

DETERMINAÇÃO DO COP EM TEMPO REAL UTILIZANDO SISTEMA MICROPROCESSADO

Ferreira, Vitor Pinheiro¹
Alves, Lourenço Gobira²

¹UFRB - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

²SENAI CIMATEC – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

Resumo: Os métodos para gestão da manutenção sofreram sensível evolução com o passar dos anos, e a contratação por desempenho surge como uma valiosa alternativa na melhoria dos serviços prestados pelas empresas mantenedoras do setor de refrigeração e condicionamento de ar. Para tal os parâmetros termodinâmicos como COP e o EER surgem como ferramentas a serem utilizadas para quantificar a eficiência energética de um ciclo frigorífico, servindo de indicadores para contratos por desempenho. O presente trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema microprocessado para controle operacional de um sistema frigorífico e a determinação do seu COP em tempo real. O sistema criado utiliza apenas cinco transdutores para indicação do COP, sendo dois transdutores de pressão e três de temperatura, além de um sensor térmico adicional para controle da temperatura interna do ambiente refrigerado. O sistema implementado através de CLP (controlador lógico programável) foi testado avaliando a evolução do COP através da variação das condições operacionais do ciclo como a alteração nos regimes de condensação e vaporização.

Palavras-chave: COP, CLP, Contratação por desempenho.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem se observado uma grande tendência de se criar bases para uma nova modalidade de terceirização da manutenção de máquinas térmicas chamada de contratação por desempenho, para tal é necessário se criar mecanismos para medição do desempenho térmico de uma máquina ou COP, no caso específico de sistemas frigoríficos.

Este trabalho propõe o monitoramento em tempo real de um sistema frigorífico, predizendo, a cada momento, qual é o coeficiente de desempenho do ciclo, permitindo a integralização deste indicador numa escala de tempo definida pelo usuário.

1.1. Refrigeração por Compressão

Num sistema convencional de refrigeração por compressão (ver fig. 1) o fluido refrigerante é comprimido no compressor sendo descarregado como vapor superaquecido a uma alta temperatura e alta pressão seguindo então para o condensador onde através da dissipação de calor para uma fonte quente (meio externo) se condensa e se tornando, portanto, líquido sub-resfriado.

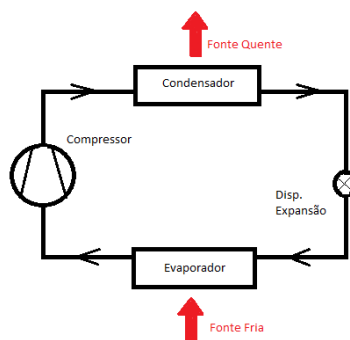


Figura 1 – Circuito frigorífico

Esta fonte quente, também chamada de meio condensante, geralmente é um recurso natural como ar ou água que proverá a redução da temperatura do fluido refrigerante e sua condensação. Esta temperatura de resfriamento determinará a pressão de saturação (pressão de condensação) do sistema, ou seja, a pressão do lado de alta do sistema frigorífico.

Após sair do condensador, o fluido refrigerante passa por um dispositivo, em geral uma válvula de expansão, onde tem sua pressão e temperatura reduzidas aproximadamente de forma isoentálpica (WYLEN et al, 1994). Neste ponto uma pequena parcela do fluido se vaporiza. Esta quantidade vaporizada é quantificada por um parâmetro termodinâmico chamado de título, que é a relação entre a massa de vapor e a massa total do fluido (WYLEN et al, 1994).

O fluido refrigerante, depois de expandido, segue para o evaporador onde absorve calor de uma fonte fria até se evaporar totalmente pela absorção de calor do meio a ser resfriado e se tornar novamente vapor superaquecido, seguindo então para o compressor e assim repetindo o ciclo.

Da mesma forma que no condensador, no evaporador a pressão é determinada pela temperatura de saturação, ou seja, à medida que a temperatura em que o fluido se vaporiza diminui, menor será a pressão deste ponto do sistema, ou seja, a pressão do lado de baixa do sistema.

