

JACKSON DE CARVALHO GALOCHA

LUIS CARLOS REBELO

INDICADORES DO MAU FUNCIONAMENTO EM TEMPO REAL DO
SISTEMA DE AR CONDICIONADO DE TRENS

São Paulo

2012

JACKSON DE CARVALHO GALOCHA

LUIS CARLOS REBELO

INDICADORES DO MAU FUNCIONAMENTO EM TEMPO REAL DO
SISTEMA DE AR CONDICIONADO DE TRENS

Monografia apresentada para a conclusão do
Curso de Especialização em Tecnologia
Metro-ferroviária pela ESCOLA
POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO
PAULO.

São Paulo

2012

JACKSON DE CARVALHO GALOCHA

LUIS CARLOS REBELO

**INDICADORES DO MAU FUNCIONAMENTO EM TEMPO REAL DO
SISTEMA DE AR CONDICIONADO DE TRENS**

Monografia apresentada para a conclusão do
Curso de Especialização em Tecnologia
Metro-ferroviária pela ESCOLA
POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO
PAULO.

Área de concentração:
Tecnologia Metro-Ferroviária

Orientador: Prof. Dr. José R. Simões Moreira

São Paulo

2012

Ficha Catalográfica

Galocha, Jackson de Carvalho e Rebelo, Luis Carlos

INDICADORES DO MAU FUNCIONAMENTO EM TEMPO REAL DO SISTEMA DE AR
CONDICIONADO DE TRENS – São Paulo, 2012.

86 p.

Dissertação (Especialização) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1.Tecnologia Metro-Ferroviária 2.Engenharia I. Engenharia Ferroviária.
Operação de Sistemas Metroviário, Ar Condicionado, Compressor

AGRADECIMENTOS

Ao Metrô de São Paulo, por permitir o desenvolvimento de nosso trabalho acadêmico, em particular à Unimetro, pela oportunidade de ampliar nossos horizontes com esta especialização.

Ao professor Dr. José R. Simões Moreira, pela orientação e suporte na elaboração deste trabalho.

A Eliana Santos Rebelo e Maria Clara Barros Santos, pela compreensão e ajuda nos momentos de ausência durante o curso.

A todos os amigos que colaboraram direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

O objetivo deste estudo é elencar indicadores do mau funcionamento que viabilizem a preditiva do sistema de ar condicionado. Devido às expansões, implantações e modernizações que estão ocorrendo nos sistemas metro-ferroviários, introduziu-se um novo padrão de projeto, em que todas as novas frotas de trens possuem sistema de ar condicionado, criando um novo nível de conforto para os passageiros.

O novo padrão de exigência estabelecido na operação deve ser mantido pela manutenção, acrescentando novos desafios aos seus processos, principalmente quando o elemento conforto dos passageiros torna-se fator de segurança, pois as equipes de manutenção trabalham com o sistema de ventilação e refrigeração de trens, onde ocorre a sobrecarga de passageiros.

A partir dos indicadores elencados, foram efetuados testes nos componentes básicos do sistema de ar condicionado, buscando obter desvios de funcionalidade que pudessem levar a falhas críticas do sistema.

Espera-se que este estudo forneça subsídios para as equipes de manutenção, independentemente da complexidade dos vários tipos de equipamentos de ar condicionado instalados nos trens. Com isso, melhora-se a gestão dos processos e minimizam-se os transtornos aos passageiros.

ABSTRACT

This work study aims to select some malfunctioning indicators to support the air conditioning predictive maintenance. Because with the expansions, implementations and updating that are now having place in the subway/railway systems, a new project standard has been introduced, in all new train fleets have conditioning air system in order to create a new passengers comfort level.

This new requirement standard established by the operation and must be maintained by the maintenance teams, adding new challenges to their procedures, manly when the passengers comfort factor changes to passengers safety factor, because they deal with train cooling and ventilation systems, where passenger overload occur.

From these selected indicators, tests have been done on the air conditioning system basic components in order to find some functional deviations that could led to system critical failures.

It is expected that this study work supplies information to the maintenance teams, independently of aboard air conditioning equipment kinds variety and complexity. With this , increasing the processes management and avoiding troubles to the passengers.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	1
1.2	MOTIVAÇÃO	1
1.3	METODOLOGIA	2
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.2	ANÁLISE DO CICLO DE REFRIGERAÇÃO	4
2.3	CONCEITOS BÁSICOS	4
2.3.1	LEI DA CONSERVAÇÃO DE ENERGIA	4
2.3.2	CALOR	4
2.3.3	MÉTODOS DE TRANSMISSÃO DE CALOR	4
2.3.4	CALOR SENSÍVEL	5
2.3.5	CALOR LATENTE	5
2.3.6	CALOR SENSÍVEL DO LÍQUIDO	5
2.3.7	CALOR LATENTE DE VAPORIZAÇÃO	5
2.3.8	CALOR SENSÍVEL DO VAPOR (SUPERAQUECIMENTO)	5
2.3.9	TEMPERATURA DE SATURAÇÃO	5
2.3.10	LÍQUIDO SUB-RESFRIADO	6

2.3.11 VAPOR SUPERAQUECIDO	6
2.3.12 TEMPERATURA CRÍTICA	6
2.3.13 PRESSÃO CRÍTICA	6
2.3.14 PROPRIEDADES IMPORTANTES DE GASES E VAPORES.....	6
2.3.15 ENTALPIA	7
2.3.16 ENTROPIA	7
2.3.17 DISPOSITIVOS DE EXPANSÃO.....	7
2.4 FLUIDO REFRIGERANTE.....	8
2.4.1 TIPOS DE FLUIDOS REFRIGERANTES:	9
2.4.2 FLUIDOS REFRIGERANTES UTILIZADOS NO TRANSPORTE METRO-FERROVIÁRIO	9
2.5 CONFORTO TÉRMICO.....	12
2.6 CONDICIONAMENTO DO AR EM SISTEMAS METRO- FERROVIÁRIOS.....	12
2.7 ANÁLISE DO CICLO DE REFRIGERAÇÃO	14
2.7.1 DIAGRAMA MOLLIER	14
2.7.2 CICLO TEÓRICO DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR	16
2.7.3 CICLO REAL DE COMPRESSÃO DE VAPOR	18
2.8 DESEMPENHO E BALANÇO ENERGÉTICO DO CICLO DE REFRIGERAÇÃO	20

2.9	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE EVAPORAÇÃO NO COP DO CICLO TEÓRICO	22
2.10	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE CONDENSAÇÃO NO COP DO CICLO TEÓRICO	23
2.11	INFLUÊNCIA DO SUB-RESFRIAMENTO DO LÍQUIDO NO COP DO CICLO TEÓRICO	24
2.12	INFLUÊNCIA DO SUPERAQUECIMENTO ÚTIL NO COP DO CICLO TEÓRICO	25
3	CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS ESTUDADOS	26
3.2	ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS SISTEMAS ESTUDADOS	31
3.3	MODERNIZAÇÃO E EXPANSÃO DO SISTEMA METROVIÁRIO DE TRANSMISSÃO E ANÁLISE DE DADOS.....	33
3.3.1	SISTEMA DE TRANSMISSÃO DIGITAL (STD).....	33
3.3.2	SCMVD.....	36
3.3.3	SISTEMA DE APOIO À MANUTENÇÃO (SAM).....	38
3.4	MONITORAÇÃO DO AR CONDICIONADO NO METRÔ DE SÃO PAULO.....	39
4	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	43
4.1	EQUIPAMENTOS, SOFTWARE E COMPONENTES UTILIZADOS:	43
4.2	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	45
4.3	PRIMEIRO TESTE DE RETIRADA DO FLUIDO REFRIGERANTE	47
4.4	SEGUNDO TESTE DE RETIRADA DO FLUIDO REFRIGERANTE.....	48
5	PROPOSTA DE MONITORAÇÃO	50

5.1 OBJETIVO DA MONITORAÇÃO DO INDICADOR.....	50
5.2 GERAÇÃO DE ALARMES.....	51
5.2.1 Conexão nos sistemas da Modernização.....	55
5.3 PROPOSTA DE PLACA DE MONITORAMENTO (PM)	60
5.3.1 Arquitetura da Placa de Monitoramento	60
5.3.2 Proposta de Hardware	61
5.3.3 Software	62
6 PROPOSTA DE UM NOVO PLANO DE MANUTENÇÃO	67
6.1 AÇÕES IMPORTANTES PARA UM PLANO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA	67
6.1.1 AUMENTO DA TEMPERATURA DE EVAPORAÇÃO	68
6.1.2 DIMINUIÇÃO DA TEMPERATURA DE CONDENSAÇÃO	68
6.1.3 AJUSTE DO SUB-REFRIGERAMENTO.....	68
6.1.4 AJUSTE DO SUPERAQUECIMENTO.....	68
6.1.5 ELIMINAÇÃO DE VAZAMENTOS DE FLUIDO REFRIGERANTE	69
6.1.6 TROCA DO FILTRO SECADOR	70
6.1.7 EVACUAÇÃO E DESIDRATAÇÃO DO SISTEMA.....	70
6.1.8 CARGA DE REFRIGERANTE	70
6.2 FICHA DE ACOMPANHAMENTO DA CORRENTE DOS COMPRESSORES...	72
7 ANÁLISE E CONCLUSÃO.....	75
7.1 ANÁLISE DA PROPOSTA.....	75
7.2 NOVOS ESTUDOS.....	76

7.3 CONCLUSÃO	78
REFERÊNCIAS.....	79
APÊNDICE A - Esquema elétrico	84

Lista de Figuras

Figura 1 - Fatores que influenciam a temperatura e umidade internas do trem (MOREIRA, 2011)	13
Figura 2 - Diagrama de Mollier (PIRANI, 2006)	14
Figura 3 - Esquema de um diagrama de Pxh (Mollier) para um fluido refrigerante. .	15
Figura 4 - Ciclo teórico de refrigeração por compressão a vapor (PÖTTKER, 2006)	16
Figura 5 - Ciclo Teórico de Refrigeração por Compressão a Vapor (PIRANI, 2006)	17
Figura 6 - Diferenças entre o Ciclo Teórico e o Real de Refrigeração.	18
Figura 7 - Diagrama Ph (específica) com identificação das energias envolvidas	20
Figura 8 - Influência da temperatura de evaporação no COP do ciclo teórico (PROCEL, 2005)	22
Figura 9 - Influência da temperatura de condensação no COP do ciclo teórico (PROCEL, 2005)	23
Figura 10 - Influência do sub-resfriamento no COP do ciclo teórico (PROCEL, 2005)	24
Figura 11 - Influência do superaquecimento no COP do ciclo teórico (PROCEL, 2005)	25
Figura 12 - Circuito Frigorífico do Sistema de Ar Condicionado da Frota I e L.....	26
Figura 13 - Unidade de Ar Condicionado da Frota I e L	26
Figura 14 - Circuito Frigorífico do Sistema de Ar Condicionado da Frota G e K.....	27
Figura 15 - Unidade de Ar Condicionado da Frota G e K	27
Figura 16 - Circuito Frigorífico do Sistema de Ar Condicionado da Frota H e J	28
Figura 17 - Unidade de Ar Condicionado da Frota H e J	28
Figura 18 - Circuito Frigorífico do Sistema de Ar Condicionado da Linha 4 Amarela	29
Figura 19 - Unidade de Ar Condicionado da Linha 4 Amarela.....	29
Figura 20 - Ciclo Frigorífico do Sistema de Ar Condicionado da Frota F	30
Figura 21 - Unidade de Ar Condicionado da Frota F	30
Figura 22 - Diagrama de interligação físico e lógico do STD da Linha 1 Azul (CMSP GCS/CSC, 2012)	34
Figura 23 - Diagrama de interligação físico e lógico do STD da Linha 2 Verde (CMSP GCS/CSC, 2012)	34

Figura 24 - Diagrama de interligação físico e lógico do STD da Linha 3 Vermelha (CMSP GCS/CSC, 2012)	35
Figura 25 - Diagrama de interligação das três linhas do STD no CCO	35
Figura 26 - Arquitetura dos Equipamentos Embarcados (CMSP GCS/CSC, 2012) ..	37
Figura 27 - Ponto selecionado na tela do software do Alstom EVRCSV	40
Figura 28 - Diagrama de Ph do ponto selecionado.	41
Figura 29 - Recolhedora e recicladora 69200-200 e jogo de mangueiras para refrigeração (VULKAN, 2010).....	43
Figura 30 - Balança Digital e amperímetro digital modelo 2046R (VULKAN, 2010) ..	43
Figura 31 - Tanque para recolhimento de fluido e manifold digital mastercool.....	44
Figura 32 - Conversor USB para serial RS-232 e Cabo RS-232 macho/fêmea	44
Figura 33 - Notebook.....	44
Figura 34 - Software “MONA” de controle do ar condicionado (CAF e GEMINYS, 2010)	45
Figura 35 - Conexões dos equipamentos	46
Figura 36 - Resposta da corrente do compressor pela massa de fluido removida ..	47
Figura 37 - Resposta da corrente do compressor com a retirada de Fluido Refrigerante.....	48
Figura 38 - Resposta da pressão de alta com a retirada de fluido refrigerante	49
Figura 39 - Resposta da pressão de baixa com a retirada de fluido refrigerante	49
Figura 40 - Comportamento do circuito frigorífico com a retirada de fluido refrigerante	51
Figura 41 - Correntes dos compressores e critério para análise	53
Figura 42 - Exemplo do histograma das médias absolutas diárias.....	54
Figura 43 - Exemplo do histograma das médias relativas diárias.....	54
Figura 44 - Gráfico com a função de ajuste relativo	55
Figura 45 - Interligação com o circuito frigorífico e a placa de monitoração	56
Figura 46 - Interligação entre os sistemas com a monitoração	56
Figura 47 - Tela disponibilizada pela placa de monitoração	57
Figura 48 - Exemplo de tela inicial do SAM (Diagnóstico dos servidores)	59
Figura 49 - Arquitetura de hardware da placa de monitoração e conexões ao sistema do ar condicionado.....	60
Figura 50 - Rede usando termômetros DS18B20, controlados pela placa de monitoração.....	62

Figura 51 - Fluxograma com funções principais	63
Figura 52 - Determinação do sub-resfriamento (PROCEL, 2005)	68
Figura 53 - Determinação do superaquecimento (PROCEL, 2005).....	69
Figura 54 - Verificação das condições de operação do equipamento frigorífico. (ASHRAE-HANDBOOK, 2006).....	71
Figura 55 - Ficha de acompanhamento da corrente do compressor do Ar Condicionado	74

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Comparação do Ciclo Teórico R-22 com Suva® 407c (DUPONT, 2009)	10
Tabela 2 - Comparação do Ciclo Teórico R-12 com Suva® 134 ^a (DUPONT, 2009).	11
Tabela 3 - Especificações técnicas das unidades frigoríficas	31
Tabela 4 - Especificações técnicas dos compressores.....	31
Tabela 5 - Cenário futuro da quantidade de circuitos instalados	32
Tabela 6 - Alarmes de Ar Condicionado enviados pelo Concentrador de Dados	38
Tabela 7 - Oportunidades para a melhoria do sistema de ar condicionado (PROCEL, 2005)	67
Tabela 8 - Circuitos analisados.....	73

Lista de abreviaturas e siglas

CCO	Centro de Controle Operacional
CD	Concentrador de Dados do Trem
CF	Círculo frigorífico
E3	Software SCADA da Elipse Software
FR	Fluido refrigerante
HVAC	Heating Ventilation and Air Conditioning
IHM	Interface Homem-Máquina
NI	National Instruments
NTP	Network Time Protocol
OSI	International Organization for Standardization
OSPF	Open Shortest Path First
PH	Pressão e entalpia específica
PM	Placa de monitoração
RTC	Real Time Clock
SAM	Sistema de Apoio à Manutenção
SCADA	Supervisão, Controle e Aquisição de Dados
SCMVD	Sistema de Comunicação Móvel de Voz e Dados
SD	Secure Digital
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SM	Sistema de Monitoração
SPCM	Servidor de Posicionamento de Cliente Móvel
STD	Sistema de Transmissão Digital
SW	Sistema de Wireless
UTR	Unidade Terminal Remota
VLAN	Virtual LAN
VRRP	Virtual Router Redundancy Protocol
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network

1 INTRODUÇÃO

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho elenca os indicadores do mau funcionamento de sistemas de ar condicionado, utilizados em trens de transporte de pessoas, para possibilitar que uma ferramenta computacional indique a causa de um desvio antes que a falha ocorra. A partir daí, será possível fornecer subsídios para a manutenção, melhorar a gestão dos recursos e das competências e auxiliar o desenvolvimento de novos padrões de atuação. Com isso, poderá-se prever a ocorrência de uma eventual paralisação funcional dos circuitos frigoríficos, evitando transtornos aos passageiros durante a operação comercial.

