UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

MARCO STABILITO MESQUITA

AUTOMAÇÃO DE TESTES DE COMPRESSORES HERMÉTICOS UTILIZANDO O SOFTWARE LABVIEW

São Carlos
2010

MARCO STABILITO MESQUITA

AUTOMAÇÃO DE TESTES DE COMPRESSORES HERMÉTICOS UTILIZANDO O SOFTWARE LABVIEW

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em
sistemas de energia e automação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Manoel Luís de Aguiar

São Carlos
2010

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

M582a

Mesquita, Marco Stabilito
Automação de testes de compressores herméticos utilizando o software LabVIEW / Marco Stabilito Mesquita ; orientador Manoel Luís de Aguiar. -- São Carlos, 2010.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.

1. Calorímetros. 2. Compressor. 3. Circuito refrigerador. 4. Compressores - testes estabilização - automação. 5. LabVIEW. I. Título.

Sumário

Lista de Figuras i
Resumo ii
Abstract iii
1. Introdução 1
2. O Circuito de Refrigeração 4
3. Descrição do sistema térmico compressor e calorímetro 7
3.1. Medição de temperatura, pressão e visor de líquido 7
3.2. Válvulas solenóide 10
3.2. Controladores 11
3.3. Análise de desempenho 13
4. Procedimento de testes 15
4.1. Ajustes e critérios de estabilização 19
5. Resultados 21
5.1. Alterações no programa principal “Rendimento.vi” 21
5.2. Programação de condições de testes – Steps.vi 23
5.3. Verificação de condições de estabilização – Scan.vi 26
5.4. Elaboração do Relatório de Testes 29
Conclusões 31
Anexos 32
Referências Bibliográficas 33

Lista de Figuras

Figura 1 – Laboratório de Aplicação e Desenvolvimento.....1
Figura 2 – Parte do diagrama de blocos do programa Steps.vi. 2
Figura 3 - Painel Frontal do LabVIEW. 3
Figura 4 – (a) Esquema de um circuito refrigerador. (b) Gráfico da pressão versus entalpia.....5
Figura 5 – (a) Compressor hermético de ar para refrigeração. (b) Condensador com refrigeração a água. (c) Filtro secador. (d) Válvula de expansão. 6
Figura 6 – Calorímetro Externamente. 8
Figura 7 – Calorímetro Internamente. 9
Figura 8 – Painel de calorímetro evidenciando válvulas solenóides (azul), pressostatos (branco), manômetros analógicos e visor de líquido (acima, à direita). 10
Figura 9 – Controladores do calorímetro. 12
Figura 10 – Sistema de controle de temperatura ambiente. 12
Figura 11 – Curva de saturação do refrigerante puro R134a. 14
Figura 12 – Curva de saturação da mistura de refrigerantes R404a.....14
Figura 13 – Painel Frontal do programa principal Rendimento.vi. 15
Figura 14 - Parâmetro Power dos controladores. 16
Figura 15 – Posição dos controles no programa Rendimento.vi. 17
Figura 16 – Indicador de resistências. 18
Figura 17 – Posição dos indicadores no programa Rendimento.vi. 19
Figura 18 – Parte do diagrama de blocos desenvolvido no programa “Rendimento.vi”. 22
Figura 19 – Parte do diagrama de blocos desenvolvido no programa “Rendimento.vi”. 23
Figura 20 – Painel frontal do programa Steps.vi. 24
Figura 21 – Tela de entrada de dados de documentação do teste. 26
Figura 22 – Painel Frontal do Programa Scan.vi. 27
Figura 23 Comportamento da temperatura do gás refrigerante na descarga pelo tempo. 28
Figura 24 – Potência consumida na caldeira pelo tempo. 28
Figura 25 – Modelo de relatório final de testes em calorímetros. 30

Resumo

O objetivo do projeto é aprimorar a automação de testes de calorímetros, implementando em LabVIEW as funções de verificação de estabilização e possibilidade de programação e execução de múltiplos testes automáticos. Com o aprimoramento do *software* dos calorímetros, ter-se-á um considerável aumento de produtividade e qualidade dos testes calorimétricos. A proposta é tornar o *software* similar ao do calorímetro comercial fabricado pela empresa Chino [1], no qual a intervenção do operador é mínima. Neste equipamento, é possível realizar até 19 condições de testes de forma sequencial e automática. O programa desenvolvido deverá utilizar comunicações seriais e protocolos TCP/IP para comunicar com diversas instrumentações (termopares, PTCs, CLPs, acelerômetros...) e servidores; possuirá uma interface com o usuário através de um supervisório para possibilitar a preparação e controle de diversas condições de testes para diferentes famílias de compressores e impressão automática de relatórios.

Palavras chave: calorímetro, compressor, circuito refrigerador, automação, estabilização, LabVIEW

Abstract

The objective of project is to improve the automation of calorimeter tests, implementing LabVIEW verification functions of stabilization and the possibility of programming and execution of automatic multiple tests. The improvement of calorimeter software will bring a considerable increase in productivity and quality of calorimetric tests. The proposal is to make the software similar to that of commercial calorimeter manufactured by Chino [1], in which operator intervention is minimal. In this equipment, you can perform up to 19 test conditions sequentially and automatically. The software should use serial communications and TCP / IP to communicate with diverse instrumentation (thermocouples, PTC, PLCs, accelerometers ...) and servers; it will have a user interface through a supervisory in order to enable the preparation and control of many test conditions for different families of compressors and automatic printing of reports.

Key Words: calorimeter, compressor, refrigerator circuit, automation, stabilization, LabVIEW

1. Introdução

Numa indústria de produção em série, é indispensável submeter seus produtos a testes exaustivos antes de lançá-lo no mercado. Detecção prévia de defeitos e análise de desempenho são práticas que garantem a confiabilidade dos mesmos.

A proposta do plano de Trabalho de Conclusão de Curso foi elaborar um *software* desenvolvido em LabView para automatizar testes de compressores herméticos de ar para refrigeração em calorímetros. O projeto foi desenvolvido em parceria com a empresa Tecumseh do Brasil Ltda. no Laboratório de Aplicação e Desenvolvimento (LAD). A Figura 1 mostra uma foto do LAD contendo diversos calorímetros. Para mais informações sobre a empresa, basta acessar o site da mesma [2].

Figura 1 – Laboratório de Aplicação e Desenvolvimento.

Inicialmente foi necessário realizar um curso completo do *software* LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engeneering Workbench*) utilizando as apostilas do fabricante [3-6]. Esta etapa durou dois meses, os quais possibilitaram adquirir um treinamento mínimo para se desenvolver um projeto.

Cada projeto é realizado em unidades chamadas VI (*Virtual Instrument*) ou instrumento virtual. Essas VIs são compostas de um Painel Frontal que corresponde à interface com o usuário e de um Diagrama de Blocos que são representações gráficas de toda a lógica do projeto. Todos os projetos em LabVIEW são salvos no computador com uma extensão ".vi".

A Figura 2 mostra parte de um diagrama de blocos, onde estão indicadas algumas das principais estruturas do *software* LabVIEW:

- Estrutura FOR – executa um mesmo bloco de programação N vezes, em que N é o valor conectado ao terminal contador da estrutura.
- Estrutura CASE – executa blocos de programa diferentes se o valor da variável conectada ao terminal seletor for falsa ou verdadeira.
- Estrutura SEQUENCE – estrutura composta de um ou mais subdiagramas que são executados de forma seqüencial.
- SubVI – o LabVIEW permite que blocos de programas sejam agrupados em uma nova VI interna a outra VI.

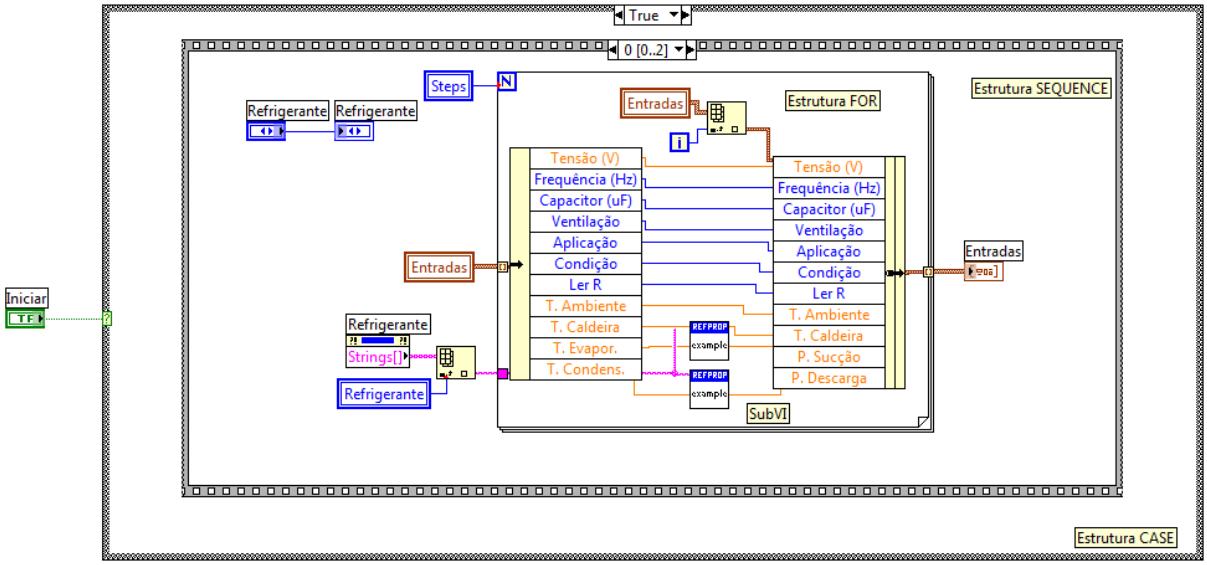


Figura 2 – Parte do diagrama de blocos do programa Steps.vi.

A Figura 3 mostra um exemplo de um painel frontal, o qual é composto basicamente de:

- Controles, a partir dos quais podemos escrever dados no programa.
- Indicadores, a partir dos quais podemos ler dados do programa.
- Decorações e textos, os quais auxiliam na clareza e estética do painel frontal.

No capítulo 2 será apresentado um resumo do circuito de refrigeração, no capítulo 3 haverá uma descrição do sistema térmico do compressor e calorímero. No capítulo 4 serão apresentados os procedimentos de teste de compressores e no capítulo 5 serão apresentados os resultados do projeto.

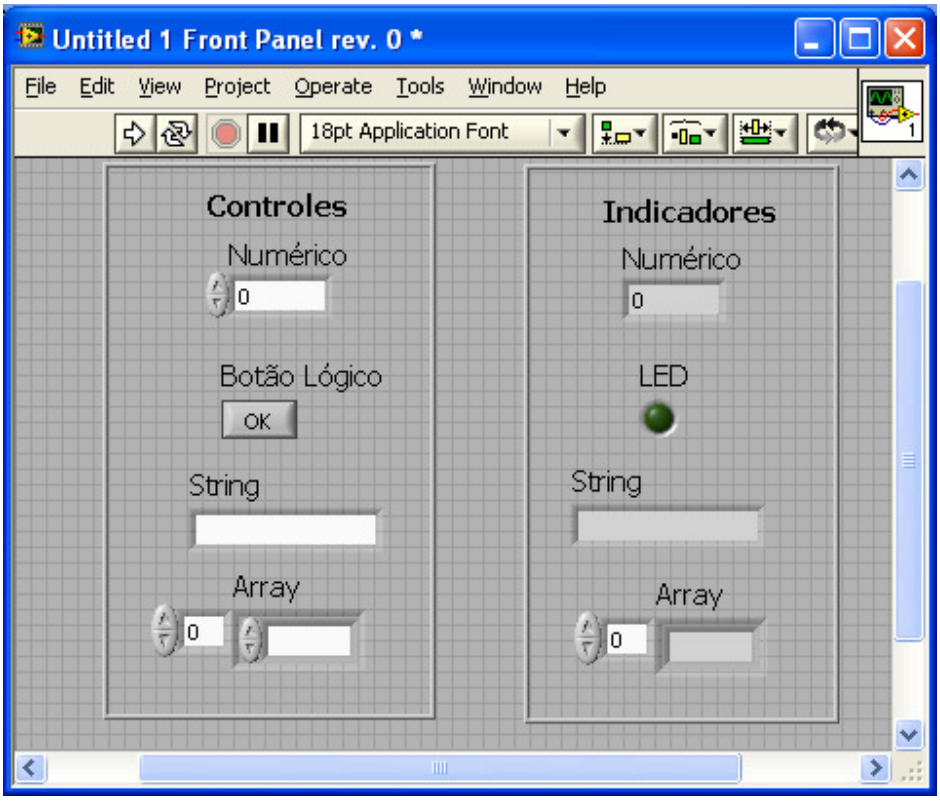


Figura 3 - Painel Frontal do LabVIEW.