1.2. Coeficiente de Desempenho (COP)

O COP (coeficiente de desempenho) é a relação entre a energia absorvida pelo evaporador e a energia gasta pelo compressor (WYLEN et al, 1994), conforme Eq. 1.

$$COP = \frac{\text{Energia}_{\text{evaporador}}}{\text{Energia}_{\text{compressor}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{evap}}}{\dot{W}_{\text{comp}}} = \frac{h_{\text{saídaevaporador}} - h_{\text{entradaevaporador}}}{h_{\text{saídacompressor}} - h_{\text{entradacompressor}}} \quad (1)$$

Conforme a Equação 1, o COP pode ser calculado pela determinação das entalpias em pontos específicos do sistema frigorífico. A entalpia é uma propriedade que pode ser determinada pela leitura da pressão e temperatura quando o fluido não está saturado.

O COP visa avaliar a eficiência energética de um sistema de refrigeração. Diferentemente do conceito de rendimento, terminologia muito utilizada para motores térmicos, o COP, por relacionar duas entradas de energia do ciclo frigorífico, pode ter valor menor, igual ou superior a 1,0 (um). Quanto maior for o COP maior será a eficiência do ciclo e, conseqüentemente, seu efeito frigorífico.

Segundo Venturini (2005), diferentes fatores contribuem para a variação do COP de um equipamento, tais como temperatura de evaporação, condensação do fluido refrigerante e subresfriamento e superaquecimento do sistema frigorífico. Em geral, para os casos de aumento da temperatura de condensação, diminuição da temperatura de vaporização, diminuição do subresfriamento ou aumento do superaquecimento, o COP tende a diminuir, provocando, desta forma, aumento da energia gasta pelo sistema para se obter o mesmo efeito frigorífico.

1.3. Contratação por Desempenho

A terceirização baseada em contratação por desempenho é aquela em que o valor a ser remunerado para a contratada tem uma parcela variável, de acordo ao ganho energético obtido por esta última (ARAÚJO et al, 2007).

A implantação de uma contratação por desempenho está diretamente ligada ao estabelecimento de indicadores, pois será através destes que o cliente terá como avaliar o desempenho de seu processo e o prestador de serviço demonstrar as melhorias alcançadas.

Após definidos os indicadores de desempenho (fatores de desempenho), os mesmos devem ser utilizados na metodologia de remuneração variável do contrato, onde o contratado ou o que vende o serviço irá participar diretamente dos resultados alcançados, na forma de remuneração variável, na implementação das melhorias que resultaram em ganhos para o contratante (ARAÚJO et al, 2007).

Segundo Araujo et al (2007), nessa forma de contratação por desempenho usualmente o contratado recebe uma parcela de remuneração fixa e outra variável. A parcela de remuneração fixa equivale aos custos diretos atribuídos à manutenção diária como materiais de consumo, pessoal e outros custos. Já a parcela variável está diretamente relacionada aos ganhos obtidos pela contratada medidos através do atendimento às metas de indicadores previamente estabelecidos.

Segundo Kardec e Carvalho (2002) a remuneração por desempenho obedece a uma regra geral ou “Formula Genérica”, onde o valor a ser pago depende da multiplicação de uma parcela fixa multiplicada de um fator variável, ou como descrito na Eq. 2:

$$VP = PF \cdot FP \quad (2)$$

VP = Valor a ser pago;

PF = Parcela fixa equivalente aos custos diretos atribuídos à manutenção diária, dentre os quais se destaca: materiais de consumo, pessoal, gestão de subcontratados e outros custos.

FP = Fator de desempenho correspondente ao indicador estabelecido como referencia.

1.4. Automação por CLPs (Controladores Lógico Programáveis)

O CLP (ver figura 2), surgido pela dificuldade de se atualizar sistemas elétricos baseados em relés, foi desenvolvido originalmente para aplicação em unidades fabris de sistemas automáticos de montagem, impulsionado pela necessidade de atualização de parâmetros de produção, em que a automação por relés causava atraso de produção e possibilidade de erros de montagem.