1.2 MOTIVAÇÃO

Com as expansões, modernizações e implantações de novas linhas no Metrô de São Paulo, introduziu-se um novo padrão de projeto, em que todas as novas frotas de trens possuem ar condicionado. Isso proporciona um novo nível de conforto para os passageiros e, ao mesmo tempo, cria um desafio para o setor de manutenção: conhecer e dominar o processo dessa máquina térmica, que possui um alto grau de realimentação e é afetada tanto pelo clima como pela demanda de passageiros (infiltrações térmicas variadas). Assim, esse equipamento que tem características próprias de funcionamento, deixa de ser um item de conforto para tornar-se um item de segurança, no caso do fornecimento de ventilação.

Já é possível, para a manutenção, instrumentar um sistema de ar condicionado e levantar várias informações. As análises são feitas depois que o veículo é recolhido para a oficina, mas não existe uma ferramenta computacional que trate os dados e comunique a manutenção sobre um eventual desvio antes que ocorra a falha.

Com a implantação de uma ferramenta computacional, será possível, com os dados coletados em tempo real, determinar o estado do funcionamento do circuito frigorífico (CF) e o rendimento das partes do sistema. Isso permitirá tanto a identificação de um provável desvio como a programação do reparo de forma objetiva, diminuindo o tempo de resposta e o custo da manutenção.

1.3 METODOLOGIA

- Pesquisa bibliográfica em livros, apostilas, manuais, artigos técnicos, monografias de graduação, dissertações de mestrado e teses de doutorado que tratam do funcionamento de sistemas de refrigeração, determinando assim as variáveis necessárias para obter os indicadores.
- Estudo crítico do funcionamento do ar condicionado de uso metro-ferroviário.
- Sugestão de ações para ser implantadas no plano de manutenção preventiva.
- Determinação dos parâmetros (grandezas) que podem indicar o mau funcionamento do Sistema.
- Teste das hipóteses do mau desempenho, de acordo com o conceito do embasamento teórico, e levantamento de dados do sistema de ar condicionado, com foco nos indicadores elencados.
- Aquisição de dados de um sistema de ar condicionado para determinar e alimentar o algoritmo.
- Desenvolvimento de algoritmo para indicar possíveis causas do mau desempenho do sistema, com posterior aplicação em um sistema computacional.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica aborda os seguintes trabalhos de monografia relacionados ao sistema de ar condicionado utilizado em sistemas metro-ferroviário, que foram desenvolvidos no curso de pós-graduação em Tecnologia Metro-Ferroviária da Poli e na graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Paulista:

- Confiabilidade do Ar Condicionado Modelo RP56 dos Trens Série 2000 da CPTM – 2004.
- Propostas de Melhorias da Manutenção do Sistema de Ar Condicionado do Metrô – 2009.
- Estudo do Comportamento do Sistema de Ar Condicionado dos Trens da Frota "F" do Metrô de São Paulo por Meio do Monitoramento Contínuo – 2010.

Também foram analisados livros, apostilas, manuais, artigos, monografias de graduação, dissertações de mestrado e teses de doutorado que tratavam do funcionamento dos sistemas de refrigeração.

Cabe ressaltar que no Brasil não existem muitos trabalhos publicados sobre o tema, visto que a cultura de utilização de sistemas de ar condicionado em sistemas metro-ferroviários é relativamente nova:

- 1979 - Primeira iniciativa, no metrô do Rio de Janeiro
- 1998 - CPTM adquire 48 trens da Espanha com AC
- 2000 - CPTM faz mais 30 aquisições
- 2000 - Metrô de Recife (Metrorec)
- 2002 - Supervia do Rio de Janeiro (trens do subúrbio apelidados de geladão)
- 2002 - Metrô de São Paulo (Linha 5 é a primeira linha com AC)
- 2009 - Início da modernização das frotas da CPTM e do Metrô de São Paulo
- 2010 - Novos trens em todo o Brasil são adquiridos com AC.

2.2 ANÁLISE DO CICLO DE REFRIGERAÇÃO

Este capítulo tem por objetivo apresentar as definições termodinâmicas, as propriedades das substâncias mais usadas na análise de sistemas de ar condicionado e os conceitos básicos relacionados à transferência de calor, fundamentais à elaboração deste trabalho.

A propriedade de uma substância é qualquer característica que ela apresenta e possa ser observável, sendo necessário um número de propriedades termodinâmicas independentes para dar uma definição completa do estado da substância (VENTURINI e PIRANI, 2005).

2.3 CONCEITOS BÁSICOS

Para melhor entendimento deste trabalho, alguns conceitos importantes de termodinâmica são descritos a seguir.

2.3.1 Lei da conservação de energia

A primeira lei da termodinâmica estabelece, na realidade, que a quantidade de energia em qualquer sistema termodinâmico é constante. Nada se ganha ou se perde, exceto no sentido de que é convertida de uma forma para outra (DOSSAT, 2004).

2.3.2 Calor

Termodinamicamente, o calor é definido como energia em trânsito de um corpo para outro como resultado de uma diferença de temperatura entre dois corpos. Qualquer outra transmissão de energia ocorre como trabalho (DOSSAT, 2004).

2.3.3 Métodos de Transmissão de Calor

A transmissão do calor ocorre de três formas: por condução, por convecção e por radiação (DOSSAT, 2004).

2.3.4 Calor Sensível

Ocorre quando o calor absorvido ou cedido por um material causa ou acompanha uma mudança na temperatura deste (DOSSAT, 2004).

2.3.5 Calor Latente

É a energia que causa ou acompanha a mudança de fase ou estado (DOSSAT, 2004).

2.3.6 Calor Sensível do Líquido

É a quantidade total de energia cedida ao líquido para aumentar sua temperatura, desde a temperatura de fusão até a temperatura de vaporização (DOSSAT, 2004).

2.3.7 Calor Latente de Vaporização

É a quantidade de energia que 1 libra massa de líquido absorverá passando da fase líquida para a fase de vapor ou da fase de vapor para a fase líquida (DOSSAT, 2004).

2.3.8 Calor Sensível do Vapor (Superaquecimento)

É o calor adicionado ao vapor após a sua vaporização (DOSSAT, 2004).

2.3.9 Temperatura de saturação

Ocorre quando o fluido muda da fase líquida para a fase de vapor ou, inversamente, da fase de vapor para a fase líquida. Um líquido à temperatura de saturação é denominado líquido saturado, e o vapor na temperatura de saturação é denominado vapor saturado. Para uma dada pressão, a temperatura de saturação é a máxima temperatura que o líquido pode ter, sendo a mínima temperatura para o vapor (DOSSAT, 2004).

A temperatura de saturação é diferente para diferentes fluidos e, para um fluido particular, varia consideravelmente com a variação da pressão do fluido (DOSSAT, 2004).

2.3.10 Líquido Sub-resfriado

Ocorre quando um líquido, após a condensação, está a qualquer temperatura abaixo da temperatura de saturação (DOSSAT, 2004).

2.3.11 Vapor Superaquecido

Ocorre quando um vapor está a qualquer temperatura acima da temperatura de saturação, correspondente a sua pressão. Uma vez que o líquido foi vaporizado, a temperatura do vapor resultante pode ser mais fortemente aumentada pela adição de energia. Quando a temperatura do vapor aumenta muito acima da temperatura de saturação, o vapor é denominado superaquecido. A energia necessária para superaquecer o vapor é comumente denominada superaquecimento (DOSSAT, 2004).

2.3.12 Temperatura Crítica

A temperatura de um gás pode ser elevada a um ponto tal, que este não pode ser considerado saturado, apesar da quantidade de pressão aplicada. Essa temperatura crítica é diferente para cada gás. Alguns gases têm temperatura crítica elevada, enquanto a temperatura crítica de outros é relativamente baixa (DOSSAT, 2004).

2.3.13 Pressão Crítica

É a pressão mais baixa à qual uma substância pode existir no estado líquido à sua temperatura crítica; isto é, a pressão saturada à temperatura crítica (DOSSAT, 2004).

2.3.14 Propriedades Importantes de Gases e Vapores

Apesar de um gás ou vapor ter muitas propriedades, somente seis são de particular importância no estudo da refrigeração: pressão, temperatura, volume, entalpia, energia interna e entropia. Pressão, temperatura e volume são chamados de propriedades mensuráveis, porque elas podem ser realmente medidas. Entalpia, energia interna e entropia não podem ser medidas; devem ser calculadas e são, portanto, conhecidas como propriedades calculadas (DOSSAT, 2004).

2.3.15 Entalpia

É uma propriedade calculada da matéria, mais especificamente a entalpia "H" de uma dada massa de material sob qualquer condição termodinâmica dada. É a soma de toda a energia que lhe é fornecida para levá-la àquela condição a partir de alguma condição inicial, arbitrariamente tomada como o ponto zero da entalpia (DOSSAT, 2004).

2.3.16 Entropia

É uma propriedade calculada de matéria, mais especificamente a entropia "S" de uma dada massa de material, sob qualquer condição dada. É uma expressão da energia total cedida ao material, por grau de temperatura absoluta, para levar o material àquela condição de algum ponto 0 ou de referência selecionado arbitrariamente. Para qualquer um dos FRs, o ponto de referência para cálculos de entropia é o mesmo que para os cálculos de entalpia (DOSSAT, 2004).

2.3.17 Dispositivos de expansão

Além de manter uma diferença de pressão adequada entre os lados de alta e baixa pressão do sistema, o dispositivo de expansão tem a função de controlar a vazão de fluido refrigerante (FR) que entra no evaporador. Dispositivos de expansão podem apresentar uma restrição constante, como o tubo capilar ou variável, como as válvulas de expansão termostáticas (TEVs) e as válvulas de expansão eletrônicas (EEVs) (PÖTTKER, 2006).

O dispositivo de expansão deve regular o grau de superaquecimento na saída do evaporador, de forma a mantê-lo adequadamente preenchido com fluido bifásico. Um grau de superaquecimento elevado reduz a efetividade do evaporador e, consequentemente, a capacidade de refrigeração. Por outro lado, o inundamento do evaporador pode provocar um “golpe de líquido” no compressor.

Tubos capilares são largamente empregados como dispositivo de expansão em sistemas herméticos de refrigeração de pequeno porte. Apesar da simplicidade e do baixo custo, o tubo capilar é um dispositivo de expansão com restrição constante, fornecendo, portanto, um fluxo refrigerante adequado numa faixa de condições de

operação bastante restrita. Qualquer variação da carga térmica ou da temperatura de condensação em relação às de projeto resulta em redução do desempenho do sistema (STOECKER e JONES, 1985).

2.4 FLUIDO REFRIGERANTE

Os FRs podem ser caracterizados pelas seguintes propriedades: pressão, temperatura, volume específico, massa específica, entalpia, inflamabilidade, habilidade de se misturar com óleo, reação a umidade, odor, toxicidade, tendência a vazamentos e facilidade na detecção de vazamentos (MILLER e MILLER, 2008).

Um bom FR deve possuir as seguintes propriedades (FERRAZ e GOMES, 2012):

- Condensar-se a pressões moderadas.
- Evaporar-se a pressões acima da atmosférica.
- Ter pequeno volume específico (menor trabalho do compressor).
- Ter elevado calor latente de vaporização.
- Ser quimicamente estável (não se alterar, apesar de suas repetidas mudanças de estado no circuito de refrigeração).
- Não ser corrosivo.
- Não ser inflamável.
- Não ser tóxico.
- Ser inodoro.
- Deve permitir fácil localização de vazamentos.
- Ter miscibilidade com óleo lubrificante e não atacá-lo ou ter qualquer efeito indesejável sobre outros materiais da unidade.
- Em caso de vazamentos, não deve atacar nem deteriorar os alimentos, não deve contribuir para o aquecimento global e não deve atacar a camada de ozônio.

Não existe um FR que reúna todas as propriedades desejáveis, de modo que um refrigerante considerado bom para ser aplicado em determinado tipo de instalação frigorífica nem sempre é recomendado para ser utilizado em outra. O bom refrigerante é aquele que reúne o maior número possível de boas qualidades, relativamente a um determinado fim.

2.4.1 Tipos de fluidos refrigerantes

2.4.1.1 CFC

São moléculas formadas pelos elementos cloro, flúor e carbono (exemplos: R-11, R-12, R-502, etc.). São utilizados em ar condicionado automotivo, refrigeração comercial, refrigeração doméstica, etc. Os CFCs destroem a camada de ozônio.

2.4.1.2 HCFC

Alguns átomos de cloro são substituídos por hidrogênio (exemplos: R-22 e R-141b). São utilizados em ar condicionado de janela, câmaras frigoríficas, etc.

2.4.1.3 HFC

Todos os átomos de cloro são substituídos por hidrogênio (exemplos: R-134a, R-404a e R-407c). São utilizados em ar condicionado automotivo, transporte metro-ferroviário, refrigeração comercial e refrigeração doméstica. Os HFCs não apresentam potencial de degradação da camada de ozônio. Sua utilização não será interrompida devido ao Protocolo de Montreal.

2.4.2 Fluidos refrigerantes utilizados no transporte metro-ferroviário

2.4.2.1 R-407C (Classificação ASHRAE R-407C)

É uma mistura de três FRs, na seguinte proporção: HFC-32 (23%), HFC-125 (25%) e HCFC-134a (52%).

Foi desenvolvido para a substituição do R-22, em equipamentos novos de média e alta temperatura de expansão, possui baixa toxicidade e não é inflamável.

Considerando a capacidade e a eficiência energética, o FR Suva® 407C tem um desempenho similar ao do R-22 sob temperaturas de evaporação na faixa de -7 a 10°C.

A Tabela 1 apresenta uma comparação do desempenho teórico do Suva® do R-22 e do R-407c em condições de média temperatura:

Tabela 1 - Comparação do Ciclo Teórico R-22 com Suva® 407c (DUPONT, 2009)

CARACTERÍSTICA	R-22	R-407c
Capacidade de Refrigeração	1,0	1,0
Coeficiente de Desempenho (COP)	6,43	6,27
Coeficiente de Compressão	2,66	2,83
Temperatura de Descarga do Compressor, °C (°F)	77,3 (171,2)	75,1 (167,1)
Pressão de Descarga do Compressor, kPa abs (psia)	1662 (241)	1763 (255,6)

Nota: As seguintes condições foram consideradas: condensador 43,3°C (110°F); evaporador 7,2°C (45°F); sub-resfriamento 2,8°C (5°F) e superaquecimento, 8,3°C (15°F).

2.4.2.2 R-134a (Classificação ASHRAE: R-134a)

Foi desenvolvido para a substituição do R-12, em equipamentos novos de média e alta temperatura de expansão; possui baixa toxicidade e não é inflamável.

Considerando a capacidade e a eficiência energética, o FR Suva® R-134a tem um desempenho similar ao do R-12 sob temperaturas de evaporação acima de -7°C.

Em caso de vazamento, pode-se completar a carga de FR durante o serviço de manutenção sem a remoção de todo o produto (FR), desde que o sistema esteja com Suva® 134 a.

A Tabela 2 apresenta uma comparação do desempenho teórico do Suva® do R-12 e do R-134a em condições de média temperatura:

Tabela 2 - Comparação do Ciclo Teórico R-12 com Suva® 134^a (DUPONT, 2009)

CARACTERÍSTICA	R-12	R-134a
Capacidade de Refrigeração	100	99,7
Coeficiente de Desempenho (COP)	3,55	3,43
Coeficiente de Compressão	4,1	4,7
Temperatura de Descarga do Compressor, °C (°F)	86,8 (188,2)	83,1 (181,5)
Pressão de Descarga do Compressor, kPa abs (psia)	1349 (195,6)	1473 (213,7)

Nota: As seguintes condições foram consideradas: condensador 54,4°C (130°F); evaporador 1,7°C (35°F); sucção do compressor 26,7°C (80°F) e válvula de expansão, 52,7°C (125°F).

2.5 CONFORTO TÉRMICO

Devido à subjetividade das sensações, quando se trata das condições ambientais para o conforto térmico de um grupo de pessoas, deve-se entender que isso corresponde às condições que propiciam bem-estar ao maior número possível de delas, mas não necessariamente a todas (RUAS, 2002).

A ISO 7730 (ISO 7730, 2005) define conforto térmico como o estado de espírito que exprime satisfação com o ambiente térmico e considera que a insatisfação pode ocorrer em razão do aquecimento ou resfriamento do corpo como um todo ou de partes determinadas, o que recebe a designação de desconforto localizado.

O desconforto localizado pode ser causado por altas velocidades do ar, por grandes diferenças entre as temperaturas nas alturas da cabeça e do tornozelo, por grande assimetria de temperatura radiante ou pelo contato com superfícies frias ou quentes. A ISO 7730 (ISO 7730, 2005) recomenda limites para esses tipos de desconforto nas atividades leves.

A ABNT NBR 16401 (ABNT NBR 16401, 2008) introduz o conceito de que a sensação de conforto térmico é subjetiva. Assim, os limites de conforto especificados nessa norma foram baseados na premissa de que um ambiente só é confortável se pelo menos 80% dos ocupantes estão satisfeitos.