2. O Circuito de Refrigeração

Numa definição bem simples, a refrigeração é a remoção do calor de um corpo. O fenômeno da refrigeração em um sistema frigorífico é resultado das transformações físicas sofridas por um fluído refrigerante durante seu percurso em um circuito de refrigeração, cujos principais componentes são: compressor, condensador, filtro secador, elemento de expansão (tubo capilar ou válvula de expansão) e evaporador.

A (b)

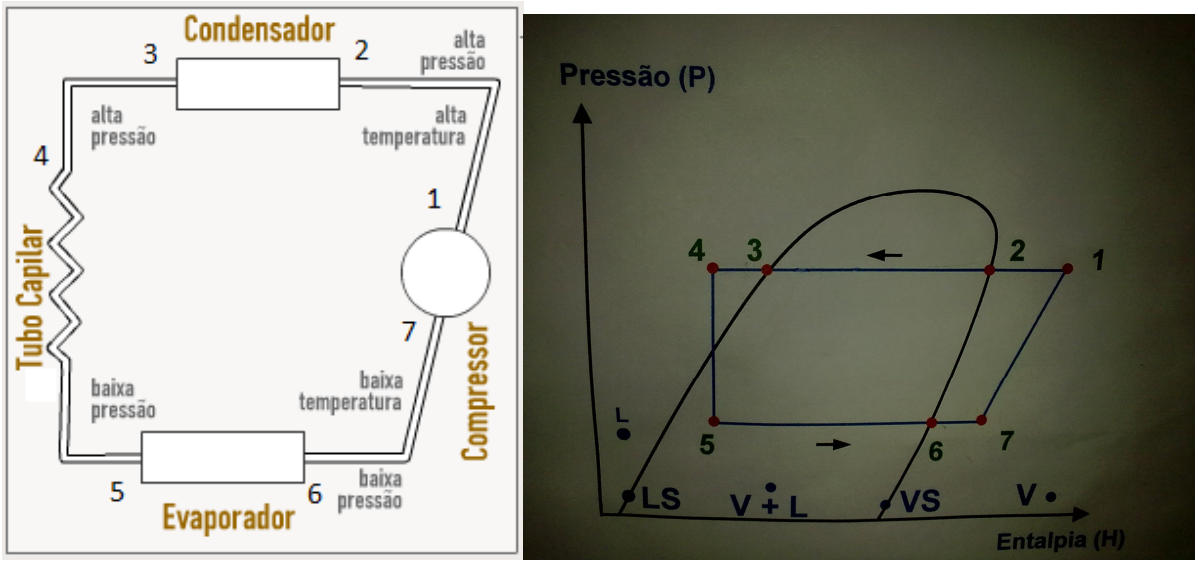
Figura 4 (a) mostra um esquema de um circuito refrigerador, o qual se inicia no compressor. Este atua como o coração do sistema de refrigeração, criando o fluxo do refrigerante ao longo dos componentes do sistema. Ele recebe o fluido refrigerante com baixa temperatura e baixa pressão e o transforma em vapor superaquecido à alta pressão e temperatura.

Como mostra a Figura 5 (a), os compressores herméticos possuem três acessos: tubo de descarga, tubo de processo e tubo de sucção. O tubo de processo é utilizado somente para injetar uma carga de gás ou realizar vácuo através do compressor. Quando está em funcionamento, são utilizados somente os tubos de sucção, por onde o refrigerante entra e o tubo de descarga, por onde o refrigerante sai.

O condensador – Figura 5 (b) – é o componente responsável por remover o calor do sistema. Nele ocorre uma troca térmica com o ar ou água, transformando o vapor em líquido subresfriado à alta pressão. Após a saída do condensador, é comum instalar-se um filtro secador – Figura 5 (c) – o qual possui internamente um material dessecante à base de sílica com a função de reter a umidade e uma tela para reter partículas sólidas.

Em seguida, o elemento de expansão promove a perda de carga do fluido refrigerante, ocasionando uma queda de pressão. O elemento de expansão pode ser um tubo de cobre com diâmetro reduzido – tubo capilar – ou uma válvula com um orifício de diâmetro bem reduzido – válvula de expansão – Figura 5 (d).

Logo após, no evaporador – que corresponde ao compartimento a ser resfriado – ocorre a evaporação do fluido, absorvendo o calor da superfície da tubulação – que fornece todo o calor latente necessário para a troca de estado físico – e abaixando a temperatura interna do compartimento. Por fim, o fluido retorna com baixa temperatura e pressão para o compressor para início de um novo ciclo. Para mais informações sobre o circuito refrigerador, consultar [7] e [8].



(a) (b)

Figura 4 – (a) Esquema de um circuito refrigerador. (b) Gráfico da pressão versus entalpia.

O gráfico da Figura 4 (b) mostra que do estágio 1 a 4 o refrigerante perde energia e vai se transformando do estado gasoso para líquido. Do estágio 4 a 5, o refrigerante sofre uma perda de pressão e do estágio 5 a 7, este vai se tornando novamente gás. Finalmente, do estágio 7 ao 1, o refrigerante é pressurizado e volta para um novo ciclo.

(a)

(b)

(c) (d)

Figura 5 – (a) Compressor hermético de ar para refrigeração. (b) Condensador com refrigeração a água. (c) Filtro secador. (d) Válvula de expansão.

3. Descrição do sistema térmico compressor e calorímetro

O Calorímetro é um instrumento utilizado na medição do fluxo de calor envolvido numa mudança de estado de um sistema, que pode envolver uma mudança de fase, de temperatura, de pressão, de volume, de composição química ou qualquer outra propriedade associada com trocas de calor.

Em um laboratório de testes de compressores, o Calorímetro é o principal instrumento utilizado para medir os fluxos de energia em um sistema de refrigeração. Dentro desse equipamento, é simulado um circuito refrigerador tal qual uma geladeira ou um ar condicionado, contendo um gás refrigerante que circula basicamente através de um compressor, um condensador, uma válvula de expansão e uma caldeira que funciona como evaporador. As Figura 6 e Figura 7 mostram um calorímetro externamente e internamente, respectivamente.

3.1. Medição de temperatura, pressão e visor de líquido

As temperaturas são monitoradas no calorímetro em diversos pontos: nas carcaças superior e inferior do compressor, nos tubos de sucção e descarga, na saída da caldeira, na entrada da válvula de expansão, a 20 cm do teto (temperatura interna do calorímetro) e próximo ao protetor térmico do compressor. Para tanto, alguns termopares são utilizados.

O termopar é um dispositivo elétrico composto pela junção de dois metais que geram uma tensão elétrica que é função da temperatura [9]. No calorímetro são utilizados termopares do tipo T que são compostos de cobre e constantan, possuem uma faixa de utilização de –270ºC a 400ºC e um erro de medição de até 1ºC.

Para monitorar as pressões de sucção, descarga e na caldeira, três transdutores de pressão são utilizados. Existem também, três pressostatos – Figura 8 – cuja função é desligar todo o equipamento se as pressões medidas ultrapassarem as pressões limites do equipamento. Na Figura 8 também é possível verificar que há três manômetros analógicos, cuja função é verificar as pressões quando o operador está na cabine interna do calorímetro.

Por fim, a Figura 8 mostra um visor de líquido, o qual serve para o operador verificar visualmente em qual estado físico o refrigerante está entrando na válvula de expansão. O correto é que seja totalmente líquido, pois a refrigeração da caldeira é feita entregando-se energia para a evaporação do fluido. Mas se o fluido entrar em estado gasoso haverá uma grande perda de rendimento do sistema de refrigeração.

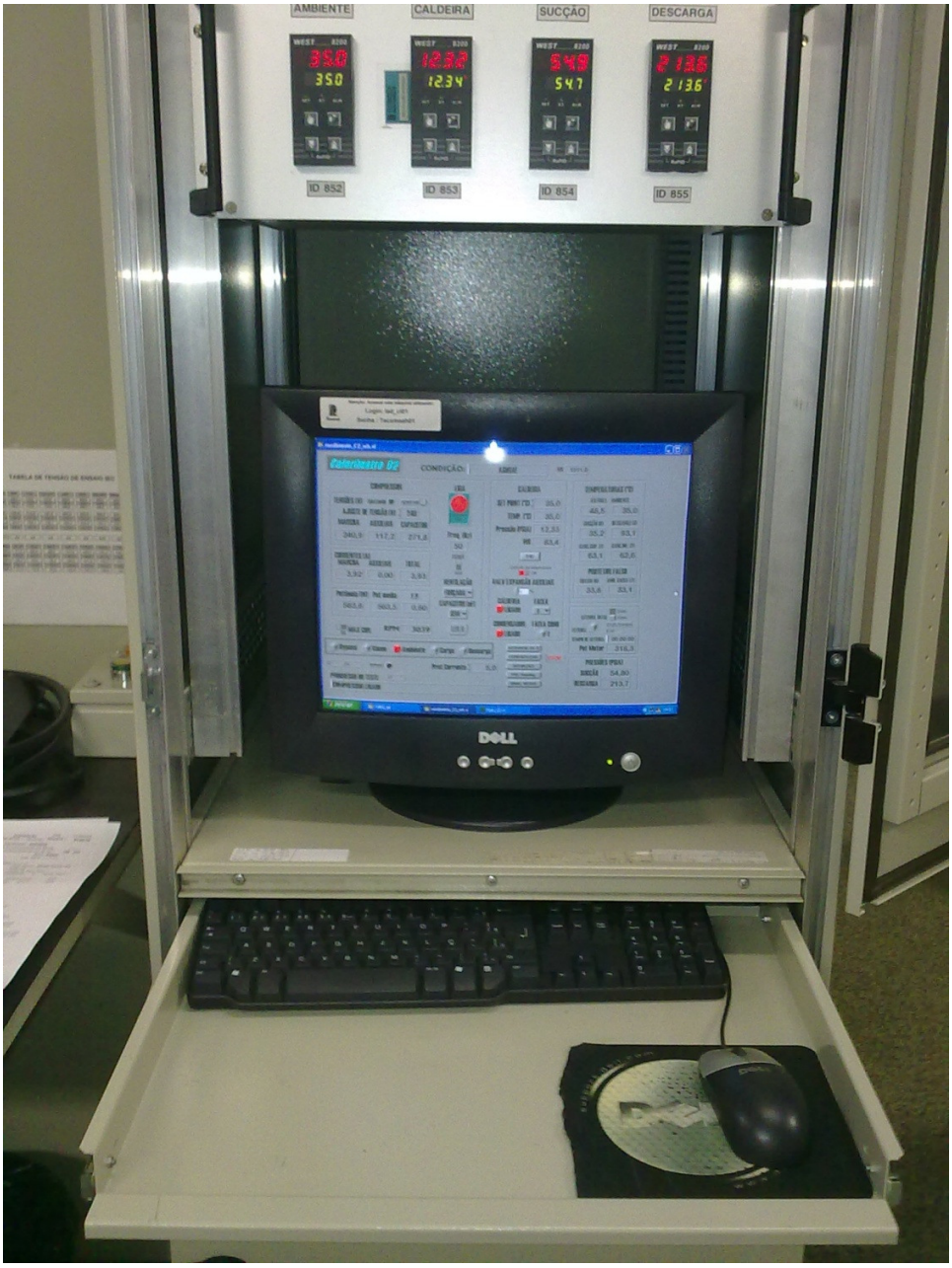


Figura 6 – Calorímetro Externamente.