Figura 2 – Vista de um CLP

O crescimento das aplicações dos CLPs surgiu pela forma de programação utilizada, chamada de linguagem Ladder, linguagem esta já utilizada pelos eletricitistas no chão de fábrica para as montagens elétricas e diagramas com símbolos conhecidos como chaves, bobinas de relés, contatos elétricos, que facilitou em muito a aceitação das pessoas envolvidas com a instalação do equipamento. A linguagem ainda é utilizada por praticamente todos os fabricantes de CLP's, ainda que existam outras formas de programação desses equipamentos, como a linguagem de instruções que se baseia em texto. A linguagem Ladder (ver figura 3) é a preferida pela maioria dos programadores de CLP por trazer a semelhança em se programar com a maneira que se constrói um painel elétrico convencional.

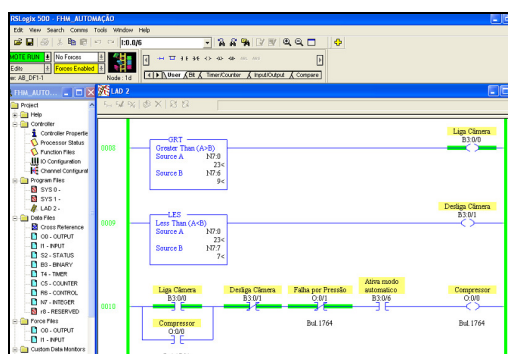


Figura 3 – Estrutura da linguagem Ladder

Podemos definir um CLP (controlador lógico programável) como um dispositivo de estado sólido ou um computador industrial capaz de armazenar instruções de controle (seqüência lógica, temporização, contagem) além de realizar operações matemáticas e comparação pode também armazenar dados e comunicar-se em rede em um sistema automatizado. O CLP possui um dispositivo de segurança óptico acoplador, utilizado para isolar a CPU em caso de curto circuito em uma instalação de corrente contínua. Os CLPs podem controlar uma grande quantidade de variáveis, substituindo o homem em algumas aplicações com mais precisão, confiabilidade, menor custo e rapidez.

Os CLPs possuem ainda ciclo de varredura definido como a seqüência entre leitura das entradas, interpretação do programa, Ladder e a atualização das saídas. O tempo da varredura pode variar de acordo com o tamanho da lógica Ladder. Os CLP's possuem diferentes tipos de entradas e saídas, sendo compostos de vários módulos como CPU, módulos de entrada e saída.

1.5. Sistemas Supervisórios

O programa supervisor é utilizado para configurar um sistema de supervisão de processo, incorporando recursos de operação configuráveis pelo usuário, como telas, gráficos, registros de alarmes, entre outras.

Os sistemas supervisórios são, em geral, estruturados em volta de um núcleo que coordena a aquisição de dados dos controladores programáveis, através de elementos conhecidos como "drivers" de comunicação. Os mesmos se

encarregam de distribuir esses dados aos módulos gráficos como telas gráficas, gráficos de tendência, alarmes, entre outros. É claro que cada software tem sua maneira de gerenciar informação entre os módulos, mas esta é uma arquitetura comum encontrada nos produtos. Como consequência da evolução tecnológica, os supervisórios ampliaram-se com mais desempenho e capacidade.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Sistema Frigorífico e Sensores Utilizados

A plataforma experimental utilizada no trabalho foi um kit frigorífico didático, concebido e montado no SENAI-Cimatec, dotado de compressor hermético, condensador a ar por convecção forçada, evaporador por convecção forçada e dispositivo de expansão por válvula de expansão automática. O fluido refrigerante utilizado foi o R-22 (monoclorodifluormetano), conforme ilustrado na figura 4.