Esse embasamento, através da norma, é fundamental para as campanhas de publicidade que visam a conscientizar os milhões de passageiros que utilizam diariamente o transporte metro-ferroviário quanto a reclamações referentes a temperatura (muito frio ou muito quente) no interior dos trens.

2.6 CONDICIONAMENTO DO AR EM SISTEMAS METRO-FERROVIÁRIOS

No caso específico de trens em países como o Brasil, o ar precisa ter sua temperatura reduzida devido às cargas térmicas, isto é, às fontes de calor existentes ou infiltradas para dentro dos carros. Cargas térmicas são principalmente produzidas pelo calor liberado pelas pessoas, pela condução através das paredes e por infiltração de ar externo através da abertura das portas. Mas também podem ser produzidas por outras fontes, como incidência de radiação solar, no caso do trem ser de superfície (SIMÕES MOREIRA, 2011) (Ver Figura 1.)

<p>Geração interna: O calor é gerado internamente no carro devido a fontes de calor e de umidade. Seres humanos produzem calor e umidade, enquanto as máquinas elétricas e mecânicas, apenas calor.</p>	<p>Transmissão: O calor é transferido para dentro do carro através das paredes por meio da condução de calor e do ar para as superfícies expostas por convecção.</p>
	
<p>Solar: Incidência de radiação solar sobre a superfície externa do trem. Se a superfície for transparente, a incidência do sol se dá diretamente para o interior do trem (janelas). Se a superfície for opaca, haverá condução de calor através das paredes.</p>	<p>Infiltração: Calor adicionado ao carro ou perdido por ele devido a infiltração do ar exterior ou saída do ar interior (abertura de portas). Afeta a umidade e a temperatura interior.</p>

Figura 1- Fatores que influenciam a temperatura e umidade internas do trem (SIMÕES MOREIRA, 2011).

2.7 ANÁLISE DO CICLO DE REFRIGERAÇÃO

2.7.1 Diagrama Mollier

Os diagramas, tendo como ordenada a pressão absoluta (P) e como abscissa a entalpia específica (h), são bastante utilizados para apresentar as propriedades termodinâmicas dos FRs, visto que essas coordenadas são mais adequadas à representação do ciclo termodinâmico de refrigeração por compressão de vapor. Esses diagramas são conhecidos como diagramas de Mollier (PIRANI, 2006).

As propriedades termodinâmicas de uma substância são frequentemente apresentadas, além das tabelas, em diagramas que podem ter, como ordenada e abscissa, a temperatura e a entropia, a entalpia e a entropia, a pressão absoluta e o volume específico ou a pressão absoluta e a entropia (PIRANI, 2006).

A Figura 2 mostra os elementos essenciais dos diagramas pressão-entalpia, para qualquer substância pura.

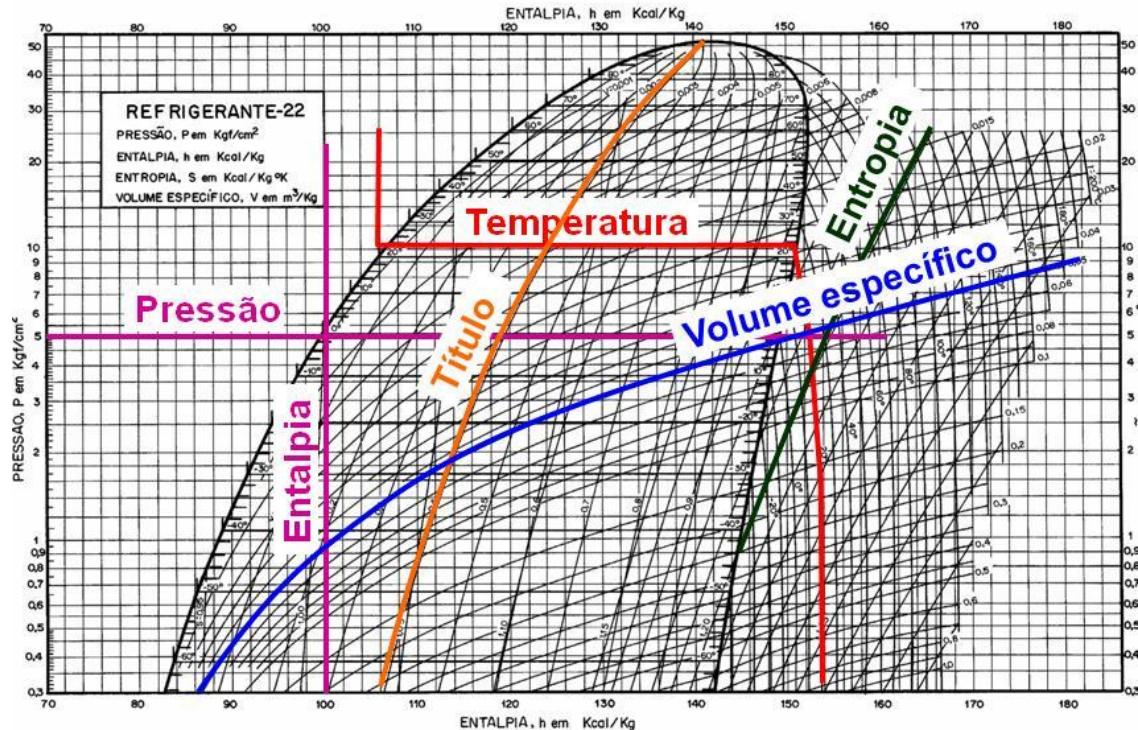


Figura 2 - Diagrama de Mollier (PIRANI, 2006)

Esses diagramas são úteis tanto como meio de apresentar a relação entre as propriedades termodinâmicas como instrumento para visualização dos processos

que ocorrem em cada uma das partes do sistema. Assim, no estudo de um ciclo de refrigeração, será utilizado o diagrama de Mollier para mostrar o que ocorre em cada componente do sistema de refrigeração (compressor, condensador, dispositivo de expansão e evaporador) (PIRANI, 2006).

Podemos observar na Figura 3 três regiões características de um gás refrigerante:

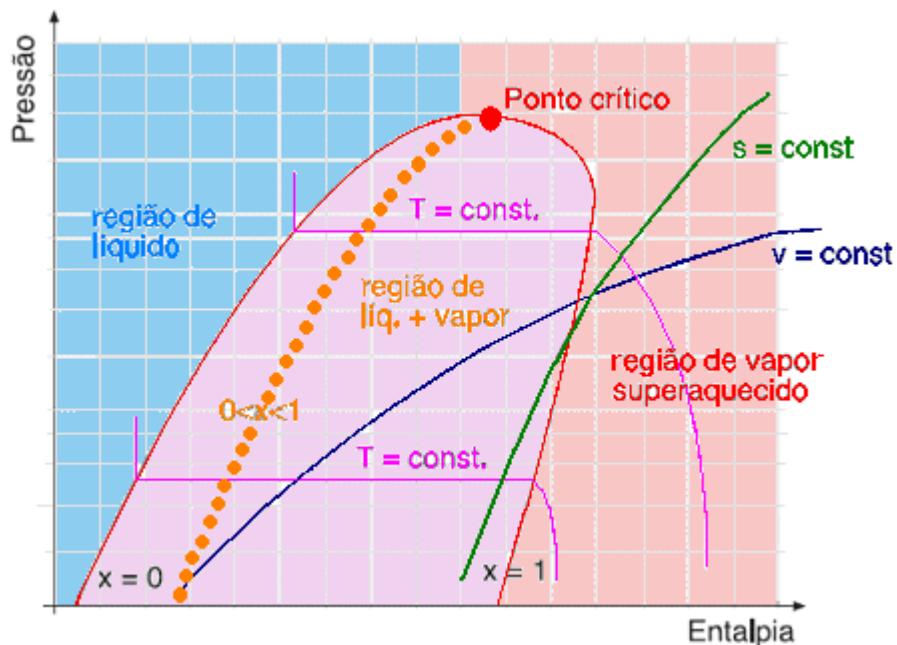


Figura 3 - Esquema de um diagrama de Pxh (Mollier) para um fluido refrigerante.

A região à esquerda da linha de líquido saturado, ou seja, líquido a temperatura e pressão de saturação, tem título: $x=0$ (massa de vapor igual a zero). É chamada de região de líquido sub-resfriado, que significa que a temperatura do líquido é menor do que a temperatura de saturação.

A região compreendida entre as linhas de líquido saturado (título: $x=0$, ou seja, massa de vapor igual a zero) e vapor saturado (título: $x=1$, ou seja, massa de vapor igual a 100%), é chamada de região de vapor úmido ou região de líquido mais vapor.

A região à direita da linha de vapor saturado, ou seja, vapor na temperatura de saturação (título: $x=1$, ou seja, massa de vapor igual a 100%), é chamada de região de vapor superaquecido, que significa vapor a qualquer temperatura acima da temperatura de saturação.

2.7.2 Ciclo Teórico de Refrigeração por Compressão de Vapor

A Figura 4 mostra um esquema básico de um sistema de refrigeração por compressão de vapor com seus principais componentes e o seu respectivo ciclo teórico construído sobre um diagrama de Mollier, no plano P-h (Pressão x Entalpia). Os equipamentos esquematizados na figura 4 representam, genericamente, qualquer dispositivo capaz de realizar os respectivos processos específicos indicados (PIRANI, 2006).

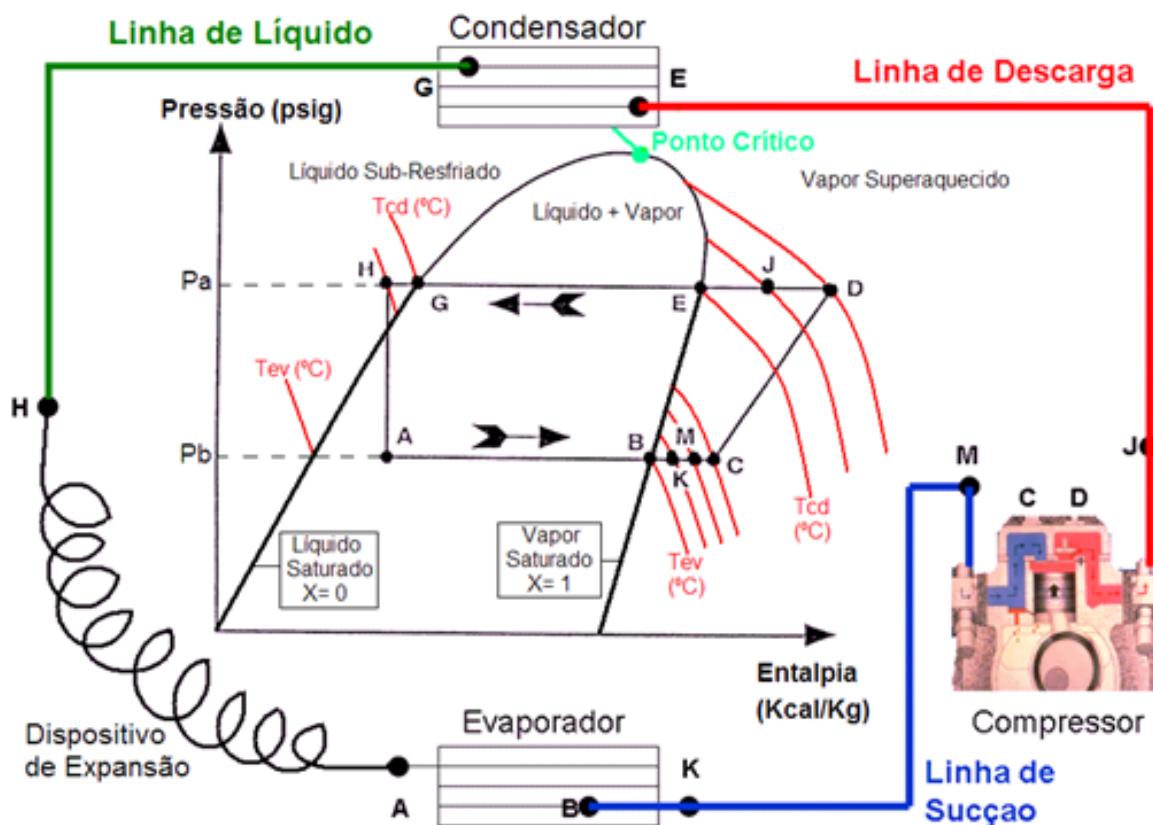


Figura 4 - Ciclo teórico de refrigeração por compressão a vapor (PÖTTKER, 2006)

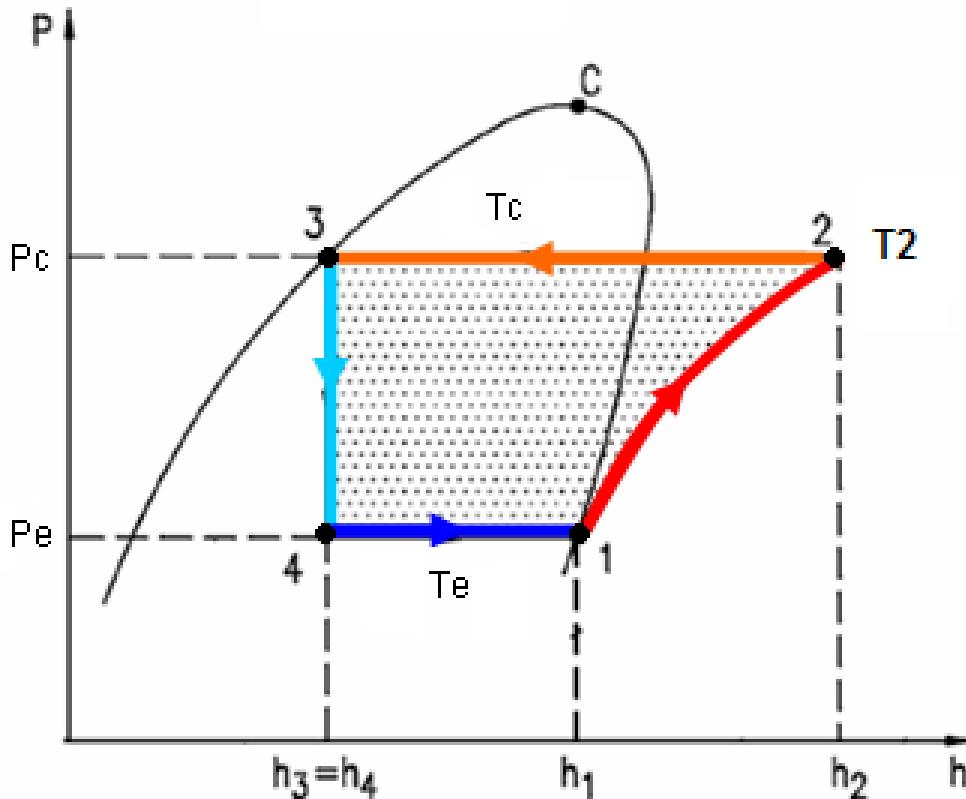


Figura 5 - Ciclo Teórico de Refrigeração por Compressão a Vapor (PIRANI, 2006)

Os processos termodinâmicos que constituem o ciclo teórico em seus respectivos equipamentos são:

Processo 1→2 - Ocorre no compressor, sendo um processo adiabático reversível e, portanto, isentrópico (entropia constante), como mostra a Figura 5. O refrigerante entra no compressor à pressão do evaporador P_e e com título igual a 1 (título: $x=1$, ou seja, massa de vapor igual a 100%). O refrigerante é então comprimido até atingir a pressão de condensação P_c e, ao sair do compressor, está superaquecido à temperatura no ponto 2 (temperatura T_2), que é maior que a temperatura de condensação T_c .

Processo 2→3 - Ocorre no condensador, sendo um processo de rejeição de calor, do refrigerante para o meio de resfriamento, à pressão constante. Nesse processo, o FR é resfriado da temperatura no ponto 2 (T_2) até a temperatura de condensação T_c e, a seguir, condensado até se tornar líquido saturado na temperatura T_3 , que é igual à temperatura T_c .

Processo 3→4 - Ocorre no dispositivo de expansão, sendo uma expansão irreversível a entalpia constante (processo isentálpico), desde a pressão P_c e líquido

saturado (título: $x=0$, ou seja, massa de vapor igual a zero) até a pressão de vaporização P_e . Observe que o processo é irreversível e, portanto, a entropia do refrigerante na saída do dispositivo de expansão (ponto 4) será maior que a entropia do refrigerante na sua entrada (ponto 3).

Processo $4 \rightarrow 1$ - Ocorre no evaporador, sendo um processo de transferência de calor à pressão constante P_e , consequentemente, à temperatura constante T_e , desde vapor úmido (estado 4) até atingir o estado de vapor saturado seco (título: $x=1$). Observe que o calor transferido ao refrigerante no evaporador não modifica a temperatura do refrigerante, mas somente muda sua qualidade (título e estado físico) (PIRANI, 2006).

