

**CARLOS ADRIANO PEREZ PINTO
JULIUS CEZAR BARACHO
SÉRGIO HENRIQUE DA SILVA NEVES**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO SISTEMA DE AR-CONDICIONADO DOS
TRENS DA FROTA “F” DO METRO DE SÃO PAULO POR MEIO DE
MONITORAMENTO CONTÍNUO**

Monografia de conclusão do curso de
especialização em Tecnologia
Metroferroviária apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo.

Orientador:
Prof. Dr. José Roberto Simões Moreira

São Paulo
Junho / 2010

**CARLOS ADRIANO PEREZ PINTO
JULIUS CEZAR BARACHO
SÉRGIO HENRIQUE DA SILVA NEVES**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO SISTEMA DE AR-CONDICIONADO DOS
TRENS DA FROTA “F” DO METRO DE SÃO PAULO POR MEIO DE
MONITORAMENTO CONTÍNUO**

Monografia de conclusão do curso de
especialização em Tecnologia
Metroferroviária apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo.

São Paulo
Junho / 2010

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, e não mais do que justo, gostaríamos de agradecer às nossas famílias por terem tolerado nossas ausências nos últimos dois anos e pelo apoio dado para que chegássemos até aqui.

Ao mestre José Roberto Simões Moreira, nosso orientador, que sempre se mostrou disposto em nos receber e passar sua experiência de forma a nos auxiliar a empreender este trabalho.

Ao METRÔ, nossa segunda família, que nos proporcionou essa oportunidade de aperfeiçoamento nessa tão prestigiosa escola, subsidiando o investimento e ofertando parte de nosso tempo remunerado para que melhor pudéssemos nos dedicar ao curso.

Aos colegas da equipe de manutenção do Material Rodante do Pátio Capão Redondo, em especial ao engenheiro Leandro José de Araújo e ao técnico Jefferson Ribeiro, que compartilharam sua grande experiência adquirida na manutenção do sistema de ar condicionado e pela iniciativa do desenvolvimento do “software” e hardware de monitoramento que possibilitou a aquisição de dados essenciais ao desenvolvimento desse trabalho.

Finalmente, mas não menos importante, ao engenheiro José Carlos Mora, por acreditar no nosso projeto a ponto de torná-lo mais do que um simples estudo, um verdadeiro caso prático, além do seu empenho e apoio na viabilização de aquisição dos instrumentos necessários para o monitoramento dos sinais.

RESUMO

A proposta do presente trabalho foi estudar o comportamento do sistema de ar condicionado dos trens da frota “F” do Metrô de São Paulo e a importância dos parâmetros fundamentais do ciclo frigorífico

Com esse intento, o trabalho foi concebido com o emprego de instrumentação adequada, promovendo o monitoramento contínuo de variáveis do processo de um sistema de condicionamento de ar de um trem do Metropolitano de São Paulo, o que permitiria a antecipação das informações de funcionamento e os eventuais desvios do sistema analisado.

Sobre a monitoração, o trabalho dedicou um capítulo com a descrição do sistema do ar condicionado da frota da Linha 5 e outro sobre o Estudo Experimental. Sobre a base para definição dos pontos a serem monitorados, um capítulo descreveu os fundamentos teóricos que nortearam os estudos enquanto outro capítulo foi dedicado exclusivamente à análise dos dados.

Após esta análise o trabalho apresentou, baseado nos capítulos anteriores, as conclusões e as conseqüentes recomendações de modificações no sistema que permitirão a máxima disponibilidade e qualidade de serviço. Proporcionando uma atuação precisa e ágil, reduzindo o tempo médio de liberação – TML e aumentando a disponibilidade dos metrocarros para a operação do sistema.

ABSTRACT

The purpose of this work was to study the behavior of the air-conditioning system of Metro of São Paulo “F” fleet and the importance of the basic parameters of cooling cycle.

With this intention, this treatise was conceived throughout the use of the adequate instrumentation promoting continuous monitoring of variables from an air conditioning system process of a wagon of Sao Paulo subway system, which will permit anticipating operations information and possible failuires of the analyzed system.

Concerning the monitoring system, this work devoted a specific chapter describing the air-conditioning system of the Line 5 fleet and another chapter on the Experimental Study. To define the main points to be monitored, one chapter described the theoretical foundations that guided this study and another chapter was devoted exclusively to data analysis.

After this analysis, this work presents the conclusions, and subsequent recommendations for changes on the system that will provide maximum availability and quality of service. This will provide a immediate and precise maintenance action in order to reduce the average time spent on investigation and increasing the availability of trains for service.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS	08
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE FIGURAS	11
1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 OBJETIVO	12
1.2 MOTIVAÇÃO	13
1.3 ESTABELECIMENTO DO PROBLEMA.....	15
1.4 APANHADO HISTÓRICO	19
1.5 METODOLOGIA.....	23
1.6 DIVISÃO DA MONOGRAFIA.....	24
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	25
2.1 CICLO FRIGORÍFICO	25
2.2 SISTEMAS DE CONTROLE.....	27
2.3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	29
2.4 APLICAÇÕES EM SISTEMAS DE TRANSPORTE DE MASSA.....	30
3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DO AR CONDICIONADO DOS TRENS DA FROTA “F” DA LINHA 5	32
3.1 APRESENTAÇÃO.....	32
3.2 FUNCIONAMENTO	35
3.3 COMPONENTES.....	40
4 ESTUDO EXPERIMENTAL	62
4.1 INSTRUMENTAÇÃO	63
4.2 MONITORAMENTO DO SISTEMA AR CONDICIONADO.....	71
4.3 PREPARAÇÃO	74

5 ANÁLISE DOS DADOS	76
5.1 REGISTRO EM DIA QUENTE NAS CONDIÇÕES NORMAIS DE OPERAÇÃO DO SISTEMA DE AR CONDICIONADO	76
5.2 REGISTRO COM ACIONAMENTO DO TERMOSTATO DO COMPRESSOR.....	78
5.3 REGISTRO DE FUNCIONAMENTO COM A RETIRADA DO RESISTOR.....	80
5.4 REGISTRO DE FUNCIONAMENTO COM SISTEMA EM 50%	81
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	83
6.1 CONCLUSÕES.....	83
6.2 RECOMENDAÇÕES	85
7 REFERÊNCIAS	89
APÊNDICE	90

LISTA DE SÍMBOLOS

• 1VTF	– Sistema de ventilação da Frota “F”
• A	– Ampére
• AC	– Corrente alternada
• AR-01	– Ar condicionado número 1
• AR-02	– Ar condicionado número 2
• bar	– Unidade de pressão
• °C	– Graus Celsius
• CAN	– “Controller area network”
• CLP	– Controlador Lógico Programável
• CPTM	– Companhia Paulista de Trens Metropolitanos
• DC	– Corrente contínua
• EVR	– Registrador de eventos
• h	– Coeficiente de convecção de calor
• HVAC	– “Heating ventilation and air conditioning applications”
• Hxh	– Homem x hora.
• Hz	– Hertz
• kg	– Quilograma
• kPa	– Quilopascal
• kVA	– Quilovoltampère
• kW	– Quilowatt
• m	– Metro
• m/s	– Metro por segundo
• m ²	– Metro quadrado
• m ³ /h	– Metro cúbico por hora
• mm	– Milímetro
• Pa	– Pascal
• PC	– Processador

• psi	– Libra por polegada quadrada
• RIOM	– Módulo remoto de entrada e saída
• rpm	– Rotações por minuto
• T	– Temperatura
• Te	– Temperatura externa
• Ti	– Temperatura interna
• TIMS	– Sistema de monitoração interna do trem
• TML	– Tempo médio de liberação
• V	– Volt
• Vca	– Volts corrente alternada
• Vcc	– Volts corrente continua
• VLT	– Veículo leve sobre trilhos
• W	– Watt

LISTA DE TABELAS

- *Tabela 1.1 - Componentes principais do sistema de ar condicionado.....16*
- *Tabela 3.1 - Características técnicas do compressor a parafuso41*
- *Tabela 3.2 - Características técnicas da bateria condensadora46*
- *Tabela 3.3 - Características técnicas da bateria evaporadora.....49*
- *Tabela 3.4 - Pressão de atuação dos pressostatos.....55*

LISTA DE FIGURAS

• <i>Figura 1.1 - Compressor queimado por sobreaquecimento</i>	13
• <i>Figura 1.2 - Ocorrências de falhas do sistema de ar condicionado</i>	14
• <i>Figura 1.3 - Dutos de distribuição do ar condicionado no carro A</i>	17
• <i>Figura 1.4 - Número de ocorrências de falhas no sistema de ar condicionado</i>	18
• <i>Figura 2.1 - Ciclo de compressão a vapor</i>	25
• <i>Figura 2.2 - Componentes básicos de um ciclo de compressão a vapor</i>	26
• <i>Figura 2.3 - Componentes básicos do circuito frigorífico estudado (obtido do manual de manutenção Sistrem)</i>	26
• <i>Figura 2.4 - Fluxo básico de controle</i>	27
• <i>Figura 2.5 - Fluxo de aquisição de dados</i>	29
• <i>Figura 3.1 - Disposição geral do sistema de ar condicionado</i>	33
• <i>Figura 3.2 - Disposição geral do sistema de ar condicionado em um carro</i>	33
• <i>Figura 3.3 - Módulo de ar condicionado completo instalado no teto da frota “F”</i> ...	34
• <i>Figura 3.4 - Esquema elétrico de alimentação dos módulos de ar condicionado pelos inversores auxiliares</i>	39
• <i>Figura 3.5 - Tela do programa que permite comandar, remotamente, a entrada e saída dos equipamentos do ar condicionado como ventiladores e compressor</i>	39
• <i>Figura 3.6 - Localização do compressor dentro do módulo do ar condicionado</i>	40
• <i>Figura 3.7 - Compressor de parafuso</i>	40
• <i>Figura 3.8 - Diagrama de funcionamento do compressor</i>	43
• <i>Figura 3.9 - Diagrama da cadeia de segurança</i>	44
• <i>Figura 3.10 - Fotografia da válvula de expansão termostática</i>	45
• <i>Figura 3.11 - Bateria condensadora</i>	46
• <i>Figura 3.12 - Baterias condensadoras instaladas no modulo</i>	47
• <i>Figura 3.13 - Posição dos ventiladores de condensação</i>	47
• <i>Figura 3.14 - Fixação do Ventilador axial</i>	48
• <i>Figura 3.15 - Ventilador axial</i>	48
• <i>Figura 3.16 - Bateria evaporadora</i>	48

• <i>Figura 3.17 - Montagem da bateria evaporadora no modulo do ar condicionado ...</i>	<i>49</i>
• <i>Figura 3.18 - Detalhe dos ventiladores das evaporadoras instalados</i>	<i>50</i>
• <i>Figura 3.19 - Válvula de controle de capacidade</i>	<i>51</i>
• <i>Figura 3.20 - Válvula solenóide</i>	<i>51</i>
• <i>Figura 3.21 - Depósito de líquido</i>	<i>52</i>
• <i>Figura 3.22 - Manômetros e tomadas no circuito</i>	<i>53</i>
• <i>Figura 3.23 - Manômetro</i>	<i>53</i>
• <i>Figura 3.24 - Localização dos sensores de temperatura.....</i>	<i>55</i>
• <i>Figura 3.25 - Cartão do “Nodo” secundário.....</i>	<i>57</i>
• <i>Figura 3.26 - “Nodo” principal.....</i>	<i>58</i>
• <i>Figura 4.1 - Conjunto utilizado no monitoramento do ar condicionado.....</i>	<i>64</i>
• <i>Figura 4.2 - Sensores de temperatura e pressão.....</i>	<i>65</i>
• <i>Figura 4.3 - Condicionador de sinais.....</i>	<i>65</i>
• <i>Figura 4.4 - Sensores de corrente.....</i>	<i>66</i>
• <i>Figura 4.5 - Condicionador de sinais e atuadores.....</i>	<i>66</i>
• <i>Figura 4.6 - Gravador de dados com Compact RIO National Instruments</i>	<i>67</i>
• <i>Figura 4.7 - Gravador de dados com módulo 505 da National Instruments</i>	<i>67</i>
• <i>Figura 4.8 - Conexão notebook com módulo 505 da National Instruments.....</i>	<i>68</i>
• <i>Figura 4.9 - Tela do gravador de dados com Labview®</i>	<i>68</i>
• <i>Figura 4.10 - Gravador de dados para transferência e interface com o “notebook”.....</i>	<i>69</i>
• <i>Figura 4.11 - Módulos de interface National para coleta de dados dos sensores ...</i>	<i>69</i>
• <i>Figura 4.12 - Conexões e cabos na canaleta de cabos do trem</i>	<i>70</i>
• <i>Figura 4.13 - Conexões no compartimento do compressor no teto do trem.....</i>	<i>70</i>
• <i>Figura 4.14 - Fotografia do notebook com a representação gráfica do circuito frigorífico do ar condicionado da frota “F”.....</i>	<i>73</i>
• <i>Figura 5.1 - Registro realizado em 10/03/10, sem falha.....</i>	<i>77</i>
• <i>Figura 5.2 - Registro de 12/03/10, com acionamento do termostato do motor.....</i>	<i>79</i>
• <i>Figura 5.3 - Registro realizado em 13/03/10, com a retirada do resistor.....</i>	<i>80</i>
• <i>Figura 5.4 - Registro realizado em 18/03/10, com sistema frigorífico em 50%.....</i>	<i>82</i>

1 INTRODUÇÃO

1.1 OBJETIVO

Este trabalho teve por objetivo principal realizar o monitoramento contínuo das variáveis envolvidas no processo de condicionamento de ar do salão de passageiros de um carro de passageiros do trem da frota “F”, da linha 5, do Metrô de São Paulo. Para isso, decidiu-se pelos pontos e pelas grandezas a serem medidas a fim de monitorar seus valores por meio de instrumentação dedicada e um sistema de coleta e armazenamento automático de dados. Dessa forma, observa-se como essas variáveis se comportam ao longo do tempo ante as diversas condições ambientais e de carregamento, verificando seus efeitos sobre o funcionamento do equipamento de ar condicionado, bem como suas respostas. Assim o trabalho vai permitir conhecer suas limitações e compreender como ocorrem as falhas durante funcionamento, de forma a se determinar ajustes e / ou soluções para otimização do desempenho do equipamento.

1.2 MOTIVAÇÃO

A proposta de efetuar o estudo do comportamento do sistema de ventilação ou de ar condicionado, por meio de monitoramento contínuo, aplicado num trem da frota “F”, adveio do baixo desempenho que esse sistema apresenta desde o início da operação comercial dos 8 trens, firmando-se como o principal responsável pelo comprometimento da disponibilidade de trens nos períodos de maiores temperaturas durante o ano. Dentre os diversos modos de falha, destaca-se a queima de compressores, o que gera longa indisponibilidade do equipamento dado ao tempo necessário para o restabelecimento, bem como elevado custo e dispêndio de mão-de-obra. Essas falhas intrigam a manutenção quanto à sua causa, visto que o sistema de controle possui diversos dispositivos de proteção que visam proteger o equipamento quanto à sua sujeição a condições impróprias de funcionamento.

O emprego dessa ferramenta torna possível analisar os registros de parâmetros gravados ao longo da operação comercial, revelando as condições em que o sistema funciona e trazendo a perspectiva de possibilitar identificar as causas que levam o equipamento a falhar. Assim sendo, alternativas de melhoria poderão ser propostas e, ainda com o monitoramento contínuo, observar seus efeitos criando subsídios para a tomada de decisão sobre a melhor solução. O compressor representado na fotografia da figura 1.1 foi queimado por sobreaquecimento e pertence ao ar condicionado do Sistema de Ventilação que vem apresentando elevada incidência de falhas prematuras, as quais destacam-se, além da própria queima do compressor, os defeitos em componentes elétricos.

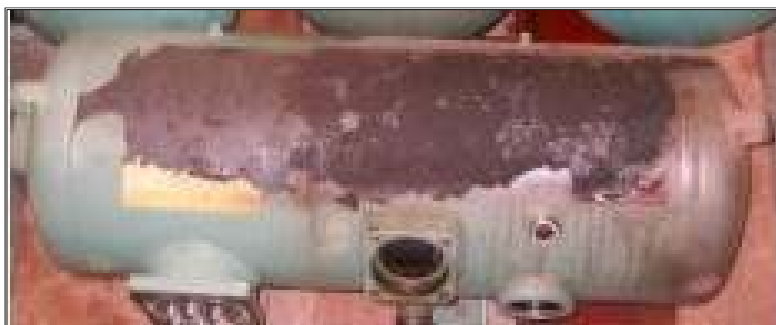


Figura 1.1 – Compressor queimado por sobreaquecimento

Além das freqüentes ocorrências de queimas de compressores, contrariando as diversas proteções existentes no sistema, observam-se também problemas com componentes elétricos, como recorrentes falhas de sobreaquecimento dos terminais e erros de leitura de temperatura nos Nodos Secundários, ou mesmo defeitos dos contadores K2.2, os quais são definidos mais adiante neste trabalho.

O gráfico da figura 1.2 ilustra a distribuição das ocorrências de falhas do sistema de ar condicionado ao longo dos anos de 2005 até junho de 2008.

Claramente, o gráfico indica que o número maior de falhas ocorre no verão, quando o sistema é mais solicitado.

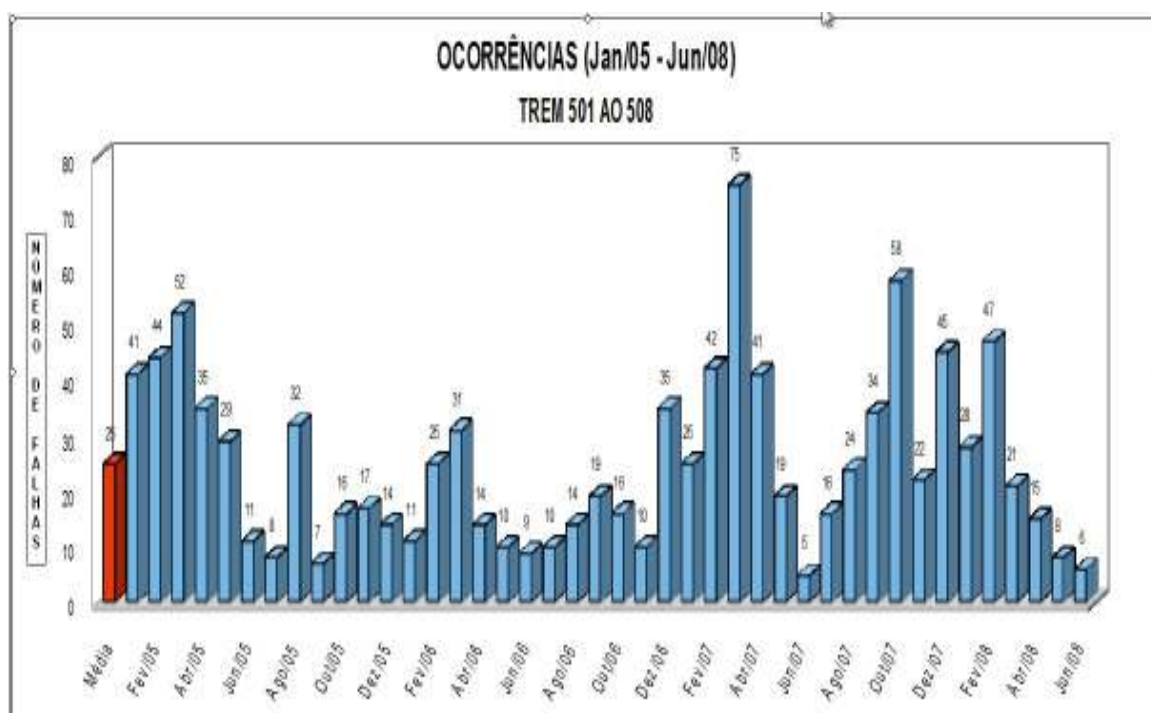


Figura 1.2 – Ocorrências falhas do sistema de ar condicionado

1.3 ESTABELECIMENTO DO PROBLEMA

A linha 5 do Metrô de São Paulo começou a operar em outubro de 2002 e, desde então, o número de ocorrências de falhas, no sistema de ar condicionado despontou como o de maior incidência, seguido pelas ocorrências de falhas no sistema de portas.

Historicamente nas demais frotas da Companhia do Metrô, o sistema de portas sempre apresentou o maior número de ocorrências de falhas, contudo, isso é justificado pela quantidade de equipamentos por carro, número de acionamentos e por sofrer interferência direta pelos usuários. Esta frota foi a primeira experiência do Metrô com carros equipados com sistema de ar condicionado no salão de passageiros.

Ainda que baseado na experiência de outras operadoras, que têm sistema de ar condicionado nos trens, as quais apontam esse sistema como o que mais onera a manutenção, chama a atenção o fato desse sistema responder pelo maior índice de ocorrências de falhas durante a operação, pois se contrapondo ao sistema de portas, possui quatro vezes menos equipamentos instalados e não sofre influência direta de usuários por vandalismo.

1.3.1 Custo com atuações e substituições de equipamentos.

De janeiro de 2003 a dezembro de 2008, o sistema de ar condicionado apresentou 1584 ocorrências.

Na tabela 1.1 são apresentadas as quantidades e o custo com a substituição apenas dos equipamentos mais representativos dentro do sistema de ar condicionado.

Tabela 1.1 – Componentes mais representativos do sistema de ar condicionado.

EQUIPAMENTO	TOTAL	CUSTO UNITARIO R\$	CUSTO TOTAL R\$
Compressor	93	30.206,00	2.809.158,00
Transformador	101	372,87	37.659,87
Contatores	41	45,98	1.885,14
TOTAL	235		2.848.703,05

A deficiência de projeto do equipamento de ar condicionado instalado nos trens da frota “F” consome elevada mão-de-obra de manutenção e gera indisponibilidade operacional, dado que as intervenções neste equipamento são demoradas pela necessidade de garantia de estanqueidade e ausência de umidade no circuito frigorífico.

1.3.2 Reclamações de usuários.

Desse elevado número de ocorrências, decorrem duas consequências diretas:

A primeira é que, nos dias mais quentes, com o desligamento de uma das máquinas do carro, ocorre uma elevação da temperatura interna do salão de passageiros e, como cada máquina é responsável pelo condicionamento de metade do salão de passageiros, em situação de lotação (horários de pico) há um desconforto térmico. Enquanto em um extremo do carro há uma temperatura próxima ao ideal, no extremo oposto ocorre um calor em excesso e sem a possibilidade de deslocamento dos usuários devido à lotação. A Figura 1.3 ilustra a disposição dos dutos de distribuição do ar condicionado ao longo do salão de passageiros de um carro líder (com cabine).