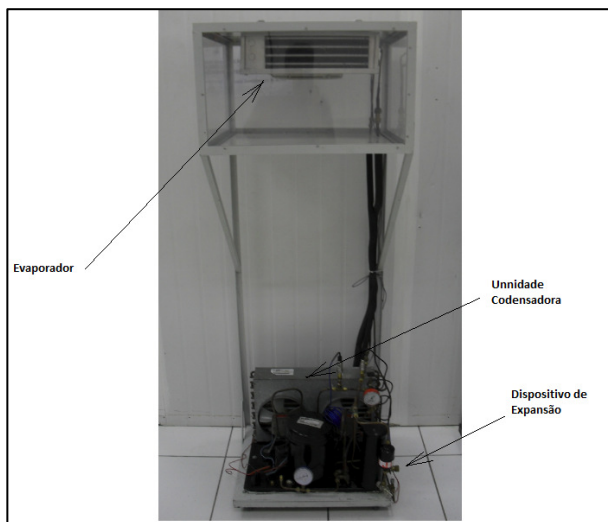


Figura 4 - Sistema frigorífico utilizado

Para a aquisição dos dados de pressão e temperatura, foram utilizados dois transdutores de pressão e três sensores de temperatura.

Para a medição da pressão de alta do sistema foi utilizado um transdutor fabricado pela Full Gauge com faixa de medição de 0,7 a 3,5 MPa. Para a pressão de baixa foi utilizado um transdutor fabricado pela Full Gauge, com faixa de medição de 0 a 0,7 MPa, ambos com sinal de saída de 0,5 a 5,0 VDC (ver figura 5).

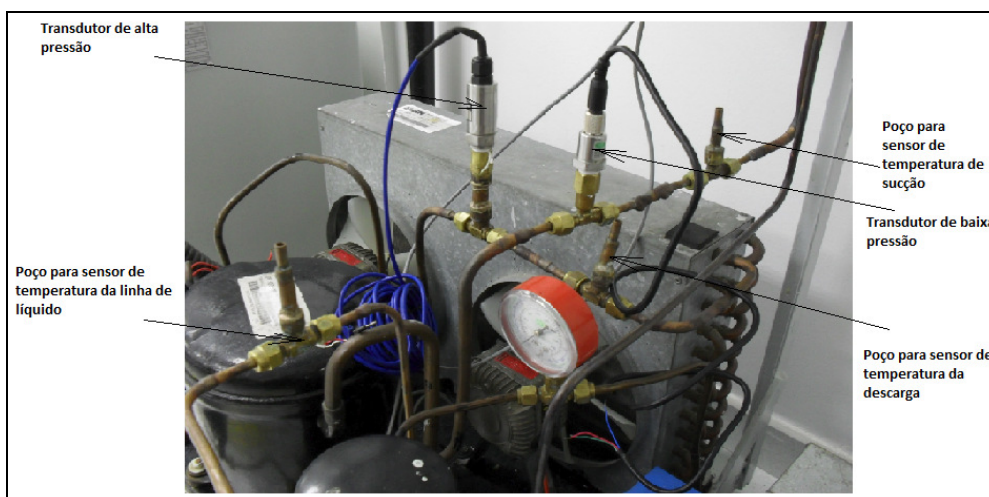


Figura 5 - Instalação dos sensores de pressão

Os sensores de pressão (alta e baixa) foram calibrados utilizando-se de um sistema de pressurização e manômetro padrão, sendo encontrada a relação entre a pressão aplicada e a tensão de saída do transdutor conforme ilustrado na figura 6.