2.7.3 Ciclo Real de Compressão de Vapor

Para concluir este estudo do diagrama de Mollier, é importante montar o diagrama e as explicações com base nos valores do ar condicionado e do gás refrigerante R134A, considerando o ciclo real.

As diferenças principais entre o ciclo real e o ciclo teórico estão na Figura 6, as quais são descritas a seguir.

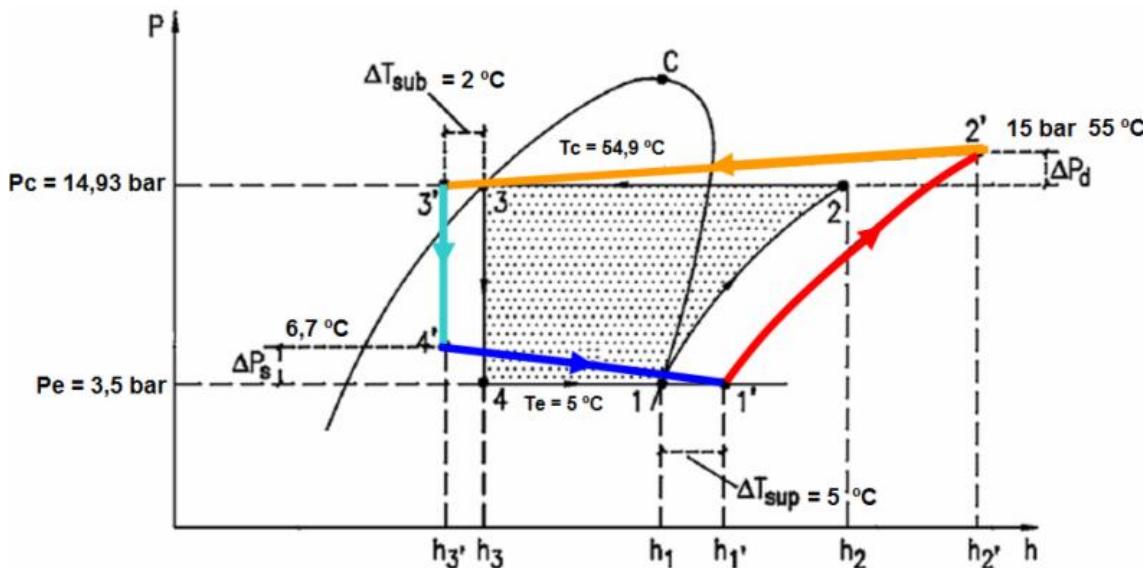


Figura 6 - Diferenças entre o Ciclo Teórico e o Real de Refrigeração

Processo $1 \rightarrow 2$ - Ocorre no compressor, sendo um processo no qual existe aumento de entropia (energia que não é transformada em trabalho). Nessa etapa o FR entra

no compressor à pressão do evaporador ($P_e = 3,5$ bar) e com título igual a 1 (título: $x=1$, ou seja, massa de vapor igual a 100%). O FR é então comprimido até atingir a pressão de condensação ($P_c = 15$ bar) e, ao sair do compressor, estará superaquecido à temperatura no ponto 2 (Temperatura $T_2 = 55$ °C), que é maior que a temperatura de condensação ($T_c = 54,9$ °C).

Processo 2→3 - Ocorre no condensador, sendo um processo de rejeição de calor, do FR para o meio de resfriamento, no qual ocorre uma pequena variação entre a pressão no ponto 2' (15 bar) para pressão de condensação P_c (14,93 bar) ($\Delta P_d =$ Queda de pressão de descarga do compressor). Nesse processo, o FR é resfriado da temperatura no ponto 2' ($T_2 = 55$ °C) até a temperatura de condensação ($T_c = 54,9$ °C) e, a seguir, condensado até se tornar líquido saturado na temperatura no ponto 3' ($T_3 = 54,9$ °C), que é igual à temperatura ($T_c = 54,9$ °C).

Processo 3→4 - Ocorre no dispositivo de expansão, sendo uma expansão irreversível à entalpia constante (processo isentálpico), desde a pressão P_c (15 bar) e líquido saturado (título: $x=0$, ou seja, massa de vapor igual a zero) até a pressão de vaporização ($P_e = 3,5$ bar). Observe que o processo é irreversível e, portanto, a entropia do refrigerante na saída do dispositivo de expansão (ponto 4) será maior que a entropia do refrigerante na sua entrada (ponto 3).

Processo 4→1 - Ocorre no evaporador, sendo um processo de transferência de calor a uma pressão que sofre uma pequena variação devido à queda de pressão de sucção do compressor, mas que deve estar próximo a $P_e = 3,5$ bar. No caso, também há pequena variação de temperatura de (6,7 a 5 °C), desde vapor úmido (estado 4') até atingir o estado de vapor saturado seco (estado 1'). Observe que o calor transferido ao refrigerante, no evaporador, não modifica a temperatura do refrigerante, mas somente muda sua qualidade (título e estado físico).

Outra diferença é o sub-resfriamento do refrigerante na saída do condensador (nem todos os sistemas são projetados com sub-resfriamento) e o superaquecimento na sucção do compressor. Esse também é um processo importante, cuja finalidade é evitar a entrada de líquido no compressor (PIRANI, 2006).

Devido ao superaquecimento e ao processo politrópico (aumento de energia que não é transformada em trabalho) de compressão, a temperatura de descarga do

compressor pode ser muito elevada, tornando-se um problema para os óleos lubrificantes usados nos compressores frigoríficos. A temperatura de descarga não deve ser superior a 130 °C, o que, por vezes, exige o resfriamento forçado do cabeçote dos compressores (com baixas temperaturas de evaporação) (PIRANI, 2006).

2.8 DESEMPENHO E BALANÇO ENERGÉTICO DO CICLO DE REFRIGERAÇÃO

Os índices de referência (benchmarks) mais usuais nos sistemas de refrigeração industrial são o Coeficiente de Performance do Ciclo (COP) ou a Razão de Eficiência Energética (EER), a relação kW/TR e, se possível, o consumo específico por produto (kWh/t).

O COP representa a relação entre a capacidade frigorífica do sistema (Q_o) e a potência consumida (W). Já a EER indica a eficiência de uma máquina frigorífica, sendo mais utilizada para equipamentos autônomos, principalmente na indústria de ar condicionado.

O balanço energético de um ciclo de refrigeração por compressão de vapor pode ser observado na Figura 7, na qual se pode observar o trabalho imposto pelo compressor no FR, desprezando-se a energia cinética e potencial (STOECKER e JONES, 1985).

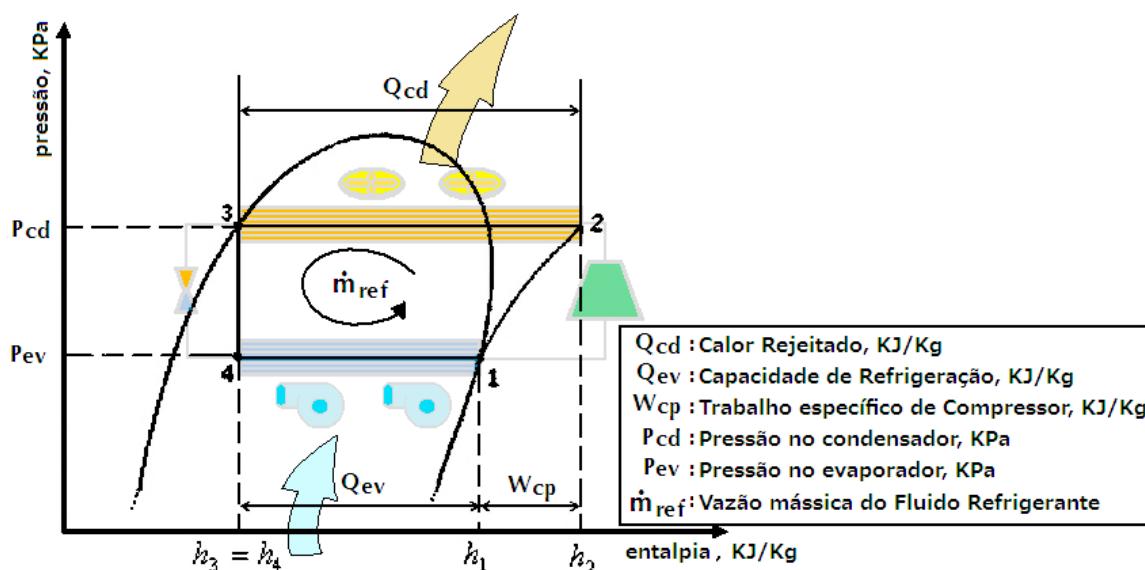


Figura 7 - Diagrama Ph (específica) com identificação das energias envolvidas

O trabalho imposto pelo compressor no fluido refrigerante é:

$$\dot{W}_{cp} = \dot{m}_{ref} (h_1 - h_2) = \text{potência _necessária} \quad (1)$$

Dividindo por \dot{m}_{ref} , temos:

$$W_{cp} = h_1 - h_2 \quad (2)$$

O calor rejeitado é representado por:

$$Q_{cd} = h_2 - h_3 \quad (3)$$

O calor trocado na refrigeração é representado por:

$$Q_{ev} = h_1 - h_4 \quad (4)$$

Destacando que a potência necessária para manter o funcionamento do sistema é:

$$\dot{W}_{cp} = \dot{Q}_{cd} - \dot{Q}_{ev} \Rightarrow \text{potência _necessária} \quad (5)$$

“A eficiência de ciclos é normalmente definida como a relação entre a energia útil, que é o objetivo do ciclo, e a energia que deve ser paga para a obtenção do efeito desejado. No caso dos ciclos frigoríficos, o objetivo é produzir um efeito de refrigeração, ao passo que o trabalho líquido representa aquela quantidade que deve se pagar, dada pela Eq. (5). Assim, a eficiência, denominada neste caso de Coeficiente de Eficácia, COP, Coefficient of Performance, pode ser determinada pela seguinte relação:” (STOECKER e SAIZ JABARDO, 2002)

$$COP = \frac{\dot{Q}_{ev}}{\dot{Q}_{cd} - \dot{Q}_{ev}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{\text{efeitoutil}}{\text{potência _necessária}} \quad (6)$$

$h_4 = h_3$, pois no dispositivo de expansão ocorre a expansão isentálpica.

2.9 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE EVAPORAÇÃO NO COP DO CICLO TEÓRICO

Para ilustrar o efeito que a temperatura de evaporação exerce sobre a eficiência do ciclo, será considerado um conjunto de ciclos em que somente a temperatura de evaporação (TO) é alterada. Esses ciclos estão mostrados na Figura 8.

Nessa análise, utilizou-se R22 como refrigerante, o qual é típico de sistemas de ar condicionado. Como pode ser observado, uma redução na temperatura de evaporação resulta em redução do COP; isto é, o sistema torna-se menos eficiente.

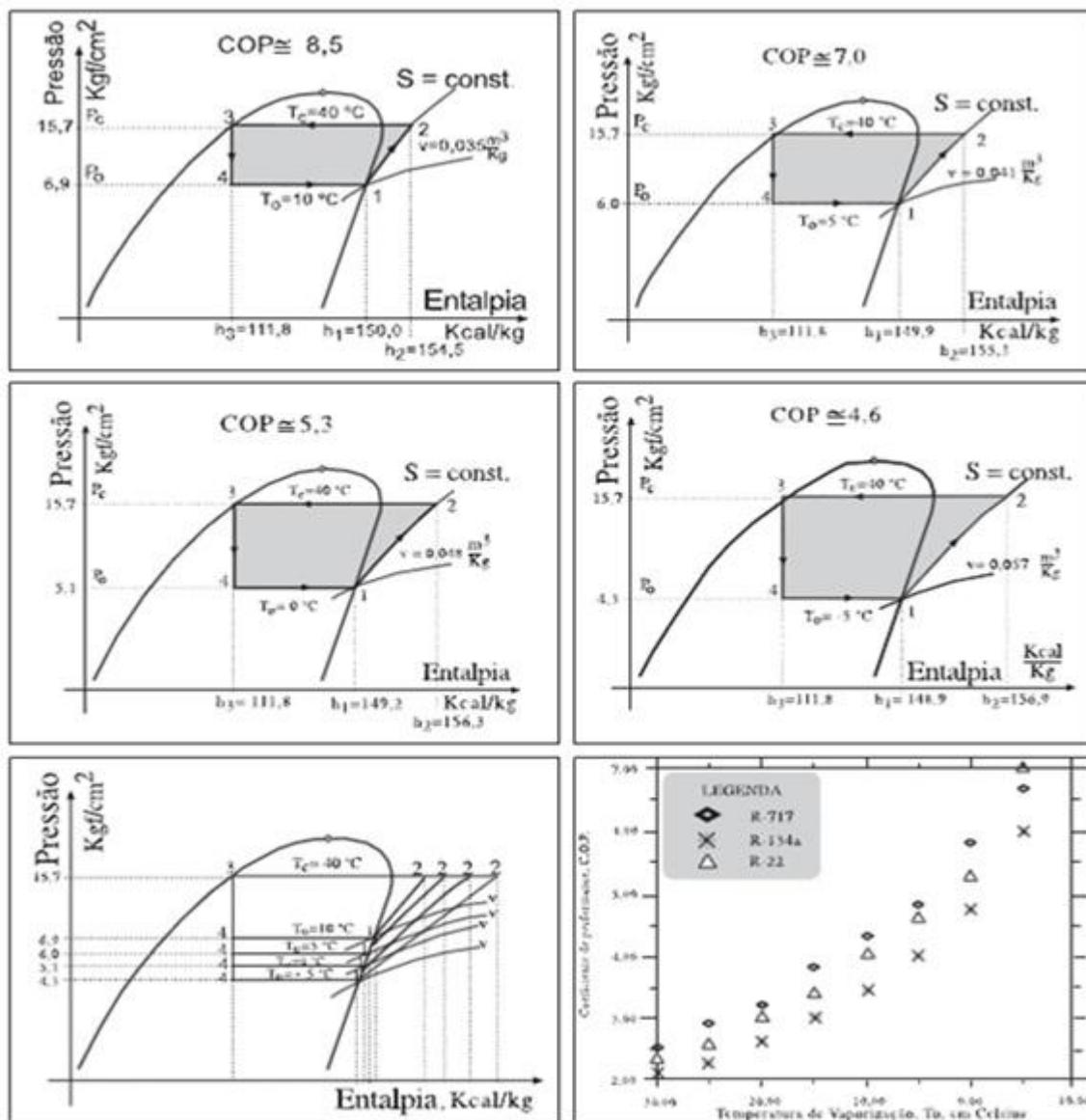


Figura 8 - Influência da temperatura de evaporação no COP do ciclo teórico (PROCEL, 2005)

2.10 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE CONDENSAÇÃO NO COP DO CICLO TEÓRICO

Como no caso da temperatura de vaporização, a influência da temperatura de condensação é mostrada em um conjunto de ciclos em que apenas se altera a temperatura de condensação (TC).

Essa análise está mostrada na Figura 9. Observe que uma variação de 15°C na temperatura de condensação resultou em menor variação do COP, se comparado com a mesma faixa de variação da temperatura de evaporação.