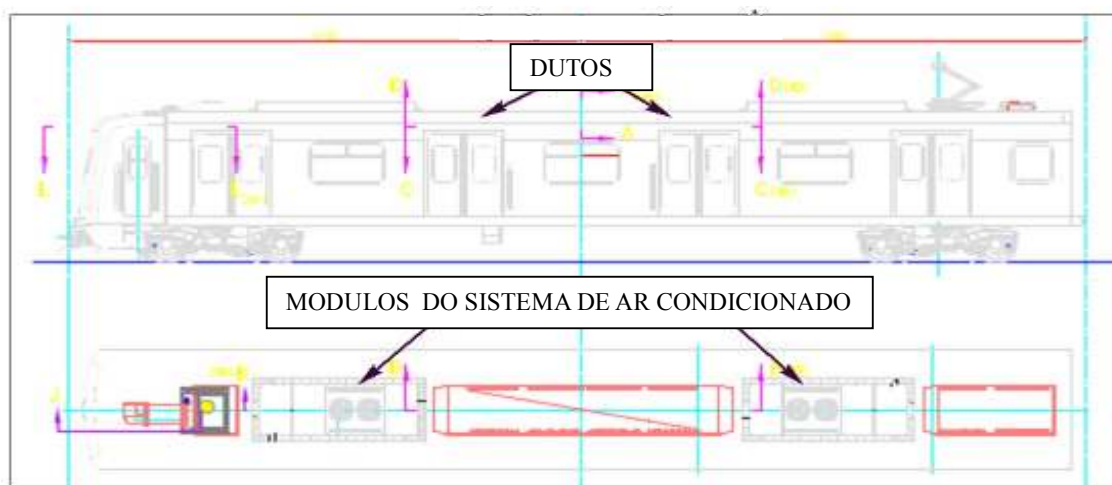


Figura 1.3 - Dutos de distribuição do ar condicionado no carro A

O segundo problema é uma consequência da primeira falha que gera maior impacto, pois caso ocorra o desligamento do segundo equipamento do carro em decorrência de sobrecarga, esse carro deve ser evacuado o mais rápido possível uma vez que, a temperatura interna e a sensação de abafamento aumentam demasiadamente, chegando a causar mal-súbito aos usuários, além do incômodo de ter que desembarcar e aguardar por uma nova composição causando maior lotação de plataformas e trens.

Essas situações geram reclamações por parte dos usuários aos canais de comunicação da empresa que, além de prejudiciais para a imagem da companhia, afetam os indicadores de qualidade da Operação no atendimento aos passageiros, principalmente nos meses do verão.

As falhas neste sistema são sazonais, pois dependem das condições climáticas para sua operação. Logo, nos meses mais quentes quando os equipamentos se mantêm ligados continuamente, ocorre um aumento do número de falhas.

Na figura 1.4 estão indicados os números de ocorrências de falhas no sistema de ar condicionado nos anos de 2007 (barras azuis) e 2008 (barras vermelhas). Como pode ser visto no gráfico, entre os meses de maio e agosto, há uma clara redução

no número de falhas. Já a partir de outubro, as falhas aumentam significativamente, voltando a reduzirem-se apenas em abril. Essa característica se repete anualmente, demonstrando o comportamento sazonal das falhas neste sistema.

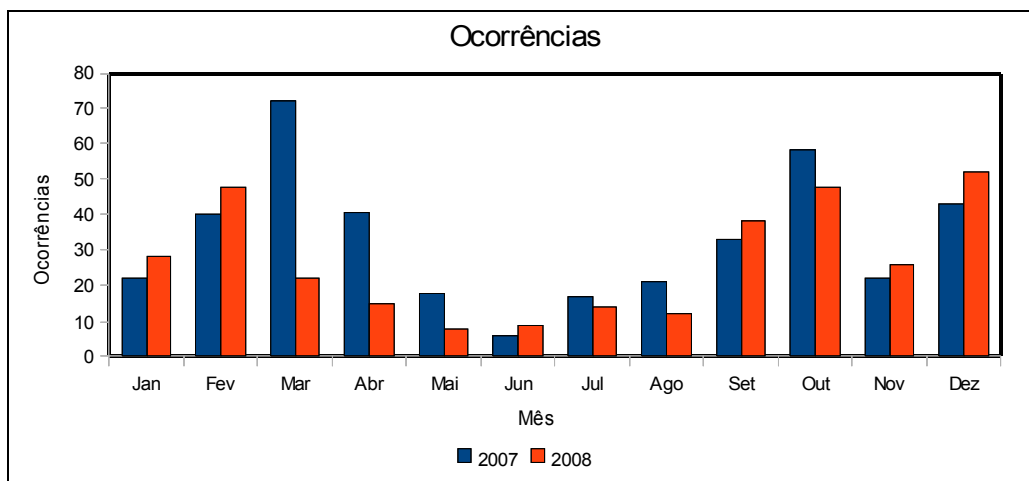


Figura 1.4 – Número de ocorrências de falhas do sistema de ar condicionado

1.4 APANHADO HISTÓRICO

A elevada incidência de queima de compressores, ainda durante a vigência do período de garantia contratual do sistema de ventilação, levou o fabricante do equipamento a realizar um reparo no período entre os anos de 2003 e 2005, quando foram substituídos 24 compressores com avarias, todas as baterias condensadoras e seus respectivos ventiladores. Alteraram-se os ajustes do superaquecimento e reduziu-se o tempo de funcionamento do equipamento em modo “*by-pass*” de 10 para 5 minutos.

As novas baterias condensadoras possuem tubos de paredes internas ranhuradas o que proporcionaria uma melhor troca de calor que embora prevista no projeto original, não foram usados, sendo empregados tubos com parede interna lisa. Novas dimensões da condensadora também melhoraram a área de troca de calor.

Os ventiladores foram substituídos por outros com maior capacidade e mantendo o mesmo sentido de fluxo do ar. Tal configuração não proporciona o aproveitamento de toda a área de troca de calor da condensadora devido a sua superfície estar parcialmente encoberta.

Posteriormente ao reparo do equipamento, o fabricante dos compressores realizou um levantamento sobre o desempenho do sistema e constatou, entre outros itens, um baixo valor do ajuste do superaquecimento, momentos antes do início do ciclo de “*by-pass*” e recomendando a análise criteriosa do sistema, incluindo o ajuste do “set-point” do controlador do ar de retorno.

No modo “*by-pass*”, pôde-se observar, por intermédio do monitoramento, que o compressor também opera fora da faixa de trabalho em determinados momentos. Com o reparo do fabricante, o tempo em que o equipamento operava em “*by-pass*” foi alterado de 10 para 5 minutos, com o objetivo de se melhorar as condições de trabalho para o compressor.

Com relação à queima dos compressores de parafuso, foi instalado um termostato na carcaça do compressor com ajuste fixado em 90°C como proteção adicional. Entretanto, os problemas de sobreaquecimento e queima do equipamento persistem.

Nenhuma ação foi tomada em relação aos compressores que não queimaram durante o período de garantia, sendo que podem ter sofrido danos que comprometem a sua vida útil, hipótese comprovada com a continuidade da queima de compressores entre 2005 a 2009, que totalizou 46 equipamentos.

O fabricante dos compressores disponibilizou um gravador de dados para monitorar dois equipamentos de ar condicionado com características peculiares: o primeiro deles, o AR-01, instalado no carro 5733 do trem 506, que contava com a maior quilometragem rodada e o segundo no equipamento AR-01, instalado no carro 5741 do trem 507, que era o equipamento com o menor índice de falhas apurado no período até a ocasião.

No equipamento do carro 5733 do trem 506 foi executados a limpeza e vácuo do circuito frigorífico e a substituição do compressor. Nos testes foi observado que o compressor do AR-01 do trem 506 trabalhava dentro dos parâmetros da especificação do fabricante, porém em regime intermitente (liga-desliga), acima do esperado. Já o compressor do AR-01 do trem 507, apesar de operar fora da faixa especificada, permanecia ligado por mais tempo do que o do trem 506.

Diante disso, por orientação do fabricante do compressor, no equipamento do trem 507, foram substituídos o fluido refrigerante existente por de marca recomendada, o óleo do compressor, o filtro desidratador e obtido vácuo no circuito. Após isso, um novo monitoramento foi feito no período de 09/12/08 à 17/01/09 e observou-se que o compressor passou a operar no mesmo regime do T506, ou seja, dentro da faixa especificada, porem num ciclo de intermitência (liga-desliga) acima do esperado.

Como o fabricante do compressor recomendava a verificação do superaquecimento dos sistemas, foi efetuada uma aferição dos parâmetros de uma amostra deles e se

observou que havia desbalanceamento entre as duas unidades evaporadoras, resultando no superaquecimento do sistema acima do limite recomendado (8 à 20°C).

Diante dessa constatação, estabeleceu-se uma rotina de manutenção para o ajuste do superaquecimento termodinâmico em regime urgente na frota, mas para desenvolvimento dessa atividade havia a necessidade de uma temperatura ambiente em torno de 30°C, o que torna o trabalho viável apenas no verão. Como forma de contorno, desenvolveu-se um dispositivo para aquecimento do ar de retorno para proporcionar tais condições.

Outro ponto de discutível eficácia no circuito frigorífico é o ciclo “by-pass”; neste sistema uma válvula de capacidade localizada antes da entrada da condensadora desvia o fluido quente para a sucção do compressor. Existe uma válvula de expansão termostática dedicada a esta função, que recebe o fluido refrigerante da linha de líquido (após a condensadora), expandindo-o. Na sequência, mistura-se ao fluido quente e em alta pressão proveniente da descarga do compressor, reduzindo a pressão e deixando o fluido refrigerante em um estado adequado para ser aspirado pelo compressor.

O superaquecimento encontrava-se baixo, momentos antes do ciclo “by-pass” entrar em operação, o que pode provocar a perda do filme de lubrificação do compressor, gerando danos aos rolamentos e fusos, além de aumentar a probabilidade de um travamento mecânico.

O sistema de lubrificação do compressor hermético de parafuso funciona por diferença de pressão (mínimo 3 bar) e quando o equipamento opera em modo “by-pass”; a pressão e a temperatura de descarga tendem a diminuir, enquanto que na sucção, estes valores aumentam. Conseqüentemente, as pressões tendem a se igualar, o que pode vir a prejudicar a lubrificação dos rolamentos e dos parafusos do compressor.

Não há acesso ao código fonte do programa de controle do sistema, o que permitiria a alteração dos tempos de cada etapa do processo. Para que isso seja possível ou “abre-se o código fonte do programa” (engenharia reversa) ou desenvolve-se outro sistema de controle, por exemplo, por intermédio de um novo controlador lógico programável (CLP).

Tal configuração não proporciona o aproveitamento de toda a área de troca de calor da unidade condensadora devido a sua disposição, que encobre parte de sua superfície.

O superaquecimento termodinâmico é a garantia para que não entre líquido no compressor, apenas vapor superaquecido deve ser aspirado. O superaquecimento útil é a diferença de temperatura do fluido refrigerante no estado de vapor saturado (obtida por meio da pressão medida na saída da evaporadora) e da temperatura do fluido refrigerante medida por meio de um termômetro também na saída da evaporadora.

1.5 METODOLOGIA

A metodologia usada nesse trabalho consistiu na instrumentação de cada um dos componentes do circuito frigorífico, possibilitando o levantamento completo das informações necessárias para a visualização do funcionamento do sistema instalado em um equipamento de ar condicionado e a verificação do funcionamento de cada componente no tempo e nas diversas condições ambientais (temperatura e umidade) e de carregamento de passageiros, como função do tempo.

Contudo por questões circunstanciais, não foi possível a disponibilidade de toda a instrumentação necessária e deste modo, foram eleitos os pontos principais do sistema para os quais se dispunha dos sensores de temperatura e pressão (sucção, descarga do compressor e linha de líquido) que pudessem trazer o maior número de informações relevantes acerca do funcionamento do sistema, inclusive mediante o uso de sensores de temperatura próprios do equipamento e indicações de estado de relés, contadores e termostatos.

De posse dos dados armazenados, sob a forma de registros analógicos e digitais, com o uso de “software” adequado torna-se possível a análise das condições de funcionamento e das situações que chegam a provocar a parada do equipamento, determinando suas causas.

1.6 DIVISÃO DA MONOGRAFIA

No Capítulo 2, Fundamentos Teóricos, apresentam-se dados técnicos teóricos que nos auxiliaram no embasamento desse trabalho.

Já no Capítulo 3, Descrição do Sistema do Ar Condicionado da frota “F”, apresenta-se a descrição específica, do manual do fornecedor com dados, cálculos, esquemas, componentes e ciclos de funcionamento deste equipamento instalado nos trens do Metrô de São Paulo no ano de 2002, na frota de trens da linha 5,

No Capítulo 4, Estudo Experimental, estão descritos todos instrumentos utilizados para o monitoramento do ar condicionado, que foi a base desse estudo. Descreve também o “software” utilizado para coleta de dados dos sensores. Tanto na instalação, como na preparação e coleta dos dados.

No Capítulo 5, Análise dos Dados, estão os dados colhidos até este instante do estudo, o qual terá continuidade.

No Capítulo 6, Conclusões e recomendações, estão apresentadas às recomendações que, se implantadas na frota, servirão de modelo para expansão para os demais trens do Metrô de São Paulo e mesmo de outras operadoras

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 CICLOS FRIGORÍFICOS

O ciclo de compressão a vapor consiste de quatro processos básicos, a saber :

- Compressão adiabática reversível isoentrópica, entre os pontos 1 e 2 da figura 2.1, onde ocorre a elevação da pressão de evaporação para a pressão de condensação.
- Condensação entre os pontos 2 e 3 da figura 2.1, onde ocorre a rejeição de calor para o meio externo à temperatura constante, mediante condensação do fluido frigorífico.
- Expansão isoentálpica entre os pontos 3 e 4 da figura 2.1, onde ocorre o estrangulamento da pressão do condensador (alta pressão) para a pressão do evaporador (baixa pressão).
- Evaporação entre os pontos 4 e 1 da figura 2.1, onde ocorre a remoção isotérmica de calor para o ambiente condicionado, mediante a evaporação à baixa temperatura do fluido frigorífico.

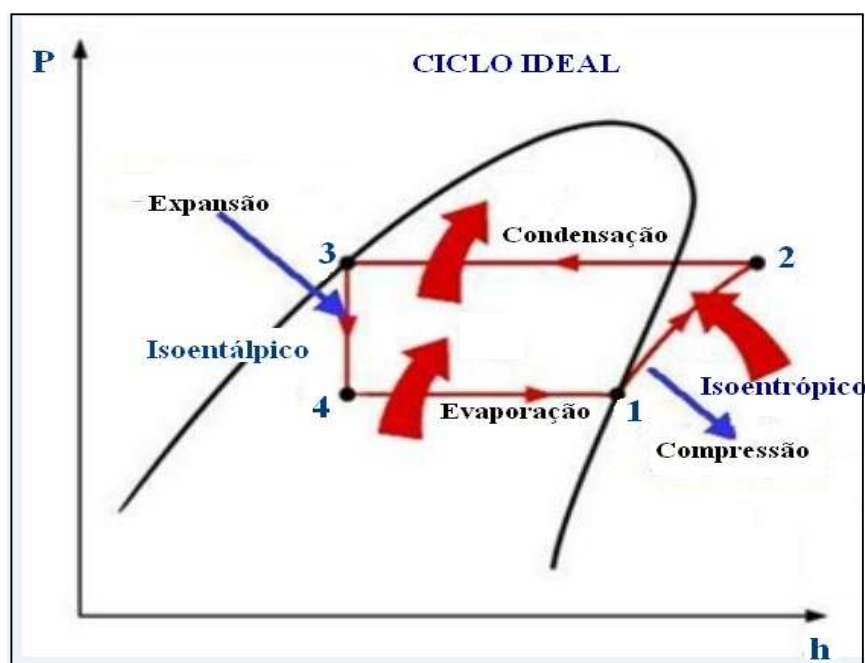


Figura 2.1 Ciclo de compressão a vapor

A figura 2.2 representa os quatro componentes básicos do ciclo de compressão a vapor descrito acima, sendo que os pontos 1, 2, 3 e 4 da desta figura são os mesmos que estão assinalados na figura 2.1.

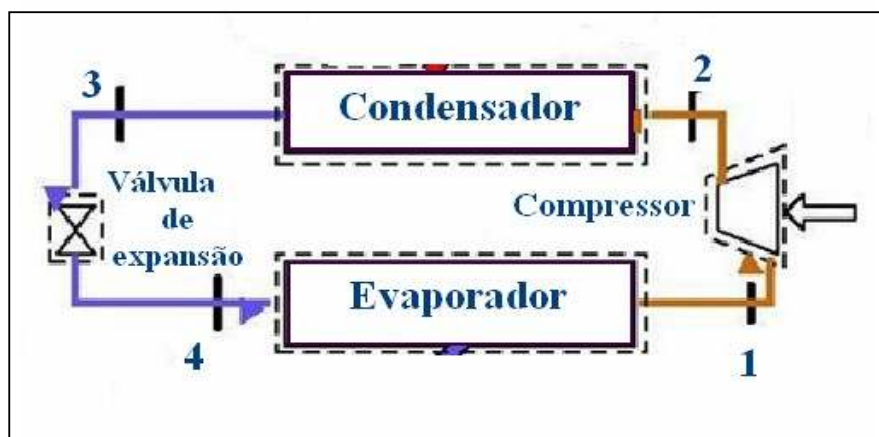


Figura 2.2 – Componentes básicos de um ciclo de compressão a vapor

Na figura 2.3 está ilustrado o circuito frigorífico deste estudo com seus componentes básicos que, neste caso, possui dois evaporadores, dois condensadores e duas válvulas de expansão.

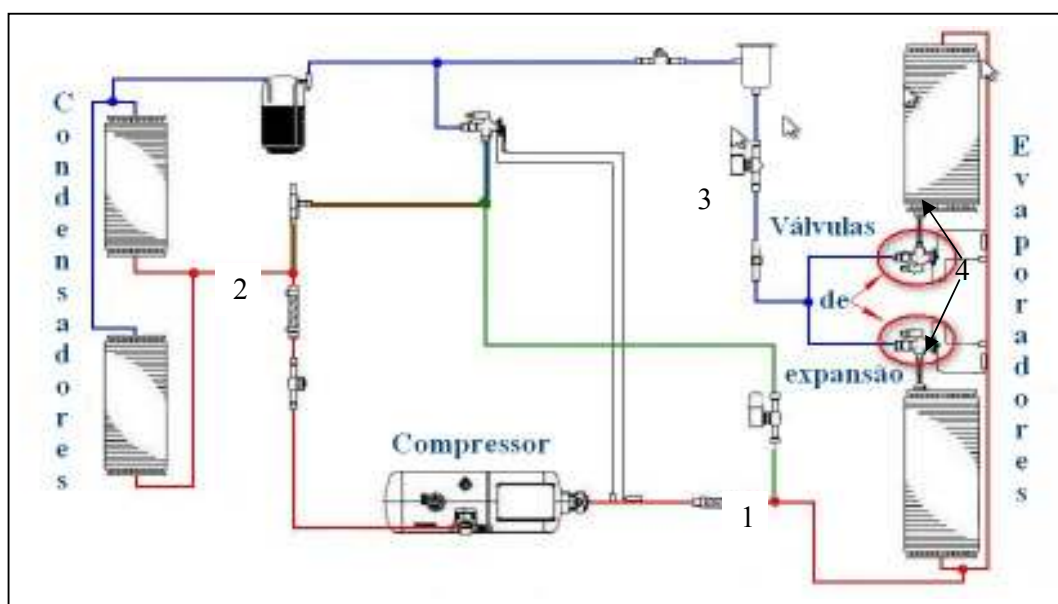


Figura 2.3 – Componentes básicos do circuito frigorífico estudado (obtido do manual de manutenção Sistrem)

2.2 SISTEMA DE CONTROLE

O sistema de controle em ar condicionado tem a principal funcionalidade de reduzir a capacidade de refrigeração ou aquecimento proporcionado pelo sistema. Além desta funcionalidade, existe a manutenção do conforto térmico do ambiente, a necessidade de eficiência do sistema e, no caso de quaisquer anomalias, ações que impeçam danos aos usuários e ao próprio sistema.

Na operação sem um sistema de controle, sempre existe uma das variáveis em sua condição máxima, ou seja, máximo resfriamento ou ausência total do mesmo.

O esquema básico de um sistema de controle é mostrado na figura 2.4.

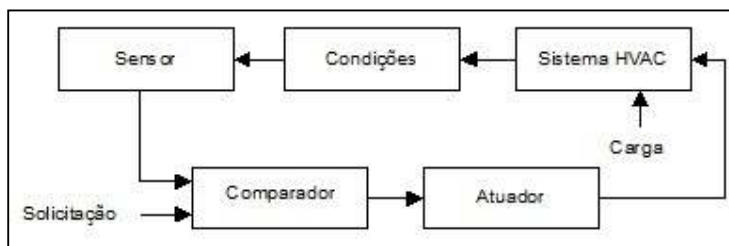


Figura 2.4 - Fluxo básico de controle

2.2.1 Funcionamento

Com base no esquema representado na figura 2.4, uma vez solicitado que o sistema opere numa determinada temperatura, um sensor lê a condição instantânea do ambiente e a partir daí faz a comparação entre o solicitado e o instantâneo. Dependendo do resultado, o atuador solicitará maior ou menor resfriamento ou aquecimento ao sistema de HVAC.

Nesse momento, de forma simplificada, o ciclo passa a se repetir em regime permanente, propiciando a todo instante o controle do sistema.

No início, existiam dois tipos básicos de sistema de controle:

- Sistemas Mecânicos (pneumáticos);
- Sistemas Elétricos (eletrônicos).

Basicamente nos sistemas mecânicos, as variáveis (pressão, temperatura, vazão etc) eram as responsáveis pela atuação de válvulas, chaves etc, proporcionando controle rápido e direto. Nesse caso praticamente não eram utilizados componentes elétricos.

Com o advento do transistor, surgiram novas solicitações, principalmente quanto à precisão do controle e confiabilidade, sendo necessária à inclusão de diversos dispositivos que efetuassem a conversão entre as variáveis (mecânicas) em estímulos elétricos, surgem então os transdutores. Atualmente existe uma gama muito grande de transdutores para as diversas aplicações, sendo que esta rápida evolução contribuiu para que vários sistemas de ar condicionado migrassem do puramente mecânico (pneumático) para modelos híbridos, conciliando mecânica e elétrica.

A evolução rápida da eletrônica permitiu uma nova fase nos sistemas de controle, que passaram não somente a “controlar”, mas também a “verificar” o funcionamento correto dos sistemas, “reajustar” as variáveis e funções em função de variações sazonais e de partes dos circuitos que perdem algumas funcionalidades, “detectar” falhas e “transmitir” informações sobre o sistema à distância de maneira automática. Os sistemas de controle informatizado são aqueles, em que o cérebro é um computador embarcado no sistema, sendo responsável pelas decisões sobre o que fazer com as diversas informações colhidas de inúmeros sensores instalados nos diversos estágios de funcionamento do sistema de ar condicionado.