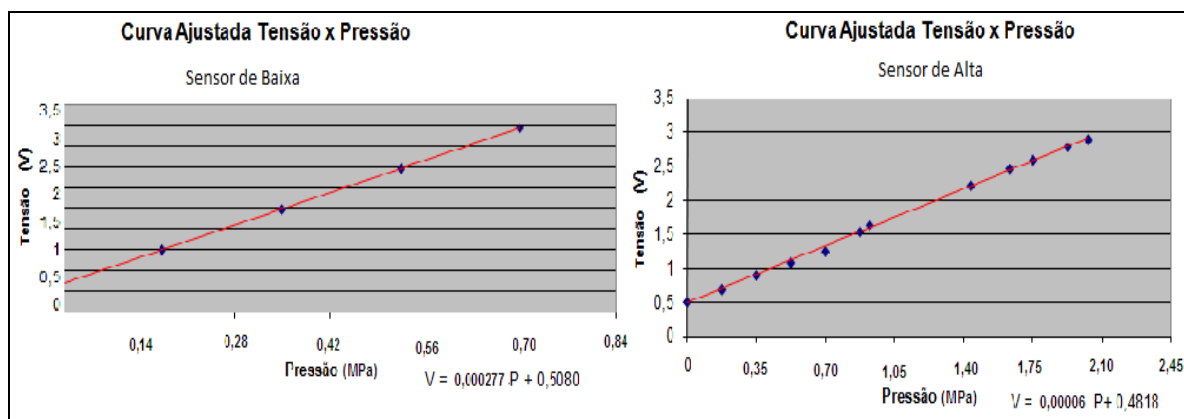


Figura 6 – Calibração dos transdutores de pressão

Para a medição das temperaturas de sucção, de descarga, linha de líquido (saída do condensador), além da temperatura interna do compartimento refrigerado, foram utilizados sensores modelo LM-35 (NATIONAL, 2010). Para tal, os mesmos foram instalados em poços (ver figura7) construídos de maneira a cada sensor medir de maneira mais fidedigna a temperatura real de cada ponto. Para diminuição da resistência térmica de contato, foi utilizada pasta térmica no interior dos poços. Os poços também foram isolados termicamente com manta elastomérica, minimizando assim os efeitos convectivos do ar externo.



Figura 7 - Fixação dos sensores de temperatura.

Como os sensores de temperatura proviam uma tensão de saída muito baixa, foi necessário um circuito de amplificação, instalados na caixa de montagem descritos na figura 8.

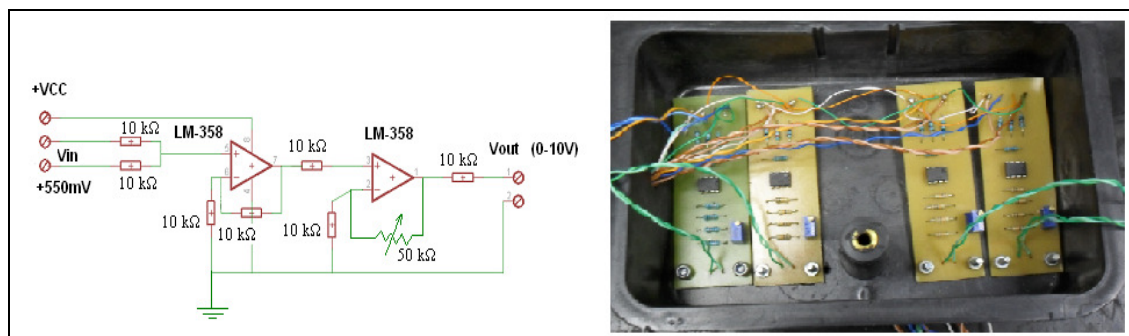


Figura 8 – Circuito de amplificação para sensores de temperatura.

Neste circuito o primeiro amplificador operacional (LM-358) elimina o nível DC de 550mV, para poder ampliar o range de amplificação conseguido no segundo amplificador (LM-358) que provê o ganho final, proporcionando um sinal de saída que pode excursionar entre 0 e 10V para uma temperatura variando entre -40 °C à 130 °C.

2.2. Sistema de Automação

Foi elaborado um sistema supervisório, (em comunicação com um CLP), que mostra valores de pressão e temperatura medidos no sistema (câmara frigorífica), informando o coeficiente de desempenho, com o intuito de mensurar a eficiência energética da instalação.