Figura 7 – Calorímetro Internamente.

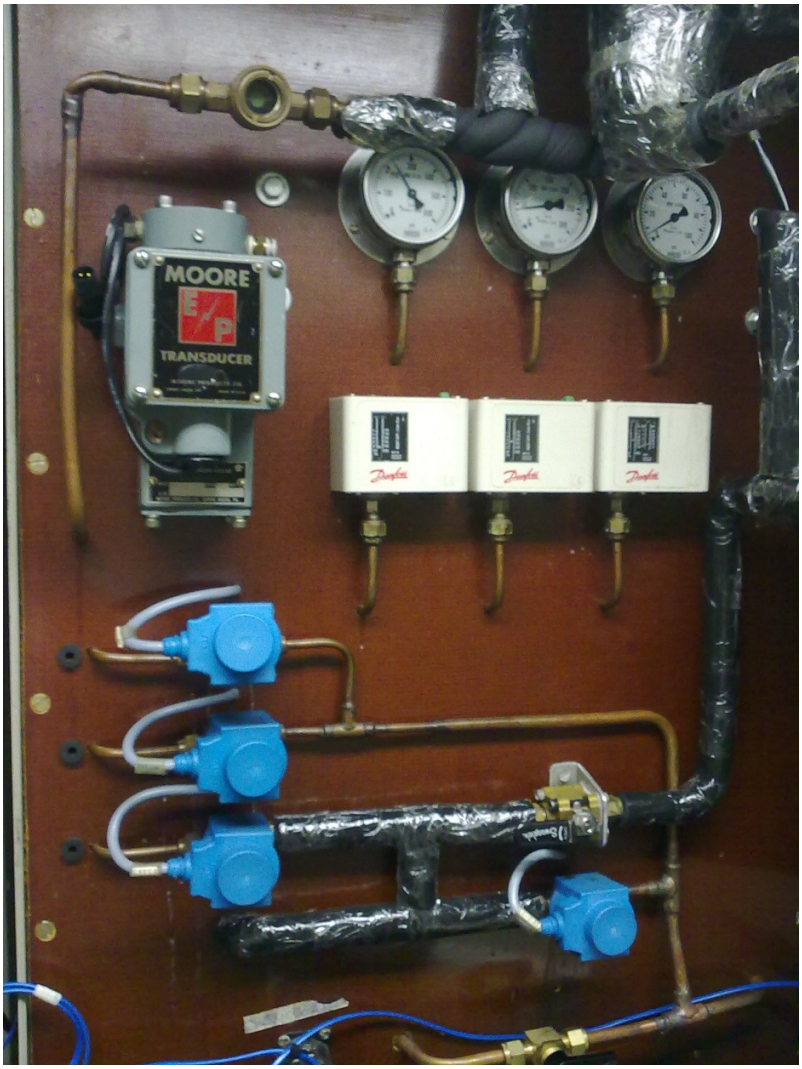


Figura 8 – Painel de calorímetro evidenciando válvulas solenóides (azul), pressostatos (branco), manômetros analógicos e visor de líquido (acima, à direita).

3.2. Válvulas solenóide

Válvulas solenóide são utilizadas no equipamento para abrir e fechar seções do sistema do calorímetro. A Figura 8 mostra quatro válvulas que são utilizadas no calorímetro:

- Válvula de *bypass*: é uma válvula que, quando aberta, permite a conexão direta das linhas de sucção e descarga, equilibrando as pressões do sistema. Se a pressão de descarga for muito superior à pressão de sucção, é demandado um torque de partida muito elevado do compressor e este não parte. Por isso, ela é aberta antes de iniciar cada teste. Após a partida do compressor, ela deve permanecer fechada.
- Válvula de Vácuo: é uma válvula que permite a ligação de um sistema de vácuo que elimina todo o ar e umidade que houver na tubulação do sistema. Quando se troca de compressor,

fecham-se dois registros de sucção e descarga. Eles permitem que se preserve todo o gás contido no resto do sistema. Apenas as mangueiras que se conectam ao compressor têm contato com o ar e deve-se eliminá-lo realizando um vácuo somente no trecho compreendido entre as mangueiras.

- Válvula de Carga: é uma válvula que permite a conexão de um cilindro pressurizado contendo gás refrigerante. A válvula deve ser aberta permitindo a entrada de uma massa de gás suficiente. Uma quantidade insuficiente de fluido refrigerante acarreta a entrada de líquido misturado com gás na válvula de expansão e excesso de gás ocasiona queda de rendimento, aquecimento do compressor e instabilidade da pressão de descarga.
- Válvula de Descarga: é a válvula que permite a retirada de gás do sistema. Este procedimento é necessário quando há excesso de gás ou quando se troca de fluido refrigerante.

3.2. Controladores

A Figura 9 mostra os quatro controladores existentes no calorímetro.

- Controlador da temperatura ambiente: controla um conjunto de resistência e ventilação – Figura 10 – para manter a temperatura interna do calorímetro de acordo com as especificações.
- Controlador da pressão interna à caldeira: internamente à caldeira, está situada uma carga resistiva, que simula, num sistema refrigerante, a carga que deve ser resfriada por um refrigerador. O controlador regula a tensão que deve ser entregue às resistências. Para aumentar a pressão, aumenta-se a tensão nas resistências e o inverso também se aplica.
- Controlador da pressão de sucção: a válvula de expansão possui um orifício que pode ser parcialmente obstruído por uma agulha – Figura 5 (d). O controlador aciona um motor de passo que gira no sentido anti-horário, fechando o orifício com a agulha e aumentando a pressão de sucção ou no sentido horário, provocando o efeito contrário.
- Controlador da pressão de descarga: como já mencionado, o condensador é refrigerado a água. O controle funciona abrindo e fechando o fluxo de água – controle *on-off* – através de uma válvula. Quanto maior o tempo em que a válvula permanece aberta, menor é a pressão de descarga.

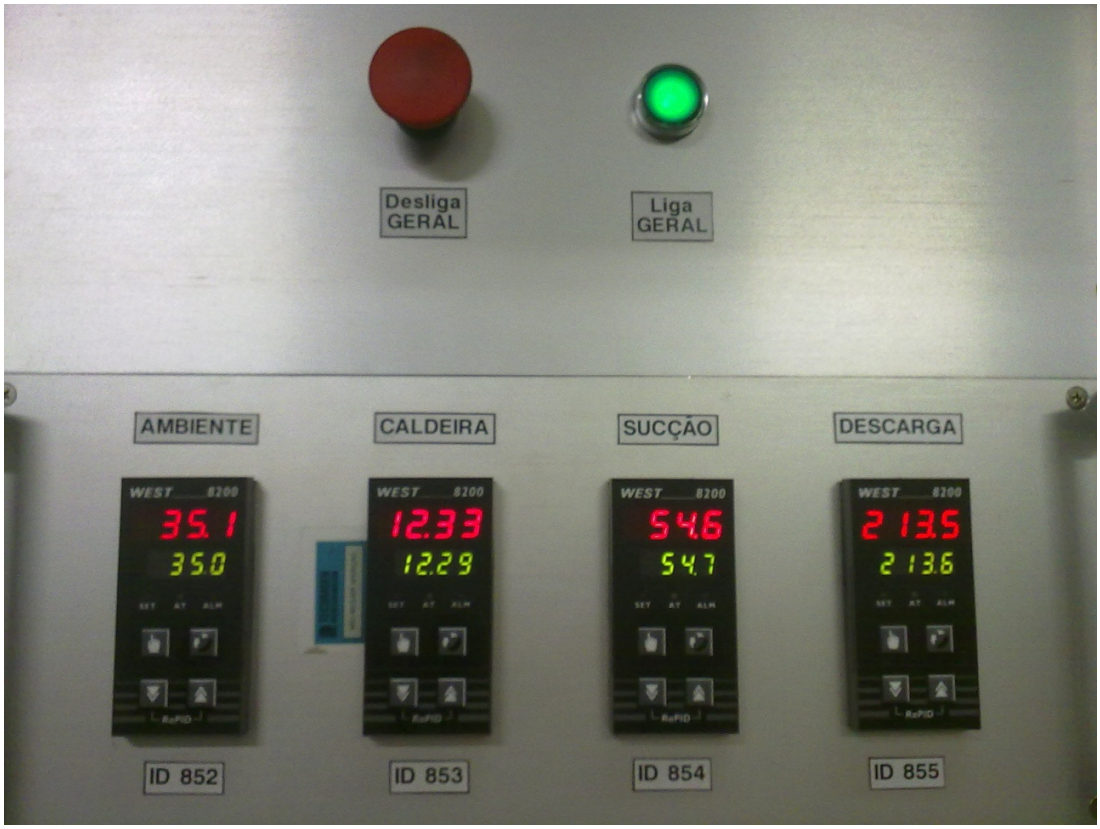


Figura 9 – Controladores do calorímetro.

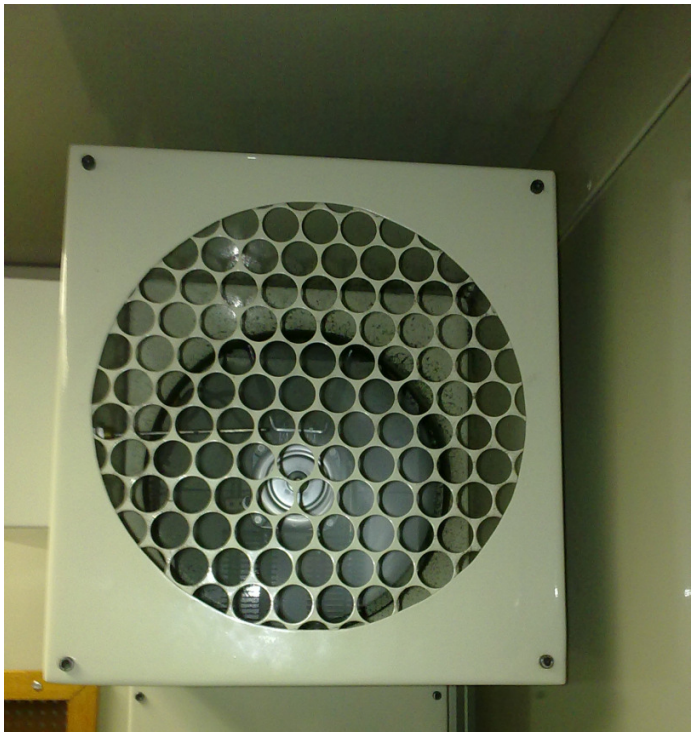


Figura 10 – Sistema de controle de temperatura ambiente.

3.3. Análise de desempenho

Os compressores são analisados principalmente quanto ao índice de eficiência energética (EER) – do inglês *Energy Efficiency Ratio* – que indica a razão da capacidade frigorífica do compressor, em BTU/h, pela potência absorvida pelo mesmo, em W – equação (1). Portanto, quanto maior o EER, melhor é a eficiência energética do compressor.

$$EER = \frac{Capacidade\ [BTU/h]}{Potência\ [W]} \tag{1}$$

Outro parâmetro utilizado é o fluxo de massa de gás bombeada pelos compressores dado pela razão da capacidade térmica do compressor pela entalpia do refrigerante na válvula de expansão – equação 2.

$$Massa = \frac{Capacidade\ [BTU/h]}{\Delta H\ [BTU/lb]}\ [lb/h] \tag{2}$$

A entalpia é uma grandeza física que busca medir a energia contida em um sistema termodinâmico [10]. Portanto, para cada fluido, dadas temperatura e pressão, é possível obter o valor da entalpia.

Todas essas e outras propriedades dos gases foram extraídas utilizando-se de uma biblioteca de dados do *software* RefProp (*Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties*) [11], através do qual também é possível obter-se as curvas de saturação de gases puros, como o R134a – Figura 11 – e de mistura de gases, como o R404a – Figura 12. A curva de saturação indica as temperaturas de condensação para diferentes pressões. Abaixo da curva, o estado físico do refrigerante é líquido e acima da curva, gasoso.