Uma evolução disso são os computadores que hoje começam a incorporar a capacidade de “aprender” com as diversas condições que vão surgindo ao longo do tempo, por meio de “Redes Neurais”, Lógica “Fuzzy” etc, tornam-se cada vez mais auto-suficientes, necessitando cada vez menos a interferência humana, bastando inserir o que nos é conforto.

2.3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Atualmente existem vários recursos para a aquisição e armazenamento de informações das grandezas físicas, só que o principal requisito está na precisão e velocidade do transdutor (conversor da grandeza física em sinal ou impulso elétrico).

Historicamente eram utilizados cartões perfurados, fitas magnéticas, papel graduado, memórias de pequena capacidade. Atualmente é possível registrar de segundos até anos de informações, podendo escolher o registro contínuo ou somente o intervalo definido antes e após um evento importante

Esquemmatizando esse sistema no fluxo representado na figura 2.5:

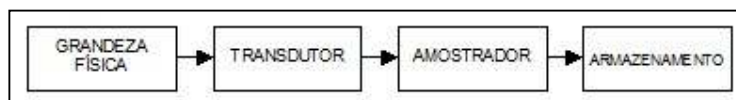


Figura 2.5 – Fluxo de aquisição de dados

Para realização desse trabalho foi utilizado os equipamentos da National Instruments, denominado Labview®, em que foi utilizado uma diversidade de módulos para aquisição de sinais analógicos e digitais, isso foi aliado a uma maior flexibilidade na programação, e na fácil preparação das interfaces mais conveniente para exibição das informações coletadas.

Devido ao seu alto nível de integração, foi possível em um espaço reduzido instalar o sistema completo para aquisição das informações no trem e mantê-lo em operação comercial e, quando de seu recolhimento à célula de manutenção, resgatar as informações registradas.

O gravador de dados recebeu as informações analógicas dos sensores de temperatura e pressão, amostragem da corrente do compressor e informações digitais das chaves que indicam os estados (ativo ou desligado).

2.4 APLICAÇÕES EM SISTEMAS DE TRANSPORTE DE MASSA

(As informações desta seção consistem em um resumo das informações extraídas do ASHRAE; 1999).

2.4.1 Ar Condicionado Ferroviário

Nos vagões ferroviários, normalmente utilizam-se unidades eletromecânicas com evaporadores de expansão direta geralmente utilizando fluido refrigerante R-22 já o R-134A não é indicado por exigir uma maior seção da tubulação, dos trocadores de calor e compressor.

A unidade de ar condicionado com controle eletrônico micro-processado é uma tendência, em que são monitoradas as falhas, registros históricos e realimentados a uma central.

Durante a construção dos vagões são desenvolvidos equipamentos com tamanho e peso reduzidos, principalmente os equipamentos de ar condicionado e sistemas auxiliares.

No METRÔ e VLT (veículo leve sobre trilhos) a alimentação pode ser direta DC ou AC trifásica do sistema alternador / inversor montado sob o veículo. Os sistemas de ar condicionado são comumente do tipo “split”, os evaporadores são montados na zona do teto do veículo e a parte de condensação no chão do mesmo.

Pela indisponibilidade de espaço sob os veículos metroviários e VLT, muitos sistemas são do tipo integrado (sem separação). Esses sistemas são montados nos tetos dos veículos ainda no processo de fabricação. Esse recurso é utilizado principalmente nos processos de modernização de veículos mais antigos, tomando o devido cuidado com as limitações do carro:

- Altura total;

- Perfil do teto;
- Restrições do sob o carro;
- Formato do equipamento.

Outro ponto importante se relaciona com a sujeira e corrosão. A utilização de materiais resistentes à corrosão e de revestimentos devem ser considerados durante o projeto, bem como facilitar a acessibilidade para realização dos processos de limpeza.

No tocante à manutenção as unidades de ar condicionado instaladas em veículos de transporte metroferroviários possuem mais exigência de que unidades fixas, pois, por exemplo, um vagão de passageiros com janelas fechadas num dia quente torna-se inutilizável com o sistema de ar condicionado não operacional, pois mesmo que o sistema de ventilação de emergência se mantenha, a pequena vazão de ar que é insuflada além de insuficiente para produzir conforto, arrasta mais calor ao ambiente, pois o teto dos carros por onde passa o ar antes de ser insuflado está sob ação direta da radiação solar, podendo gerar o efeito contrário do seu objetivo. Desta forma, o sistema deve conter componentes adicionais que permitam um rápido diagnóstico e correção de falhas.

Motores, compressores, pontos de acesso e controle devem ser facilmente acessíveis para inspeção e reparo. A evolução das estratégias de manutenção permitiu a criação de sistemas hermeticamente fechados que possibilitam a substituição rápida e fácil, e a manutenção do equipamento é feita em local específico, fora do vagão.

3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DO AR CONDICIONADO DOS TRENS DA FROTA “F” DA LINHA 5

(Dados compilados do manual de manutenção do Sistrem, 2002).

3.1 APRESENTAÇÃO.

Cada composição ou trem do Metrô é formado por seis carros cada. Em cada uma das extremidades do trem, há os carros líderes, dotados de cabine de condução na seguinte formação Mc+M+M+M+M+Mc.

Cada carro é equipado com um sistema de condicionalmente de ar para o salão de passageiros, formado por duas unidades de climatização independentes, designadas como AR1 e AR2. Cada unidade de climatização incorpora todos os elementos necessários para a ventilação e climatização do carro, sendo que nos carros líderes, há ainda uma unidade exclusiva para climatização da cabine do operador com controle independente. No apêndice estão representados o esquema frigorífico e o esquema elétrico deste circuito.

O projeto do sistema de ar condicionado foi desenvolvido pela empresa Temoinsa Barcelona (TMI-BCN) sediada na Espanha e instalada pela sua subsidiária no Brasil.

As duas unidades de climatização do salão de passageiros possuem, cada uma, um módulo de comando, chamado “Nodo” Secundário que se comunica com o módulo central de controle do carro ou “Nodo” Principal, pela rede CAN.

Derivado do espanhol, o termo “nodo”, no campo da informática, significa ponto de intersecção ou união de vários elementos que convergem para um mesmo local. No caso de uma rede de computadores, cada máquina corresponde a um “nodo” e essa analogia é estendida à rede que controla o funcionamento das duas unidades de climatização do salão.

O “Nodo” Principal se comunica com o restante do trem por meio de uma rede RS-485, cujo programa é baseado na técnica de cálculo de lógica FUZZY, que regula o sistema recebendo informações e transmitindo comandos aos “Nodos” Secundários instalados nas unidades de climatização. A disposição geral do sistema de ar condicionado é ilustrada na figura 3.1;

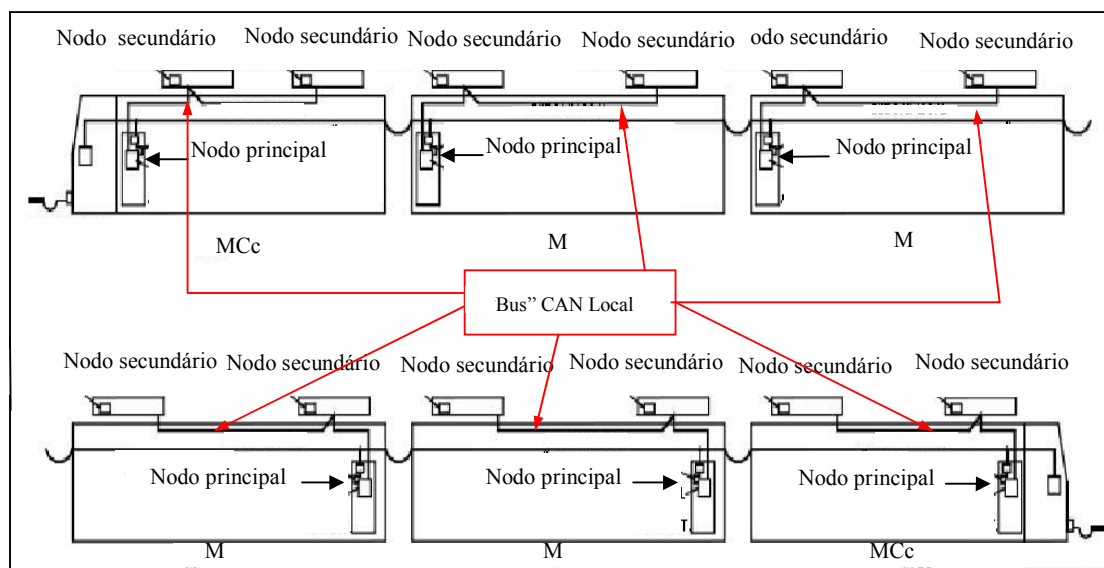


Figura 3.1 - Disposição geral do sistema de ar condicionado

Enquanto que na figura, 3.2, é ilustradas a disposição do sistema de ar condicionado em um carro com cabine.

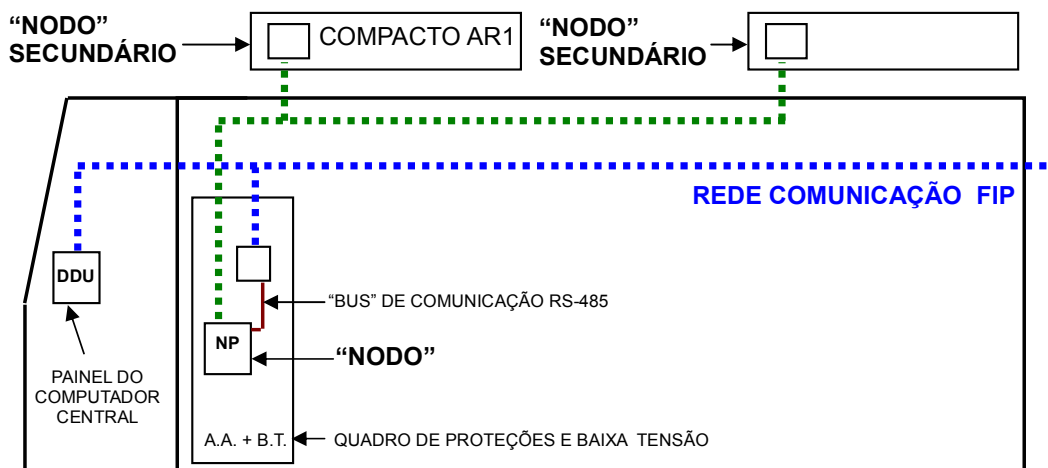


Figura 3.2 - Disposição geral do sistema de ar condicionado em um carro

Cada um dos equipamentos tem as seguintes características:

Potência frigorífica 45 kW

Temperaturas de evaporação e de condensação 5 /55 °C

Fluxo de ar exterior (renovação) 1600 m³/h (37,6%)

Fluxo de ar de retorno 2650 m³/h

Fluxo de ar insuflado 4250 m³/h

Tipo refrigerante (quantidade) R134a (25 kg)

Tensão de alimentação do sistema 380 V 3Φ 60 Hz

Tensão do circuito de controle 72 Vcc

Consumo de energia 29.6 kVA

Peso 900 kg

Tipo de óleo do compressor (volume) Éster - BSE 55 (4 litros)

A seguir, na figura 3.3 ilustram-se as diferentes partes (zonas) em que é dividida cada unidade compacta, pela fase do processo dentro do ciclo frigorífico.

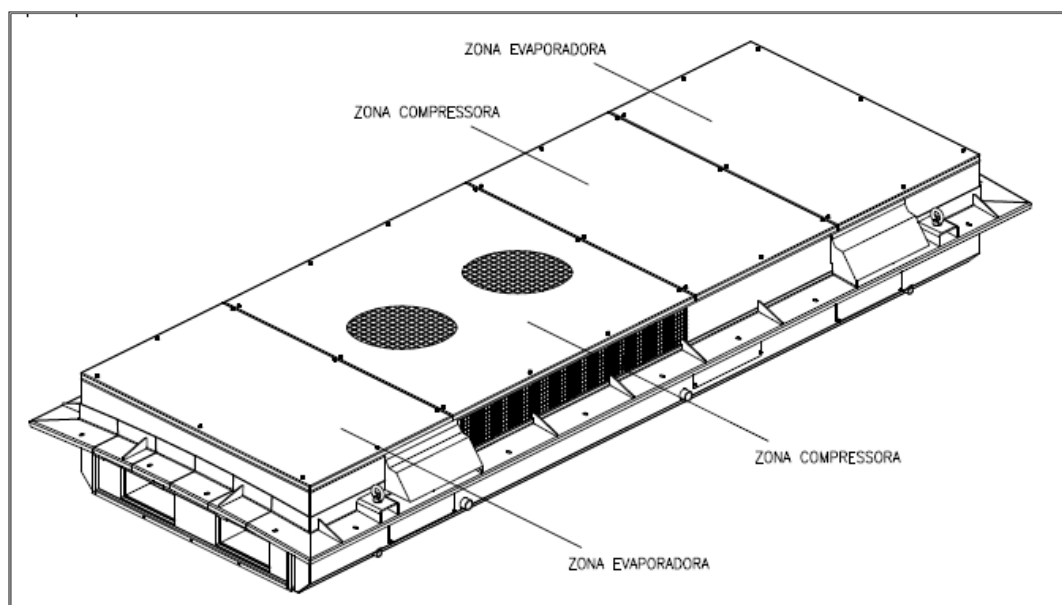


Figura 3.3 – Módulo de ar condicionado completo instalado no teto da frota “F”

3.2.FUNCIONAMENTO

O funcionamento do sistema de ar condicionado é totalmente automático. Cada um dos equipamentos instalados é comandado pelo correspondente “Nodo” Principal do carro. O “Nodo” Principal “toma as decisões” em função das condições externas de temperatura, da situação do equipamento e das condições de temperatura no interior do carro. Já a tomada de dados e a execução de instruções, são realizadas pelos “Nodos” Secundários de cada equipamento.

A regulação do ciclo frigorífico em cada equipamento compacto é independente, pois é função da temperatura do ar de retorno deste equipamento, desta forma, a temperatura total do salão é estimada mediante valores lidos e balanceados dos sensores de temperatura do ar de retorno.

Da cabina poderá seleccionar os seguintes modos de funcionamento:

- Modo de Ventilação
- Modo Automático
- Parada do Sistema

Pelo monitor instalado na cabina os operadores também recebem as sinalizações referentes ao estado das unidades climatizadoras.

3.2.1 Sinalizações do Sistema

O “Nodo” Principal de cada carro envia, as seguintes mensagens:

O ar condicionado opera normalmente (equipamento OK)

O ar condicionado tem uma avaria (falha leve)

O ar condicionado não opera (falha grave)

O detalhamento do elemento que tenha falhado será feito mediante a atuação do pessoal de manutenção com um computador portátil com o “software” de manutenção.

3.2.2 Controle de Temperaturas

O controle da temperatura interna ao salão de passageiros é automático e regido pela seguinte equação:

$$T_i = 22 + 0,25 (T_e - 19), \text{ para } T_e > 23^\circ\text{C}, \text{ (3.1)}$$

Quando a temperatura interna (T_i) do carro for menor ou igual a 23°C (equação 3.1) só haverá circulação e renovação de ar.

Cada equipamento dispõe dos seguintes sensores:

3.2.2.1 Sensor Temperatura do ar de Retorno.

Este sensor é responsável pela medida da temperatura do ar que retorna ao equipamento proveniente do salão de passageiros.

O “Nodo” Principal aplicará para o cálculo, uma média dos sensores de retorno. Se o sensor falhar, será utilizado para o cálculo, o ponto da curva prefixado, correspondente a 23°C .

3.2.2.2 Sensor de Temperatura do Ar Insuflado

Este sensor é responsável pela medida da temperatura do ar insuflado ao salão para evitar o congelamento do evaporador e manter o ar fresco dentro de limites prefixados.

Os pontos importantes da curva de temperatura são os seguintes:

- Se a temperatura atinge $8^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$, ativa-se a eletroválvula de 50%;
 - Se a temperatura atinge $3^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$, ativa-se a eletroválvula de “by-pass”;
- Chegando a 0°C , desliga-se o compressor para evitar o congelamento.

3.2.2.3 Sensor de Temperatura do Ar Externo

Este sensor é responsável pela medida da temperatura do ar externo ao carro que é admitido pelo equipamento.

- Se a temperatura externa é inferior a 18 °C e a temperatura de retorno é inferior a 24 °C +/- 0,5 °C, o compressor entra em “By-pass”.
- Se a temperatura exterior é maior que 27 °C, aplica-se à fórmula de regulação.

3.2.3 Comando e Controle

Todos os cálculos e o controle são realizados pelo “NODO” PRINCIPAL, em que são instalados os seguintes cartões eletrônicos:

- Fonte de alimentação de bateria;
- Cartão CAN;
- Cartão PC;
- Cartão de comunicações RS 485.

O cartão CAN controla as comunicações entre “Nodos” e corrige informações incorretas que possam chegar.

No cartão PC está instalado o programa de controle do ar condicionado baseado na técnica de cálculo de lógica “FUZZY”, assim como a geração e o armazenamento de mensagens previstas para uma correta checagem do sistema.

A interconexão entre todos os “nodos” é feita mediante um “bus” local de comunicações chamado *CANOPEN*, “bus” série diferencial em baixa impedância, pelo qual percorrem os protocolos para acionamento dos equipamentos de potência.

O cartão RS485 comunica o “Nodo” Principal com o controle central do trem (TIMS) pelo protocolo de comunicações série.

3.2.4 Sistema de Comunicação Entre Carros

3.2.4.1 Comunicações por “Bus Can”

Dentro dos componentes eletrônicos do sistema se encontra o cartão para as comunicações do “bus” CAN, denominado “bus” local do carro. No cartão usa-se o canal 1 e ficando o canal 2 livre. Do canal 1 conecta-se o “bus” ao “Nodo” Secundário do AR1 e deste ao AR2.

3.2.4.2 Comunicações por “Bus” RS-485

No “Nodo” Principal se localiza o cartão de interface com o exterior para o “bus” RS-485 e este cartão é ligado ao cartão PC mediante o “bus” PC 104. A comunicação é permitida pela aplicação correta do protocolo de comunicações entre TIMS e a RIOM do carro.

O sistema de ar condicionado envia ao sistema de monitoramento do trem uma mensagem (resposta de teste) com os seguintes parâmetros:

- Avaria grave detectada na unidade um e / ou dois.
- Avaria leve detectada na unidade um e / ou dois.
- Falha de alimentação (24 Vcc) na unidade um e / ou dois.
- Estado das unidades um e dois.
- Autorização de partida do compressor das unidades um e / ou dois.
- Temperatura medida e desejada.

As mensagens podem ser de um a nove “bytes”. Todas as mensagens se iniciam com um byte, em que se detalha o tipo de mensagem a origem e destino da mesma.

A configuração elétrica entre os vários componentes pode ser observada no desenho da figura 3.4.

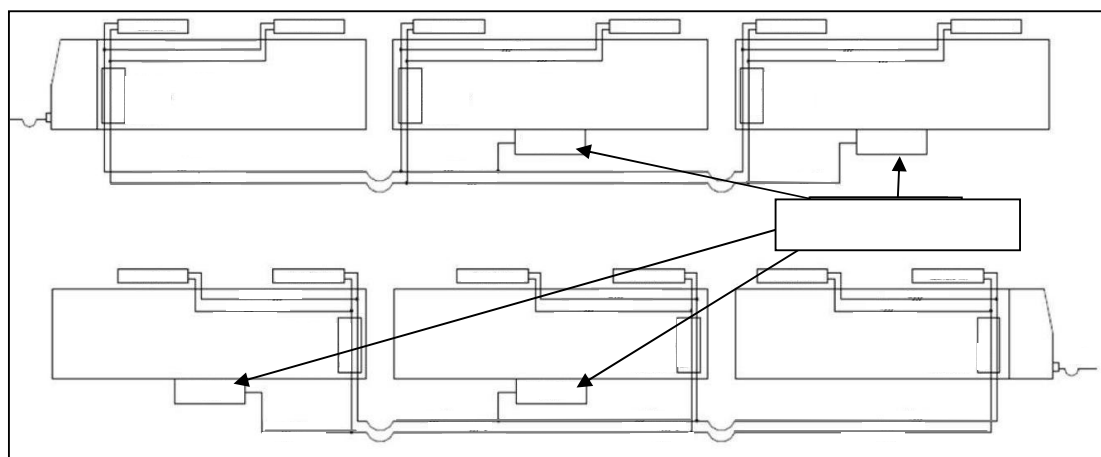


Figura 3.4. – Esquema elétrico de alimentação dos módulos de ar condicionado pelos inversores auxiliares.

3.2.5 “Software” de apoio à manutenção

O sistema conta ainda com um “software” de apoio à manutenção, cuja tela está ilustrada na figura 3.5, que permite a leitura das sondas de temperatura, a ativação individual de elementos do equipamento, atualização do programa de controle do equipamento de ar, entre outras funções

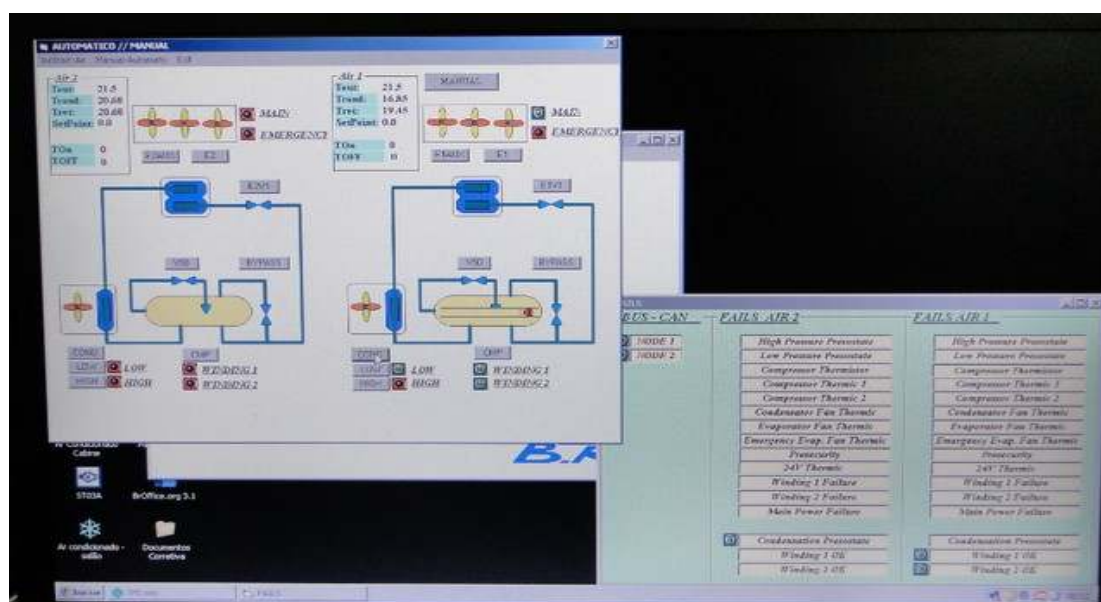


Figura 3.5 – Tela do programa que permite comandar, remotamente, a entrada e saída dos equipamentos do ar condicionado como ventiladores e compressor.

