Buildings, V40. 2008. p. 1765-1770.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO. **ISO 14644-1:99 - Cleanrooms and associated controlled environments – Part 1: Classification of air cleanliness**. Geneva: 2007. 18 p.

JOHNSON CONTROLS. **Economia de energia: vazão variável no primário**. Guia de informações técnicas em HVAC-R. Número 03. 2006. 4p.

LU, L.; CAI, W. **A New Approach To Set Point Control In Chilled Water Loops**. International Refrigeration and Air Conditioning Conference, 624., 2002, Lafayette. Disponível em: <<http://docs.lib.purdue.edu/cqi/viewcontent.cgi?article=1623&context=iracc>> Acesso em: 20 nov. 2014.

M+W ZANDER. **Process Logic Control System and MCC/VFD for CEITEC**. Make Up Air Handling Units and smoke exhaust cleanroom - FE GmbH-70499, Stuttgart: 2008.

MA, Z.; WANG, S. **Energy Efficient Control of Variable Speed Pumps in Complex**

Building Central Air-Conditioning Systems. Energy and Buildings, Vol. 41. 2009. p. 197-205.

MATSUKI M.; TANAKA N. **Energy Saving System for Air Conditioning of Clean Room for Semiconductor Factory (Estimation of FMU System).** Oki Technical Review, Vol. 63: Special Issue on Global Environment: UDC. 1998. p. 49-52.

TAYLOR, S. T. **Primary-Only vs. Primary-Secondary Variable Flow Systems.** Atlanta: ASHRAE Journal, 2002. 5p.

ANEXO 1 - Bomba do circuito secundário dos MAHU e Prédio Administrativo (HTCHWP 1, HTCHWP 2 e HTCHWP 3)



N/Ref.: 606WTC00670-0	S/Ref.: Ceitec	Data: 20/6/2006
Item: 3	Quantidade: 3	Tag: HTCHWP 01 a 03

Bomba Modelo: MEGANORM 125-250

Dados Operacionais:

Vazão	: 270,00	m ³ /h
Amt	: 25,00	m
NPSH (Requerido)	: 2,78	m
Rendimento	: 84,00	%
Diam. Rotor Projeto	: 250,00	mm
Líquido Bombeado	: Água	
Temperatura	: 5	°C
Densidade	: 1,000	Kgf/dm ³
Velocidade	: 1750	rpm
Viscosidade	: 1,00	cSt
Potência Consumida:	29,80	CV

Dados Construtivos:

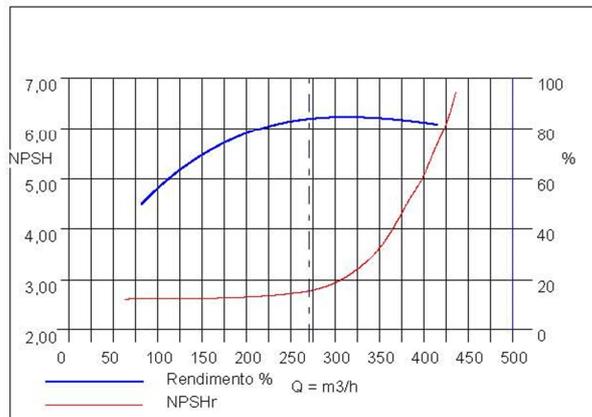
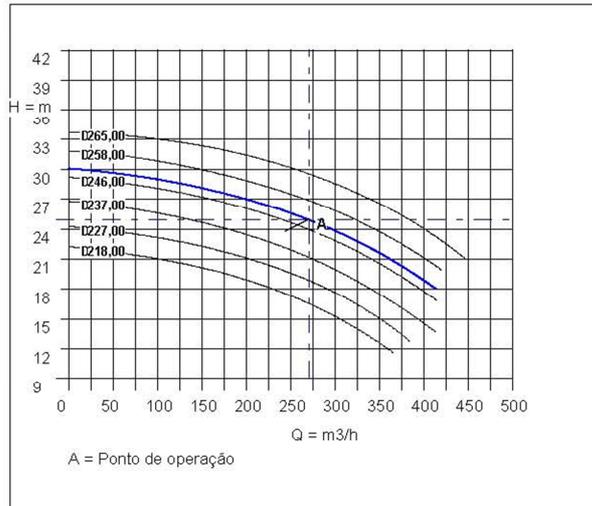
Diam. Sucção	: 150mm
Posição	: HORIZONTAL
Classe Pressão	: 125# FF
Norma	: ANSI B16.1
Diam. Recalque	: 125mm
Posição	: VERTICAL
Classe Pressão	: 125# FF
Norma	: ANSI B16.1
Construção	: PÉS
Mancais	: ROLAMENTOS
Lubrificação	: ÓLEO
Rotação(v.l.acion)	: Horário
Base	: Estrutural
Luva Elástica	: H128
Motor	: Cliente
	40 HP / IP55 / 200M / 380V / Trifásico
Vedação	: Selo Mecânico

Materiais:

Carcaça	: A48CL30
Rotor	: A48CL30
Eixo	: SAE1045
Luva Protetora Eixo	: A48CL30
Anel de Desgaste	: A48CL30

Escopo de Fornecimento:

Bomba, Selo mecânico, Base, Luva elástica c/ esp., Protetor, Contra flanges, Serviço conjugação



redutores e motorreductores bombas centrífugas equipamentos e acessórios para piscina e sauna motores elétricos automação e acionamentos

DISTRIBUIDOR e SERVICE AUTORIZADO REVENDA AUTORIZADA - ASSISTÊNCIA TÉCNICA

Rua Brasileira, 311 - Guarulhos - SP - 07043-010 - Fone: 11 6421-9001 - Fax: 11 6421-7172 - watertec@watertec.com.br - www.watertec.com.br

ANEXO 2 - Bomba do circuito secundário de PCW, UPW e CDA (HTCWP 4 e HTCWP 5)

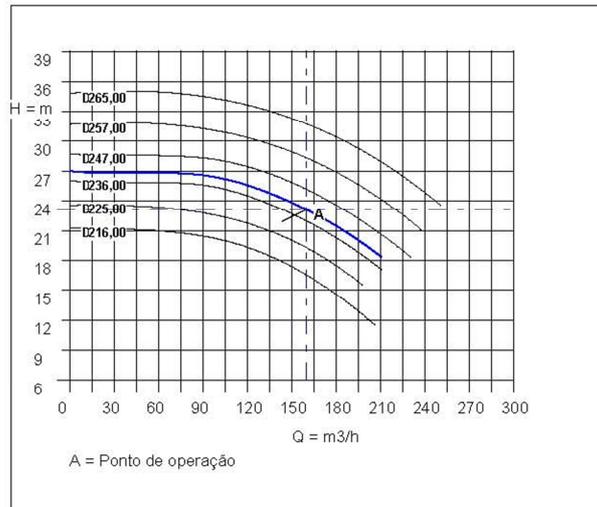


N/Ref.: 606WTC00670-0	S/Ref.: Ceitec	Data: 20/6/2006
Item: 6	Quantidade: 2	Tag: HTCWP 4/5

Bomba Modelo: MEGANORM 100-250

Dados Operacionais:

Vazão	: 160,00	m ³ /h
Amt	: 23,00	m
NPSH (Requerido)	: 3,96	m
Rendimento	: 78,00	%
Diam. Rotor Projeto	: 240,00	mm
Líquido Bombeado	: Água	
Temperatura	: 5	°C
Densidade	: 1,000	Kgf/dm ³
Velocidade	: 1750	rpm
Viscosidade	: 1,00	cSt
Potência Consumida:	17,50	CV

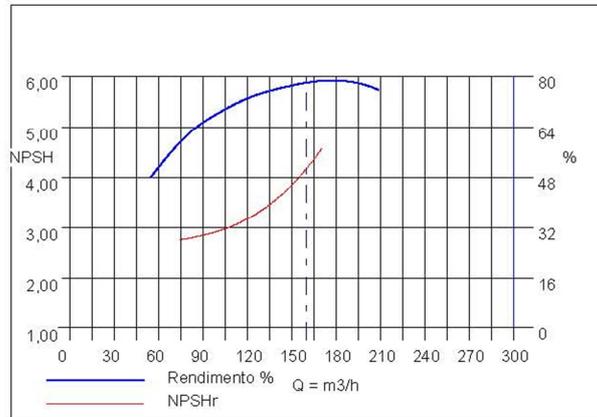


Dados Construtivos:

Diam. Sucção	: 125mm
Posição	: HORIZONTAL
Classe Pressão	: 125# FF
Norma	: ANSI B16.1
Diam. Recalque	: 100mm
Posição	: VERTICAL
Classe Pressão	: 125# FF
Norma	: ANSI B16.1
Construção	: PES
Mancais	: ROLAMENTOS
Lubrificação	: ÓLEO
Rotação(v.l.acion)	: Horário
Base	: Estrutural
Luva Elástica	: H112
Motor	: Cliente
	: 25 HP / IP55 / 160L / 380V / Trifásico
Vedação	: Selo Mecânico

Materiais:

Caixa	: A48CL30
Rotor	: A48CL30
Eixo	: SAE1045
Luva Protetora Eixo	: A48CL30
Anel de Desgaste	: A48CL30



Escopo de Fornecimento:

Bomba, Selo mecanico, Base, Luva elastica c/ esp., Protetor, Contra flanges, Servico conjugacao



redutores e motorreductores **DISTRIBUIDOR e SERVICE AUTORIZADO** **REVENDA AUTORIZADA - ASSISTÊNCIA TÉCNICA**

bombas centrífugas **equipamentos e acessórios para piscina e sauna** **motores elétricos automação e acionamentos**

Rua Brasileira, 311 - Guarulhos - SP - 07043-010 - Fone: 11 6421-9001 - Fax: 11 6421-7172 - watertec@watertec.com.br - www.watertec.com.br