O CLP usado para o controle do kit didático de refrigeração foi o Allen Bradley Controlador Programável Micrologix 1500 com compact I/O para expansão, suportando mais de 7 Kb de memória do usuário não volátil para acomodar programas mais complexos de aplicação.

O sistema supervisório utilizado foi o software Elipse Scada servido de ferramenta para supervisão e controle do processo. O Elipse Scada possui uma interface com o operador para monitorar acionamentos que permitem a visualização de variáveis, com a utilização de animações, programação de “setpoints”, controle de acesso e funções especiais, como banco de dados próprio, relatórios formatados, históricos, alarmes e controle estatístico de processos, facilmente programáveis.

O Elipse Scada trabalha como cliente que permite buscar dados de aplicações servidoras dde. Para esta conexão, é necessário que a outra aplicação seja servidora dde no mesmo computador. Como cliente dde, o Elipse Scada deve ter um tag dde configurado de acordo com a documentação fornecida pela aplicação servidora, no caso a Microsoft Excel. A configuração do tag dde é feita na página geral do tag no Organizer (ver figura 9).



Figura 9 – Detalhe da criação das “tags” no supervisório Scada.

Quando a aplicação estiver aberta no mesmo computador em que o Elipse Scada estiver em execução, ela é detectada automaticamente por itens do servidor.

Foi necessário estabelecer uma conexão entre um arquivo de planilha do Microsoft Excel (utilizado como banco de dados para os valores de entalpia) e o supervisório Elipse Scada.

Na planilha foram informadas as tabelas de saturação, sub-resfriamento e superaquecimento do fluido R-22 com valores de temperatura, pressão e entalpia correspondente. A faixa de temperatura nas tabelas foi de -40 a 130 °C e a faixa de pressão de 0,050 a 2,000 MPa. Para cada valor real de temperatura coletada pelos sensores, o Excel fará inicialmente uma comparação com a temperatura da tabela de saturação, onde pra cada valor encontrado, teremos uma pressão de saturação para essa temperatura coletada. Caso o valor real de pressão seja maior que a de saturação correspondente, o fluido encontra-se em estado de líquido sub-resfriado, logo o valor de entalpia deve ser retirado da tabela correspondente a este estado. Caso o valor medido da pressão seja menor que o valor da saturação correspondente, a entalpia deve ser obtida da tabela para o estado de vapor superaquecido.

Para se mensurar o COP em um sistema de refrigeração é necessário coletar dados de variáveis como temperatura e pressão, para isso foram instalados os sensores de temperatura e pressão, anteriormente citados, em pontos específicos do sistema. Os dados coletados pelos sensores são enviados para um controlador lógico programável (CLP) que por sua vez transformará esses valores analógicos, tanto de temperatura como de pressão em valores digitais de tensão. O COP será mostrado por intermédio de um sistema supervisório IHM (interface homem-máquina) que terá como principal função receber esses valores reais de temperatura e pressão, controlar o sistema contra falhas de pressão, temperatura interna do ambiente refrigerado, calcular e indicar o COP em interface gráfica.

O programa do CLP coleta as informações dos sensores de temperatura que são dadas entre 0 e 10 V. O programa lê este valor de tensão, e o transforma numa escala digital que varia de 0 a 15730. Usando a equação obtida na calibração convertem-se os números lidos pelo programa para os devidos valores de temperatura. Para os sensores de pressão o procedimento é análogo, sendo utilizadas as equações explicitadas na figura 6.

O programa também compara o valor medido para temperatura do espaço refrigerado com o valor desejado, e os valores de pressões dos sensores de alta e baixa com os valores recomendados, fazendo assim o controle de temperatura, verificando a pressão e atuando caso haja um erro destas variáveis.

2.3. Cálculo e Indicação do COP

Para o cálculo do COP, foram coletados os valores das pressões de alta e baixa do sistema. Por motivo de simplificação foram desprezadas as perdas de carga nos trocadores, desta forma, a pressão no trecho entre compressor e condensador foi considerada igual à pressão no trecho entre condensador e dispositivo de expansão. Da mesma forma a pressão no trecho entre dispositivo de expansão e o evaporador foi considerada igual à pressão no trecho entre evaporador e compressor.