3.3 COMPONENTES

3.3.1 Compressor

É o principal equipamento do sistema e requer um monitoramento contínuo e um controle constante. O compressor da fotografia da figura 3.7 e, do desenho da figura 3.6 (quando instalado no alojamento do sistema), é linear do tipo parafuso e hermético, cuja função é a de fazer circular o fluido refrigerante por todo o circuito. O compressor aspira refrigerante na forma de vapor a baixa pressão, proveniente dos evaporadores. Este vapor é comprimido e em seguida passa para as baterias condensadoras.

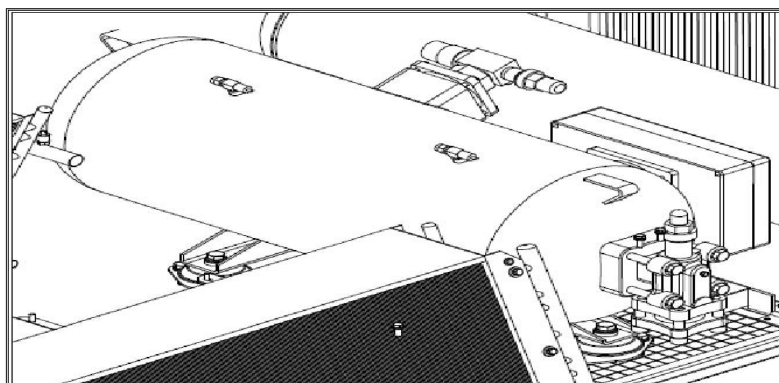


Figura 3.6 – Localização do compressor dentro do módulo do ar condicionado.



Figura 3.7 - Compressor de parafuso.

O motor do compressor tem duas bobinas em estrela, independentes e alimentadas por meio dos contatores K1.1 e K1.2; a partida e funcionamento é feito na configuração de dupla estrela ou “part-winding”. Na partida, o contator K1.1 é ativado e envia um sinal a um contato auxiliar do “Nodo” Secundário que, um segundo depois, ativa o contator K1.2 que, também envia um sinal para o “Nodo” Secundário ao seu contato auxiliar. O compressor funciona com os dois contatores ativados. Para que a parada do compressor, desconectam-se os dois contatores de forma simultânea. Na tabela 3.1 estão descritas as principais informações e características técnicas do compressor utilizado.

Tabela 3.1 – Características técnicas do compressor a parafuso

ITEM	ESPECIFICAÇÃO
Marca	BITZER
Modelo	VSK 4161-25Y
Tipo de compressor	Hermético de parafuso
Potência nominal	18,5 kW
Volume movimentado a 60Hz	96 m ³ /h
Carga de óleo	4 litros
Capacidade de controle	100% / 50%
Alimentação elétrica	440V-460V trifásico 60Hz
Corrente máxima de funcionamento	37 A

3.3.1.1 Descrição de Funcionamento

Para a partida do compressor, o sistema deve receber a ordem de partida (ON) do ar condicionado do carro. O “Nodo” Principal ordena o início (ON) após receber a permissão de partida para AR1 e para o AR2 conforme o fluxograma da figura 3.8.

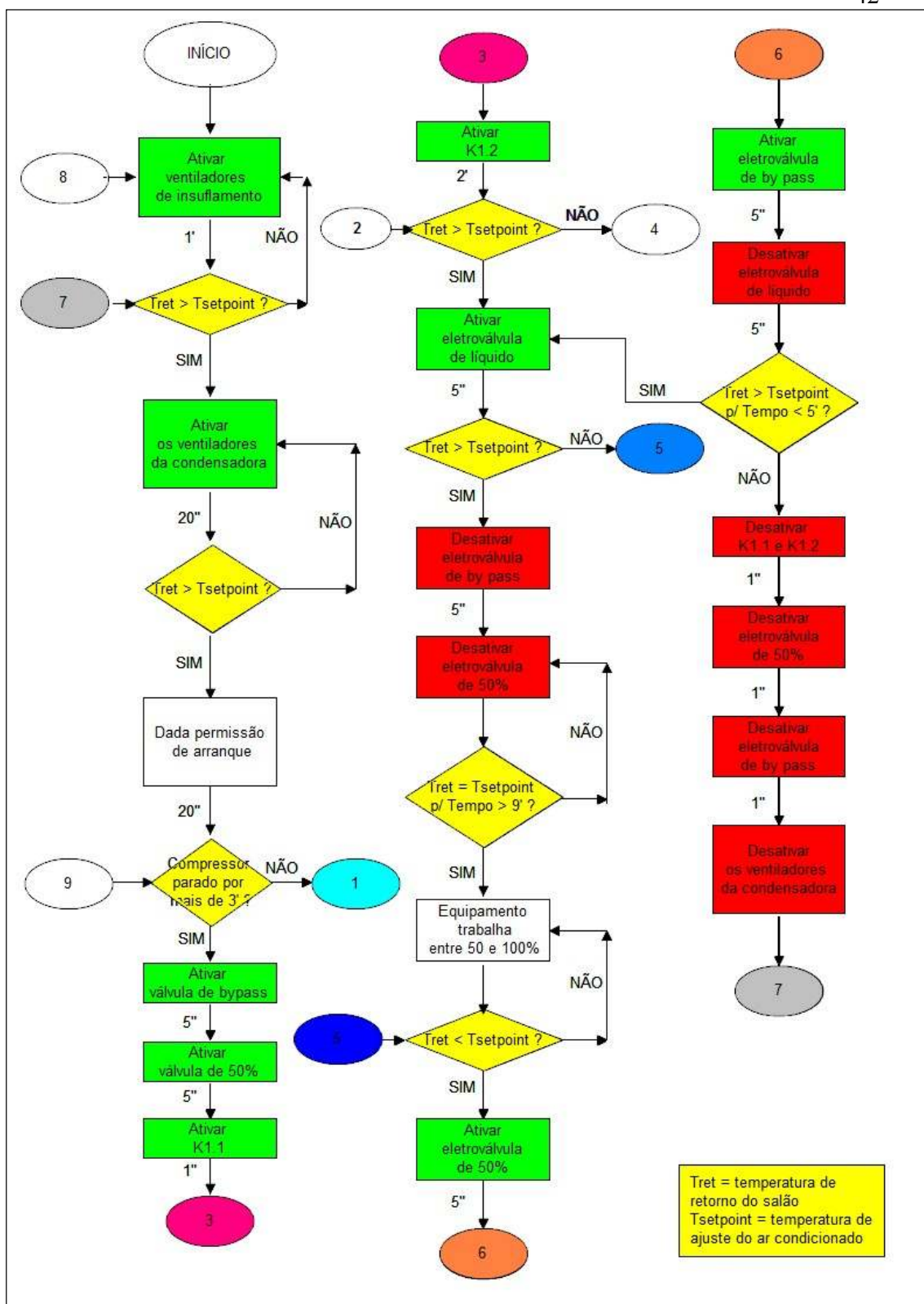


Figura 3.8 – Diagrama de funcionamento do compressor

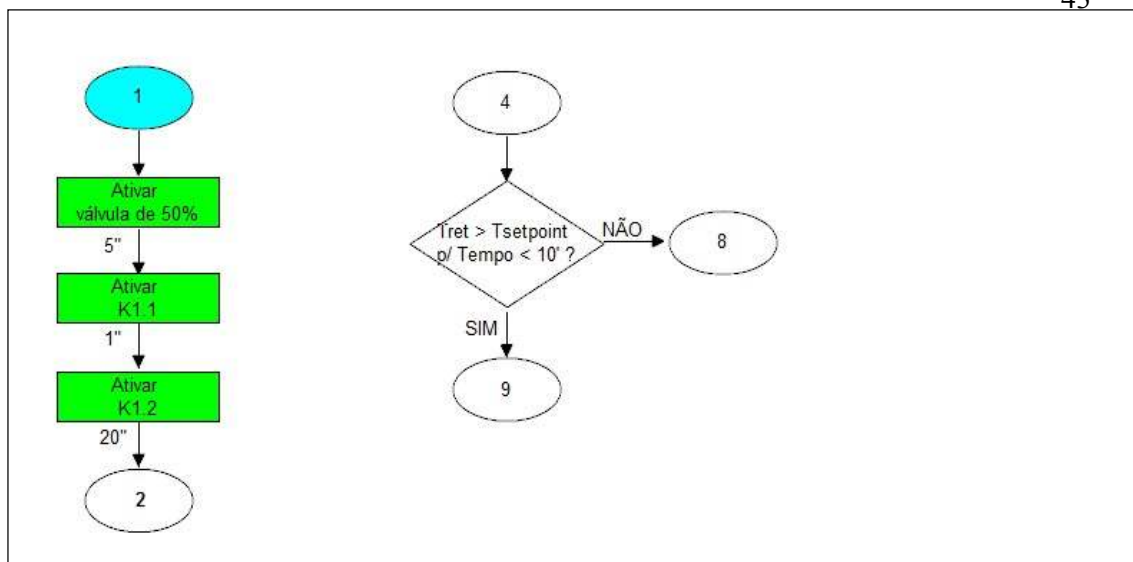


Figura 3.8 – Diagrama de funcionamento do compressor (continuação).

3.3.1.2 Parada

A parada do compressor é realizada de formas distintas:

- Por desconexão (OFF) geral do sistema via RS 485
- Por falha do relé térmico de qualquer um dos dois bobinados. Neste caso a desconexão do motor é direta e imediata, pois atua diretamente sobre a bobina dos contadores que por sua vez informa o “Nodo” Secundário para que retire a ordem de conexão.
- Por falha da cadeia de segurança (pressostato alta, pressostato baixa e termostato).
- Por falha do ventilador evaporadora ou condensadora
- Os itens b, c e d, são desconexões por avaria e a desconexão dos componentes do sistema deve seguir o processo descrito no diagrama da cadeia de segurança ilustrado na figura 3.9.:

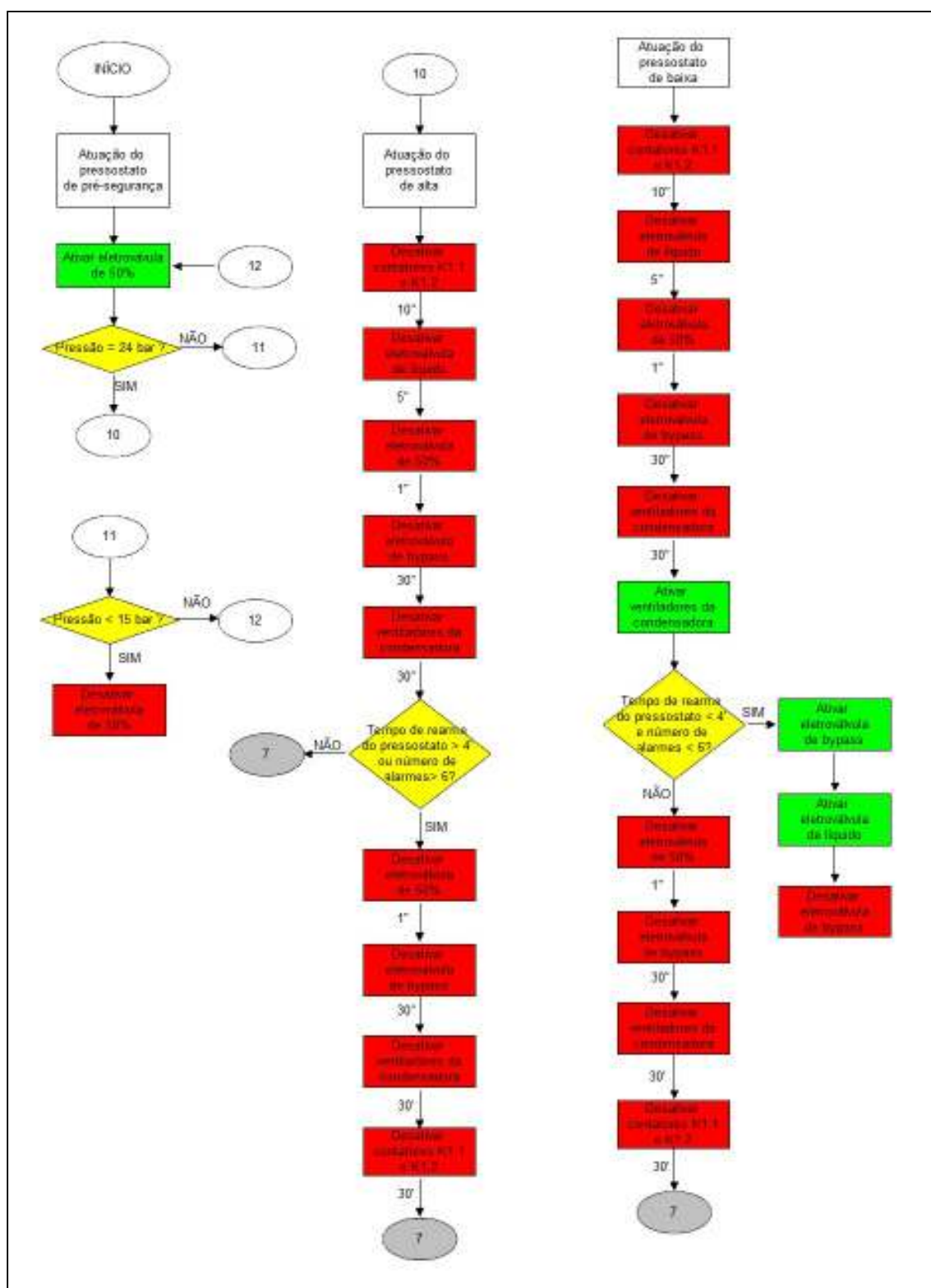


Figura 3.9 – Diagrama da cadeia de segurança

3.3.2 Válvula de Expansão Termostática.

Cada uma das duas válvulas de expansão, que podem ser identificadas na fotografia da figura 3.10, alimenta uma bateria evaporadora com líquido proveniente do depósito de líquido. As válvulas devem possibilitar que o líquido a alta pressão se expanda até atingir a baixa pressão necessária para que se proceda ao processo de evaporação do fluido refrigerante.

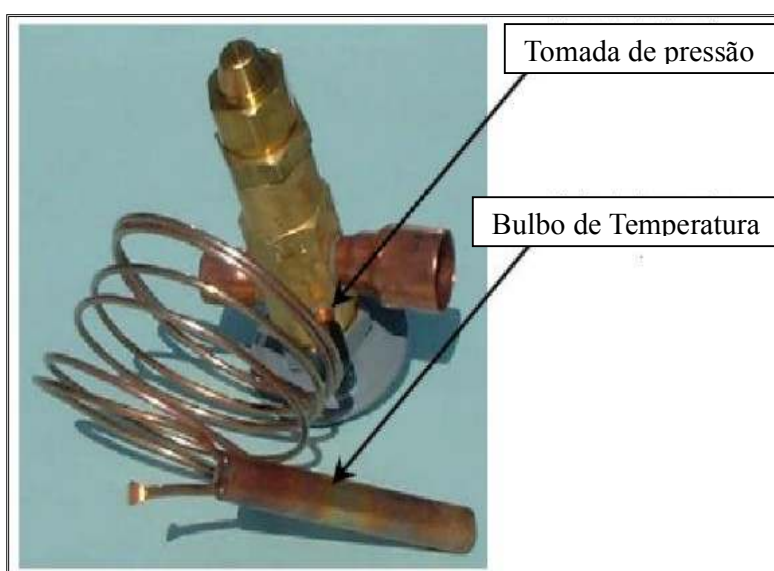


Figura 3.10 – Fotografia da válvula de expansão termostática

3.3.3 Baterias Condensadoras

A bateria condensadora é o local que ocorre à condensação do fluido refrigerante. Consiste de um pacote de tubos de cobre com aletas de alumínio. Os tubos formam diversos circuitos pelos quais o refrigerante circula, cedendo calor ao ar ambiente, proporcionado pelos ventiladores de condensação, que flui para a parte externa da bateria condensadora. Ao ceder calor, o refrigerante se condensa, passando da fase vapor para a fase líquida. A mudança de fase do refrigerante é realizada a pressão e temperatura constante, denominadas, respectivamente, pressão e temperatura de condensação.

Uma fotografia da bateria condensadora é mostrada na figura 3.11. Já na tabela 3.2 estão descritos os principais dados técnicos dessa mesma bateria condensadora.



Figura 3.11 - Bateria condensadora

Tabela 3.2 – Características técnicas da bateria condensadora

ITEM	ESPECIFICAÇÃO
Marca	HEATCRAFT
LADO AR	
Temperatura de entrada	30°C
Temperatura de saída	45°C
Perda de carga	146,9 Pa
LADO R134a	
Aquecimento	25°C
Condensação	55°C
Condensação líquida	54,9
Sub-resfriamento líquido	2
Fluxo	618,05 kg/h
Perda de carga	6,2 kPa
Pressão lado vapor	14,93 bar
Contracorrente de ar inclinada	60°
Capacidade	31,1 kW

Os equipamentos instalados possuem duas baterias cada, uma em cada lado do carro, conforme desenho da figura 3.12 Os ventiladores aspiram o ar exterior da parte superior do equipamento que, passando pelos ventiladores, chega às baterias e finalmente é expulso para o exterior pelas grades de ar de condensação.

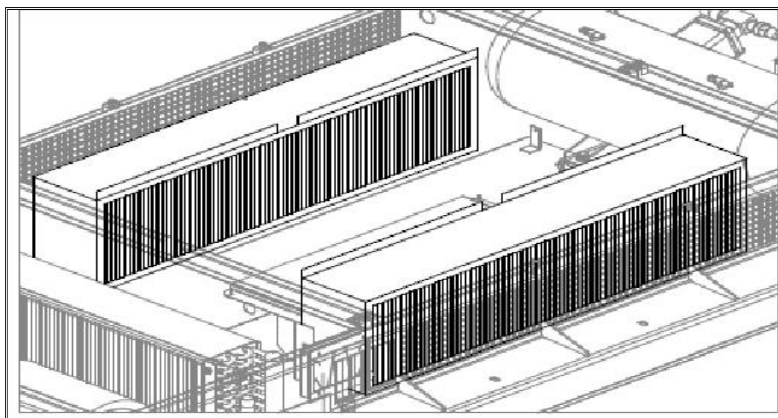


Figura 3.12 - Baterias condensadoras instaladas no modulo

Os ventiladores são do tipo axial e são instalados na zona central do equipamento conforme desenho da figura 3.13. Os ventiladores de condensação, ilustrados nas figuras 3.14 e 3.15, funcionam em duas velocidades diferentes: “lenta” e “rápida”. A atuação em uma ou outra velocidade depende da pressão de condensação. Ou seja, estabelece-se uma pressão até a qual os ventiladores funcionam a velocidade lenta e a partir da qual passam a fazê-lo a velocidade rápida.

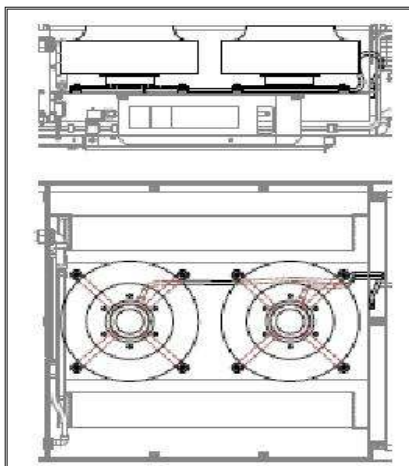


Figura 3.13 – Posição dos ventiladores de condensação

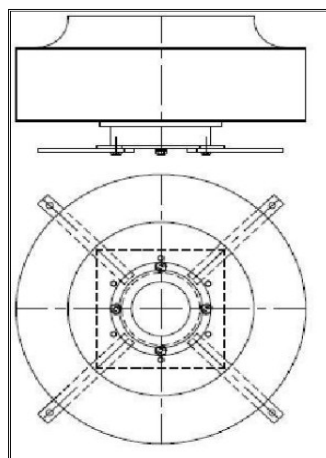


Figura 3.14 – Fixação do ventilador axial



Figura 3.15 - Ventilador axial

3.3.4 Baterias Evaporadoras

A bateria evaporadora ilustrada na fotografia da figura 3.16; consiste de um pacote de tubos de cobre com aletas de alumínio. Ao receber calor do carro, o refrigerante se evapora. A mudança de fase do refrigerante é realizada a pressão e temperatura constantes, denominadas, respectivamente, pressão e temperatura de evaporação. O ar tratado é resfriado e insuflado para a rede de dutos no salão. Os dados técnicos principais da bateria evaporadora estão mostrados na tabela 3.3, já na figura 3.17 mostra o desenho de montagem da bateria evaporadora.



Figura 3.16 – Bateria evaporadora

.Tabela 3.3 – Característica técnica da bateria evaporadora

ITEM	ESPECIFICAÇÃO
Temperatura de entrada	25,5°C
Temperatura de saída	8,9°C
Fluxo	2150 m ³ /h
Velocidade	1,57 m/s
Perda de carga	58,3 kPa
LADO R134a	
Aquecimento	5°C
T. evaporação líquido	6,7°C
T. evaporação	5°C
Condensação líquida	47°C
Sub-resfriamento líquido	2°C
Perda de carga	21,2 kPa
Pressão lado vapor	3,5 bar
Capacidade total	22,4 kW
Capacidade sensível	11,55 kW

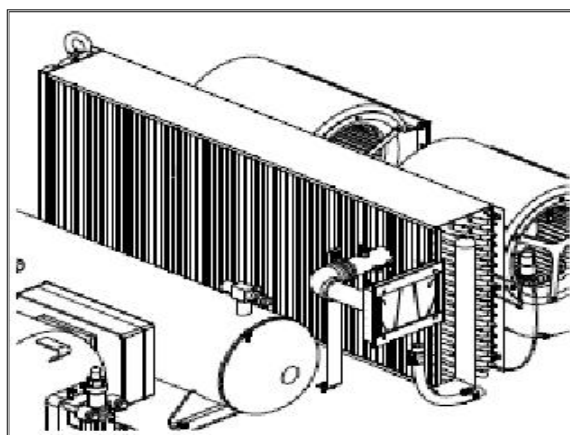


Figura 3.17 - Montagem da bateria evaporadora no modulo do ar condicionado

Na figura 3.18 pode-se observar uma das baterias evaporadoras do equipamento. A outra bateria evaporadora é instalada na outra extremidade da unidade. Cada uma das unidades possui quatro ventiladores centrífugos, dois em cada extremidade do equipamento.