O refrigerante R404a é composto de 44% de R125, 52% de R143a e 4% de R134a. Por ser uma mistura, este apresenta duas curvas de saturação indicando o início e o término da condensação. Para uma pressão constante, a condensação inicia numa temperatura na qual o líquido apresenta a primeira bolha. Este ponto é chamado de ponto de bolha.

À medida que o refrigerante recebe calor latente, os estados líquido e gasoso coexistem até a temperatura em que a última gota está na iminência de se transformar em gás. Este ponto é chamado de ponto de orvalho.

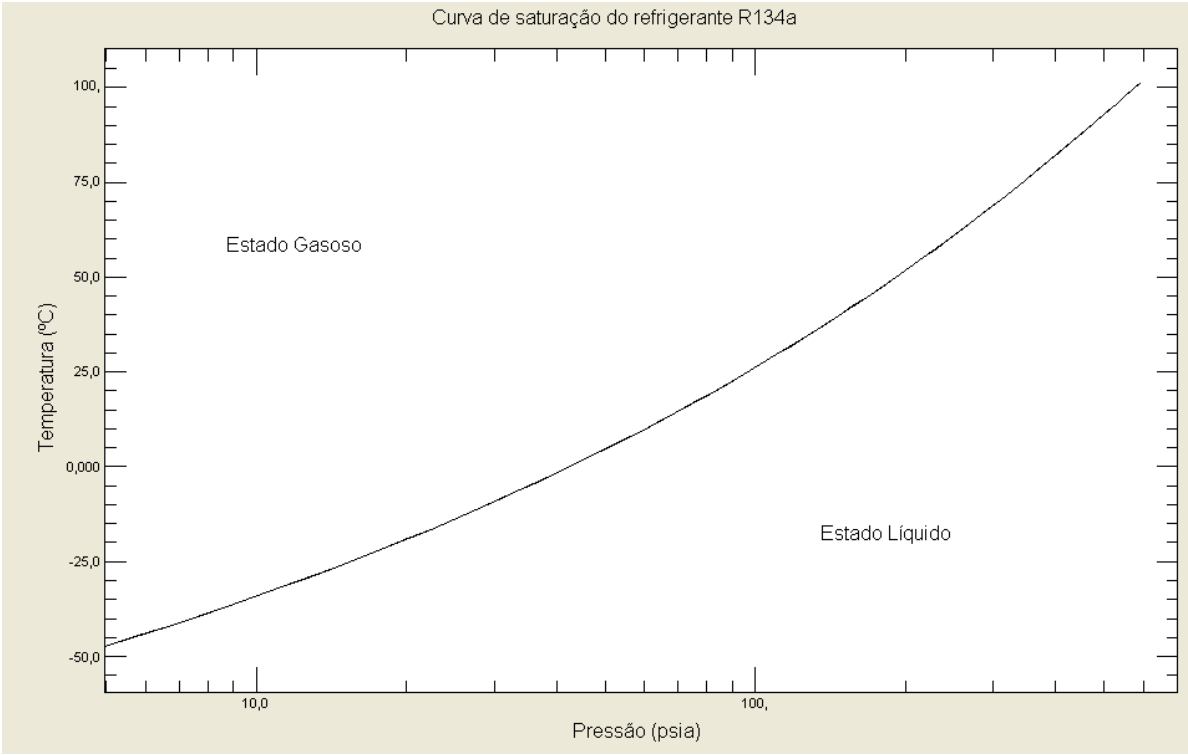


Figura 11 – Curva de saturação do refrigerante puro R134a.

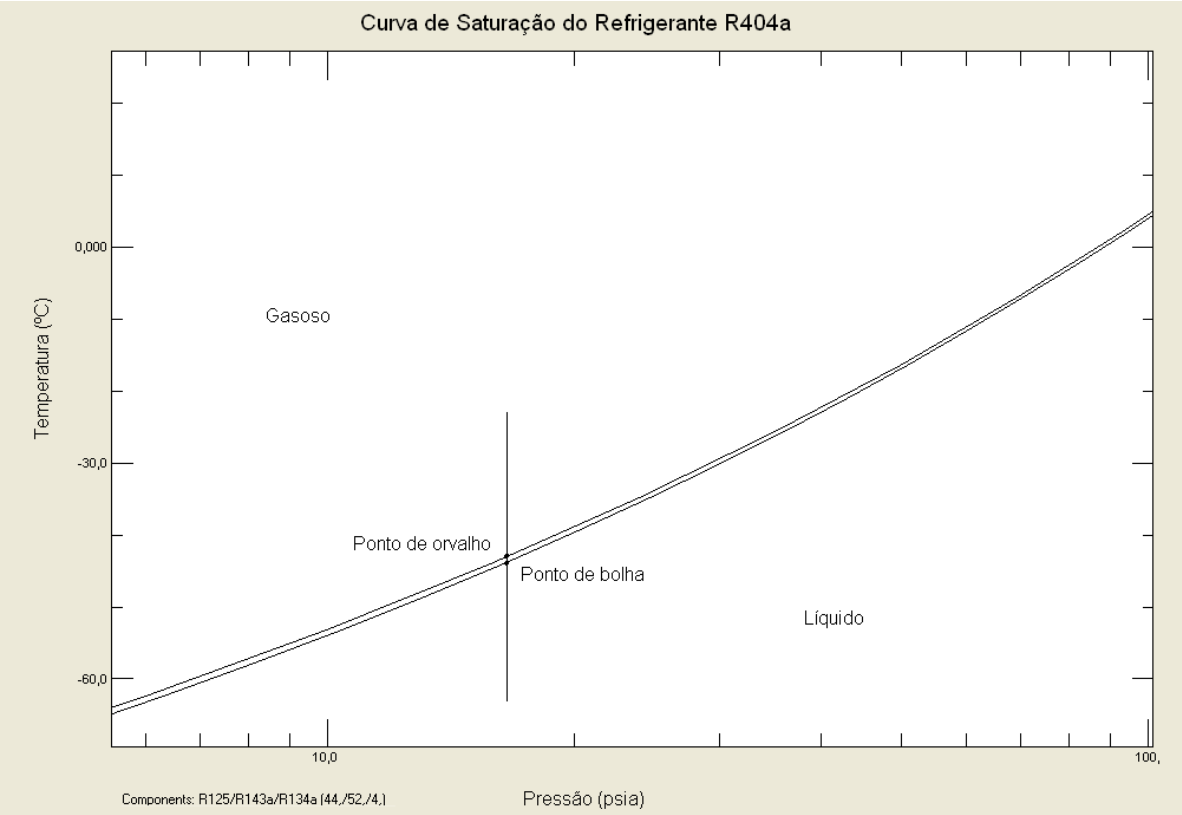


Figura 12 – Curva de saturação da mistura de refrigerantes R404a.

4. Procedimento de testes

Todos os procedimentos de testes são elaborados segundo normas internas à empresa [12-13]. Nos calorímetros do laboratório, existe um programa, elaborado anteriormente por outros programadores, denominado "Rendimento.vi" que controla toda a instrumentação do calorímetro. A Figura 13 mostra o painel frontal do programa.

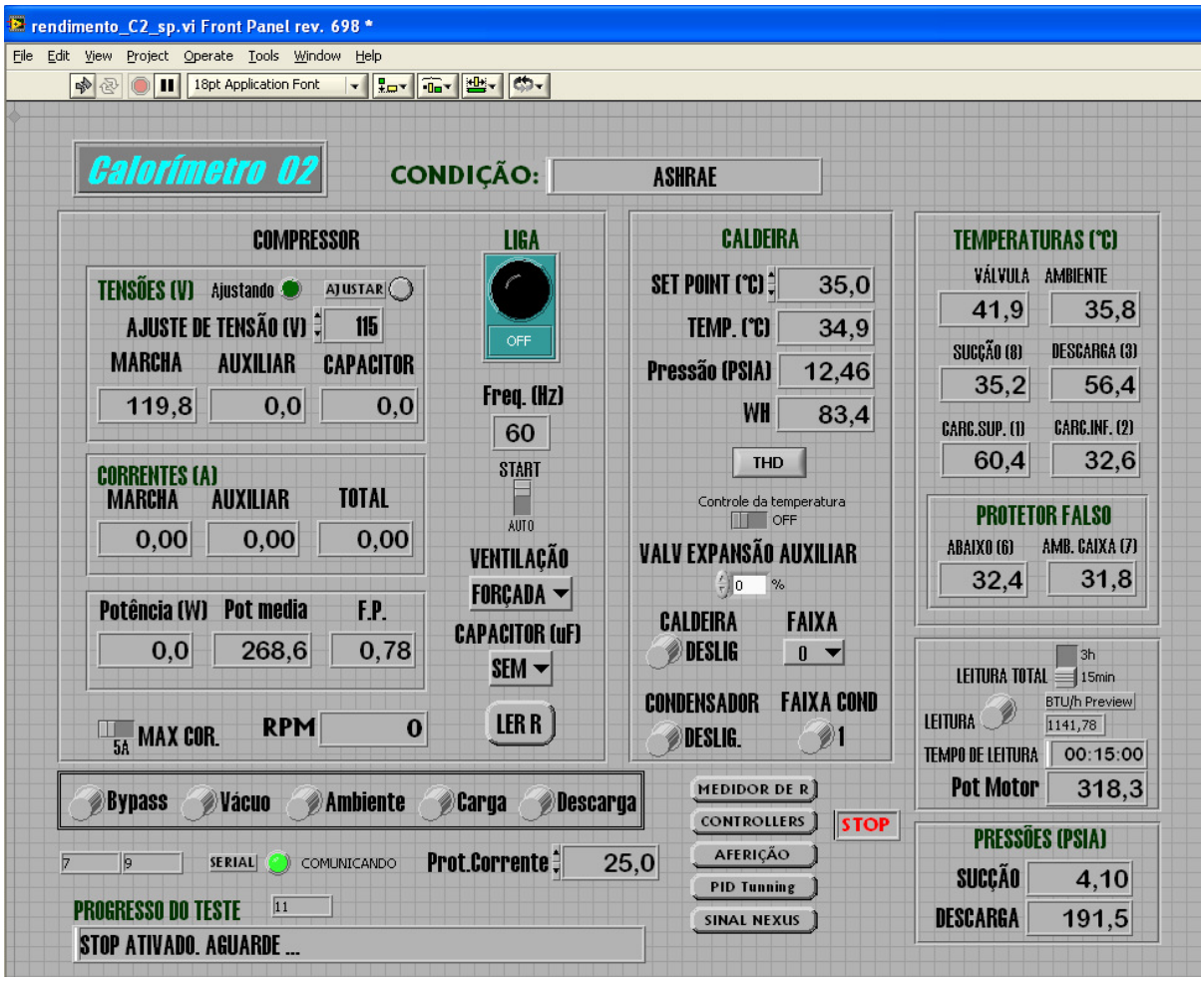


Figura 13 – Painel Frontal do programa principal Rendimento.vi.

Esta tela de supervisão possui diversos controles e indicadores que permitem ao operador entrar com dados e obter dados do equipamento, os quais são explicados a seguir.

- Controles:

a) Controle da válvula solenóide que injeta carga de gás no sistema refrigerante (Carga).

b) Controle da válvula que equilibra as pressões de sucção e descarga do compressor (*Bypass*).

c) Controle da válvula que faz vácuo no sistema (Vácuo).

d) Controle da válvula que retira gás do sistema para reciclagem (Descarga).

e) Controle da temperatura ambiente (Ambiente).

f) Controle de um ventilador posicionado em frente ao compressor (Ventilação). Alguns compressores necessitam de uma refrigeração a ar, através de um ventilador. Quando não se utiliza o ventilador, a ventilação é chamada de Natural. Quando o teste é realizado com o ventilador ligado, a ventilação é chamada Forçada.

g) Controle da introdução de valores de capacitores de partida (Capacitor (uF)). Os compressores são fabricados com um motor de indução monofásico, e alguns necessitam de um capacitor para fornecer um torque de partida maior [14]. Assim, esse controle promove o acionamento de contatores que acionam bancos de capacitores (2,5µF a 35µF).

h) Controle do fundo de escala de corrente (MAX COR.). Pode ser 5A ou 25A.

i) Controle que ajusta o valor da tensão no compressor. (Ajuste de tensão (V)). Basta inserir o valor da tensão e apertar o botão "Ajustar".

j) Controle da abertura da válvula de expansão auxiliar. É um controle numérico que aceita valores de 0 a 100%.

k) Controle da faixa da caldeira (Faixa). É um controle enumerado de 0 a 3. Zero representa a ligação de apenas uma resistência e três representa a ligação de quatro resistências.

l) Controle da ligação do segundo condensador (Faixa Cond). O número 1 significa que está ligado apenas o primeiro condensador e o número 2 indica que o segundo condensador está ligado.

m) Controle da proteção de corrente. É uma proteção por *software* que desliga o compressor se a corrente ultrapassar o valor do controle.

n) Controle que mostra na tela o valor do parâmetro Power dos controladores da caldeira, sucção e descarga, como mostra a Figura 14.