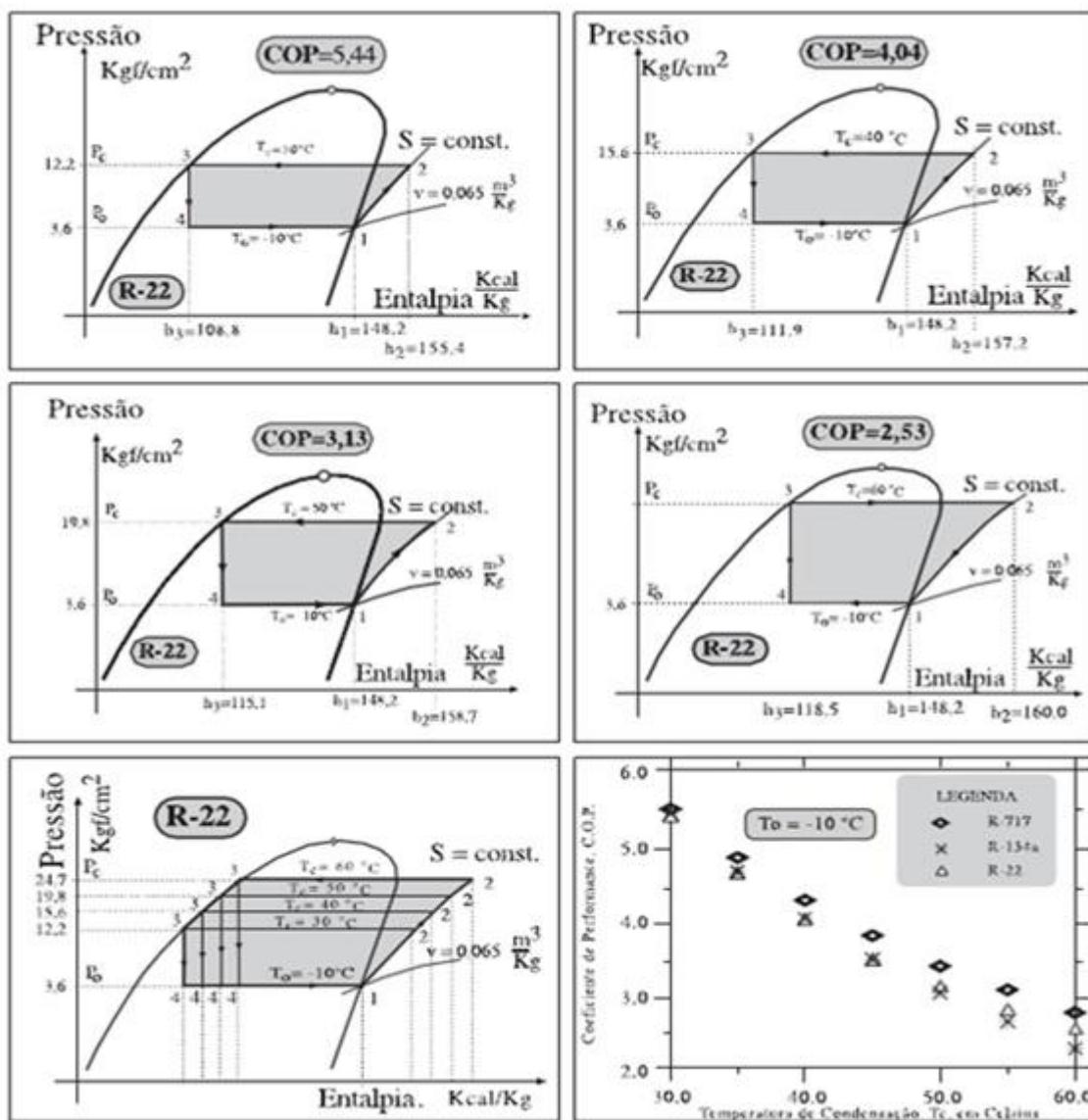


Figura 9 - Influência da temperatura de condensação no COP do ciclo teórico (PROCEL, 2005)

2.11 INFLUÊNCIA DO SUB-RESFRIAMENTO DO LÍQUIDO NO COP DO CICLO TEÓRICO

De forma idêntica à dos casos anteriores, a Figura 10 mostra a influência do sub-resfriamento do líquido na saída do condensador sobre a eficiência do ciclo.

Embora ocorra um aumento no COP do ciclo com o aumento do sub-resfriamento, o que é ótimo para o sistema, na prática se utiliza um sub-resfriamento para garantir que se tenha somente líquido na entrada do dispositivo de expansão. Isso mantém a capacidade frigorífica do sistema, mas não permite ganho de eficiência.

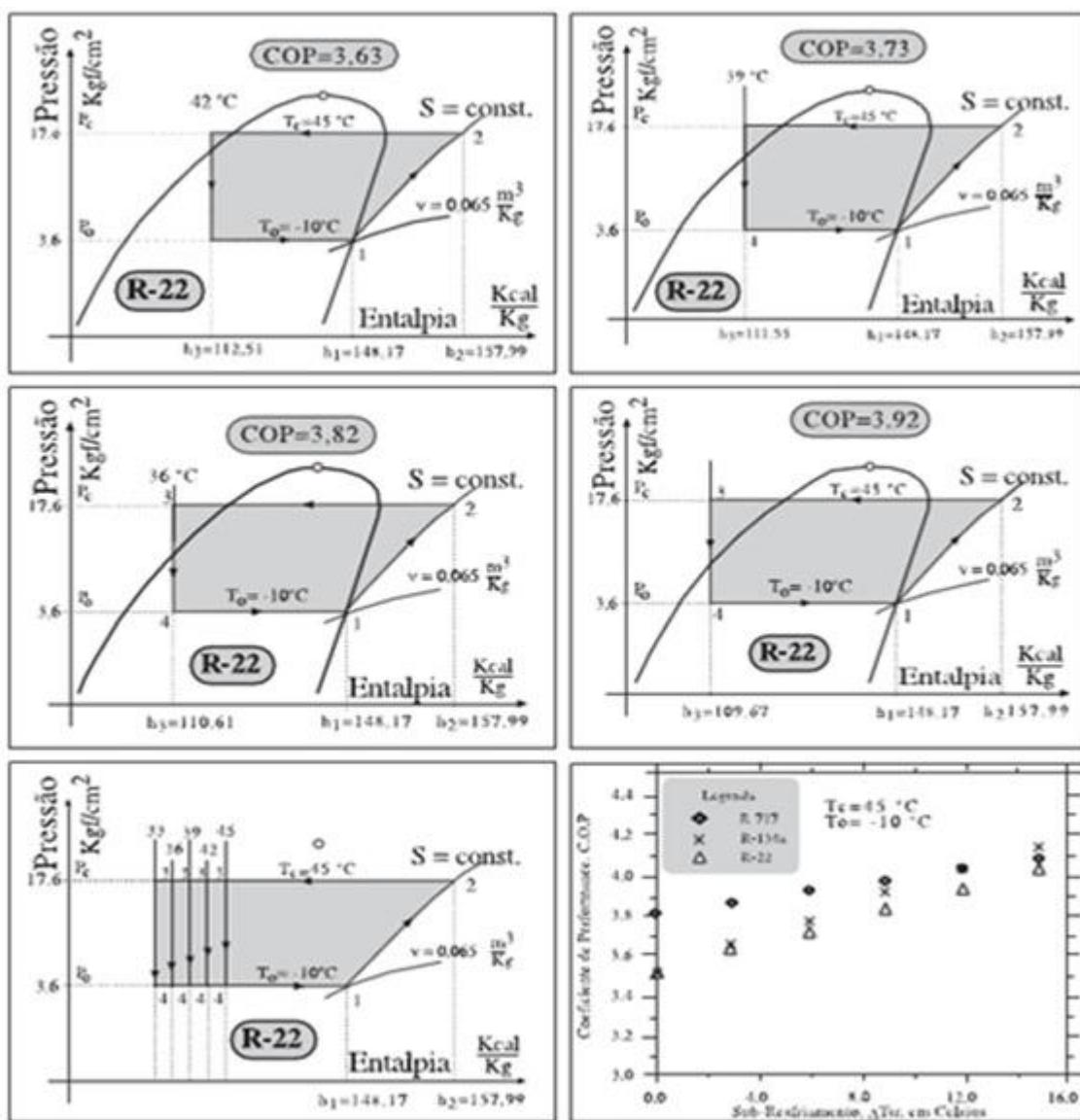


Figura 10 - Influência do sub-resfriamento no COP do ciclo teórico (PROCEL, 2005)

2.12 INFLUÊNCIA DO SUPERAQUECIMENTO ÚTIL NO COP DO CICLO TEÓRICO

A Figura 11 mostra a influência do superaquecimento na performance do ciclo de refrigeração – a variação do COP com o superaquecimento depende do refrigerante.

Nos casos mostrados, para o R717, o COP sempre diminui; para R134a, o COP sempre aumenta; e para o R22, o caso mais complexo, há um aumento inicial e, depois, uma diminuição. Mesmo para os casos em que o superaquecimento melhora o COP, ele diminui a capacidade frigorífica do sistema de refrigeração.

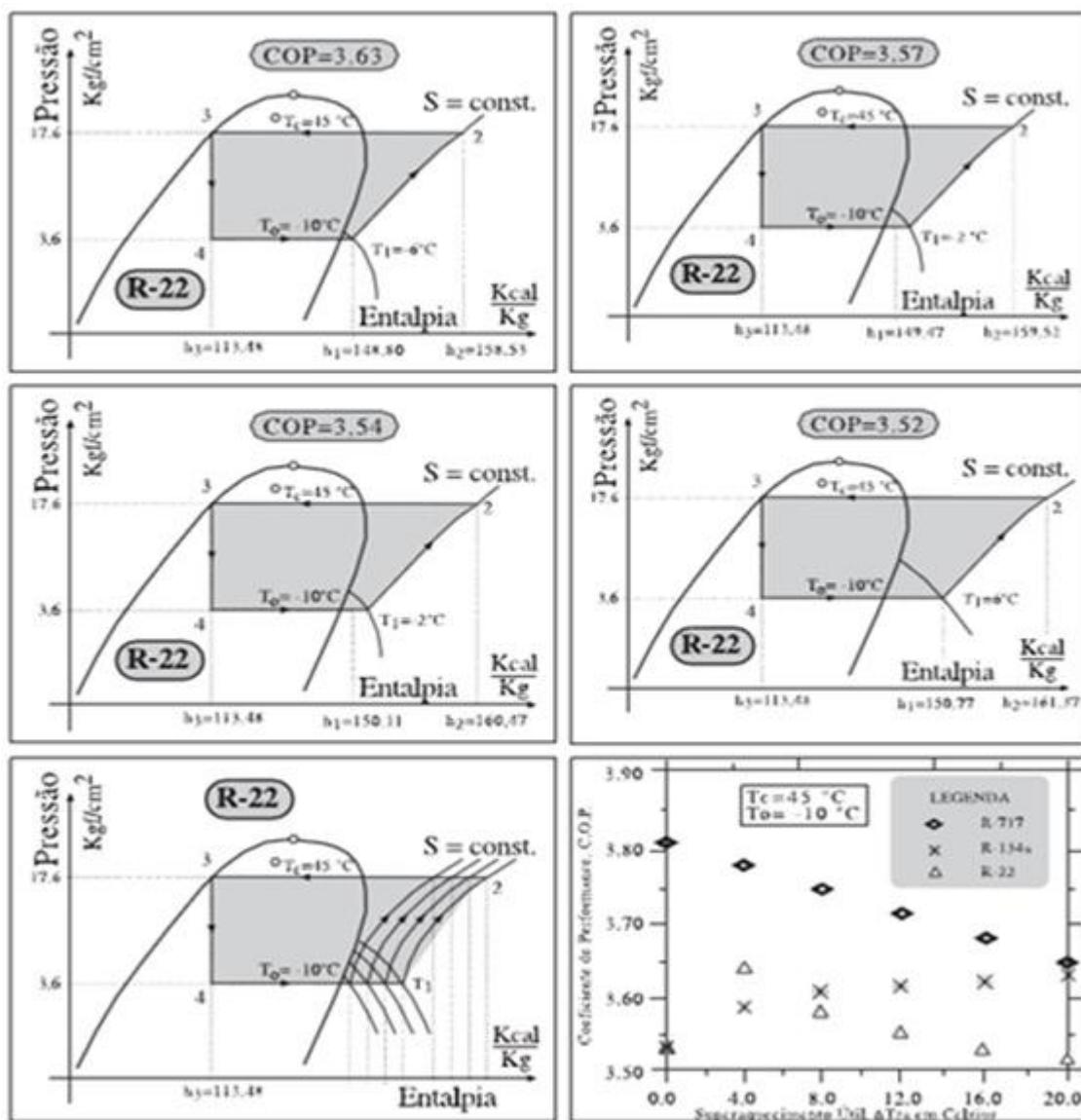


Figura 11 - Influência do superaquecimento no COP do ciclo teórico (PROCEL, 2005)

3 CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS ESTUDADOS

3.1 CIRCUITOS FRIGORÍFICOS ANALISADOS

Os CFs analisados estão instalados nas unidades de ar condicionado apresentadas nas Figuras 12 até 21:

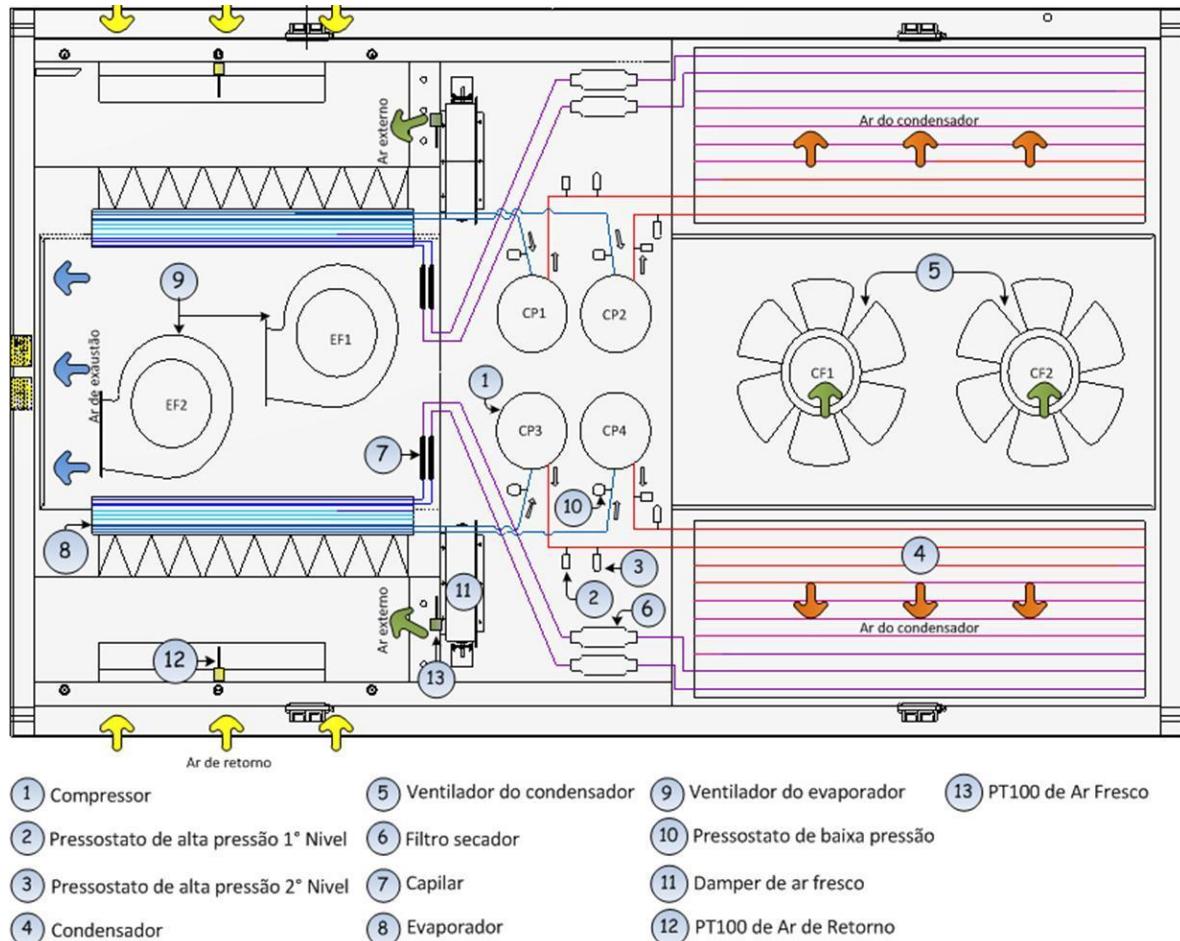


Figura 12 - Circuito Frigorífico do Sistema de Ar Condicionado das Frotas I e L



Figura 13 - Unidade de Ar Condicionado das Frotas I e L

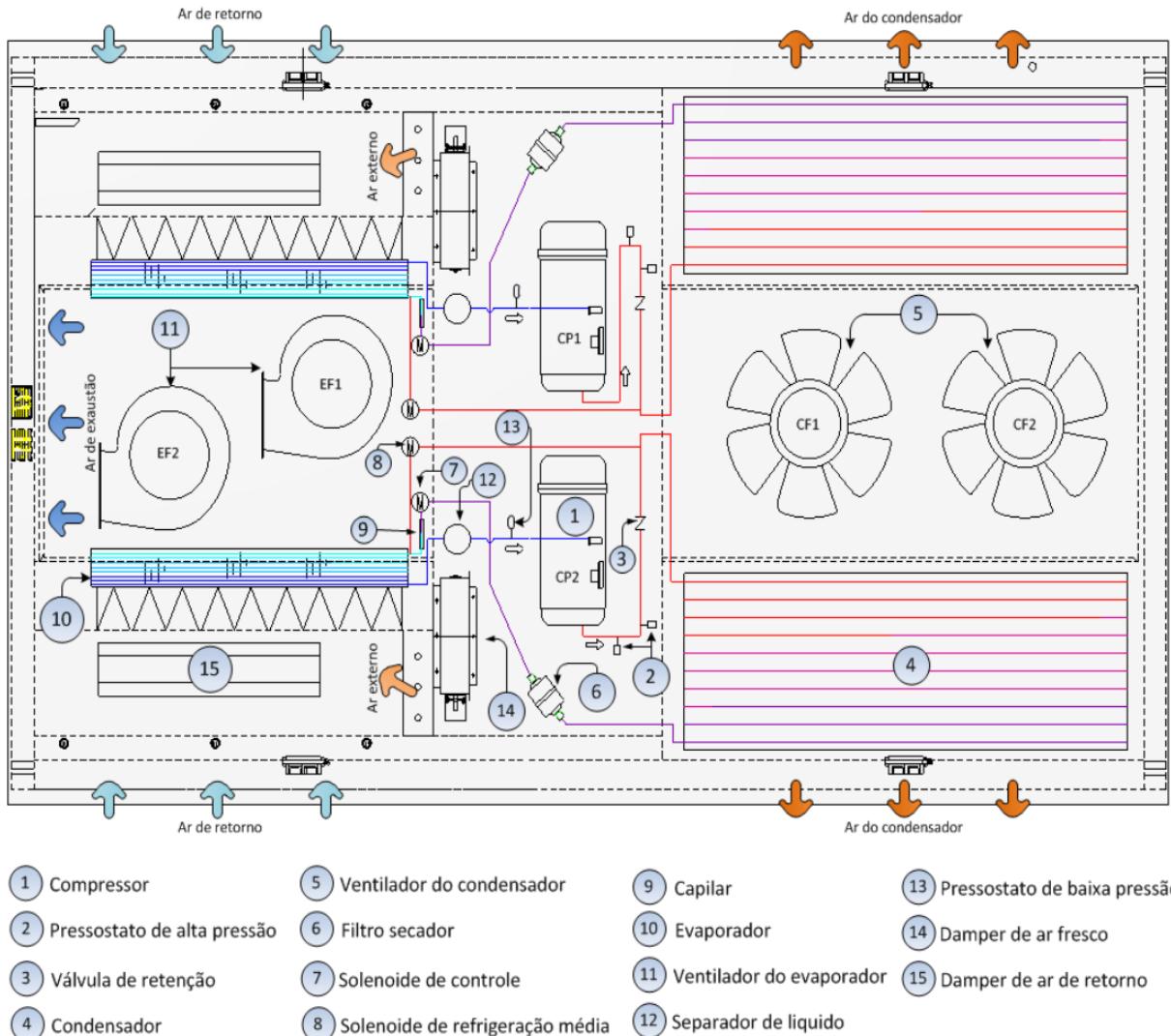
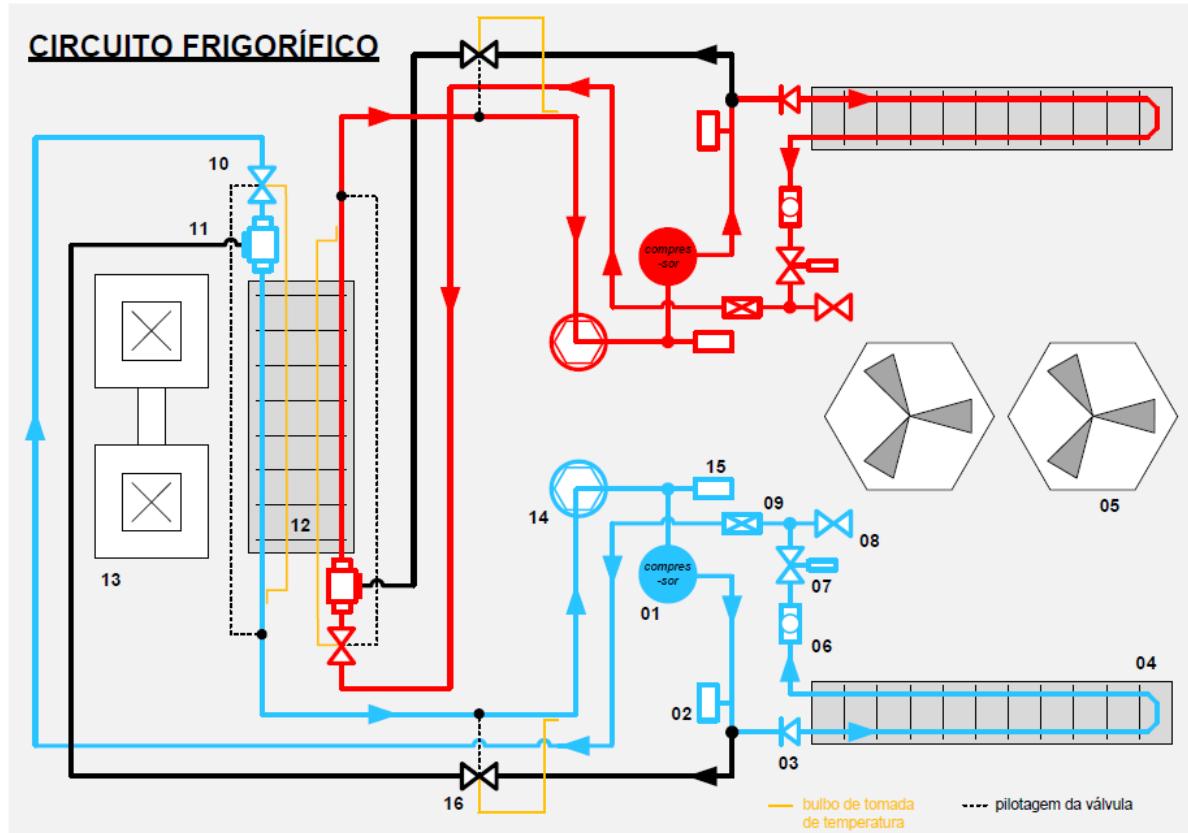


Figura 14 - Circuito Frigorífico do Sistema de Ar Condicionado das Frotas G e K



Figura 15 - Unidade de Ar Condicionado das Frotas G e K



No.	Componentes	No.	Componentes	No.	Componentes	No.	Componentes
1	Compressor scroll horizontal G750EL - 128CTP - HITACHI	5	Vent. do Condensador MOTOR QSL100L	9	Filtro Secador DML085S - DANFOSS	13	Ventilador do Evaporador (ou Insulador) MOTOR QAL80M
2	Pressostato de Alta	6	Visor SGN 16S - DANFOSS	10	Válvula de Expansão TDEZ7.5 AC - DANFOSS	14	Separador Líquido/Gás
3	Valvula de Retenção NRVH 19S - DANFOSS	7	Válvula Solenoide EVR10(NC) - DANFOSS	11	Misturador Gás/Líquido	15	Pressostato de Baixa
4	Condensador	8	Válvula de Carga	12	Evaporador	16	Válvula de bypass

Figura 16 - Circuito Frigorífico do Sistema de Ar Condicionado da Frota H e J



Figura 17 - Unidade de Ar Condicionado da Frota H e J

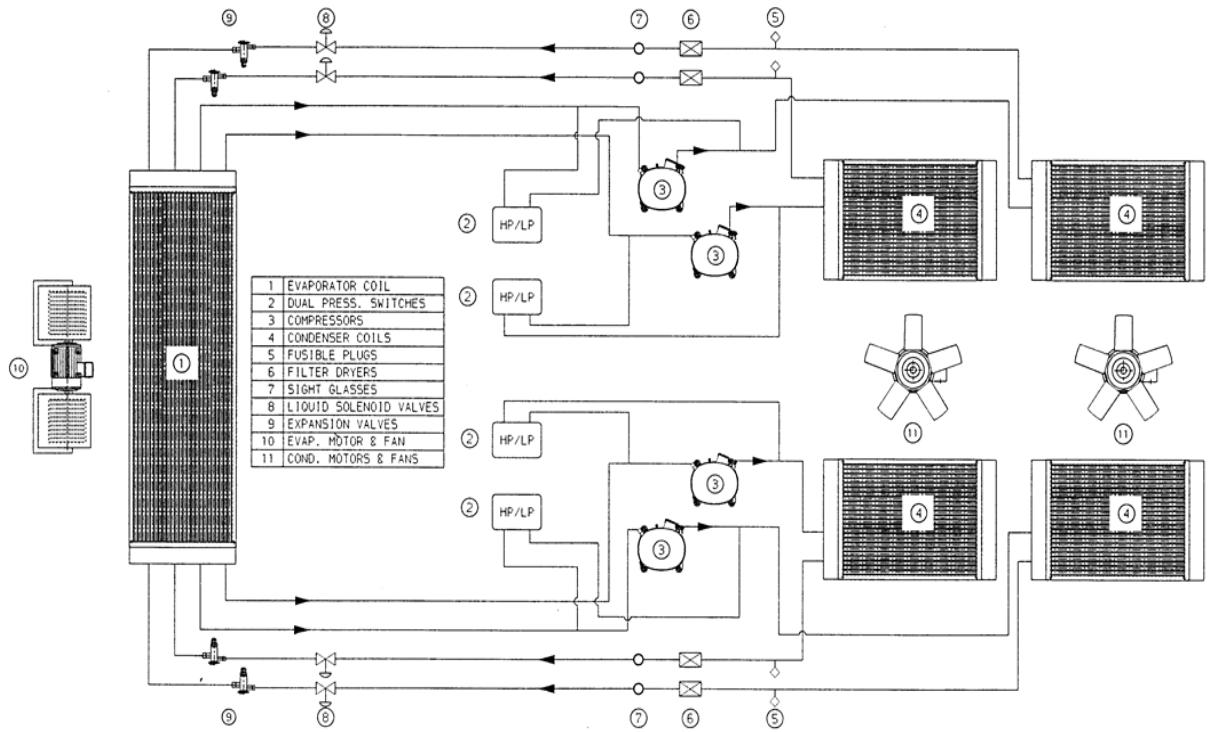


Figura 18 - Circuito Frigorífico do Sistema de Ar Condicionado da Linha 4-Amarela



Figura 19 - Unidade de Ar Condicionado da Linha 4-Amarela

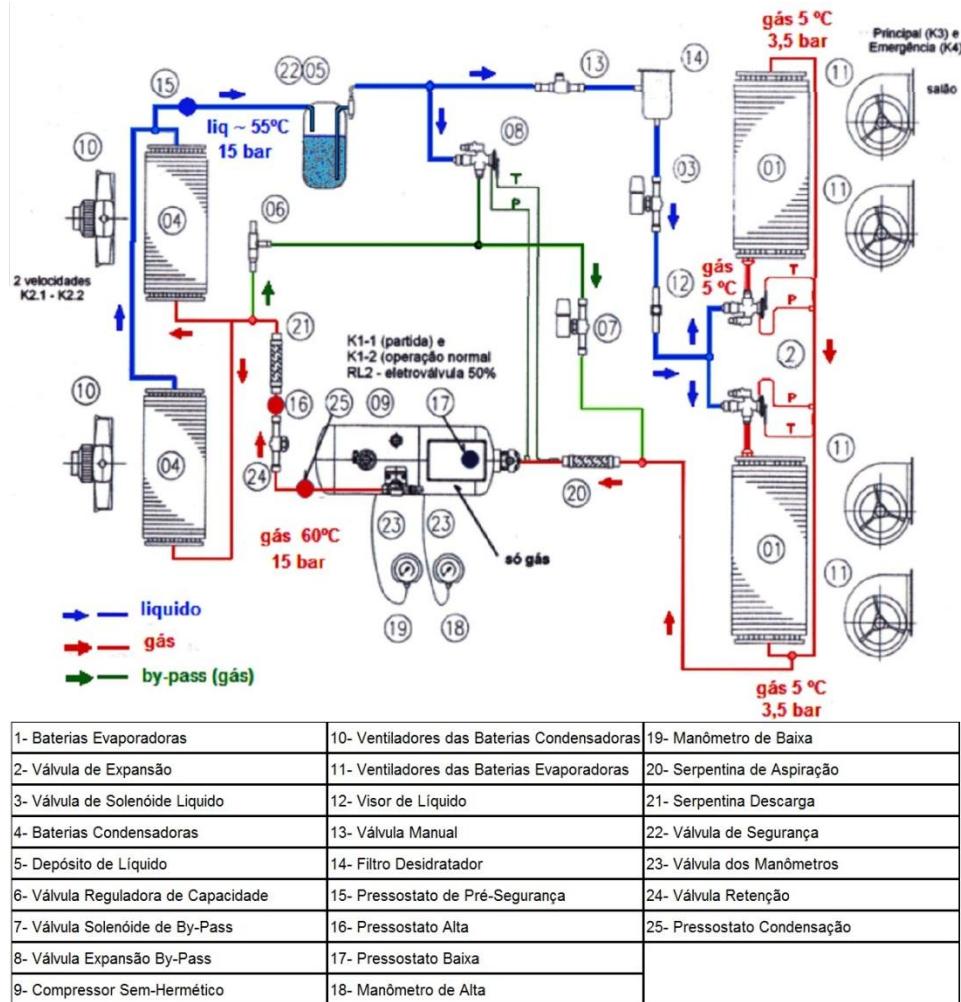


Figura 20- Ciclo Frigorífico do Sistema de Ar Condicionado da Frota F



Figura 21 - Unidade de Ar Condicionado da Frota F

3.2 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS SISTEMAS ESTUDADOS

As Tabelas 3 e 4 relacionam as especificações técnicas dos fornecedores das unidades frigoríficas.

Tabela 3 -

Especificações técnicas das unidades frigoríficas

FROTA	FABRICANTE	MODELO	ALIMENTAÇÃO		CAPACIDADE DE REFRIGERAÇÃO	PESO APROXIMADO (kg)	DIMENSÕES (mm)		
			PRINCIPAL	COMANDO			C	L	A
H	FAIVELEY	KS47A	380Vca ±10%, 3φ, 60Hz ± 5% - 28,7KW/34,32KVA	72Vdc (-30%~+25%)	41 KW	863	3825	2213	380
J	FAIVELEY	KA01A	380Vca ±10%, 3φ, 60Hz ± 5% - 28,7KW/34,32KVA	72Vdc (-30%~+25%)	41 KW	863	3825	2213	380
F	TEMOINSA	AA-UCS-R134a	380Vca ±10%, 3φ, 60Hz - 29,6KVA	72 Vcc	45 KW	900			
K	KING	KG42D	380Vac±5%, 3φ, 60Hz±1 Hz	48Vdc (-30%~+25%)	42 KW	800	3670	2058	380
I e L	KING	KG44D	380Vac±5%, 3φ, 60Hz±1 Hz	48Vdc (-30%~+25%)	44 KW	800	3300	1888	441
G	KING	KG44C	380Vac±5%, 3φ, 60Hz±1 Hz	48Vdc (-30%~+25%)	44 KW	800	3444	2058	446
LINHA 4	CARRIER	ROOF MOUNTED PACKAGED	380Vac, 3φ, 60Hz	72Vdc	46 KW	750			

Tabela 4 - Especificações técnicas dos compressores

FROTA	COMPRESSOR							
	TIPO	POSIÇÃO	MODELO	FABRICANTE	CORRENTE NOMINAL (A)	QTD	FLUIDO	VOLUME (Kg)
H	SCROLL	HORIZONTAL	G750EL-128CTP	HITACHI	24	2	R-407C	5,5
J	SCROLL	HORIZONTAL	G750EL-128CTP	HITACHI	24	2	R-407C	5,5
5	PARAFUSO	HORIZONTAL	VSK 4161-25	BITZER	37	1	R-134A	25
K	SCROLL	HORIZONTAL	ZRH72KJE-TF7-650	COPELAND	12,5	2	R-407C	4,7
I e L	SCROLL	HORIZONTAL	ZR48KCE-TF7-522	COPELAND	7,6	4	R-407C	1,36
G	SCROLL	VERTICAL	ZEN117XZA	MITSUBISHI	12,5	2	R-407C	4,6
LINHA 4	SCROLL	VERTICAL	H73A423	BRISTOL	6,5	4	R-407C	1,8

Atualmente, já existem mais de 2.000 CFs instalados nas frotas analisadas, porém, em um curto período, esse número aumentará para mais de 5.000, conforme se pode observar na Tabela 5:

Tabela 5 - Cenário futuro da quantidade de circuitos instalados

FROTA	TOTAL	
	TRENS	CIRCUITOS FRIGORÍFICOS
E	11	264
F	8	192
G	17	408
H	17	408
I	25	1.200
J	26	624
K	25	600
L	22	1.056
NOVOS TRENS L5	26	624
TOTAL	177	5.376

3.3 MODERNIZAÇÃO E EXPANSÃO DO SISTEMA METROVIÁRIO DE TRANSMISSÃO E ANÁLISE DE DADOS

É comum o uso do termo “Modernização” para o processo de atualização tecnológica dos sistemas do Metrô de São Paulo, inclusive para as expansões das linhas metroviárias com o fornecimento de novas estações.

Para os equipamentos rodantes, também existe um novo padrão de fornecimento, que deve ser seguido para os novos trens e para a reforma dos antigos.

Podem-se destacar a implantação de redes de comunicação fixa e móvel, o Sistema de Transmissão de Digital (STD) e o Sistema de Comunicações Móveis de Voz e Dados (SCMVD), que permitem a comunicação de dados em alta velocidade entre estações, vias, bases de manutenção, trens e pátios.