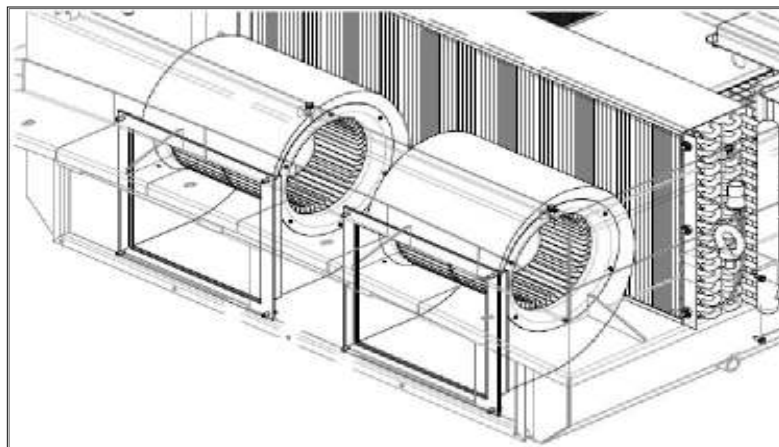


Figura 3.18 - Detalhe dos ventiladores das evaporadoras instalados

Por meio dos contadores K3 e K4 assegura-se que estes ventiladores sempre estarão alimentados quando seja necessário. Desta forma, assegura-se que, em caso de queda de uma das linhas de alimentação, os equipamentos poderão funcionar no modo de ventilação.

3.3.5 Válvula de Expansão Termostática – “BY PASS”

A função desta válvula é diminuir a pressão de condensação. O fluido resfriado pela queda de pressão é então misturado ao circuito do “by-pass”, antes de serem aspirados pelo compressor. Esta válvula recebe o fluido refrigerante de uma derivação da saída do depósito de líquido.

O refrigerante é expandido, resfriado e levado para a saída da válvula de “by-pass”. Lá os gases quentes da descarga se misturam com o líquido expandido (que acaba de se evaporar) produzindo refrigerante gasoso a uma pressão e temperatura tais que permita sua aspiração pelo compressor.

3.3.6 Válvula de Controle de Capacidade – “BY PASS”

Tem a função de desviar certa quantidade de vapor, proveniente da descarga do compressor, de seu caminho em direção às baterias condensadoras, levando-a a aspiração do compressor como ilustrado na figura 3.19.

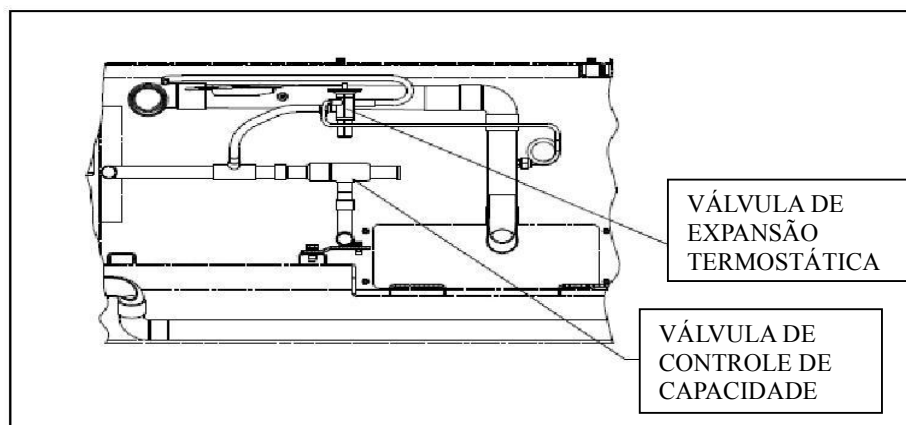


Figura 3.19 – Válvula de controle de capacidade.

3.3.7 Válvula Solenóide – “BY PASS”

Esta válvula permite ou impede o funcionamento da linha de “by-pass”. A válvula de “by-pass”, somente funciona se a válvula solenóide de “by-pass” estiver aberta. A fotografia da figura 3.20 ilustra esta válvula solenóide.



Figura 3.20 - Válvula solenóide

3.3.8 Depósito de Líquido

Sua função é a de armazenar o líquido proveniente das baterias condensadoras e alimentar as baterias evaporadoras. O depósito de líquido, cuja fotografia está na figura 3.21, absorve as diferenças de carga entre o líquido produzido nos condensadores e a demanda dos evaporadores.



Figura 3.21 - Depósito de líquido.

3.3.9 Manômetros.

Há dois manômetros instalados em cada equipamento para o controle da pressão na entrada e saída do compressor. São utilizados em operações de manutenção para observar as pressões de trabalho do compressor. O manômetro de alta indica o valor da pressão de descarga do compressor e o manômetro de baixa indica o valor da pressão de aspiração do compressor, conforme desenho representado na figura 3.22. Já na figura 3.23 encontra-se a fotografia do manômetro.

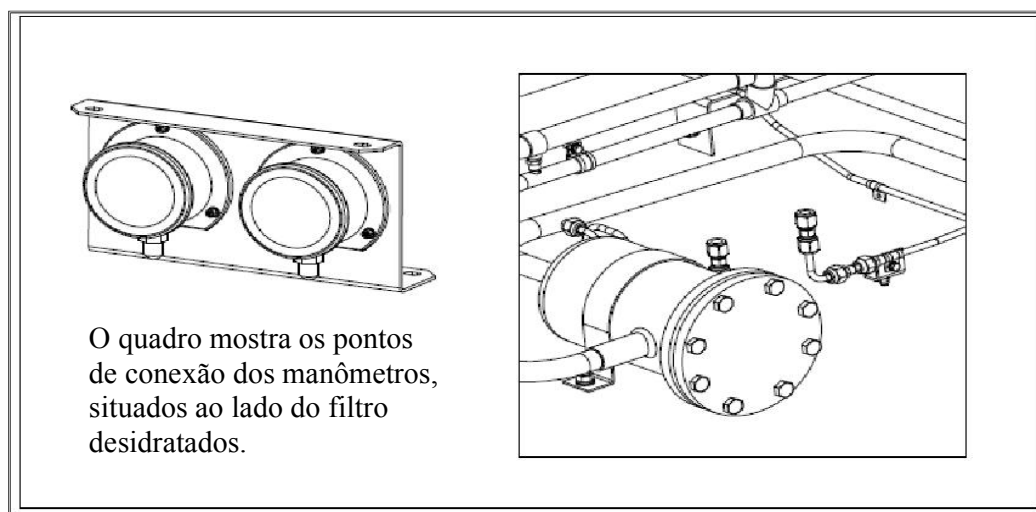


Figura 3.22 – Manômetros e tomadas no circuito.



Figura 3.23 – Manômetro

3.3.10 Pressostatos

Os pressostatos são utilizados para controle e segurança do equipamento. Estes pressostatos são instalados no circuito frigorífico para limitar as pressões de funcionamento do equipamento.

3.3.10.1 Pressostato de Condensação

Sua função é ativar ou desativar a velocidade alta dos ventiladores de condensação. Os ventiladores de condensação funcionam a velocidade lenta até uma pressão de Condensação de 12,4 bar.

3.3.10.2 Pressostato de Pré-segurança

Sua função é a de evitar a desativação desnecessária do compressor por atingir a pressão de segurança. A desativação do sistema pela atuação do pressostato de alta pressão é considerada uma falha grave, por esse motivo, é instalado o pressostato de pré-segurança que detecta a subida da pressão na descarga do compressor (20 bar) e que envia um sinal ao “Nodo” Secundário para que ative a válvula do 50% do compressor que propicia a diminuição da alta pressão

3.3.10.3 Pressostato de Alta Pressão

Sua função é a de evitar que o compressor trabalhe com uma pressão de descarga excessivamente alta. O pressostato envia um sinal para o “Nodo” Secundário quando a pressão atinge 24 bar, considerada como máxima admissível para o funcionamento do compressor. O “Nodo” Secundário adotará as medidas oportunas, como parar o sistema, para aliviar a situação.

3.3.10.4 Pressostato de Baixa Pressão

Sua função é a de evitar que o compressor trabalhe com uma pressão de aspiração excessivamente baixa. O pressostato envia um sinal para o “Nodo” Secundário quando a pressão de 0,5 bar é atingida.

3.3.10.5 Pressão de Atuação dos Pressostatos

Na tabela 3.4 são mostrados os valores de ajustes das pressões de fechamento e abertura tanto do pressostato de alta, segura, condensação e de baixa pressão.

Tabela 3.4 – Pressão de Atuação dos Pressostatos.

PRESSOSTATO	P ABERTURA (bar)	P FECHAMENTO (bar)
ALTA	24	19
SEGURANÇA	20	15
CONDENSAÇÃO	9,3	12,4
BAIXA	0,5	1,5

3.3.11 Sensores de Temperatura

Em cada equipamento são instalados ainda, três sensores de temperatura, responsáveis por monitorar as temperaturas do ar insuflado para o salão de passageiros, do ar exterior de renovação e do ar de retorno do salão de passageiros.

A localização dos sensores no alojamento do equipamento do ar condicionado é ilustrada na figura 3.24.

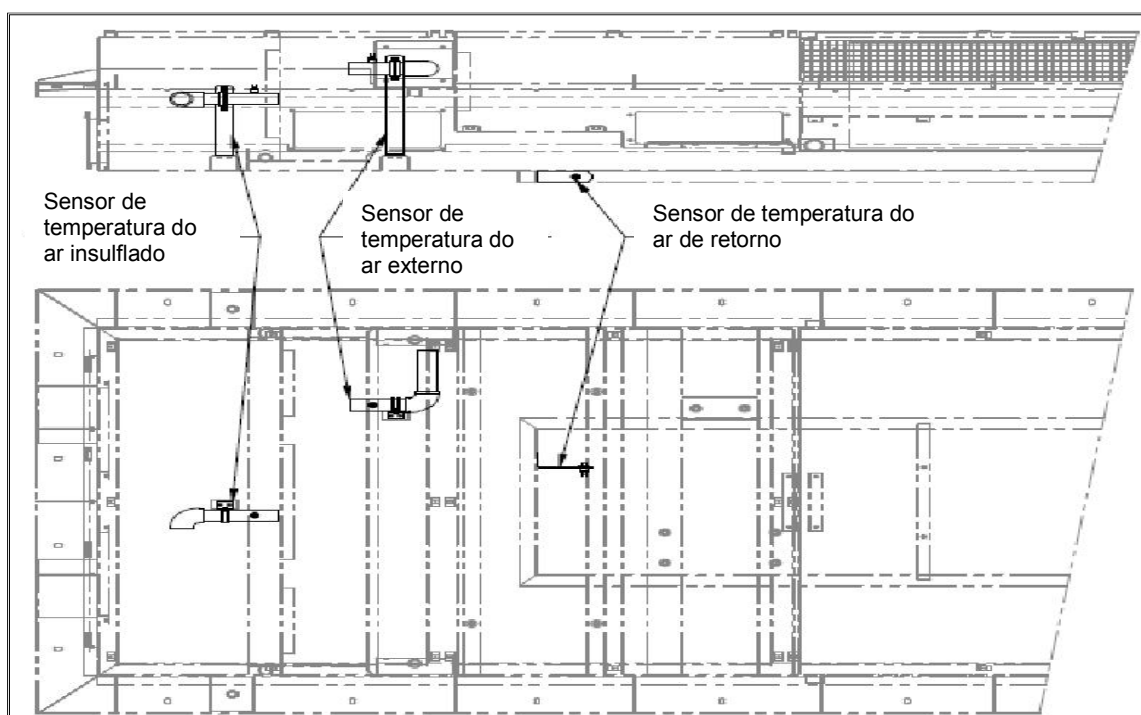


Figura 3.24 - Localização dos sensores de temperatura

3.3.12 Filtro Desidratador

O filtro desidratador tem duas funções:

- Reter partículas sólidas que o circuito refrigerante possa conter
- Reter a umidade contida no circuito refrigerante.

3.3.13 Visor de Líquido

O visor de líquido possui duas funções principais:

- Mostrar como o líquido refrigerante se dirige para as válvulas de expansão termostática
- Indicar o grau de umidade presente no interior do circuito refrigerante

3.3.14 Válvula Solenóide de Líquido

Sua função é controlar a passagem de líquido refrigerante para as baterias evaporadoras. A válvula se mantém fechada quando não recebe tensão. Quando o solenóide é ativado, a válvula se abre completamente permitindo a passagem de refrigerante em fase líquida. A ativação é realizada diretamente pelo “Nodo” Secundário.

3.3.15 Filtro de Ar Exterior

Sua função é limpar o ar de renovação que vai ser introduzido no salão de passageiros. São instalados quatro filtros em cada uma das entradas de ar exterior.

3.3.16 “Nodo” Secundário

O “Nodo” Secundário ilustrado na figura 3.25 é um equipamento eletrônico que por meio de um microprocessador controla os diversos componentes elétricos da

unidade. Possui diversas entradas (digitais e analógicas) e saídas (digitais) bem como a comunicação com o “Nodo” Principal. Este elemento recolhe todos os sinais dos elementos da unidade e das sondas de temperatura. Conecta e desconecta os diferentes elementos de acordo com as ordens do “Nodo” Principal.



Figura 3.25 - Cartão do “Nodo” secundário

3.3.17 “Nodo” Principal

Este equipamento é o responsável por realizar a parte de cálculo e controle do sistema de ar condicionado do carro e localiza-se no armário de baixa tensão. O esquema do “Nodo” principal é representado no desenho da figura 3.26.

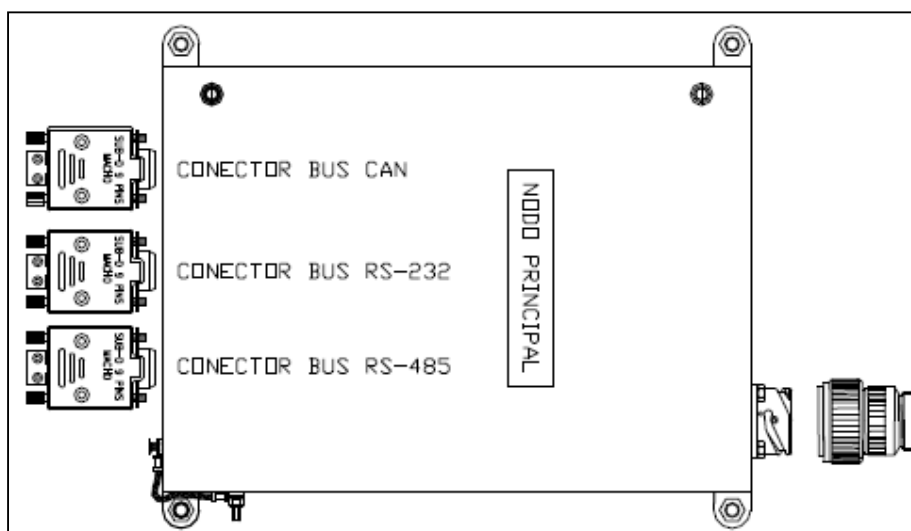


Figura - 3.26 – “Nodo” Principal

O “Nodo” Principal incorpora os seguintes cartões eletrônicos:

- Fonte de alimentação de bateria
- Cartão PC 386
- Cartão PC 104 (interface elétrica para protocolo de comunicação CAN OPEN)
- Cartão de comunicações RS485

O “software” de aplicação do “Nodo” Principal é feito gravando na memória da placa PC 386. O controle do sistema é realizado detectando-se as informações provenientes do PC 386 / “Nodos” Secundários com a respectiva transferência de dados ao processador central PC 386 / “Nodos” Secundários.

O cartão PC 104 controla as comunicações entre “Nodo” Principal e “Nodos” Secundários ao mesmo tempo em que corrige uma informação errada que possa chegar.

O cartão de comunicações RS-485 permite a conexão do sistema de ar com o exterior, ou seja, com o restante do trem. Este cartão é conectado ao cartão PC por meio do “bus” PC 104.

O fato de dispor de uma porta RS-232, permite a conexão de um PC externo para realizar a manutenção usando-se o “*software*” adequado. A fonte de alimentação do “Nodo” Principal supre o nível de tensão de 72 Vcc e é protegida por meio do interruptor magneto-térmico EVCB a 4 A.

3.3.18 Componentes Elétricos

Os componentes elétricos do sistema de ar condicionado (ver esquemas elétricos do apêndice) e citados nas nos fluxogramas das figuras 3.8 e 3.9 terão as suas funções descritas nos itens seguintes.

3.3.18.1 Magnetotérmico F1

É responsável pela proteção de uma fase (R em AR1 e U em AR2) de alimentação para o transformador TR1. Um contato auxiliar permite a passagem de um sinal de 24 Vca que indica ao “Nodo” Secundário se o magnetotérmico está armado.

3.3.18.2 Magnetotérmico F2

É responsável pela proteção de uma fase (U em AR1 e R em AR2) de alimentação para o transformador TR2. Um contato auxiliar permite a passagem de um sinal de 24Vca que indica ao “Nodo” Secundário se o magnetotérmico está armado.

3.3.18.3 Relé RL1

Alimenta o “Nodo” Secundário com tensão de 9 Vca e 24 Vca. Se a linha “principal” cair, o relé RL1 troca seus contatos de posição, permitindo a alimentação elétrica do “Nodo” Secundário por meio do transformador TR2, ou seja, da linha de emergência.

3.3.18.4 Relé RL2

Alimenta a bobina da válvula de 50% do compressor com tensão de 220 Vca. Os dois sinais da bobina são controlados diretamente pelo “Nodo” Secundário.

3.3.18.5 Relé térmico RT1.1

É responsável pela proteção do compressor. O relé térmico RT1.1 protege a linha que atravessa o contator K1.1. O relé RT1.1 envia um sinal ao “Nodo” Secundário para indicar quando está armado e quando não está.

3.3.18.6 Relé térmico RT1.2

É responsável pela proteção do compressor . O relé térmico RT1.2 protege a linha

que atravessa o contator K1.2. O relé RT1.2 envia um sinal ao “Nodo” Secundário para indicar quando está armado e quando não está

3.3.18.7 Relé térmico RT2.1

É responsável pela proteção dos ventiladores de condensação. A atuação do relé desconecta o sinal de ativação do contator K.2.1.

3.3.18.8 Relé térmico RT3 e RT4

É responsável pela proteção dos ventiladores da evaporadora. O relé térmico RT3 protege a linha “principal” que atravessa o contator K3 e, em caso de atuação, corta o sinal de ativação da bobina desse contator. Relé térmico RT4 também é responsável pela proteção dos ventiladores de impulsão. O relé térmico RT4 protege a linha “de emergência” que atravessa o contator K4 e, em caso de atuação, corta o sinal de ativação da bobina desse contator.

3.3.18.9 Contator K1.1

É responsável pela conexão do compressor. O motor do compressor tem duas bobinas em estrela independentes alimentadas por meio dos contadores K1.1 e K1.2; a partida e funcionamento são realizados em dupla estrela. O contator K1.1 é o primeiro a conectar-se e envia um sinal (“conectado”) ao “Nodo” Secundário.

3.3.18.10 Contator K1.2

Também responsável pela conexão do compressor o contator K1.2 é o segundo a conectar-se, e envia um sinal (“conectado”) ao “Nodo” Secundário.

3.3.18.11 Contator K2.1

É responsável pela conexão dos ventiladores de condensação a velocidade lenta. O

contator K2.1 é considerado “principal” e deve estar sempre ativado, tanto na velocidade lenta como na velocidade rápida, para que os ventiladores de condensação possam funcionar. A conexão da bobina deste contator passa pelo relé térmico RT2.1.

3.3.18.12 Contator K2.2

É responsável pela conexão dos ventiladores de condensação a velocidade rápida. Está em repouso na velocidade lenta e ativado na velocidade rápida. Os motores de ventilação quando em estrela-estrela funcionam em velocidade lenta e em estrela-triângulo em velocidade rápida.

3.3.18.13 Contatores K3 e K4

São responsáveis pela conexão dos ventiladores da evaporadora na linha “principal. Quando está conectado o contator K4(linha” de emergência “) o contator K3 não pode ser ativado. A ativação simultânea de ambos os contatores poderia provocar danos ao sistema elétrico.

3.3.18.14 Transformadores TR1 e TR2

É responsável pela transformação da tensão proveniente da linha “principal” em três saídas diferentes: 9 Vca, 24 Vca e 220 Vca. Transformador TR2. É responsável pela transformação da tensão proveniente da linha de “emergência”.

4. ESTUDO EXPERIMENTAL

O monitoramento contínuo dos parâmetros de um ciclo frigorífico proporciona, a partir do funcionamento em condições normais, primeiramente o conhecimento de tais parâmetros e então, a partir deles, identificar com exatidão e em tempo real, quaisquer desvios que possam a vir ocorrer, em decorrência de desgaste, vazamentos ou falhas de componentes dentro do circuito. A temperatura de um compressor, por exemplo, é um dado de suma importância dentro do processo de monitoramento de um circuito frigorífico.

Uma alteração qualquer na temperatura de funcionamento de um compressor é um indicativo de modificação no comportamento do ciclo frigorífico. O diagnóstico de problemas de natureza eletromagnética de um motor elétrico de acionamento do compressor pode ser feito com a medição da corrente que alimenta o motor. O monitoramento da corrente elétrica pode, entre outros, revelar pelo aumento em sua intensidade, um aumento na resistência ao movimento do compressor, decorrentes, por exemplo, de problemas mecânicos ou tribológicos. A partir dos dados, se obtém uma assinatura de corrente, que possui um espectro característico.

Analisando-se as curvas de tendências dos parâmetros monitorados e os níveis de alarme, pode se obter um alto grau de confiabilidade e maior disponibilidade do equipamento. O desenvolvimento desta técnica está condicionado ao correto tratamento dos dados e ao emprego de instrumentos e “software” adequados.

O estudo experimental foi desenvolvido em um equipamento de ar condicionado (AR-01 do carro 5725 do trem 505) com a medição das temperaturas de sucção e de descarga, da linha de líquido, ambiente (ar de retorno), de insuflamento e externa e pressões de sucção, de descarga, valores do superaquecimento, subresfriamento, corrente do motor do compressor, estado dos contadores, válvulas solenóides, termostato e Relé (RL2) do modo 50%.

4.1.INSTRUMENTAÇÃO

Para a execução deste estudo foram utilizados os recursos disponíveis na companhia, associando equipamentos já consagrados no ramo metroferroviário, como por exemplo o “Registrador de Eventos – EVR, fabricado pela ALSTOM, responsável pela visualização dos registros analógicos e digitais no domínio do tempo, e a ferramenta de aquisição de dados Labview® (“hardware” e “software” dedicado), com a programação realizada por empregados do Metrô que detém o conhecimento apropriado do trem, suas características e do aplicativo de programação.

Inicialmente foram instalados sensores nos pontos definidos para medida do sistema de ar condicionado, foram utilizados sensores de temperatura do tipo PT-100 e transdutores de pressão cujos sinais foram devidamente convertidos em sinais elétricos, também foram usados sensores de corrente para medição das correntes de partida e regime dos compressores. A montagem exigiu cuidados especiais quanto à fixação, evitando a ocorrência de partes que possam se desprender com a movimentação do trem provocando ruídos, contatos deficientes e até mesmo falhas em outros sistemas por ocorrência de baixas isolações e / ou curto-circuito.

Após a montagem dos sensores, fiações e condicionadores de sinais, é realizada a interligação entre o sistema Labview® e o computador, no caso realizada pela conexão USB de ambas as partes, captando as informações e armazenando-as. A instalação do computador em local fechado de forma segura e sem influência das vibrações do sistema.