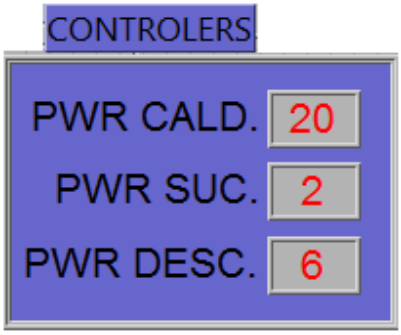


Figura 14 - Parâmetro Power dos controladores.

o) Botão *Stop*, que encerra o programa.

p) Botão Liga, que liga o compressor.

A Figura 15 indica a posição dos controles explicados acima.

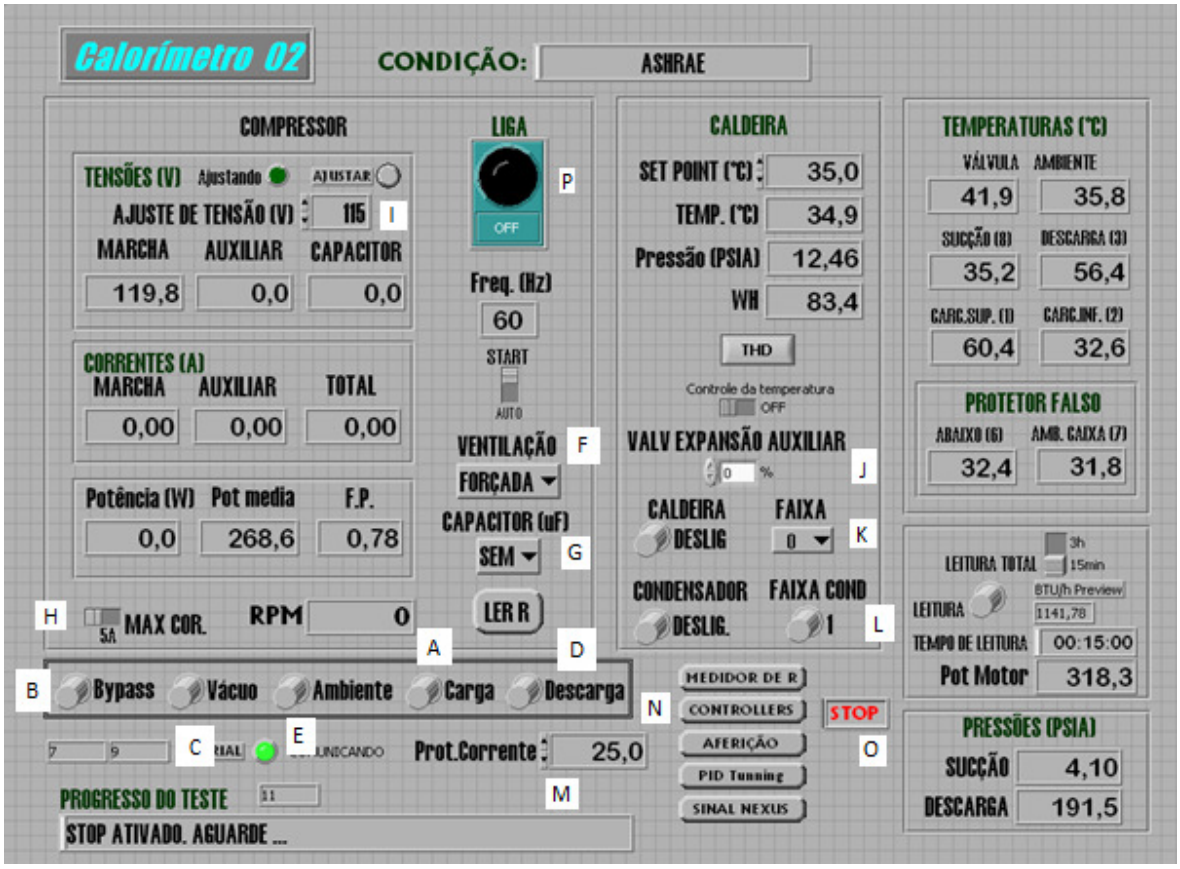


Figura 15 – Posição dos controles no programa Rendimento.vi.

- Indicadores:

a) Indicadores de tensões de marcha, auxiliar e capacitor. Todos os compressores possuem três terminais: marcha, auxiliar e comum. A tensão de marcha é a tensão aplicada entre os terminais marcha e comum, onde está situada a bobina principal do motor do compressor. A tensão de auxiliar é a tensão aplicada entre os terminais auxiliar e comum na partida do motor, onde está situada a bobina auxiliar de partida. Quando é inserido um capacitor permanente, tem-se a tensão de capacitor.

b) Indicadores de correntes de marcha, auxiliar e total. A corrente total é a soma das correntes de marcha e auxiliar.

c) Indicadores de pressão de sucção, descarga e caldeira. A pressão de sucção é a pressão do gás refrigerante na linha de entrada do compressor. A pressão de descarga é a pressão do gás na linha de saída do compressor e a pressão da caldeira é a pressão interna à caldeira.

d) Indicadores de temperaturas captadas por termopares situados na válvula de expansão (Válvula), no tubo de gás na entrada do compressor (Sucção (8)), na carcaça superior do compressor (Carc. Sup. (1)), na carcaça inferior do compressor (Carc. Inf. (2)), na caldeira (Temp. (ºC), no tubo de gás na saída do compressor (Descarga (3)), a 20 cm abaixo do teto da cabine do calorímetro (Ambiente) e próximo ao protetor de sobrecorrente (Abaixo (6) e Amb. Caixa (7)).

e) Indicadores de potências média (Pot Media) e instantânea (Potência(W)) do compressor e Fator de Potência (F.P.).

f) Indicador da energia consumida pela caldeira (WH). Existe um medidor de energia elétrica que mede a energia consumida pelas resistências elétricas da caldeira. Seu valor é mostrado para o operador neste indicador.

g) Indicador de rotações do motor (RPM). Um acelerômetro Endevco [15], que é um instrumento desenvolvido para medir vibrações em estruturas, é posicionado no corpo do compressor e através de sua vibração é possível determinar sua freqüência de rotação.

h) Indicador de Freqüência (Hz). O compressor pode funcionar em 50 ou 60 Hz.

i) Indicador da condição do teste (Ashrae, Cecomaf, Ari ou Outra).

j) Indicador do progresso do teste – exibe algumas mensagens para o operador como "Stop ativado. Aguarde..." ou "Inativo".

k) Indicador das resistências das bobinas de marcha e auxiliar do motor (Medidor de R). Ao apertar o botão, a janela da é mostrada.

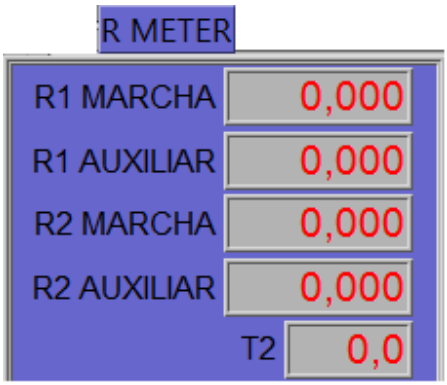


Figura 16 – Indicador de resistências.

Como não é possível inserir um termopar para medir a temperatura interna do compressor ao final de um teste, o artifício utilizado é um ensaio DC, o qual consiste em injetar uma corrente DC nas bobinas do motor e medir sua tensão. Através da 1ª lei de Ohm [16] – equação 3 – é possível calcular as resistências das bobinas de marcha e auxiliar e a equação 4 é utilizada para se obter as temperaturas das mesmas ao final do teste [12-13]. Esta equação expressa a temperatura do condutor em função do valor de sua resistência elétrica.

$$V = R_2 . I \rightarrow R_2 = \frac{V}{I} \tag{3}$$

$$T_2 = \frac{R_2}{R_1} . (K + T_1) - K \tag{4}$$

Onde R_2 é o valor da resistência na temperatura final de teste T_2, R_1 é o valor da resistência na temperatura ambiente T_1 e K=234,5 para o cobre ou K=225,7 para o alumínio.

A Figura 17 mostra a posição dos indicadores no painel frontal.

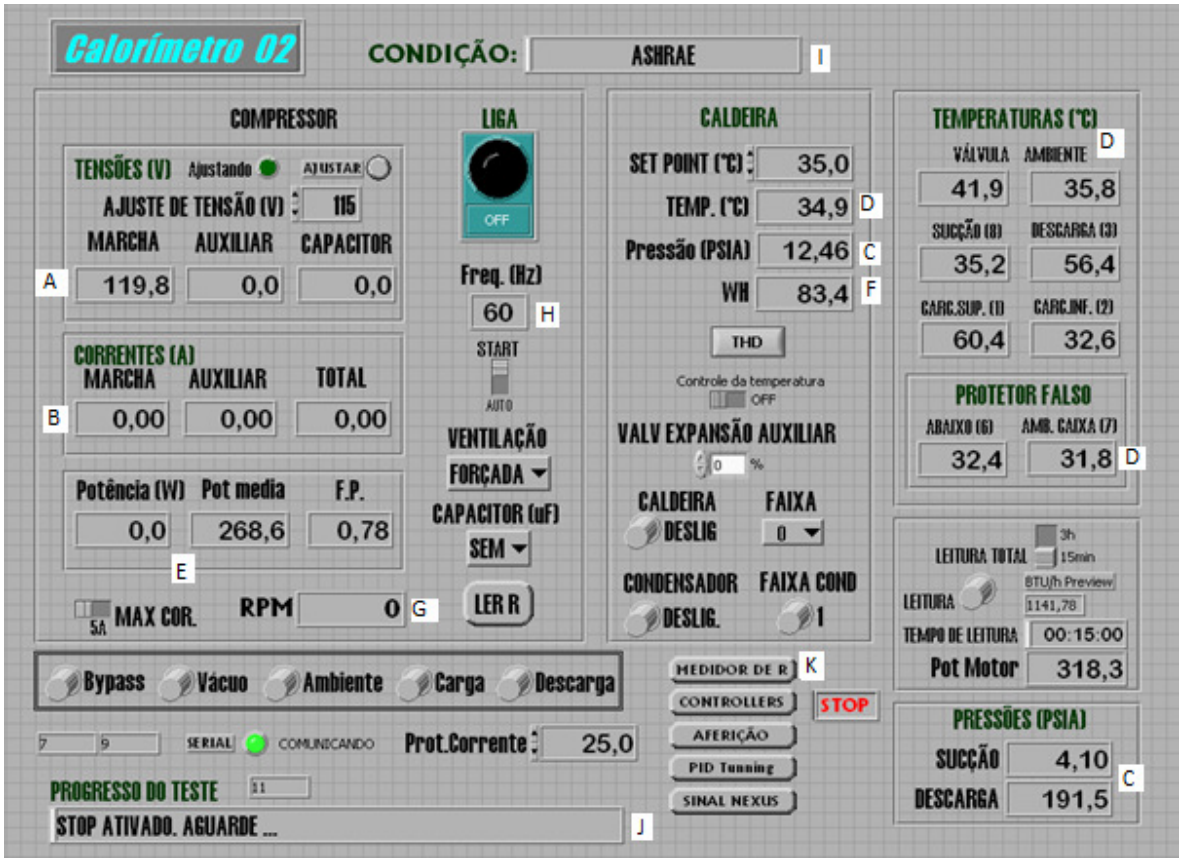


Figura 17 – Posição dos indicadores no programa Rendimento.vi.