Por se tratar de um equipamento dotado de pequeno comprimento de tubulação frigorífica, o trecho entre evaporador e compressor a temperatura foi considerada constante, assim a temperatura de sucção do compressor foi considerada a mesma temperatura da saída do evaporador.

Para a determinação da entalpia no ponto correspondente à entrada do evaporador, foi adotado de acordo à Primeira Lei da Termodinâmica (WYLEN et al, 1994) que a entalpia na saída do condensador é aproximadamente igual à entalpia na saída do dispositivo de expansão, ou seja, considerando o dispositivo de expansão como isoentálpico. Esta estratégia visou simplificar a necessidade de se avaliar o título do vapor (fração de massa do vapor na mistura) na saída do dispositivo de expansão, uma vez que após a expansão o fluido tende a vaporizar.

Desta forma o programa lê simultaneamente o valor de temperatura e da pressão e consulta o banco de dados afim de inicialmente determinar o estado termodinâmico do fluido no ponto em questão. A partir disto, o programa busca em memória na tabela correspondente (líquido sub-resfriado, vapor saturado, vapor superaquecido) o valor da propriedade entalpia específica.

Assim o programa calcula o valor do COP, indicando-o em tela do supervisório conforme descrito na figura 10.

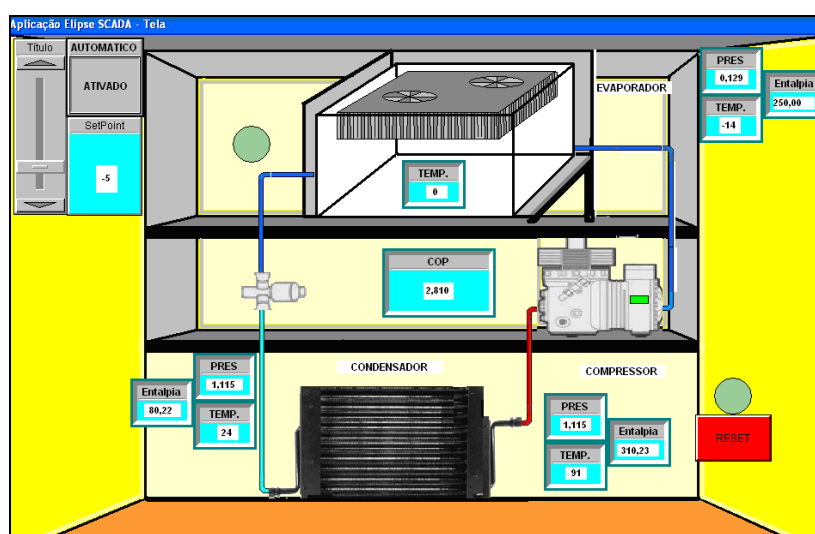


Figura 10 – Vista da tela do supervisório e a indicação do COP.

3. RESULTADOS

Como forma de validar a eficácia do sistema de determinação e indicação do COP, foram feitas medições do COP com a alteração das condições operacionais do sistema frigorífico.

A primeira validação foi feita com a variação da temperatura de saturação de condensação, através da obstrução da serpentina do condensador. Os valores obtidos para as condições operacionais podem ser visualizadas na tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Avaliação do COP para mudança na condição de condensação.

Condição de Condensação	P. sucção (MPa)	T. sucção (°C)	P. descarga (MPa)	T. descarga (°C)	T. l. de líquido (°C)	COP
Cond. livre	0,1	-14,0	1,101	91,0	24,0	2,810
Cond. 50% obstruído	0,1	-13,0	1,170	95,0	27,0	2,667
Cond. 75% obstruído	0,1	-10,0	1,218	100,0	28,0	2,607

A segunda validação correspondeu à variação nas condições de vaporização, com a obstrução do evaporador. Para tal, foram feitas duas medições, uma com a área de face do evaporador livre e outra com 50% de sua área de face obstruída. Os resultados encontrados são exibidos na tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Avaliação do COP para mudança na condição de vaporização.