Após a aquisição dos dados nas diversas condições de temperatura e umidade externa e carregamentos, o trem é recolhido ao centro de manutenção e as informações são resgatadas, sendo a visualização realizada por aplicativo desenvolvido no próprio “software” Labview®, ou ainda pelo registrador EVR, devidamente adaptado para tal função.

Na Figura 4.1 identifica-se os equipamentos instalados no salão de passageiro de um trem da frota “F” em que se observar, além do “notebook” para coleta de dados, o armário elétrico (aberto) para conexões dos cabos e as interligações que vem do teto. Todos os cabos de cor azul foram usados nas conexões com os sensores e não pertencem as conexões originais do trem

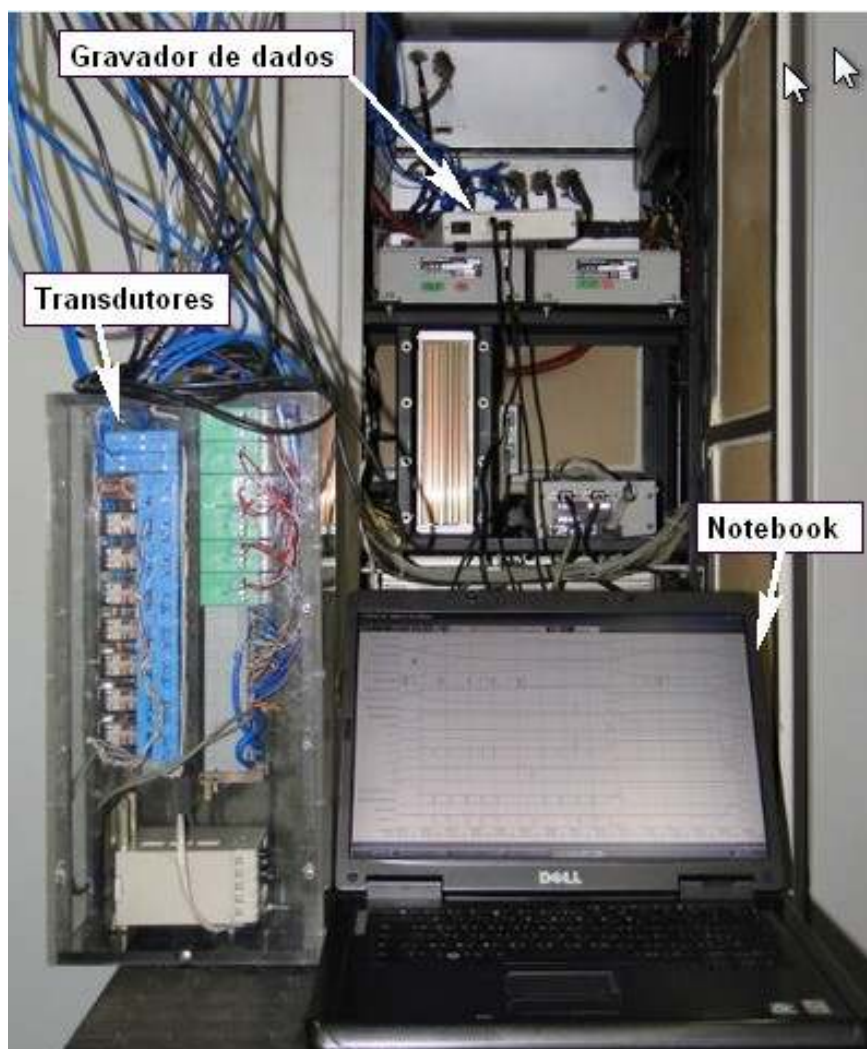


Figura 4.1 – Conjunto utilizado no monitoramento do ar condicionado

Detalhes dos sensores e do condicionador de sinais para aquisição de dados são mostrados respectivamente nas figuras 4.2 e 4.3. Na figura 4.2 estão os sensores de temperatura PT100 e as abraçadeiras de fixação. A figura 4.3 mostra a fotografia do modulo de condicionamento de sinais da marca Wika.

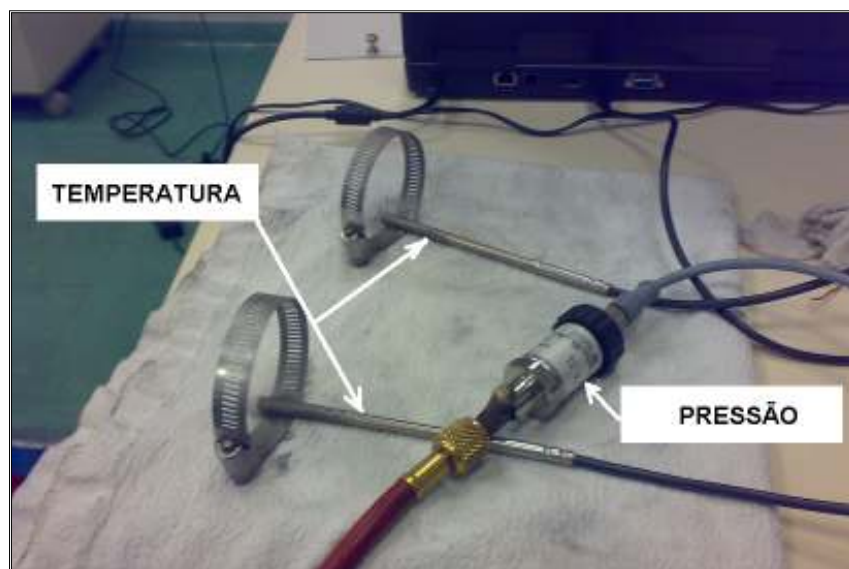


Figura 4.2 – Sensores de temperatura e pressão

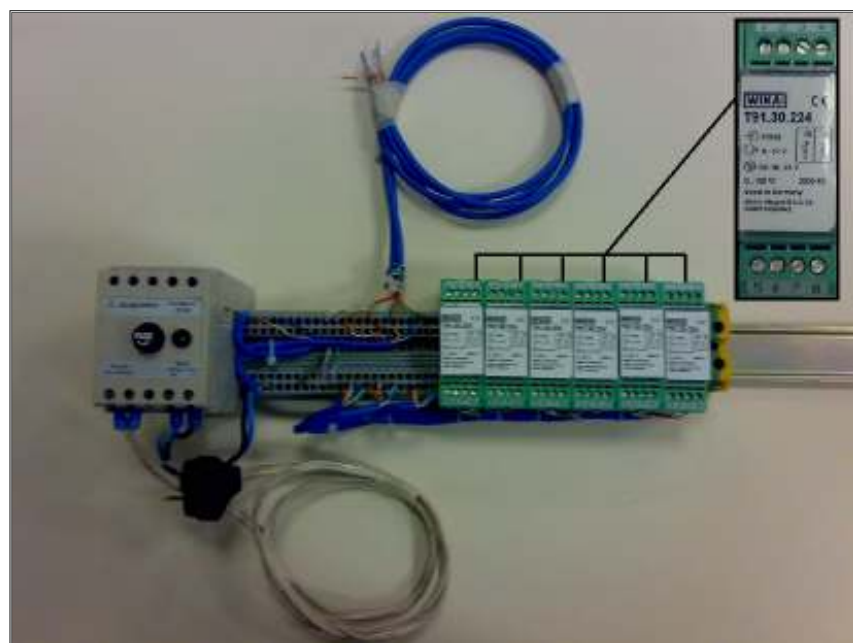


Figura 4.3 – Condicionador de sinais

Já na figura 4.4 está apresentada a fotografia dos sensores de corrente, em azul e na fotografia da figura 4.5, os condicionadores de sinais usados nas medições.



Figura 4.4 – Sensores de corrente

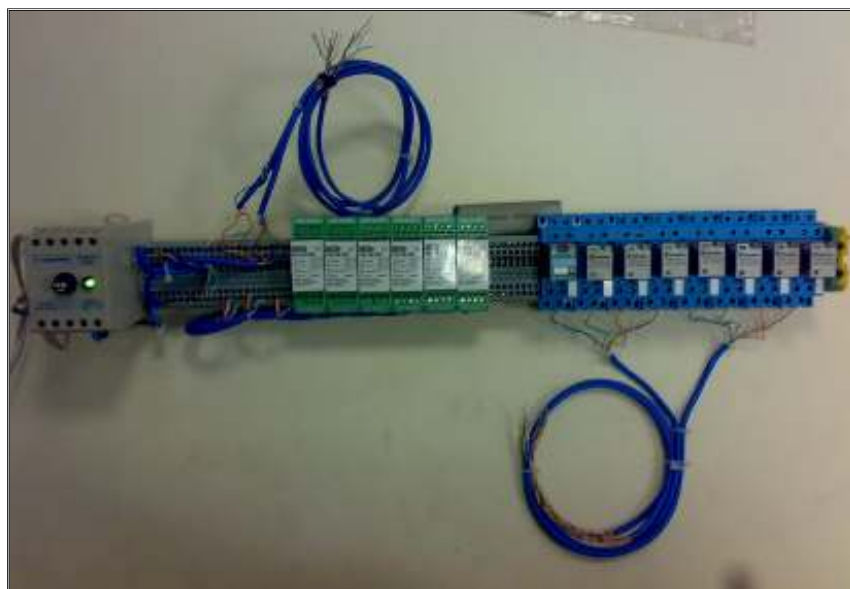


Figura 4.5 – Condicionador de sinais e atuadores

Nas fotografias das figuras 4.6 e 4.7 podem ser vistos dois modelos de gravador de dados que foram opções para esse trabalho.

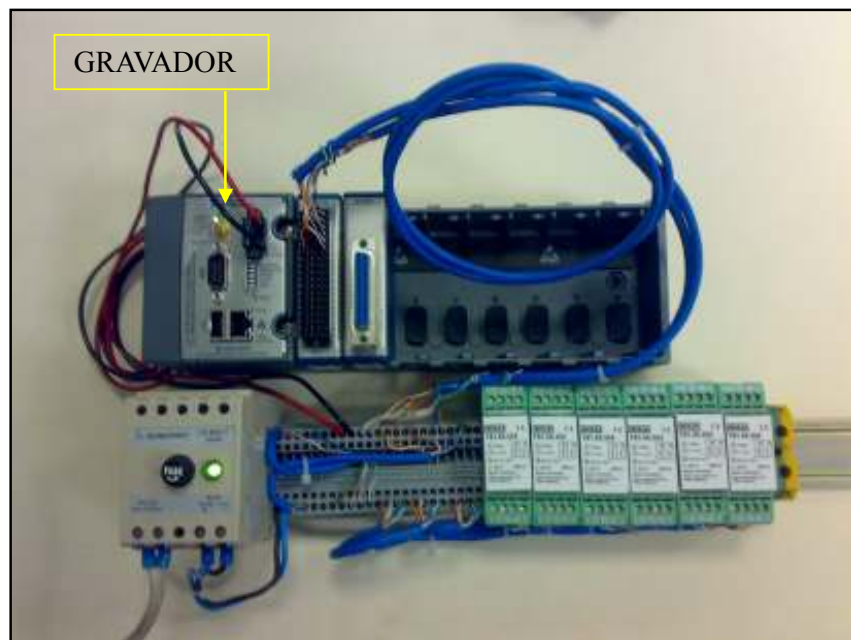


Figura 4.6 – Gravador de dados com Compact RIO National Instruments



Figura 4.7 – Gravador de dados com módulo 505 da National Instruments

A fotografia da figura 4.8 mostra os equipamentos durante a preparação do teste enquanto a figura 4.9 representa a tela de monitoramento do sistema Labview® no “notebook”. Nela é visto uma coluna para monitoramento dos sensores de temperatura, outra para verificação do estado dos equipamentos e na terceira os valores de corrente e pressão. Na última coluna têm-se os valores calculados do sistema e os botões para ajustes de valores do circuito frigorífico.



Figura 4.8 – Conexão “notebook” com módulo 505 da National Instruments

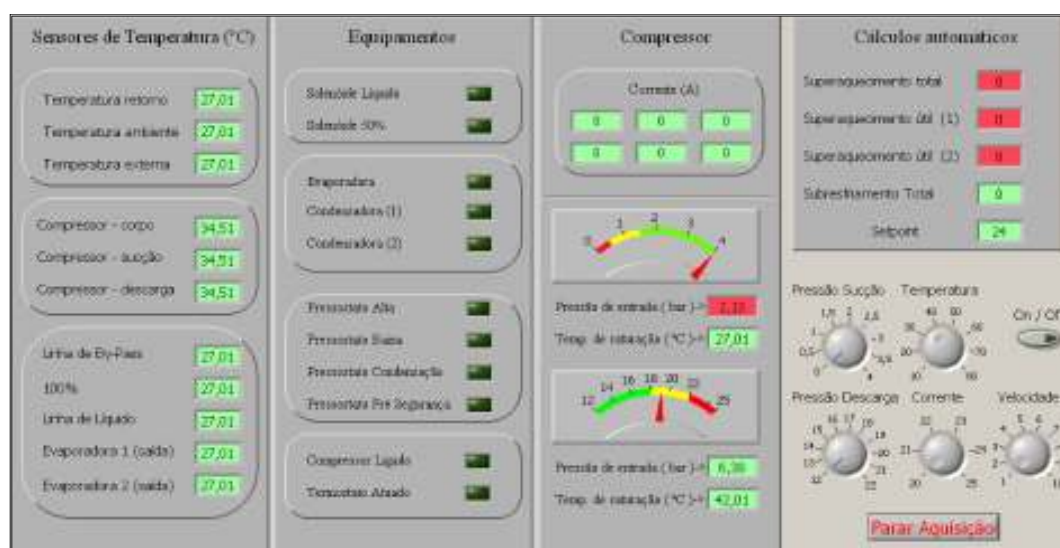


Figura 4.9 – Tela do gravador de dados com Labview®

A figura 4.10 mostra a fotografia do gravador de dados dentro do armário elétrico do trem enquanto a figura 4.11 representa as interligações do módulo de interface. Ambos já na configuração para coleta dos dados durante a operação comercial



Figura 4.10 – Gravador de dados para transferência e interface com o “notebook”



Figura 4.11 – Módulos de interface National para coleta de dados dos sensores

Nota-se na fotografia da figura 4.12 a canaleta onde os sensores de corrente estão presos nos cabos de alimentação do compressor.



Figura 4.12 – Conexões e cabos na canaleta de cabos do trem

A figura 4.13 mostra a fotografia do compartimento do ar condicionado localizado no teto do trem com a preparação necessária para o monitoramento.



Figura 4.13 – Conexões no compartimento do compressor no teto do trem

4.2 MONITORAMENTO DO SISTEMA DE AR CONDICIONADO

Conforme descrito na introdução desse capítulo, o estudo experimental foi desenvolvido com base no monitoramento contínuo dos seguintes parâmetros:

- temperaturas de sucção e de descarga do compressor;
- temperatura da linha de líquido;
- temperatura do ambiente ou do salão de passageiros (ar de retorno);
- temperatura de insuflamento;
- temperatura externa;
- pressões de sucção e de descarga do compressor;
- superaquecimento;
- sub-resfriamento;
- corrente do motor do compressor;
- estado dos contadores K1.1, K1.2, K2.2, K2.2, K3 e K4;
- válvulas solenóides de líquido e de “By-pass”;
- termostato da carcaça do compressor e
- Relé RL2, do modo 50%.

Por esses parâmetros, foi avaliado se o ciclo estava funcionando de acordo com as faixas teóricas de pressão / temperatura previstas no projeto e ainda, detectar picos de pressão e corrente e frequência de acionamentos. O fabricante estabelece, por exemplo, que o superaquecimento medido, que é a diferença entre a temperatura registrada pelo termômetro e a registrada no manômetro (temperatura de evaporação), na região de entrada do compressor (sucção), deverá estar entre 6 e 12K. Observado o limite inferior, garante que na entrada do compressor só haja vapor superaquecido, pois a presença de líquido nessa região compromete o seu funcionamento. No caso de ultrapassagem do limite superior, além da redução do rendimento, também traz danos ao compressor, aumentando a temperatura de descarga, podendo carbonizar o óleo causando desgaste prematuro e no pior caso a “queima” do compressor. Já o sub-resfriamento é a diferença entre a temperatura de condensação e a temperatura do fluido refrigerante na linha de líquido,

recomendado de 2K para evitar perdas de rendimento do sistema frigorífico com a presença de “flash-gas” (evaporação instantânea) na linha de líquido (Boletim Bitzer, 03/2005).

Quanto a eficiência da bateria condensadora, é recomendado para esse sistema que a queda de temperatura do fluido refrigerante entre a entrada e a saída seja de, no mínimo 30 °C, que é avaliado observando a diferença entre as temperaturas de descarga e da linha de líquido.

Para que haja o correto fluxo de lubrificação pelos rotores do compressor de parafusos, é desejável que haja um diferencial de pressão entre a sucção e a descarga de pelo menos 3 bar.

Já a temperatura de descarga deve ser inferior a 100°C, sob risco de comprometer as características do óleo lubrificante. Da mesma maneira a pressão de descarga recomendada deve ser inferior a 200 psi.

Com relação à corrente de acionamento do motor do compressor, deve limitar-se a 37 A durante o funcionamento e os picos durante o acionamento a 213 A.

Há ainda, os tempos de funcionamento e ciclos de acionamento recomendados pelo fabricante do compressor, que no caso, são limitadas a no máximo 6 partidas por hora e tempo mínimo de funcionamento do compressor é de 5 minutos.

Balizando-se por esses valores de referência, já se torna possível traçar um diagnóstico preciso sobre a causa de determinada anomalia, considerando os seus efeitos sobre cada parâmetro, ora avaliado.

Neste trabalho de monitoramento, devido ao prazo, não foi possível dispor de todos os sensores de temperatura, pressão e de vazão propostos pelo orientador e previstos na fase de planejamento, de forma a possibilitar a análise de componente a componente do circuito. Entretanto, a continuidade desse trabalho, se vislumbra

prosseguir com essa idéia e avaliar a viabilidade de se proceder a esse monitoramento de forma contínua, transmitindo os dados via “Wireless” para uma Central de Manutenção.

Na figura 4.14, é mostrado o Circuito Frigorífico montado na tela do “notebook” utilizando o programa Labview® desenvolvido para esse monitoramento.

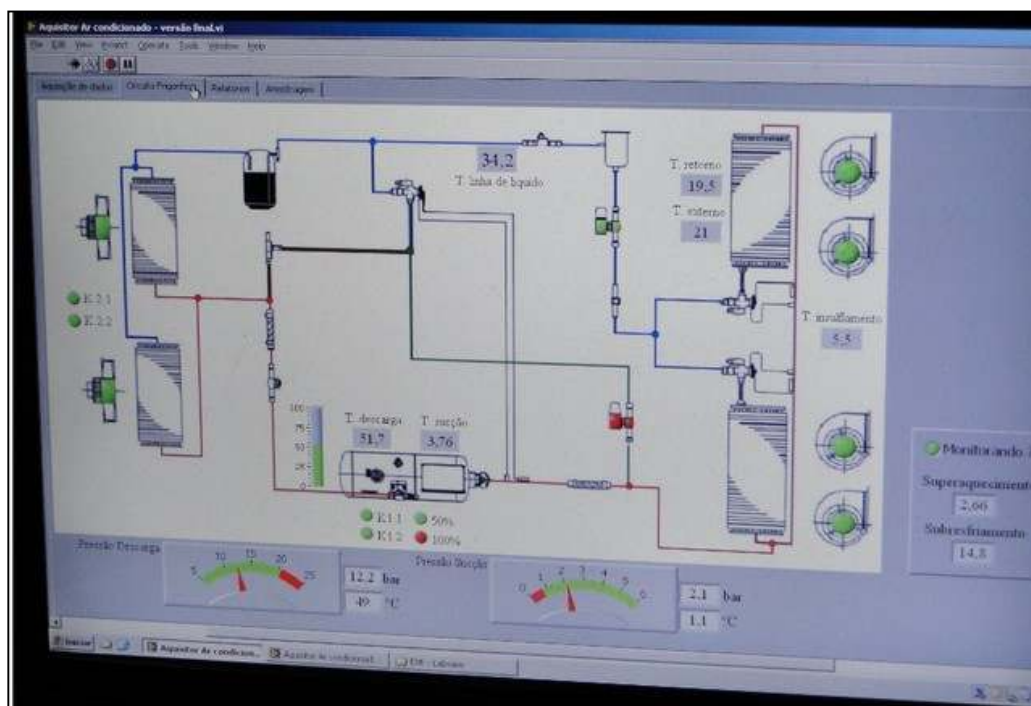


Figura 4.14 – Fotografia do “notebook” com a representação gráfica do circuito frigorífico do ar condicionado da frota “F”.

4.3.PREPARAÇÃO

Após uma rigorosa revisão, na qual, o equipamento do carro 5725 do trem 505 foi submetido a limpeza do circuito frigorífico substituído o fluido refrigerante existente (pelo da marca recomendada pelo fabricante - DuPont), trocado o óleo do compressor, o filtro desidratador e obtido vácuo do circuito frigorífico recolocando o sistema nas condições originais de projeto

Também foi feita a regulação do superaquecimento termodinâmico (limite recomendado de 8 à 20°C), mas para realização dessa atividade havia a necessidade de uma temperatura ambiente em torno de 30°C, o que torna o trabalho viável apenas no verão como forma de contorno, se desenvolveu um dispositivo para aquecimento do ar de retorno para proporcionar tais condições em qualquer época do ano. Finalmente também foi instalado um compressor novo.

Os técnicos da manutenção que executaram as atividades acima também instrumentaram esse módulo de ar condicionado, no qual foram feitos os registros necessários para comparação e análise.

Inicialmente foi registrado o funcionamento do equipamento nas mesmas condições em que os trens vêm operando nos últimos anos, ou seja, sem alteração de nenhum dos ajustes do sistema. Essas medições foram feitas nos dias 10/03/2010, 15/03/2010, 21/03/2010 e 24/03/2010.

Uma das dificuldades encontradas foi a de identificar, em meio aos registros, as mesmas condições climáticas (temperatura e umidade) nos horários de maior carregamento com usuários (picos da manhã e tarde) para efeito comparativo. Contudo, nas medições de 12/03/2010, foram atingidas temperaturas elevadas suficientes para promover a atuação do termostato do motor, ocorrência que gera grande desconforto dos usuários e o conseqüente transtorno à operação. Esta atuação indica que o compressor chegou a condições extremas.

Também foi realizada uma medição com retirada de um resistor de $1k\Omega$ (em 18/03) que foi colocado em série com o sensor do ar de retorno. Essa modificação foi feita pela manutenção do Metrô, a pedido da operação, com o objetivo de aumentar a temperatura mínima de entrada em funcionamento do ar condicionado de 22°C para 23°C . O objetivo dessa alteração foi diminuir as freqüentes reclamações de usuários de que a temperatura interna do salão “é muito fria”.