4.1. Ajustes e critérios de estabilização

Após instalar o compressor, o operador aciona um sistema de vácuo para retirar todo ar e umidade que houver nas mangueiras do compressor. Em seguida, injeta-se uma carga de gás no sistema e aciona-se o *bypass* para equilibrar as pressões de sucção e descarga. Uma vez ajustadas a freqüência e tensão do compressor, liga-se o mesmo, pressionando o botão Liga. Após ligar o compressor, o operador deve:

- Ajustar o fundo de escala de corrente. Se a corrente do motor for inferior a 5A, a chave "Max. Cor." deve estar na posição 5A. Se a corrente for superior a 5A, a chave deve estar na posição 25A.
- Ajustar a tensão corretamente. A tensão no compressor deve ser a mesma da tensão especificada com tolerância de mais ou menos 1V.
- Ajustar a faixa da caldeira. A caldeira possui internamente quatro resistências e, dependendo da capacidade do compressor, deve-se ligar um número determinado de resistências.
- Ajustar a faixa do condensador. Nos calorímetros existem dois condensadores ligados em série. Em alguns casos é necessário ligar o segundo condensador para atingir a pressão de descarga solicitada.

- Ajustar a válvula de expansão auxiliar. Nos calorímetros existem duas válvulas de expansão. Quando a primeira válvula não consegue fornecer a pressão de sucção setada, a Segunda válvula deve entrar em operação.

Após terem sido realizados todos os ajustes, o operador deve esperar por duas horas até que se cumpram os seguintes critérios de estabilização:

- Todas as temperaturas indicadas não devem variar mais do que 1ºC por um período de 20 minutos. Em especial, as temperaturas ambiente e da caldeira devem estar numa faixa de mais ou menos 1ºC dos valores de *setpoint* escolhidos para as mesmas.
- Todas as pressões não devem variar mais do que 0,8 PSIA em relação aos valores setados para as mesmas.
- A tensão de marcha deve estar na faixa de mais ou menos 1 V do Ajuste de Tensão setado.

Uma vez atingidas as condições de estabilização, é possível fazer leituras da energia consumida na caldeira por períodos de 15 ou 30 minutos. Basta selecionar o período de leitura desejado, pressionar o botão Leitura e o medidor de energia é acionado durante o período selecionado. Ao final de duas ou três leituras de 15 ou 30 minutos, calcula-se a média da energia consumida na caldeira.

5. Resultados

5.1. Alterações no programa principal "Rendimento.vi"

Para que fosse possível realizar testes sem a necessidade de um operador, foi necessário fazer alterações no programa "Rendimento.vi". A Figura 18 mostra parte do diagrama de blocos desenvolvida para substituir todos os ajustes que antes eram realizados por um operador durante um teste, conforme explicitado na seção 4.1. É uma estrutura *FOR* que se executa a cada 60 segundos desde que o operador não tenha pressionado *stop* (apertando *stop*, aciona-se uma *flag* chamada "*stop* ativado" que determina o fim da execução da estrutura *FOR*). Se o compressor estiver ligado, então a lógica é executada:

- Controle da faixa da caldeira: se a pressão da caldeira for inferior à pressão de *setpoint* e o *power* do controlador for superior a 98, então aciona-se uma nova resistência à caldeira. Se a pressão da caldeira for superior à pressão de *setpoint* e o *Power* do controlador for inferior a 5, remove-se uma resistência.
- Ajuste de tensão: se a tensão de marcha diferir de um valor acima de 1,3V do *setpoint*, então a tensão é ajustada.
- Controle da faixa do condensador: se a pressão de descarga for inferior ao *setpoint* e o Power do controlador for superior a 98, aciona-se o segundo condensador. Se a pressão de descarga for superior ao *setpoint* e o *Power* do controlador for inferior a 20, desliga-se o segundo condensador.
- Controle da carga de gás: um cálculo é efetuado para verificar se o estado físico do refrigerante na válvula de sucção é gasoso. Se for esse o caso, o algoritmo injeta uma carga de gás para garantir que entre apenas líquido na válvula.
- Controle da válvula de expansão auxiliar: se a pressão de sucção for inferior ao *setpoint*, o *Power* do controlador da sucção for superior a 98, abre-se a válvula auxiliar em 3% (numa escala de 0 a 100%, 0% significa que a válvula auxiliar está totalmente fechada e 100% indica abertura total). Se a pressão de sucção for superior ao *setpoint* e o *power* do controlador da sucção for inferior a 50, fecha-se a válvula auxiliar em 3%.

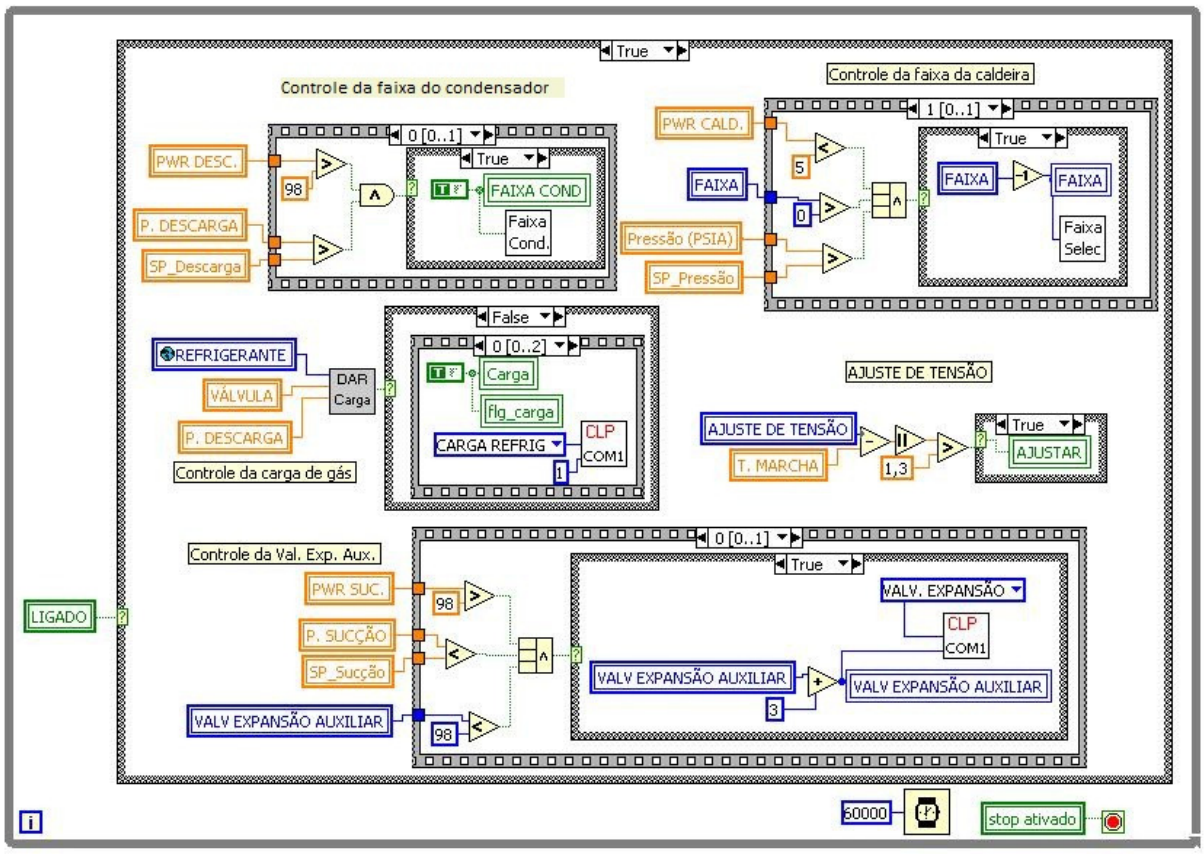


Figura 18 – Parte do diagrama de blocos desenvolvido no programa “Rendimento.vi”.

A Figura 19 mostra as demais alterações feitas no diagrama de blocos do programa “Rendimento.vi”. São três estruturas *FOR* executando as seguintes lógicas:

- A estrutura *for* de cima é responsável por trocar de condição de teste. Assim que um teste acaba, um *flag* chamado “fim” torna-se verdadeiro e se ainda houverem testes para serem realizados, as novas condições – freqüência, tensão, ventilação, temperatura da caldeira... - são inseridas.
- A segunda estrutura é utilizada para trocar o fundo de escala da medição de corrente, quando o compressor estiver ligado. Se a corrente for maior que 7, a escala de 25A é utilizada e se a corrente for menor que 6, troca-se para a escala de 7,5A.
- A última estrutura serve para enviar o valor de todos os indicadores para o programa “Scan.vi” através de protocolo TCP/IP.

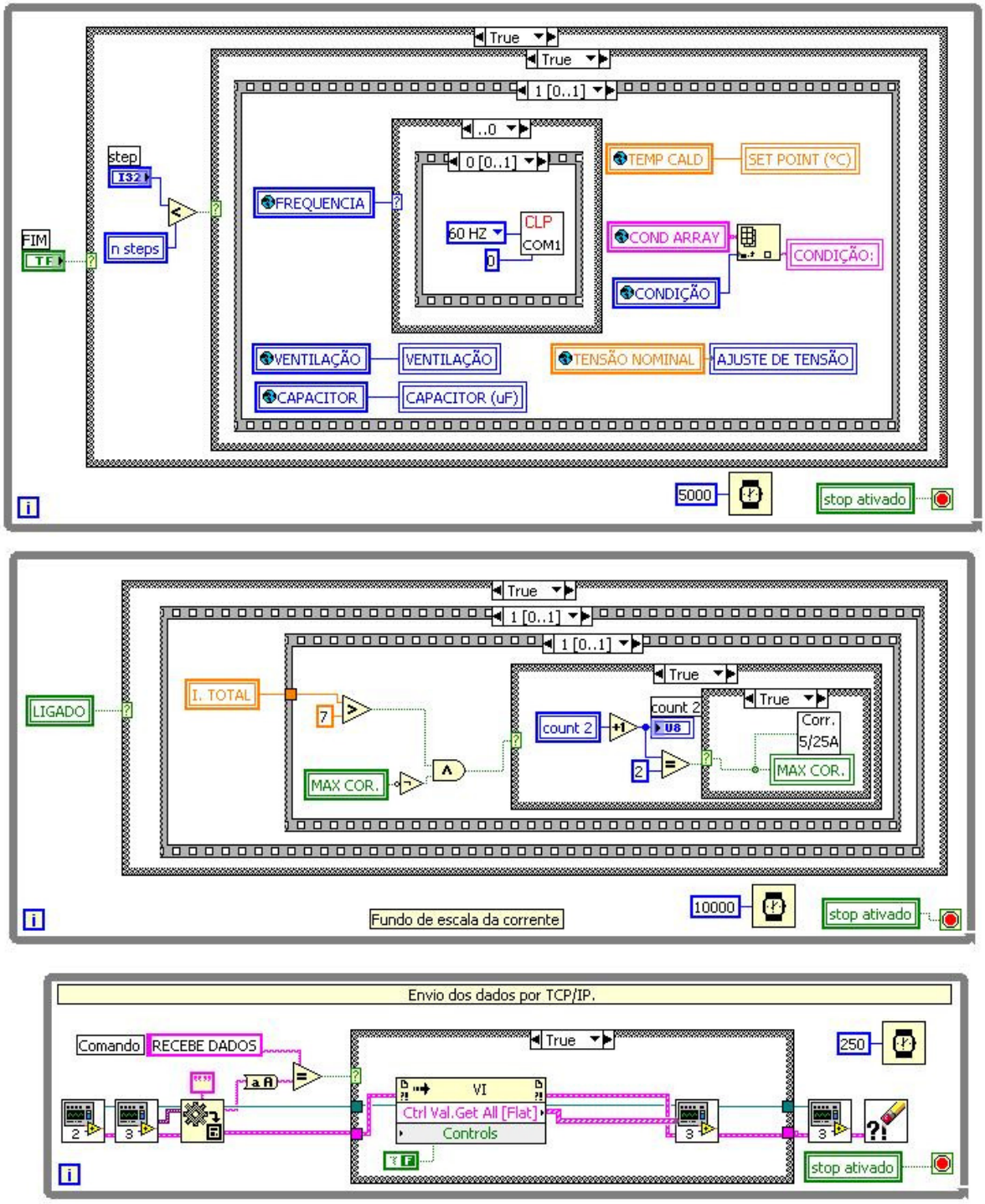


Figura 19 – Parte do diagrama de blocos desenvolvido no programa “Rendimento.vi”.