Para uso específico da manutenção, será fornecido o Sistema de Apoio à Manutenção (SAM), que centraliza todas as informações de alarmes e estados disponíveis nos equipamentos fixos e rodantes.

Algumas características desses sistemas que contribuirão para o desenvolvimento deste trabalho são discutidos nos próximos itens.

3.3.1 Sistema de Transmissão Digital (STD)

O Sistema de Transmissão Digital consiste na infraestrutura de comunicação para fornecimento de serviços de transmissão de voz, dados e imagem a todos os sistemas usuários a estações, subestações, retificadoras, CCO, vias, poços de ventilação, saídas de emergência, bases de manutenção e pátios, por meio de uma rede convergente de comunicação de dados e uma rede óptica.

A rede convergente interligará as redes locais das estações e o CCO, operando com um padrão único de comunicação de dados em seu *backbone* e combinando as diversas interfaces e segmentos de rede de acesso necessários para o atendimento aos sistemas usuários do STD.

A solução adotada para o STD utiliza tecnologia SDH no *backbone* para a modernização dos sistemas de sinalização, telecomunicações e controle

centralizado das Linhas 1-Azul, 2-Verde e 3-Vermelha. É composta por recursos tecnológicos (hardware e software) que constituirão a rede convergente capaz de proporcionar a transmissão de dados, voz e imagens entre o CCO e as estações.

Cada linha possui dois anéis ópticos interligados por meio de cabo de fibra óptica. Cada anel é ainda subdividido, formando dois sub-anéis que são interconectados por intermédio do equipamento de CCO Vergueiro (ver as Figuras 22, 23 e 24). Dois equipamentos FOX515H da ABB associados a switches foram distribuídos em cada localidade para o transporte das VLANs dos serviços de usuário.

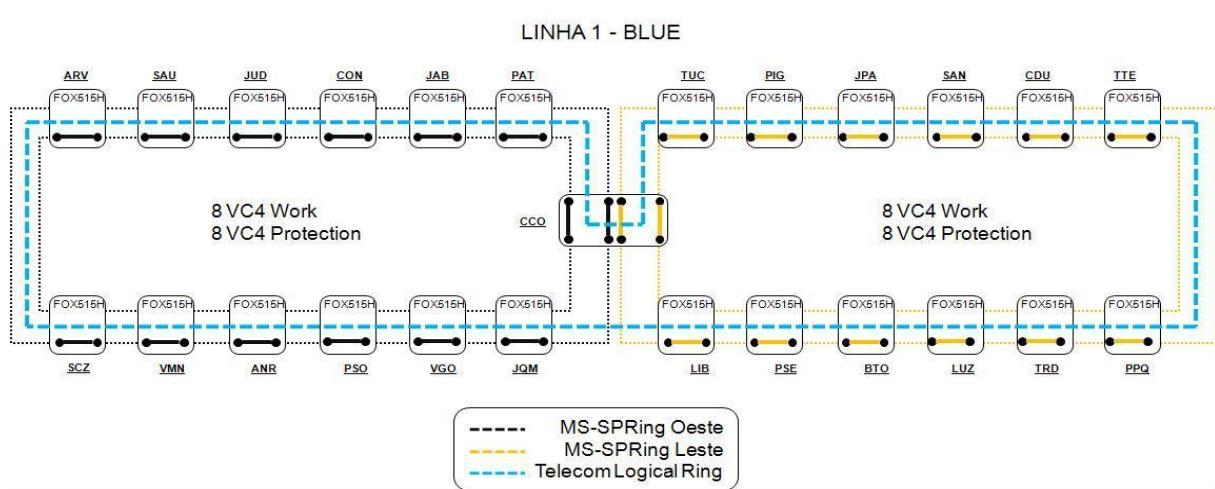


Figura 22 - Diagrama de interligação físico e lógico do STD da Linha 1-Azul (CMSP GCS/CSC, 2012)

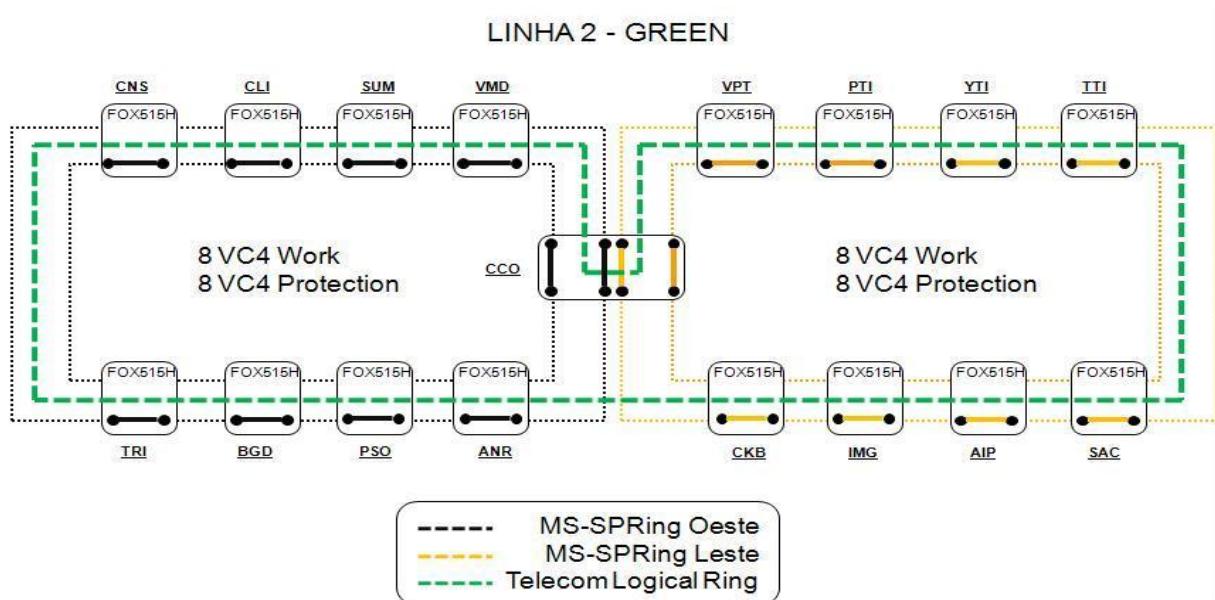


Figura 23 - Diagrama de interligação físico e lógico do STD da Linha 2-Verde (CMSP GCS/CSC, 2012)

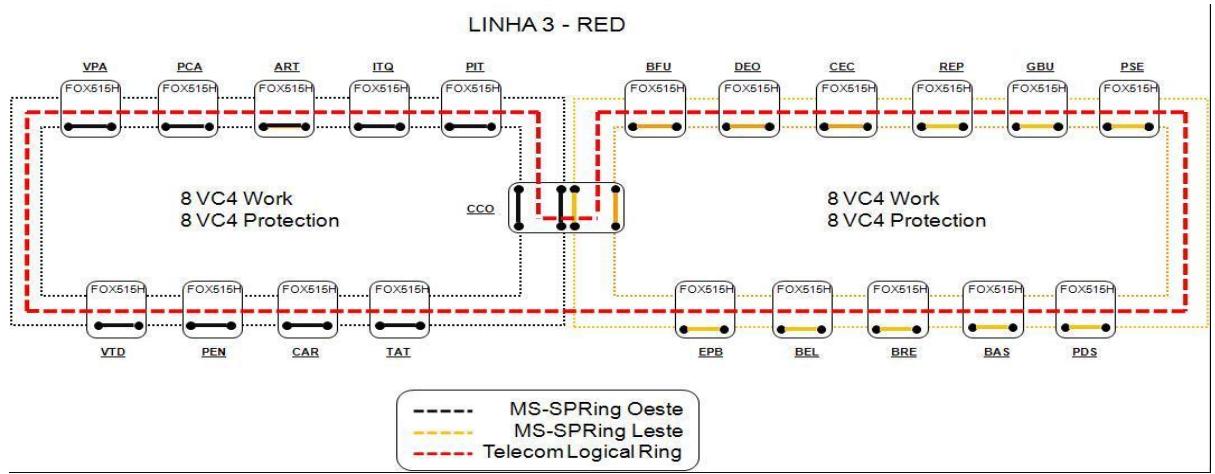


Figura 24 - Diagrama de interligação física e lógica do STD da Linha 3-Vermelha (CMSP GCS/CSC, 2012)

No CCO, as linhas são interligadas por um conjunto de seis switches, conforme indicado na Figura 25, formando um anel configurado para balanceamento de carga. Utiliza-se protocolo OSPF e endereçamento virtual por intermédio do protocolo VRRP para cada sistema que necessite de acesso às três linhas, como, por exemplo, o SAM.

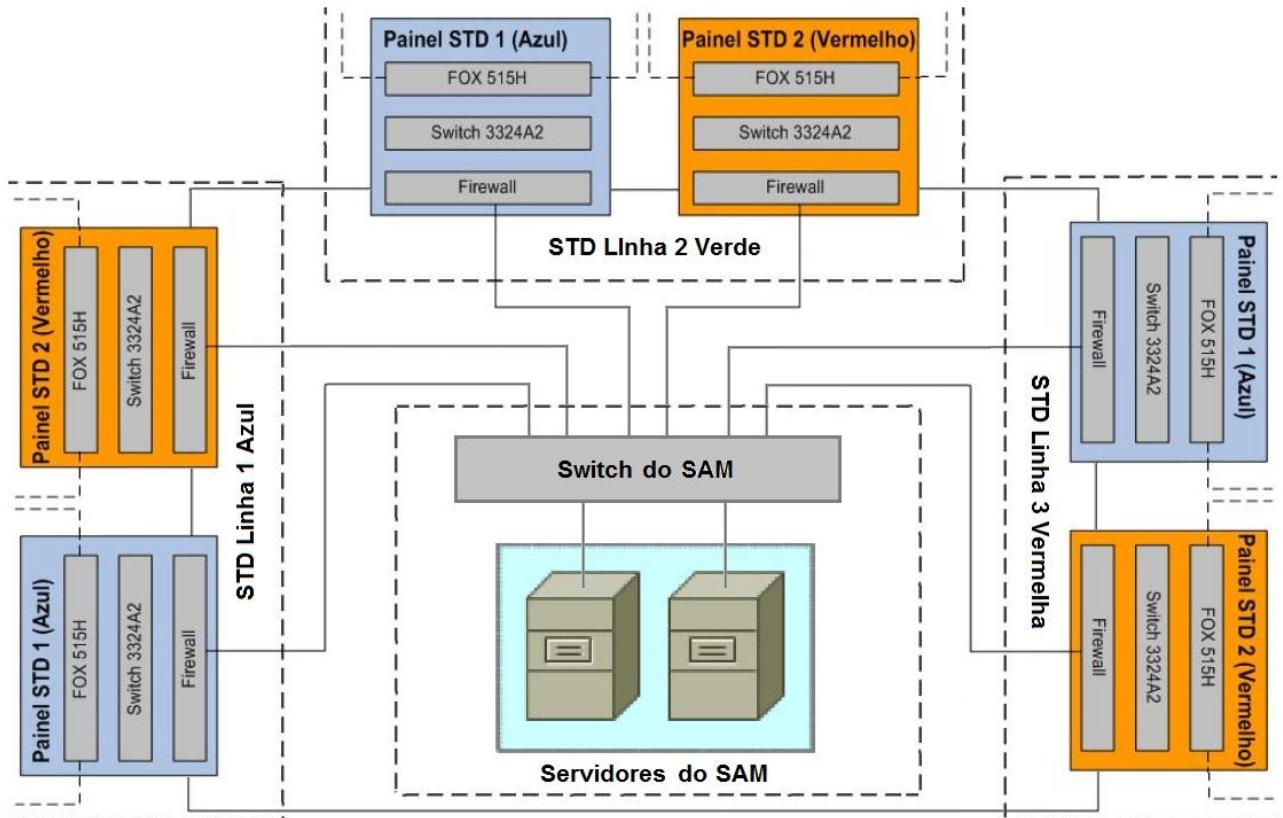


Figura 25 - Diagrama de interligação das três linhas do STD no CCO

3.3.2 SCMVD

O Sistema de Comunicação Móvel de Voz e Dados (SCMVD) tem o objetivo de proporcionar uma infraestrutura para o transporte de informações na forma de dados entre dois ou mais pontos, que podem ser parte do mesmo sistema ou não. Esses pontos de um sistema ou de sistemas diferentes que precisam se comunicar ou manter uma interoperabilidade, instalados em terra ou nos 142 trens, são considerados “usuários” do SCMVD.

O SCMVD usa como meio físico de transporte as ondas eletromagnéticas (comunicação sem fio) entre transmissor e receptor (os “usuários” e os *endpoints*).

A conexão permanente entre a Rede Embarcada e a Rede em Terra utilizará o protocolo de comunicações IP baseado no padrão Wi-Fi 802.11g, na frequência de operação de 2,4 GHz (Gigahertz).

A comunicação Trem-Terra pode ser vista como um sistema de transmissão de alta capacidade, que permite o envio de informações bidirecionais de diferentes naturezas entre os sistemas embarcados e os sistemas em terra (CCO - Centro de Controle Operacional).

No Metrô de São Paulo, o SCMVD complementa a rede STD e interage com ela para satisfazer as necessidades dos usuários dos sistemas, formando assim uma única infraestrutura funcional para o transporte de dados e a interconexão dos equipamentos e sistemas.

Por isso, o SCMVD define-se como uma extensão da infraestrutura de comunicações fixas, que permitirá que os equipamentos embarcados (a bordo dos trens) integrem-se aos serviços de terra, podendo ser acessíveis por esses equipamentos.

A conexão bidirecional entre a infraestrutura de comunicações fixas e os sistemas embarcados será ininterrupta em todo o percurso das linhas.

A arquitetura dos equipamentos embarcados está apresentada na Figura 26. O equipamento Gestor de Comunicações Móveis embarcadas está localizado no carro

B2 e concentra todas as conexões com as duas Estações de Rádio Base embarcadas, com as duas IHMs (Interface Homem-máquina) do SCMVD das cabines e com um Concentrador de Dados do trem (CD). Esse último é uma Interface de comunicação, que deverá atuar como “ponte de conexão” entre os aplicativos de terra no CCO e os aplicativos dos equipamentos embarcados que não pertencem ao SCMVD. Este está sendo especificado, isto é, encontra-se em fase de concepção para futura contratação.

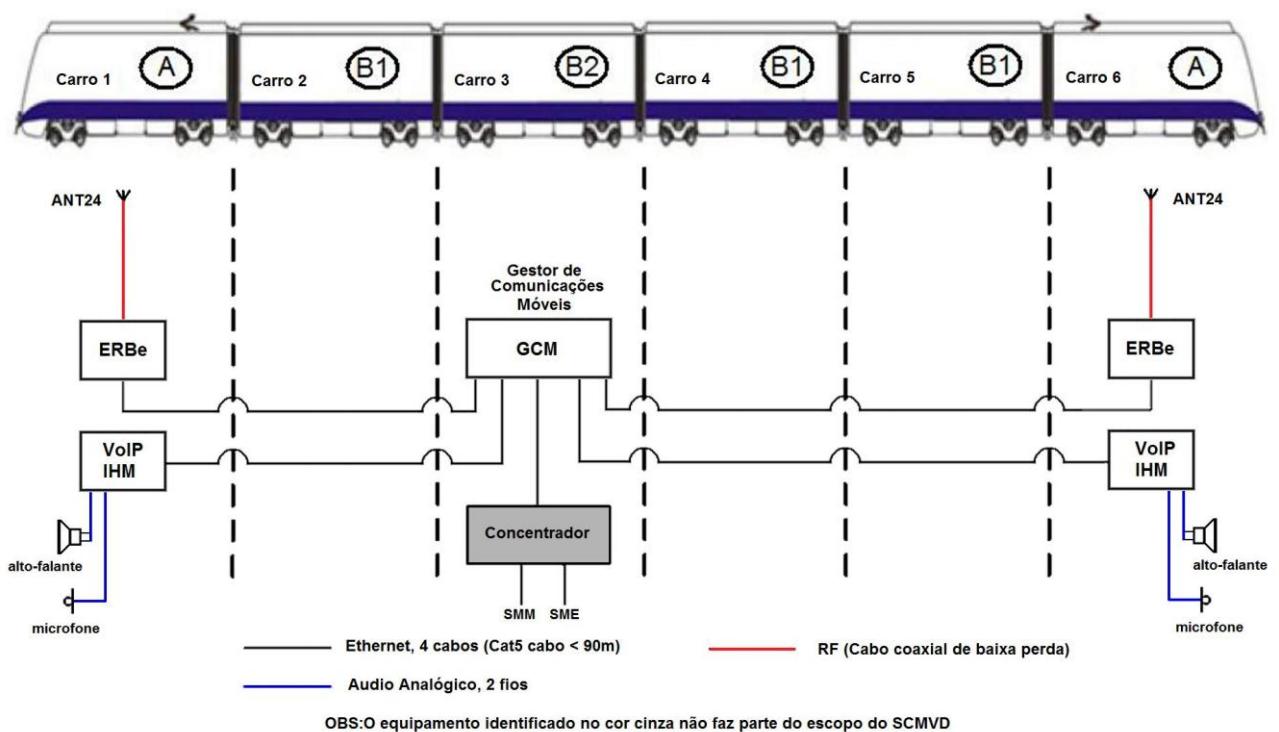


Figura 26 - Arquitetura dos Equipamentos Embarcados (CMSP GCS/CSC, 2012)

A REDE de transporte do SCMVD é baseada em uma solução de rede sem fios de forma centralizada, pelo qual todas as Estações de Base de Terra estabelecem uma comunicação com um elemento central (Servidor de Posicionamento de Cliente Móvel (SPCM)), para assegurar as mudanças de célula de rádio em nível 2 da camada OSI, sem a necessidade de uma VLAN em toda a extensão da rede. Isso evita o risco potencial nas redes de nível 2 da camada OSI (loops, manutenção complexa, controle de tráfego, grandes domínios de broadcast, etc.)