Outra medição realizada em 18/03/2010, foi com o equipamento fixo na condição e de 50% da potência do Ar Condicionado, que tinha o objetivo diminuir a freqüência de partidas do compressor durante o funcionamento do sistema.

5 ANÁLISE DOS DADOS

Foram selecionados, dentre os registros disponíveis, aqueles que melhor ofereciam chances de obtenção de conclusões acerca do funcionamento do sistema de ar condicionado em condições de maior solicitação de carga térmica.

5.1 REGISTRO EM DIA QUENTE NAS CONDIÇÕES NORMAIS DE OPERAÇÃO DO SISTEMA DE AR CONDICIONADO

Na figura 5.1 tem-se os valores obtidos em um dia de calor entre os horários das 10h02 e 10h33 do dia 10/03/2010. Neste período a temperatura externa variou entre 30°C e 35°C e conforme o fluxograma de diagrama do compressor da figura 3.8, observa-se que o sistema estava funcionando corretamente.

Na primeira linha de dados (às 10h09'02") observa-se os valores em que se encontravam todos os dados monitorados. Na seqüência pode ser visto que devido ao compressor estar desligado (K1.1 em 0) a temperatura ambiente começa a subir lentamente até atingir pouco mais de 28,5°C, neste instante a válvula de "By-pass" passa para "1" ativando o circuito de "By-pass", na seqüência o relé RL2 passa para "0" deixando o compressor em 50%. Na seqüência o contator K1.1, que estava desligado por mais de 3 minutos, é acionado ligando o compressor.

Uma vez que o compressor está em funcionamento segue a seqüência para colocá-lo em plena carga. Primeiro acionado a válvula de líquido e desligando a válvula "by-pass" deixando o compressor em 50%, que após poucos segundos passa para 100% quando relé RL2 passa para "1".

Nessa condição a temperatura interna do salão começa a baixar e por volta das 10h15' com aproximadamente 26,3°C, o relé RL2 abre voltando a 50% após o compressor trabalhar em 100% por cerca de 1'50". Depois de 30' a temperatura chega a 25,5°C acionado o circuito de "by-pass" e fechando a válvula de líquido.

Passados cerca de 5 minutos em na condição de “by-pass” e sem a uma elevação significativa da temperatura ($0,5^{\circ}\text{C}$) o compressor se desliga (10h20'), pelo contator K1.1, reiniciando o ciclo, quando a temperatura do salão se eleva e o tempo mínimo de desligamento do compressor for atendido.

Vale lembrar que pelo horário, por volta das 10h00', não há muitos usuários no trem e conseqüentemente pouca carga térmica, permitindo que o compressor trabalhe no ciclo previsto.

Contudo, apesar de uma temperatura externa alta, em apenas 11 minutos o sistema faz todo o seu ciclo de ligar e desligar o que não é bom nem para o equipamento nem para o conforto térmico do salão de passageiros.

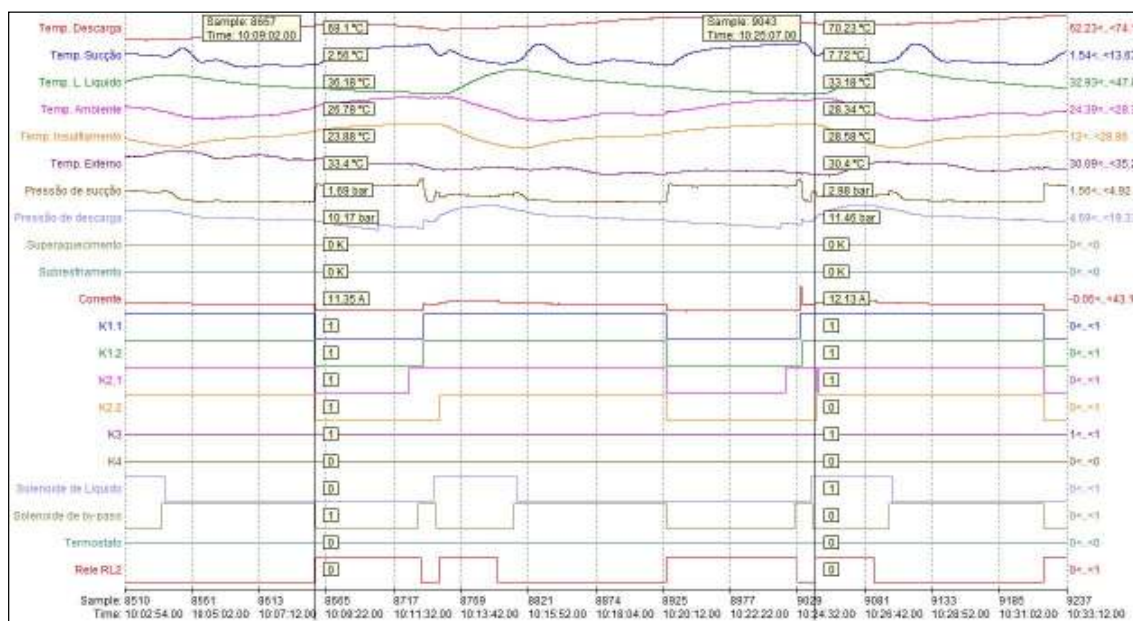


Figura 5.1 – Registro realizado em 10/03/10, sem falha.

5.2 REGISTRO COM ACIONAMENTO DO TERMOSTATO DO COMPRESSOR

No registro da figura 5.2, foi realizado no dia 12/03/10, também em um dia quente. Na primeira (14h22'01") e segunda (15h19'51") linhas de dados, o sistema de ar condicionado estava funcionando normalmente (conforme descrito no item 5.1).

Contudo na terceira linha de dados (16h15'11") embora o compressor já estivesse em plena carga (100%) por mais de 5 minutos, a temperatura ambiente (do salão de passageiros) não diminui, mesmo com o ar de insuflamento sendo inserido a uma temperatura de inferior a 12°C. Neste instante a temperatura de descarga supera 90°C (atinge 91°C) e a proteção de alta temperatura de descarga desliga o compressor. Passam-se dois minutos e o compressor é religado e novamente após todo o ciclo o sistema fica em 100% por cerca de 10 minutos (16h28') quando então a proteção de alta temperatura de descarga volta a atuar (superou 92°C) desligando o compressor. Contudo nos 10 minutos em que o compressor ficou na potência frigorífica máxima, o ar de insuflamento permaneceu por volta de 10°C e mesmo assim a temperatura interna do salão não abaixou ficando estável em torno de 29°C. Durante os trinta minutos seguintes (16h28 à 16h55) o sistema ficou desligado, devido à temperatura de descarga não baixar do 90°C por um tempo inferior a 4 minutos.

Assim o sistema prevê seu desligamento por 30 minutos (Ver item 3.3.1.3 Figura 3.9 – Diagrama da Cadeia de Segurança). Quando finalmente o sistema se reinicia com o fechamento do contator K2.1, a situação da temperatura interna do salão, é bastante crítica, atingindo o valor de 31,5 °C. Durante o tempo em que o compressor ficou desligado o ventilador da evaporadora (contator K3) ficou injetando um ar de insuflamento que chegou a atingir 32,5 °C (temperatura de insuflamento), para uma temperatura externa de 33,5°C.

Logo que o compressor entra em potência máxima a temperatura de insuflamento volta a cair para cerca de 11 °C, mas novamente a temperatura não cai a valores esperados, ficando entre 28 e 29°C. Até que às 17h13'01" o termostato de

temperatura do compressor atua, desligando, novamente, o sistema por proteção. Entretanto essa proteção não tem rearme automático, sendo necessário à intervenção da manutenção para restabelecimento do sistema.

Pelos dados coletados, tudo indica que o sistema entrou em colapso devido à temperatura do salão não ceder mesmo com um ar de insuflamento muito baixo. Para esse tipo de problema pode-se supor duas situações que poderiam impedir a redução do ar do salão:

- A primeira se as portas do carro estivessem abertas fazendo que o ar frio se perca não voltado para o sistema, que dessa forma capta o ar externo. Essa hipótese é pouco provável devido ao trem estar em circulação e não estacionado em uma estação.
- Na segunda suposição, o segundo ar condicionado deste mesmo carro entra em falha ou desarma deixando todo o salão com apenas uma máquina em funcionamento. Com o aumento do número de usuários devido ao horário do pico ocorre um aumento da carga térmica do salão para um nível em que uma só máquina não foi suficiente para reduzir a temperatura interna do salão.

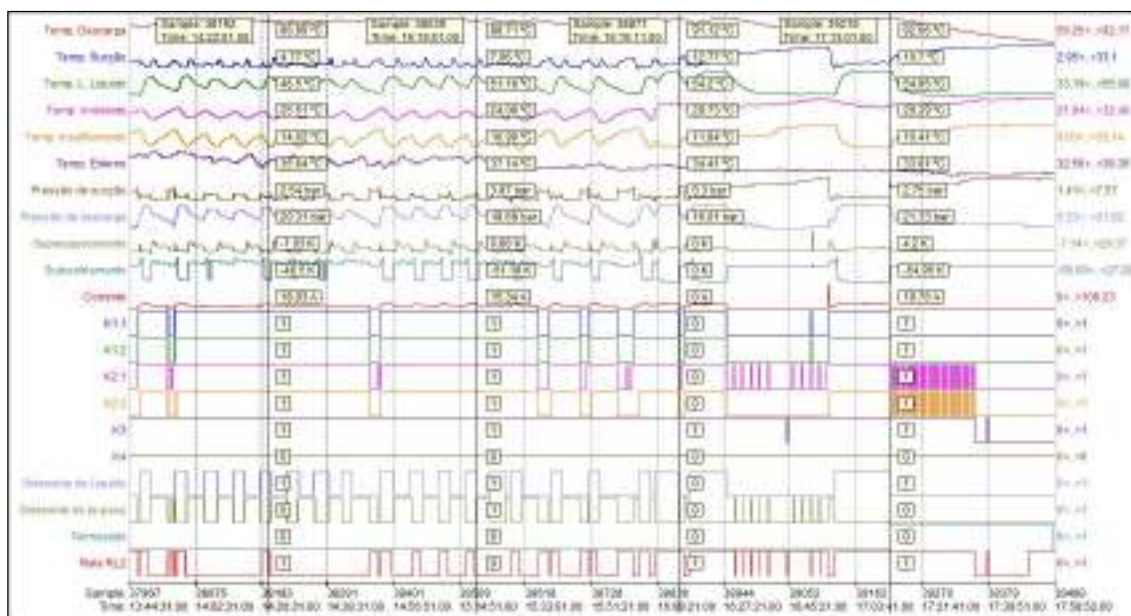


Figura 5.2 – Registro de 12/03/10, com acionamento do termostato do motor

5.3 REGISTRO DE FUNCIONAMENTO COM A RETIRADA DO RESISTOR

Como observado no item 5.1, quando as duas máquinas entram funcionamento a temperatura interna do salão cai rapidamente, isso associado com o grande volume de ar insuflado (velocidade máxima de insuflamento) provoca uma sensação de frio aos usuários, que redundavam em constantes reclamações para os empregados das estações. Como o Metrô ainda não tem o SW para reprogramação do sistema controle,, a solução encontrada foi a instalação de um resistor de 1k Ω em série com o sensor do ar de retorno que elevou a temperatura base de 22°C para 23°C.

No registro da figura 5.3, esse resistor foi retirado para verificar o comportamento do sistema que, como esperado, ficou mais baixa que nos registros com o resistor inserido. Na média com temperaturas de cerca de 20 °C contra os 21,5 °C com o resistor, mas a temperatura de descarga também diminuiu. Obviamente, somente a repetição dos registros sem o resistor e em dias diferentes podem identificar, se essa alteração, que visava à melhoria no conforto, pode ou não estar afetando o desempenho do sistema e realmente melhorando o contorto.

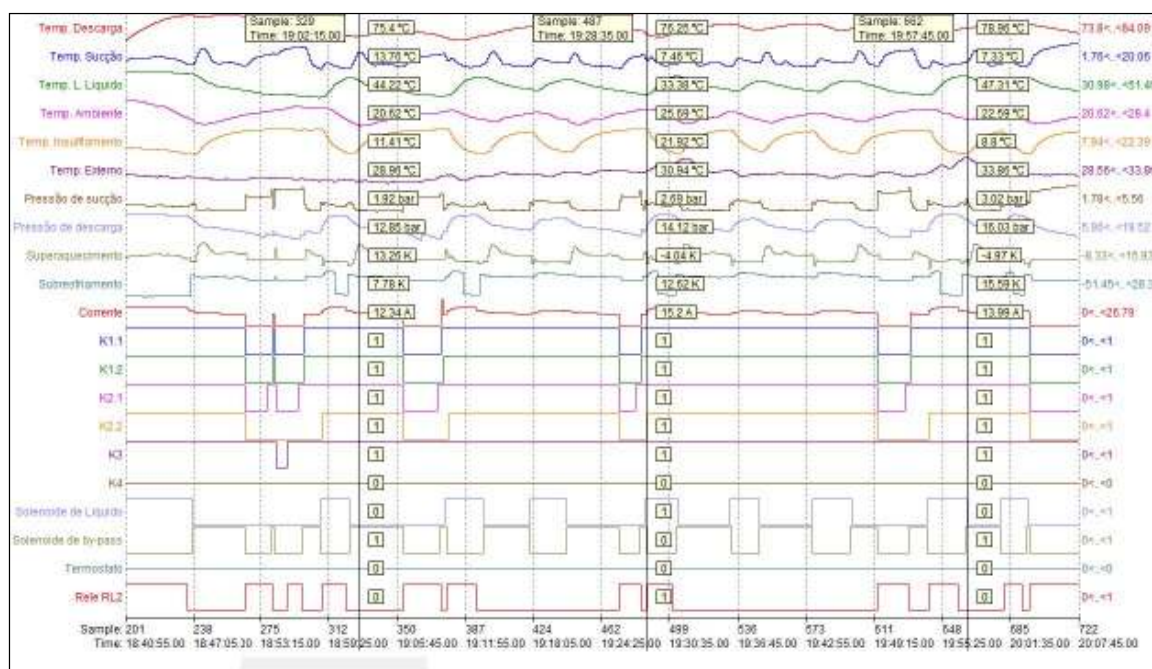


Figura 5.3 – Registro realizado em 13/03/10, com a retirada do resistor.

5.4 REGISTRO DE FUNCIONAMENTO COM SISTEMA EM 50%

Uma característica observada no funcionamento normal (item 5.1) é que quando em 100% o compressor tem uma capacidade frigorífica muito grande o que provoca uma rápida queda da temperatura do salão.

Essa característica traz duas conseqüências, a primeira é um desconforto térmico para alguns passageiros (sensação de frio) e a segunda é que o sistema passa de 100% para 50% e, devido à baixa temperatura, em poucos segundos o sistema passa para “by-pass”. Como nesta condição há um tempo limite de 5 minutos para o sistema desligar o compressor.

Assim tanto a rápida queda da temperatura como os freqüentes desligamentos do compressor, são prejudiciais para estabilidade da temperatura e do circuito frigorífico.

Dessa forma foi evitado que o sistema passasse para 100% e dessa forma alternasse apenas entre desligado, “by-pass” e 50%.

No registro da figura 5.4, os dados no horário mais quente do dia, as temperaturas chegaram a ficar acima de 32 °C.

Na linha de dados das 14h07'20", colhida como exemplo no meio de um intervalo de cerca de 1h14' sem desligamento do compressor, observa-se os dados coletados no momento de transição entre 50% (fechamento da válvula de líquido) e “by-pass” (abertura da solenóide) momento em que se nota que todos os valores estão dentro do esperado e a temperatura, interna do salão, variando em agradáveis 22 °C e 24°C. Com o ganho extra da temperatura de descarga não ultrapassar os 82 °C.

Além desse período, no gráfico completo, foi observado que o tempo de funcionamento do compressor ficou entre 16 e 24 minutos, bem melhor que os 9 a 12 minutos dos horários mais frescos do dia (manhã e noite) horário que também

coincidiu a pouca carga térmica (poucos passageiros). Lembrando que o máximo de partidas do compressor, recomendado pelo fabricante, é de 6 partidas / hora.

Como relatado acima apenas na menor parte do dia o sistema desligou o circuito em períodos mais curtos, ao contrário da condição normal de funcionamento (com o ciclo de 100%) em que praticamente todo o dia o tempo de funcionamento do compressor é muito pequeno.

Contudo como no experimento anterior (5.3) essa experiência deve ser realizada em um maior número de vezes para comprovação desses resultados e em condições adversas, inclusive com simulação de falha, deste sistema e / ou do sistema paralelo do existente no mesmo carro.

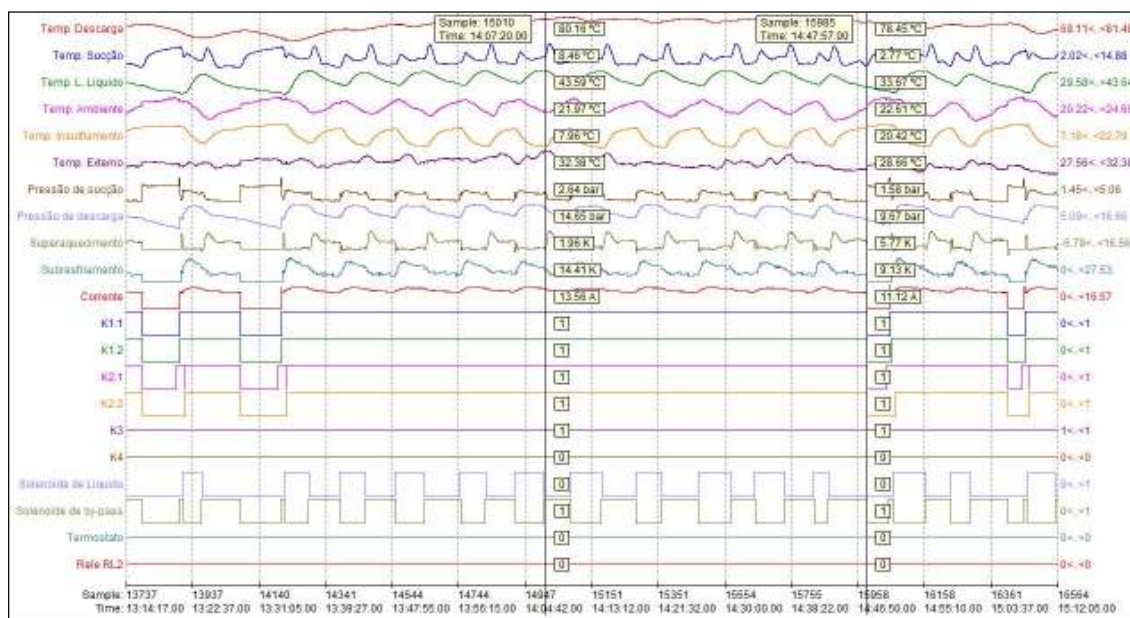


Figura 5.4 – Registro realizado em 18/03/10, com sistema frigorífico em 50%.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 CONCLUSÕES

Com os registros obtidos pode-se concluir que devido ao curto ciclo de funcionamento o circuito frigorífico tem uma alta capacidade de refrigeração, capacidade essa, que pode até mesmo ser excessiva e prejudicial para estabilidade desse sistema.

Isso pode ser notado nos registros com a capacidade limitada em 50% e o sistema, mesmo com a metade da sua potência frigorífica, ficou mais estável e com temperaturas mais agradáveis que em regime normal de trabalho.

Contudo, na condição de temperaturas elevadas (acima de 34 °C) e com uma possível parada da outra máquina do mesmo carro o circuito frigorífico não conseguiu reduzir a temperatura ambiente entrando em colapso e deixando o carro sem nenhuma refrigeração.

A existência do resistor de 1k Ω , que eleva as temperaturas mínimas do interior do salão, o que pode ter contribuído para o desarme do sistema, principalmente quando da entrada de um grande número de pessoas numa determinada estação, ou seja uma grande elevação da carga térmica num curto espaço de tempo.

Isso sugere a que, se o sistema de comando e controle pudesse ser reprogramado, alterando os parâmetros para rotinas que melhor se adequem às condições atmosféricas externas e a carga térmica interna observada durante a operação comercial. Tomando ações antecipadas, prevendo o aumento dessa carga térmica. Isto deverá ser confirmado em medições futuras, já com todos os sensores instalados, quando as temperaturas de entrada e saída de evaporadoras e condensadoras, a vazão do fluido no sistema, além da temperatura do ar na entrada e saída dos condensadores estiverem devidamente monitoradas.

Uma vez instalada toda a instrumentação necessária, outras experiências com outros fluídos ou compressores menos potentes, ou mesmo uma alteração das condensadoras poderá, de forma precisa, indicar a melhor solução para resolver os problemas de desligamento e de queimas de componentes desse sistema.

Após completar essa primeira etapa e complementando a instrumentação e posteriormente com a análise e a identificação dos problemas do projeto e de uma linha de solução viável, esse projeto terá continuidade com a definição de um sistema de transmissão de dados (em uma ou mais estações) que permitirá, além do monitoramento do desempenho de todos os conjuntos de ar condicionado em tráfego, que se instalem alarmes para que, tanto a manutenção, como a operação possam, previamente, tomar ciência de eventuais problemas potenciais, antes mesmos da ocorrência de falhas ou atuação das proteções.

6.2 RECOMENDAÇÕES

6.2.1 Compressores e Válvulas de Expansão

A partir do histórico de falhas e da análise dos registros, conclui-se que comparado aos trocadores de calor, compressor modelo VSK 4161-25Y (18,5 kW) da Bitzer muito potente e, portanto, incompatível em termos de potência, tanto com os condensadores e evaporadores. O uso de um compressor de menor potência, por exemplo, o VSK 4151-20Y (15 kW) ou eventualmente até o VSK4141-17y (12,5 kW), resultaria numa pequena redução na capacidade de refrigeração, se houver, e em contrapartida deve promover um aumento na confiabilidade do sistema. Espera-se que, com isto, se gerem melhores condições ao ciclo de trabalho do compressor, que irá gastar mais tempo para atingir a temperatura de “Set-point”, proporcionando menos acionamentos por período também redução de entrada do ciclo “By-pass”

Outra alternativa possível para se adequar a capacidade do compressor aos trocadores de calor é a introdução de um alternador de frequência ou inversor que, dependendo da carga térmica possa, pela variação da frequência de alimentação do motor do compressor, reduzir ou aumentar sua rotação em função da demanda de frio, obtendo-se com isso inclusive um ganho no rendimento. Para isso, seria necessária a instalação de, pelo menos um inversor por carro, mas para que isso seja viável, os dois equipamentos de ar-condicionado desse mesmo carro deverão trabalhar em sincronismo. Para que seu funcionamento seja mantido de forma independente, de acordo com as condições de projeto original, torna-se necessária à instalação de um inversor dedicado a cada equipamento. Esta última alternativa resultaria numa maior garantia do funcionamento de pelo menos uma unidade do carro em caso de falha desse inversor.