5.2. Programação de condições de testes – Steps.vi

Uma necessidade do laboratório era a possibilidade de se programar diversas condições de teste, executá-las de forma automática, verificando sempre as condições de estabilização conforme explanado na seção

4.1 e imprimir um relatório de cada teste, sem a necessidade de um operador. Para solucionar tal problema, o programa denominado “Steps.vi” foi desenvolvido. A Figura 20 mostra o painel frontal do programa.

Figura 20 – Painel frontal do programa Steps.vi.

O programa Steps.vi recebe como entrada de 1 até 30 Steps, em que cada Step representa uma condição de teste diferente. Como condição de teste subentende-se:

a) Tensão de alimentação do compressor;
b) Freqüência da tensão de alimentação do compressor;
c) Valor de capacitor de partida do compressor (este pode estar presente ou não);
d) Tipo de ventilação: forçada ou natural;
e) Tipo de aplicação, que é um código de 0 a 9 indicando a pressão de sucção e o torque de partida do compressor;
f) Nome da condição do teste, que pode advir de normas padrões de testes de calorímetros (Ashrae, Ari, Cecomaf ou Outra);
g) Escolha por fazer ou não a leitura das resistências das bobinas de marcha e auxiliar. Estas leituras de resistências são feitas com o compressor desligado. Portanto, quando não são requisitadas as leituras de resistências, não é necessário desligar o compressor de um teste para outro.
h) Temperatura ambiente do calorímetro;
i) Temperatura interna à caldeira;
j) Temperatura de evaporação;

k) Temperatura de condensação.

l) Temperatura de norma do líquido na válvula de expansão.

m) Gás Refrigerante utilizado no teste, os quais podem ser puros ou uma mistura de gases. Os gases puros são: R12, R22, R600a – isobutano, R290 – propano. As misturas são: R410A, R404A, R407C, R402B.

É possível ainda, salvar no arquivo toda configuração da seqüência de testes com um nome, através do botão SALVAR ou carregar uma seqüência de testes já salva anteriormente, pressionando o botão Carregar.

Uma vez preparada a programação dos testes, basta clicar em Iniciar e toda a seqüência é enviada através de protocolo TCP/IP para o programa principal, que irá rodar cada uma das condições de testes programada de forma automática.

Em seguida é aberta uma tela onde é inserida toda a documentação dos testes, como mostra a Figura 21. Fazem parte da documentação informações como técnico responsável, modelo do compressor testado, peso do compressor antes e após o teste, número do protótipo etc. É fundamental que o operador insira o tipo de fio utilizado nas bobinas de marcha e auxiliar do motor, podendo ser de alumínio ou de cobre. Todos esses dados irão para o relatório final.

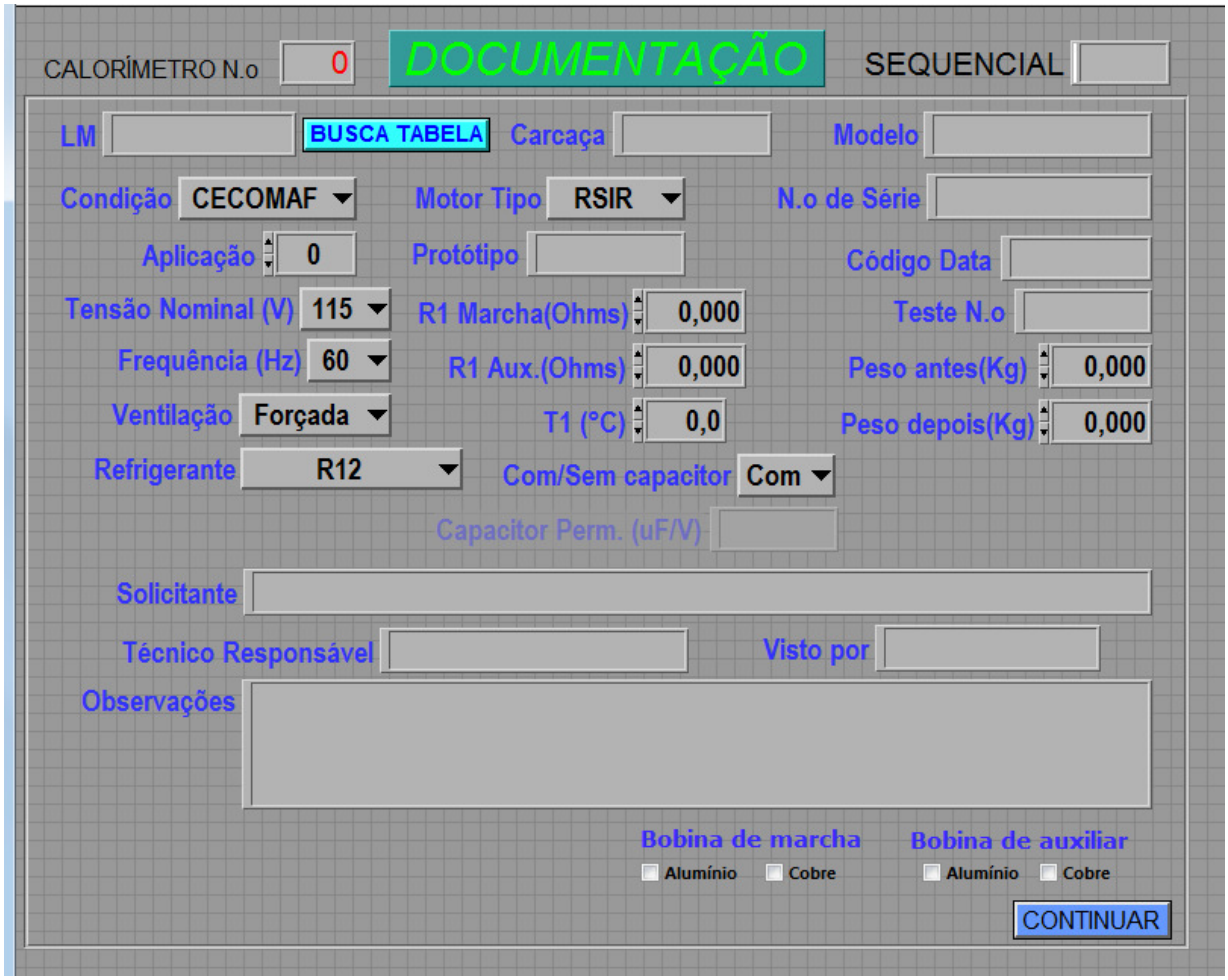


Figura 21 – Tela de entrada de dados de documentação do teste.

5.3. Verificação de condições de estabilização – Scan.vi

Uma vez inserida a documentação, o painel frontal da subVI Scan.vi é mostrada para o usuário, como mostrado na Figura 22. A subVI foi desenvolvida para verificar de forma automática quando o teste é considerado estável para medições das diversas grandezas envolvidas no teste.

Figura 22 – Painel Frontal do Programa Scan.vi.

O programa "Scan.vi", após pressionar-se o botão "Ler", inicia o recebimento dos valores dos indicadores de medidas elétricas, temperaturas e pressões do programa Rendimento.vi minuto a minuto através de protocolo TCP/IP. Essas grandezas são também analisadas minuto a minuto em relação a sua estabilização. À frente de cada grandeza, possui um *led* que só permanece aceso quando a variável está estabilizada. Quando todas as variáveis estão estabilizadas, todos os *leds* ficam verdes e uma mensagem ("ESTABILIZADO!") aparece no final da página indicando que o teste está estável.

Além disso, o programa calcula a média, o desvio padrão e a diferença entre o valor máximo e mínimo de cada variável considerando os últimos 20 minutos de teste. É possível escolher após quantos minutos estável deve-se parar o teste. Ao final do teste, o programa encerra as leituras e envia uma ordem para o programa "Rendimento.vi" trocar de condição. Enquanto isso, o valor médio de todas as variáveis são enviados para um relatório e todo o teste é armazenado em uma planilha. Com os dados armazenados na planilha é possível fazer gráficos do comportamento das grandezas pelo tempo, conforme mostram as Figura 23 e Figura 244, com os quais é possível verificar quando cada uma das variáveis medidas atinge a estabilização e estimar o tempo total de teste para cada uma das condições.

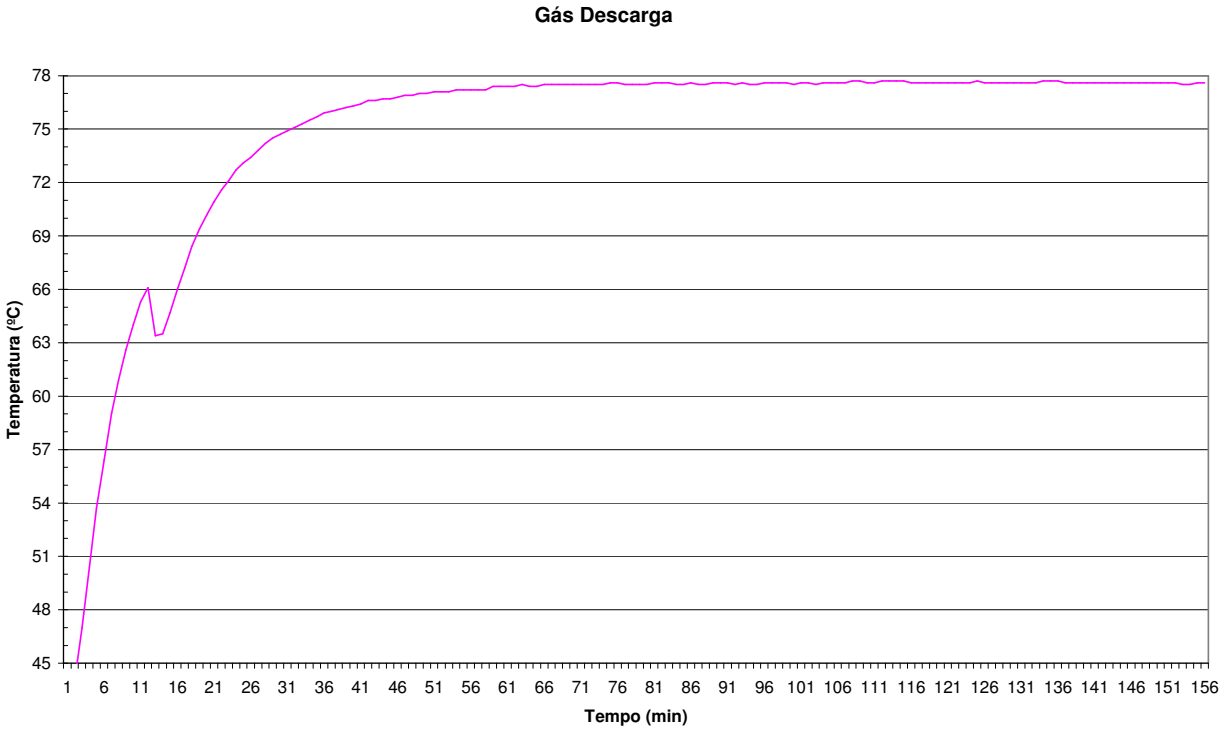


Figura 23 Comportamento da temperatura do gás refrigerante na descarga pelo tempo.