Condição de Vaporização	P. sucção (MPa)	T. sucção (°C)	P. descarga (MPa)	T. de descarga (°C)	T. l. de líquido (°C)	COP
Evaporador livre	0,1	-14,0	1,101	91,0	24,0	2,810
Evaporador 75% obstruído	0,1	-32,0	1,114	95,0	24,0	2,127

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados apresentados, conclui-se que a aplicação de um sistema supervisor, que tem como controlador lógico programável um CLP para fins de se obter e indicar o COP (coeficiente de desempenho) em ciclos de refrigeração, atingiu bom padrão de eficácia. A utilização de alguns conceitos em termodinâmica foi de extrema importância para execução deste projeto.

Os valores obtidos nas tabelas 1 e 2 comprovam a redução do COP com a diminuição do calor trocado em ambos os trocadores de calor do ciclo (condensador e evaporador), confirmando as informações contidas na bibliografia citada.

Como ponto de melhoria, pode-se destacar a necessidade de se usar sensores de temperatura com baixo tempo de resposta, uma vez que o sensor utilizado, por possuir encapsulamento plástico, criava alguns “overshoots” na indicação do COP, indesejáveis para aplicações de controle em tempo real.

O estudo e a execução deste projeto deram-se a partir da necessidade de se obter um desempenho adequado para cada sistema proposto, criando um cenário propício à redução dos custos de operação e manutenção em ciclos de refrigeração por compressão a vapor em geral. Deve-se observar também que esta metodologia pode ser aplicada em outros sistemas e ciclos térmicos, uma vez que não há limitações para a aplicabilidade do mesmo.

5. REFERÊNCIAS

- Araujo, E. et al, 2007. Desenvolvimento de Metodologia de Contratação Por Performance Baseada em Eficiência Energética e Disponibilidade Operacional. Monografia apresentada à especialização CEGEM. Faculdade Senai Cimatec. Salvador-Ba.
- Kardec, A.; Carvalho, C., 2002. Gestão Estratégica e Terceirização, Qualitymark, Rio de Janeiro.
- Mendes, M.; Medeiros, F. W. A.; Ferraz, S., Acesso em: 23 ago. 2007. Contratação por performance para serviços de manutenção industrial. Disponível em: <http://abraman.org.br/biblioteca_e_publicações/TT-271_2005.asp>.
- National Semiconductors, acesso em 01/02/2010. Disponível em: <http://www.national.com/produtos>.
- Venturini, O.; Pirani, M., 2005. Eficiência Energética em Sistemas de refrigeração Industrial e Comercial: Manual Prático, Eletrobrás, Rio de Janeiro.
- Wyllen, G.; Sonntag, R.; Borgnakke, C., 1994. Fundamentos da Termodinâmica clássica, Blücher, 4.ed. São Paulo.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

COP DETERMINATION IN REAL TIME SYSTEM USING MICROPROCESSOR.

Ferreira, Vitor Pinheiro¹
Alves, Lourenço Gobira²

¹UFRB - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

²SENAI CIMATEC – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

Abstract: *The methods for maintenance management underwent significant changes over the years, and contracting for performance emerges as a valuable alternative in the improvement of services provided by participating companies in the HVAC sector. The thermodynamic parameters such as COP and EER emerge as tools to be used to quantify the energy efficiency of a cooling cycle, serving as indicators for performance contracts. This paper describes the development of a microprocessor system for real time operational control of a refrigeration system and determine its COP. The system created uses only five transducers to indicate the COP, two pressure transducers and three temperature sensors, and an additional thermal sensor to control the refrigerated environment inside temperature. The system implemented by PLC (Programmable Logical Controller) was tested by assessing the evolution of COP by varying the operating conditions of the cycle as the condensation and vaporization scheme.*

Keywords: *COP, PLC, Performance maintenance management.*