Comparações teóricas de vários métodos para atender a capacidade frigorífica, sob condições reais, têm mostrado que o ajuste da velocidade do compressor é o mais eficiente. Nessa ótica, o emprego de uma válvula de expansão eletrônica seria

também indicado, pois promovem um controle preciso da temperatura e do superaquecimento de forma consistente, mesmo nas variações de pressão

6.2.2 Ciclo “By-pass” e Reservatório de Líquido

Com os registros pode-se observar que o sistema não consegue atingir um equilíbrio, pois se evidencia que o superaquecimento e sub-resfriamento não se estabilizam, devido a variação das pressões de descarga e sucção, resultante do acionamento do ciclo “by-pass”.

Este sistema, cujo objetivo é de evitar a parada do compressor quando se atinge a temperatura de “set-point”, mantém a circulação do fluido refrigerante sem que haja troca de calor nos evaporadores. Essa configuração possui uma criticidade intrínseca, pois depende do perfeito balanceamento térmico entre o fluido proveniente da válvula de capacidade e da válvula de expansão. Seu efeito reduz a pressão de descarga e eleva a pressão de sucção, caso não haja esse perfeito balanceamento, pode vir a causar uma condição desfavorável ao sistema de lubrificação do compressor que deve ter uma diferença mínima de 3 bar entre as pressões na admissão e descarga. Esse sistema poderia ser modificado com a substituição da válvula de expansão do “by-pass” por modelos controladas eletronicamente, o que resulta num controle mais preciso.

Outro ponto de eficiência discutível é o grande volume do reservatório de líquido, que no nosso caso possui tem 38 litros. O acúmulo de líquido e vapor nesse recipiente causa uma perda de eficiência de refrigeração do circuito, devido à troca térmica que se processa com o ar quente presente no interior do alojamento do equipamento, que nos dias quentes fica sob a ação direta da insolação. Ou seja, esse recipiente é mais uma carga térmica.

Eventualmente, com a diminuição da potência do compressor e regulação da rotação poderá se avaliar a redução ou mesmo a retirada desse componente do circuito, aumentando seu rendimento e se obtendo uma redução no volume de fluido

refrigerante necessário ao funcionamento do sistema. Isto é possível, com uma partida mais suave, em que se possa controlar, a níveis aceitáveis, a pressão na linha de sucção.

6.2.3 Trocadores de Calor

Uma solução intuitiva, dado ao problema da queima dos compressores, seria a de ampliar a capacidade dos condensadores do sistema, solução esta, já aplicada pelo fornecedor do sistema durante o período de garantia. No entanto não há espaço disponível, no alojamento do compressor, para promover esse redimensionamento da condensadora. Quanto aos ventiladores da bateria condensadora, no projeto original eles promoviam a sucção do ar pelas baterias condensadoras e não o insuflamento no sentido de cima do trem para as laterais, como estão funcionando atualmente. A configuração atual pode causar uma condição desfavorável ao funcionamento do sistema, quando na ocasião da parada do trem na estação e da abertura das portas, o ar quente proveniente das condensadoras pode vir a ser admitido ao interior do trem e também pelas entradas de admissão de ar de renovação, aumentando a carga térmica. Porém, na condição original, depara-se com outro inconveniente que é o uso parcial da área de troca de calor dos condensadores, pois estão parcialmente abaixo da cobertura do trem. A avaliação de uma alteração na disposição das baterias condensadoras e do fluxo de ar dos ventiladores pode ser objeto de estudo específico num momento posterior.

6.2.4 Comando e controle.

Há que se levar em conta que, para se viabilizar a implementação de modificações como a introdução de um alternador de frequência para acionamento do redutor ou modificação do ciclo "By-pass", deverá se desenvolver um novo sistema de controle, que pode ser feita pela engenharia reversa do "software" de controle, posto que a empresa que o desenvolveu não mais existe ou a troca do "hardware" acompanhado de um novo "software", que pode incorporar o monitoramento com sensores de vigilância do funcionamento do sistema de ar-condicionado.

Outra alteração de “software” que poderia dar resultados mais rápidos e com menores intervenções, seria a inclusão da informação do sensor de carga do trem. Dessa forma tem-se várias programações que seriam alteradas automaticamente em função da quantidade de pessoas no salão do carro. Assim com uma menor quantidade de pessoas o sistema ficaria limitado a trabalhar em 50% da potência máxima, e somente quando o carro estivesse com grande lotação ou com uma das máquinas inoperante, o sistema trabalharia a 100%.

Essa condição permitiria que, além de um melhora no conforto aos usuários, com variações de temperatura mais suaves, também permitisse que o sistema trabalhe em temperaturas mais baixas.

6.2.5 Monitoramento

Devido aos prazos de fornecimento não foi possível contar com todos os sensores necessários para obter as informações previstas inicialmente no projeto.

Também com a utilização de um computador dedicado, compacto, com memória imune a vibração, facilitará a transmissão das informações ao centro de manutenção de maneira remota. Aliado a isto pode-se processar as informações (utilizando redes neurais) de maneira que o sistema aprenda continuamente com os diversos modos de operação.

Assim pode-se obter a “assinatura” correta do funcionamento do sistema nas diversas condições e os eventuais desvios, seriam informados ao centro de manutenção pelos alarmes.

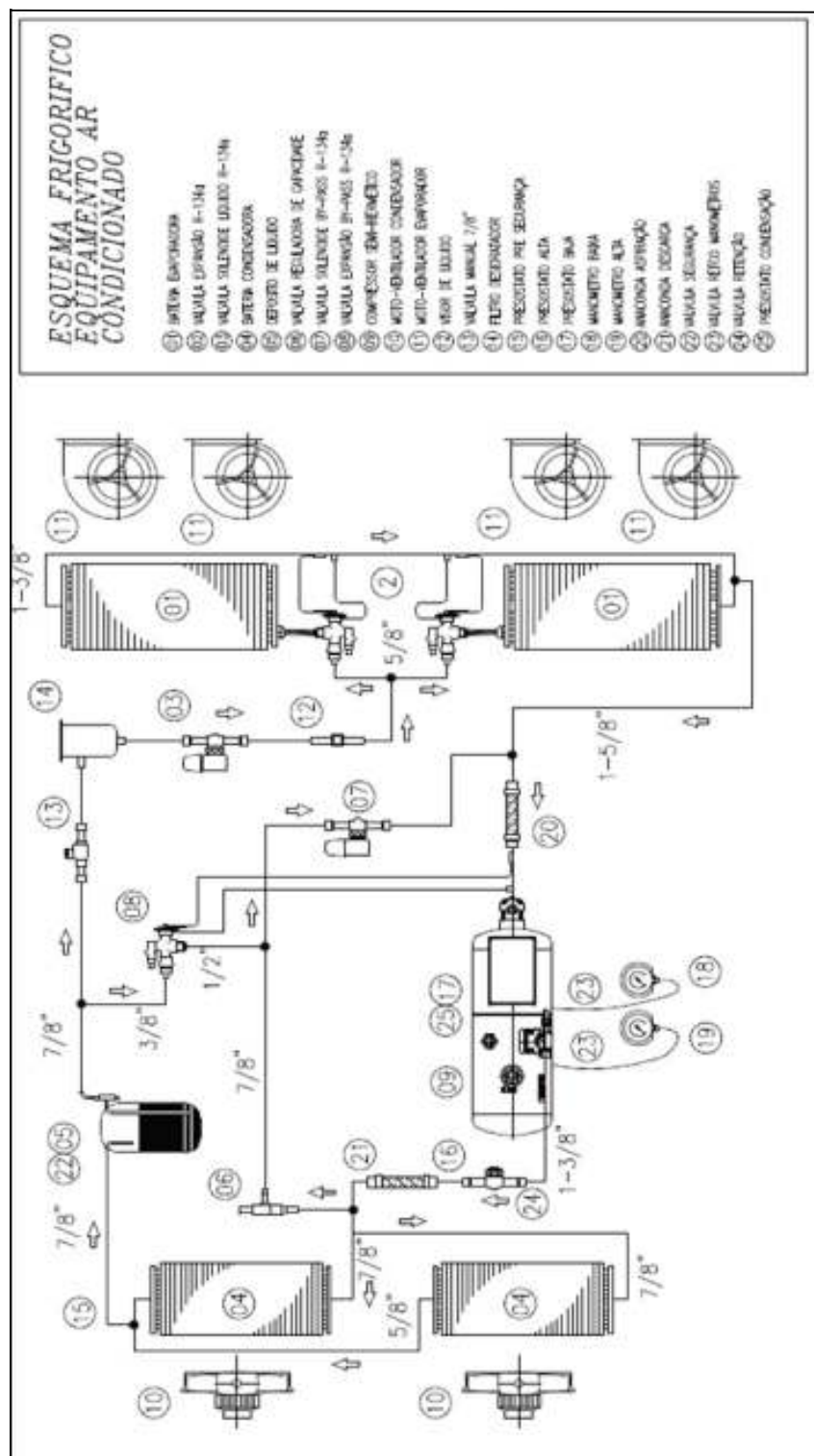
Dessa forma é aconselhável que o projeto tenha continuidade com a instalação dos demais com medições que confirmem quais alternativas terão o melhor custo-benefício, não só para solução dos problemas do ar condicionado da frota “F”, como também do que deve ser implantado em termos de monitoramento em todas as máquinas dos trens do Metrô.

7 REFERÊNCIAS

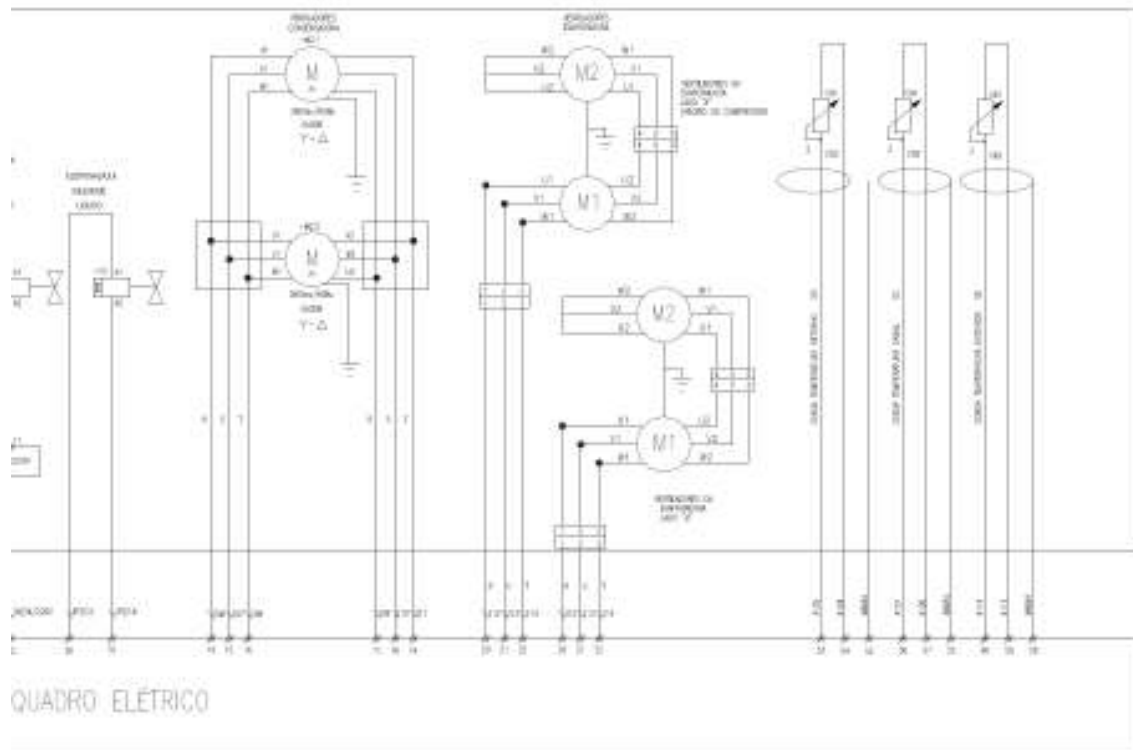
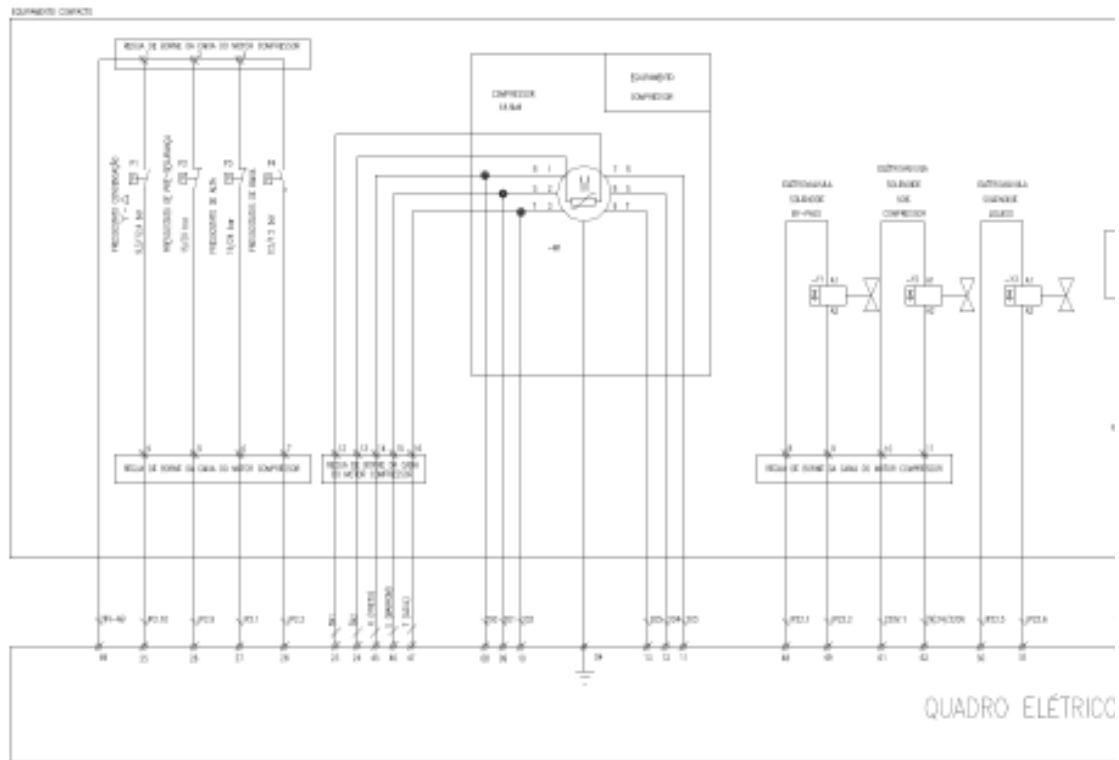
- ASHRAE - American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers; 1999, **Handbook : Heating, Ventilating And Air Conditioning Applications..**
- Bitzer; *Boletim de Engenharia* 20 - 03/2005.
- Sistrem, 2002, **“Manual de Manutenção da Frota A-48” Alstom do Brasil.**
- Temoinsa, 2002; Manual de funcionamento do sistema do Ar Condicionado do salão de passageiros do trem da frota “F”, Consorcio Sistrem.

APÊNDICE

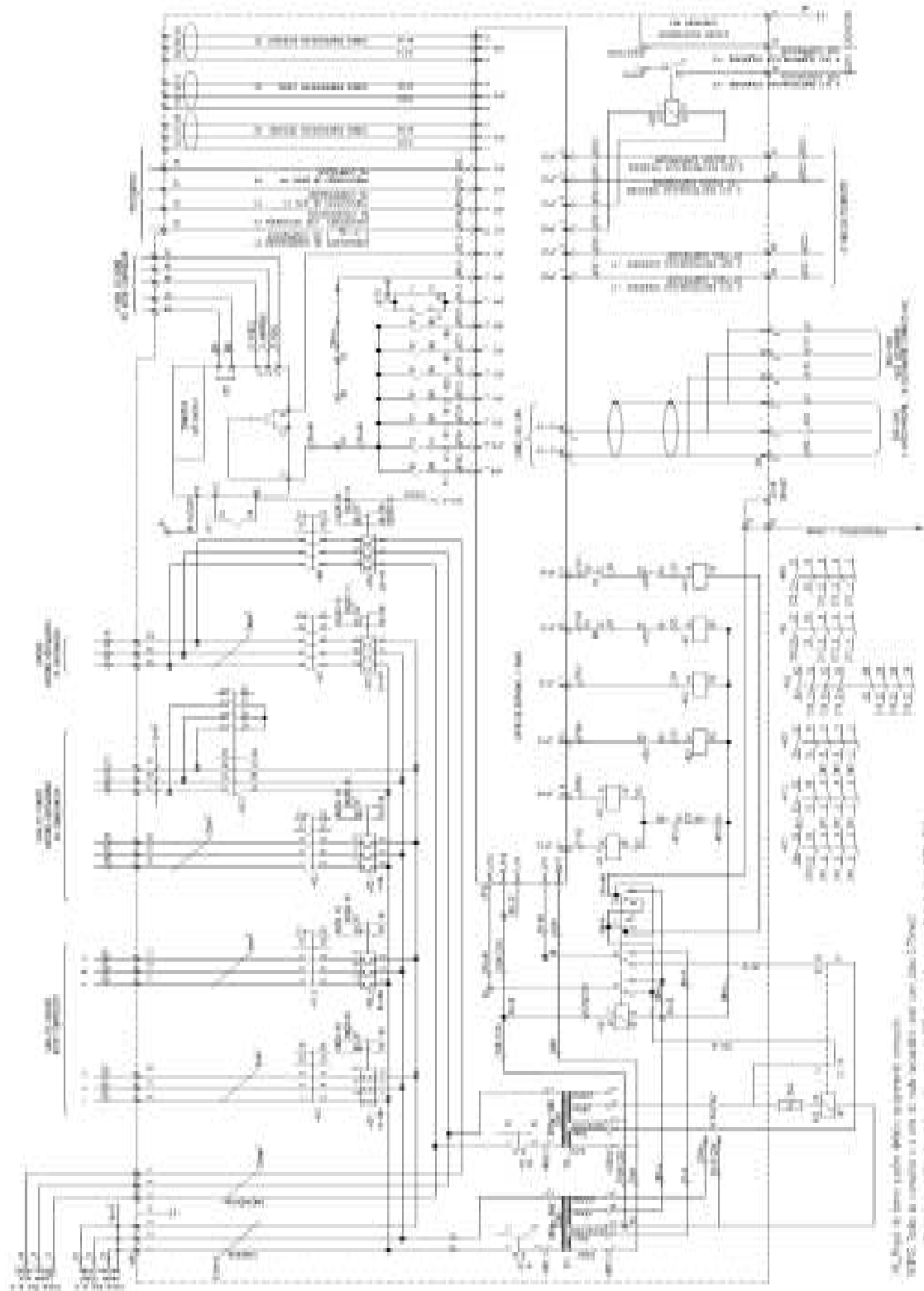
ESQUEMA FRIGORÍFICO



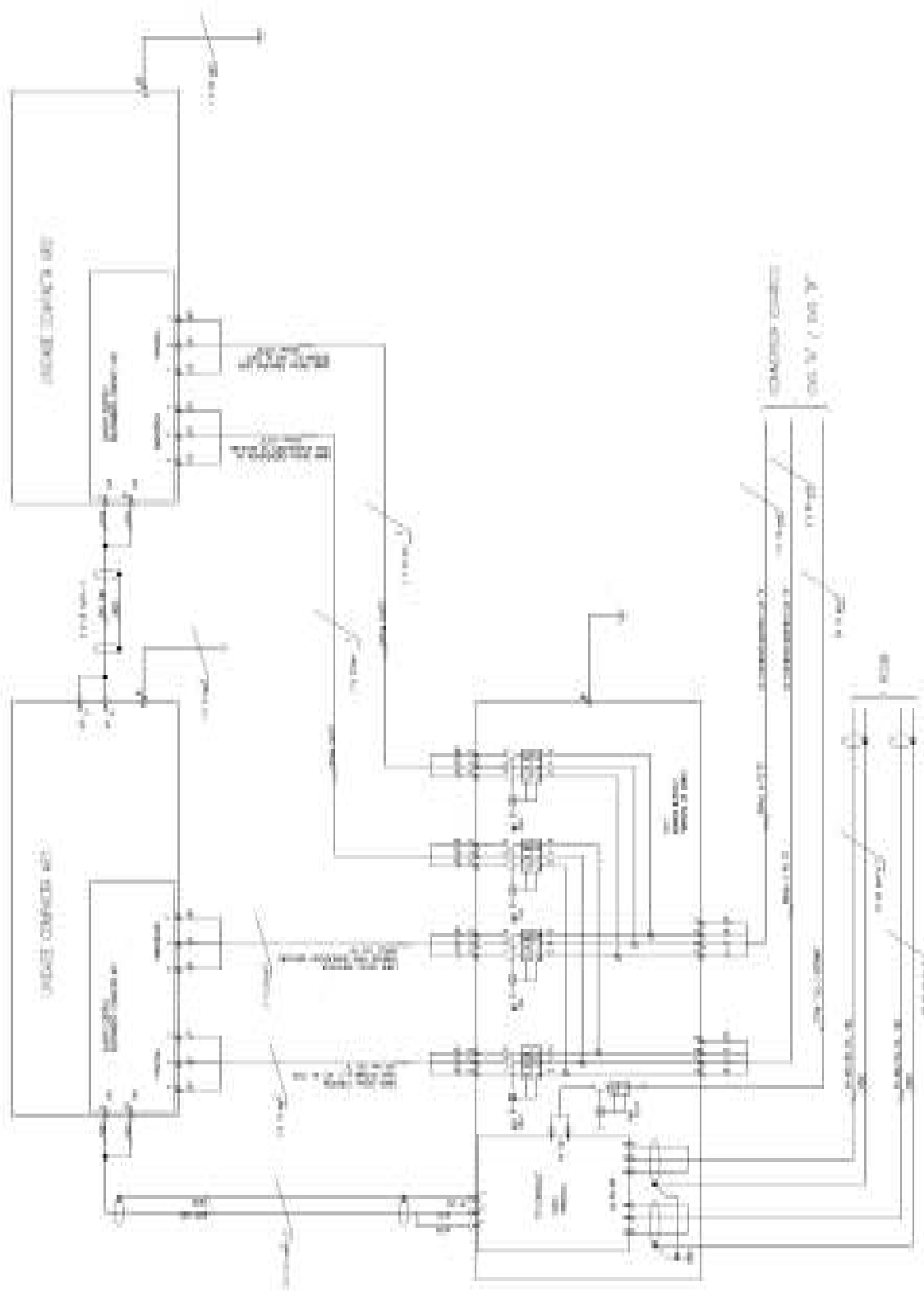
ESQUEMAS ELÉTRICOS



ESQUEMA ELÉTRICO DA UNIDADE DE AR CONDICIONADO



ESQUEMA DE INTERCOMUNICAÇÃO DO “NODO” SECUNDÁRIO / AR



ESQUEMA DE INTERCOMUNICAÇÃO DO “NODO” PRINCIPAL / AR 1 e 2