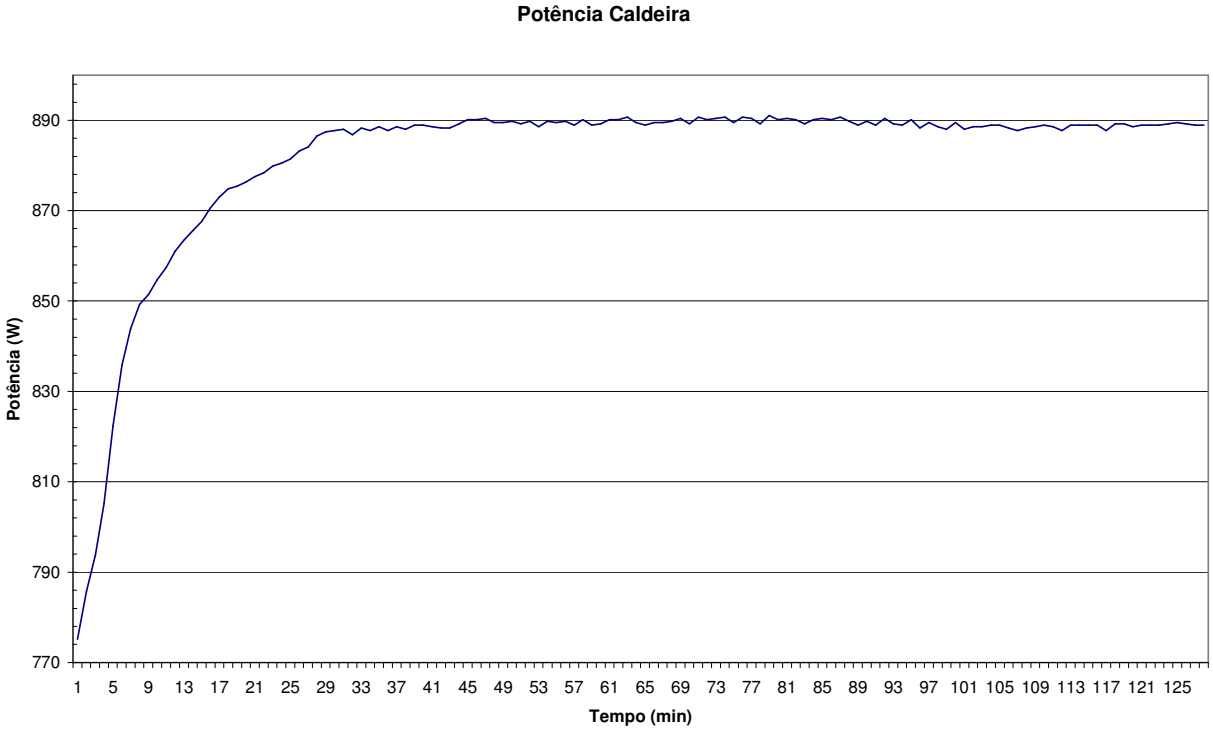


Figura 24 – Potência consumida na caldeira pelo tempo.

5.4. Elaboração do Relatório de Testes

Após a finalização do teste, um relatório de teste deve ser elaborado a partir dos dados de documentação inseridos na tela da Figura 21 e dos dados de medidas obtidas na tela da Figura 22. Com todos esses dados e efetuando alguns cálculos utilizando as equações (1) a (4), essas informações são organizadas conforme o exemplo de relatório da Figura 25. Alguns valores obtidos em teste são comparados com os valores nominais. Este relatório é disponibilizado na rede interna da empresa e fica disponível para todos os departamentos solicitantes acessarem, sem a necessidade de impressão.

Tecumseh

LABORATÓRIO DE APLICAÇÃO E DESENVOLVIMENTO

FOLHA DE CALORÍMETRO

COMPRESSOR MODELO *THG1345MKS* **COMPRESSOR LM** *TH671KS*

TESTE Nº *22336* **DATA** *13/10/2010*

DOCUMENTAÇÃO DO TESTE

N.o de Série compr.	*5819*	Tipo de ligação	*PTCSCR*
Código Data	*H2710*	R1 Marcha (Ohms)	*23,340*
Tensão Nominal (V)	*220*	R1 Auxiliar (Ohms)	*21,050*
Frequência (Hz)	*50*	T1 (°C)	*24,0*
Refrigerante	*R600a*	Condição	*ASHRAE*
Ventilação	*Natural*	Hora início	*11:00*
Calorímetro	*3*	Hora Término	*13:30*
Sequencial	*0799*	Cap. Perm. (uF/V)	*5/400*
		Protótipo	*E1564*
Solicitante	*GUSTAVO POMPEO*		

RESULTADOS

	Nominal			Real			Desvio (%)
Capacidade	*370* (BTU/h)	*108* (W)	*93* (Kcal/h)	*363* (BTU/h)	*106* (W)	*91* (Kcal/h)	*-1,93*
Potência	*83,0* (W)			*85,6* (W)			*3,13*
Corrente	*0,39* (A)			*0,43* (A)			*10,26*
EER	*4,46* (BTU/Wh)	*1,31* (W/W)	*1,12* (Kcal/Wh)	*4,24* (BTU/Wh)	*1,24* (W/W)	*1,07* (Kcal/Wh)	*-4,91*

VALORES DE TESTE

	Medido		Nominal	
PRESSÕES	(PSIA)	(Kg/cm²)	(PSIA)	(Kg/cm²)
Sucção	*9,10*	*0,62*	*9,07*	*0,62*
Descarga	*110,5*	*7,5*	*110,6*	*7,5*
TEMPERATURAS	(°C)	(°F)	(°C)	(°F)
Ambiente de Teste	*32,2*	*90,0*	*32,2*	*90,0*
Evaporação	*-23,3*	*-9,9*	*-23,3*	*-10,0*
Condensação	*54,4*	*129,9*	*54,4*	*130,0*
Gás saída caldeira	*32,2*	*90,0*	*32,2*	*90,0*
Gás entrada compr.	*33,1*	*91,6*	*32,2*	*90,0*
Líq. entr. val. exp.	*36,9*	*98,4*	*32,2*	*90,0*
Gás descarga	*81,0*	*177,8*		
Carcaça superior	*74,4*	*165,9*		
Carcaça inferior	*71,0*	*159,8*		
Bobina marcha	*100,6*	*213,1*		
Bobina auxiliar *(Al)*	*101,7*	*215,0*		

MEDIDAS ELÉTRICAS

Tensão Compr. (V)	*219,4*
Corrente Compr. (A)	*0,43*
Potência Compr. (W)	*85,6*
Potência Caldeira (W)	*102,6*
Fator de potência	*0,91*
Tensão Auxiliar (V)	*55,6*
Tensão cap. perm. (V)	*226,8*
Corrente marcha (A)	*0,55*
Corrente auxiliar (A)	*0,34*
Rotação motor (RPM)	*2880*
R2 marcha (Ohms)	*30,258*
R2 auxiliar (Ohms)	*27,596*

Capacidade (não corrig.)	*350*	(BTU/h)	*102*	(W)	*88*	(Kcal/h)
Massa bombeada (calc.)	*2,5*	(lb/h)	*1,1*	(Kg/h)		
Massa bombeada (med.)	*0,0*	(lb/h)	*0,0*	(Kg/h)		

OBSERVAÇÕES

TÉCNICO RESPONSÁVEL *J.J.NUNES* **VISTO** *Cássio Maule*

Figura 25 – Modelo de relatório final de testes em calorímetros.

Conclusões

Alguns programas em LabVIEW foram criados para atender às demandas do Laboratório de Aplicação e Desenvolvimento da Tecumseh do Brasil Ltda. Estes programas possibilitaram a programação de diversas condições de teste que são executados de forma automática. As condições de estabilização de teste são verificadas via *software* e, uma vez estável, a leitura de diversas variáveis é realizada para a emissão um relatório eletrônico. Finalizado um teste, as condições de um novo teste são inseridas automaticamente.

Este trabalho permite que os testes sejam realizados de forma mais rápida e segura. Ao se substituir um relatório escrito à caneta por um eletrônico, diminui-se a possibilidade de erros humanos, rasuras e aumenta-se a produtividade.

Anteriormente, não havia uma verificação da estabilização de testes segura. O operador apenas esperava por duas horas para que houvesse tempo suficiente para atingir uma estabilização das variáveis envolvidas no teste. Após os programas serem desenvolvidos, é possível verificar a estabilização de forma segura e em muitos casos, é possível finalizar um teste com menos de duas horas, o que aumentou ainda mais a produtividade do laboratório e confiabilidade das medições.

Anexos

Para efetuar alguns cálculos, foram realizadas diversas conversões de unidades – Tabelas 1 a 4 – utilizando-se o Conversor de unidades do Instituto de Pesos e Medidas (IPEM) [17].

Tabela 1 – Conversão de unidades de temperatura.

De \ Para	**ºC**	**ºF**	**K**
ºC	-	ºC*1,8+32	ºC+273,15
ºF	(ºF-32)/1,8	-	(ºF+459,67)/1,8
K	K-273,15	K*1,8-459,67	-

Tabela 2 – Conversão de unidades de energia

De \ Para	**BTU**	**J**	**WH**
BTU	-	BTU*1055,05585	BTU/2,41214
J	J*9,4782E-4	-	J*2,7778E-4
WH	WH*3,41214	WH*3600	-

Tabela 3 – Conversão de unidades de pressão.

De \ Para	**Psia**	**kPa**	**Kg/cm^2**
psia	-	psia*6,89475729	psia/14,695
kPa	kPa/6,89475729	-	KPa/101,3184584
Kg/cm^2	Kg/cm^2*14,695	Kg/cm^2* 101,3184584	-

Tabela 4– Conversão de unidades de massa.

De \ Para	**g**	**lb**
g	-	g*2,20462262E-3
lb	lb*453,59237	-

Referências Bibliográficas

[1] CHINO. **Full Automatic Compressor Performance Testing Equipment.** Disponível em: <http://www.chino.co.jp/english/products/08_CPTE.htm >. Acesso em: 02 dez. 2010.

[2] TECUMSEH DO BRASIL. **Home Page**. Disponível em: <http://www.tecumseh.com.br >. Acesso em: 02 dez. 2010.

[3] NATIONAL INSTRUMENTS. **LabVIEW Básico I: Introdução Manual.**

[4] NATIONAL INSTRUMENTS. **LabVIEW Básico II: Desenvolvimento Manual.**

[5] NATIONAL INSTRUMENTS. **LabVIEW Intermediate I: Successful Development Practices.**

[6] NATIONAL INSTRUMENTS. **LabVIEW Intermediate II: Performance and Connectivity.**

[7] TECUMSEH DO BRASIL. **Biblioteca Virtual.** Disponível em: <http://www.tecumseh.com.br/BibliotecaVirtual.php >. Acesso em: 02 dez. 2010.

[8] PORTAL DA REFRIGERAÇÃO. **Home Page.** Disponível em: <http://www.refrigeracao.net/>. Acesso em: 02 dez. 2010.

[9] WIKIPÉDIA. **Termopar.** Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Termopar >. Acesso em: 02 dez. 2010.

[10] WIKIPÉDIA. **Entalpia.** Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Entalpia >. Acesso em: 02 dez. 2010.

[11] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECNOLOGY (NIST). **Software RefProp**. Disponível em: <www.nist.gov >. Acesso em: 02 dez. 2010.

[12] TECUMSEH DO BRASIL. **Catálogo de normas Tecumseh Global-4.**

[13] TECUMSEH DO BRASIL. **Catálogo de normas Tecumseh MISC-4.**

[14] GONZAGA, D. P. **Apostila do motor de indução monofásico.** Material de apoio à disciplina Sel422 – Máquinas Elétricas – EESC/USP.

[15] ENDEVCO. **Isotron Accelerometer.** Disponível em: <http://www.endevco.com/product/prodpdf/751-10.pdf >. Acesso em: 02 dez. 2010.

[16] JOHNSON, D. E.; HILBURN, J. L.; JOHNSON, J. R. **Fundamentos de Análise de Circuitos Elétricos**. 4ª ed. Editora LTC, 2000. Cap. 2, p. 14-18.

[17] INSTITUTO DE PESOS E MEDIDAS (IPEM). **Conversor de unidades de medição.** Disponível em: <http://www.ipem.sp.gov.br/5mt/cv2/index.htm >. Acesso em: 02 dez. 2010.