O CD do trem enviará para o SAM embarcado a lista de alarmes dos equipamentos embarcados por intermédio do SCMVD. Para o sistema de ar condicionado, estão previstos os alarmes listados na Tabela 6.

Tabela 6 - Alarmes de Ar Condicionado enviados pelo Concentrador de Dados

HVAC		
SINAIS	E/S	D/A
Estado do HVAC 1A	S	D
Estado do HVAC 1B	S	D
Estado do HVAC 2A	S	D
Estado do HVAC 2B	S	D
Estado do HVAC 3A	S	D
Estado do HVAC 3B	S	D
Estado do HVAC 4A	S	D
Estado do HVAC 4B	S	D
Estado do HVAC 5A	S	D
Estado do HVAC 5B	S	D
Estado do HVAC 6A	S	D
Estado do HVAC 6B	S	D
Temp. Carro 1	E	A
Temp. Carro 2	E	A
Temp. Carro 3	E	A
Temp. Carro 4	E	A
Temp. Carro 5	E	A
Temp. Carro 6	E	A
Falhas Sinalizadas	S	D

3.3.3 Sistema de Apoio à Manutenção (SAM)

O SAM dará suporte à equipe de gerenciamento e supervisão da manutenção, por intermédio de um aplicativo desenvolvido na plataforma Elipse E3 (SCADA). Para isso, o SAM deverá receber os dados dos diversos sistemas, de maneira a concentrar todas as informações pertinentes a diagnóstico e alarmes, permitindo a tomada de ações sobre eles.

Esses sistemas estão distribuídos nas estações das linhas 1, 2 e 3, nas vias, nos pátios e nos trens e serão integrados ao SAM por intermédio de redes locais virtuais VLAN (STD).

O SAM é responsável pela criação de uma interface amigável entre o operador e os diversos sistemas existentes em cada estação ou trem.

Por intermédio da IHM do SAM, os operadores terão acesso a:

- diagnóstico das UTRs das estações;
- diagnósticos dos subsistemas que não estão sendo monitorados pela UTR;
- estados e alarmes de todos os equipamentos conectados na UTR;
- estados e alarmes de todos os equipamentos ligados na rede local da estação;
- estados e alarmes dos sistemas de modernização;
- estados e alarmes dos equipamentos embarcados;
- relatórios na tela dos estados e alarmes, filtrados por estação e subsistemas;
- relatório em PDF, XLS, CSV ou DOC dos estados e alarmes, filtrados por estação e subsistemas;
- E3PlayBack para diagnosticar falhas por meio de análise do Playback do banco de dados;
- diagramas unifilares de todos os subsistemas existentes nas estações;
- resumo de alarmes em cada estação, separado por linha, sistema, subsistema e equipamento;
- navegação das telas conforme login do operador, específica para cada equipe de manutenção.

Os dois servidores do SAM trabalham em configuração Hot-Standby gerenciados pelo software E3, podendo ser tratados como somente um servidor (ver a Figura 25).

3.4 MONITORAÇÃO DO AR CONDICIONADO NO METRÔ DE SÃO PAULO

No monitoramento implantado em um CF da frota F da Linha 5-Lilás do Metrô de São Paulo, são monitoradas várias variáveis comuns a outros CFs e outras que são específicas:

- Temperaturas de sucção e de descarga do compressor — analógicas.
- Temperatura da linha de líquido — analógica.
- Temperatura do ambiente ou do salão de passageiros (ar de retorno) — analógica.
- Temperatura de insuflamento — analógica.
- Temperatura externa — analógica.
- Pressões de sucção e de descarga do compressor — analógicas.
- Superaquecimento — analógica, calculada conforme tabela do FR.

- Sub-resfriamento — analógica, calculada conforme tabela do FR.
- Corrente do motor do compressor — analógica.
- Estado dos contadores K1.1, K1.2, K2.2, K2.2, K3 e K4 — digitais.
- Válvulas solenoides de líquido e de “By-pass” — digitais.
- Termostato da carcaça do compressor — digital.
- Relé RL2, do modo 50% — digital.

Monitorando as variáveis pressão de sucção, temperatura de sucção, pressão de descarga, temperatura de descarga e temperatura da linha de líquido, pode-se gerar, em tempo real, Qcd, Qev e COP, eq. (7) para pontos de regime permanente. Considera-se uma amostragem de 2seg. e desprezam-se as perdas de carga no sistema.

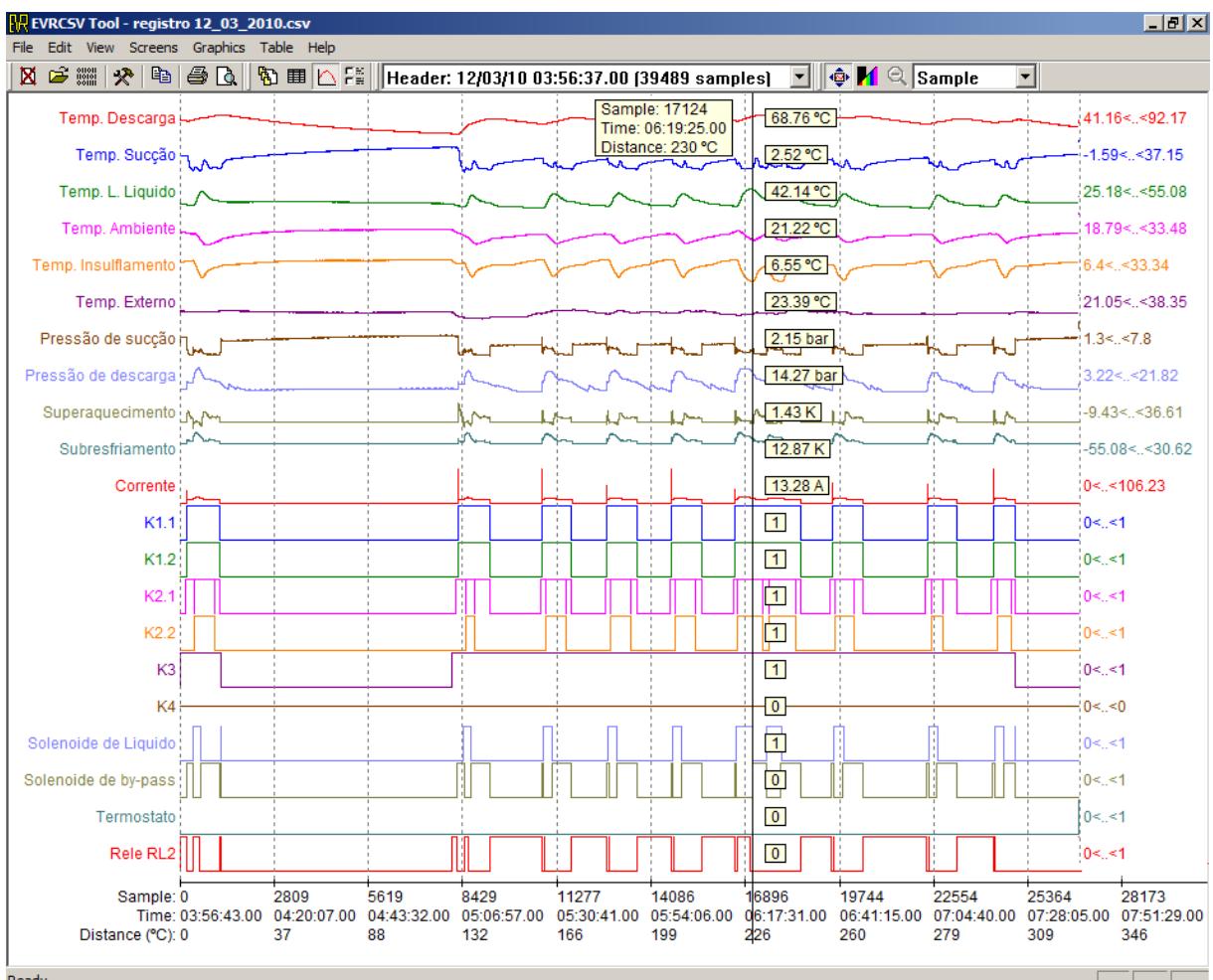


Figura 27 - Ponto selecionado na tela do software da Alstom EVRCSV

Com as variáveis citadas, é possível gerar em tempo real as curvas Ph, para ilustrar o desempenho da máquina térmica. O ponto escolhido foi ilustrado na Figura 27, por

intermédio de uma ferramenta implementada em Labview™ (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009).

Desprezando-se a perda de carga, com desenvolvimento de módulos específicos para a interpolação no gráfico Ph do FR R134a, o gráfico obtido está ilustrado na Figura 28. Com a utilização do software CoolPack versão 1.49 (DTU, 2011), para gerar as tabelas, o processamento ficou acima do tempo de amostragem, demorou 6s para processar a curva Ph, sendo que a amostragem implementada é de 2s.

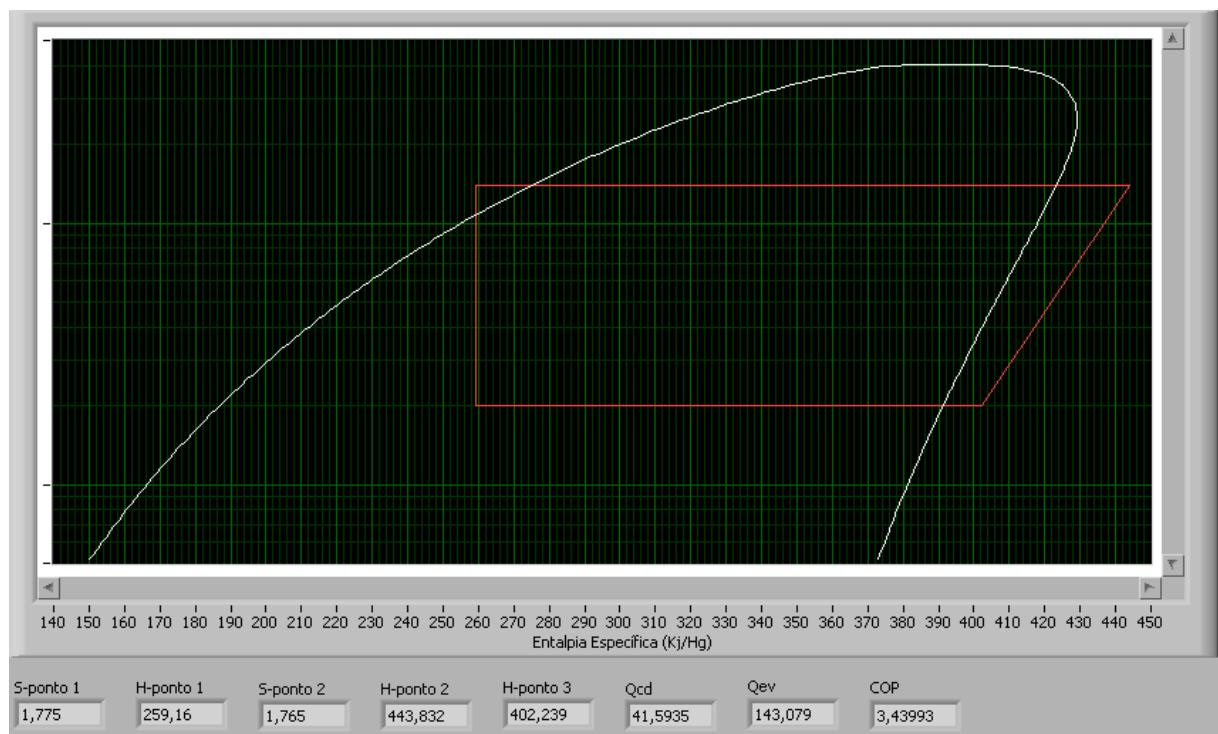


Figura 28 - Diagrama de Ph do ponto selecionado.

Obtenção de dados semelhantes ao demonstrado acima foi apresentada no trabalho de Mourão e Palmeira Jr. (MOURÃO e PALMEIRA JUNIOR, 2011), em que temos um sistema de detecção e diagnóstico de falha (DDF) aplicado a um sistema de refrigeração, no qual a modelagem e a aquisição são utilizadas para implementar o DDF.

Nas novas frotas, as quantidades de CFs são duas ou quatro vezes maiores; assim, para instalar a monitoração semelhante à da Linha 5 Lilás, seriam necessárias duas ou quatro vezes mais equipamentos. Existem CFs em que a concepção de projeto é simplificada com a intenção de minimizar as falhas de vazamento de FR. Para isso utilizam-se 8 CF por carro e capilar como dispositivo de expansão e não se

disponibilizam conexões para medir pressão e para carga de FR. No caso de necessidade de carga de FR, fura-se o sistema e solda-se ao final do serviço, utilizando-se para isso alicate específico. Então, a monitoração torna-se extremamente invasiva, gerando mais pontos fracos sujeitos a falhas.

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

4.1 EQUIPAMENTOS, SOFTWARE E COMPONENTES UTILIZADOS



Figura 29 - Recolhedora e recicladora 69200-200 e jogo de mangueiras para refrigeração (VULKAN, 2010)



Figura 30 - Balança Digital e amperímetro digital modelo 2046R (VULKAN, 2010)



Figura 31 - Tanque para recolhimento de fluido e manifold digital mastercool



Figura 32 - Conversor USB para serial RS-232 e Cabo RS-232 macho/fêmea



Figura 33 - Notebook



Figura 34 - Software “MONA” de controle do ar condicionado (CAF e GEMINYS, 2010)

4.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A fim de determinar um bom indicador para monitorar o mau funcionamento do CF, considerando-se toda a teoria apresentada no capítulo 3, escolheu-se monitorar a variação da corrente do compressor em relação ao vazamento de FR.

No intuito de testar a viabilidade e a efetividade dessa hipótese para detectar desvios no CF sem que a controladora sinalize falha no sistema, foram realizados testes em trens das frotas H e J.

Com o trem posicionado na máquina de lavar, foi desligada a alimentação das unidades de ar condicionado, para que fosse possível trabalhar em segurança e realizar as conexões dos equipamentos, conforme a Figura 35:



Figura 35 – Conexões dos equipamentos

Primeiramente, foram realizadas as conexões na parte superior do trem, onde estão localizadas as válvulas para monitoramento das pressões de alta e de baixa, assim como a válvula de serviço. Já no interior do carro, especificamente no painel elétrico, foram realizadas as conexões da controladora do sistema com o notebook.

Com o software de manutenção “MONA”, fornecido pela empresa FAIVELEY, foi possível forçar o funcionamento da unidade de ar condicionado do carro.

Checkadas todas as funcionalidades e conexões dos equipamentos, iniciamos o teste com a retirada gradual do FR.

Todo o processo foi realizado com o monitoramento da corrente do compressor, das pressões de alta e baixa, da quantidade do FR retirado do sistema e da possível sinalização de falhas através da controladora.

No transcorrer do teste, pudemos observar a grande relação entre a variação da corrente do compressor e a retirada de massa de FR.

Uma hora após o início do teste, foi possível verificar o momento exato da fixação da falha, que ocorre através da constatação da baixa pressão pelo pressostato, e a consequente sinalização na IHM.

Finalizada essa etapa, iniciamos a devolução de todo o FR retirado do sistema, quando observamos que a corrente do compressor voltou ao nível anterior, e as condições iniciais de desempenho foram restabelecidas.

A seguir, são demonstrados graficamente os resultados dos testes realizados.

4.3 PRIMEIRO TESTE DE RETIRADA DO FLUIDO REFRIGERANTE

Realizado com a estrutura da máquina de lavar trens do Pátio de Manutenção de Itaquera. Infelizmente, em consequência da logística do teste, dos equipamentos e da montagem e do processo de retirar e recolocar FR, não foi possível, pelo tempo disponível, aguardar o momento da falha. Porém, com base nas medidas efetuadas, verificou-se que existe uma diminuição da corrente com a diminuição do FR, conforme observado na Figura 36.

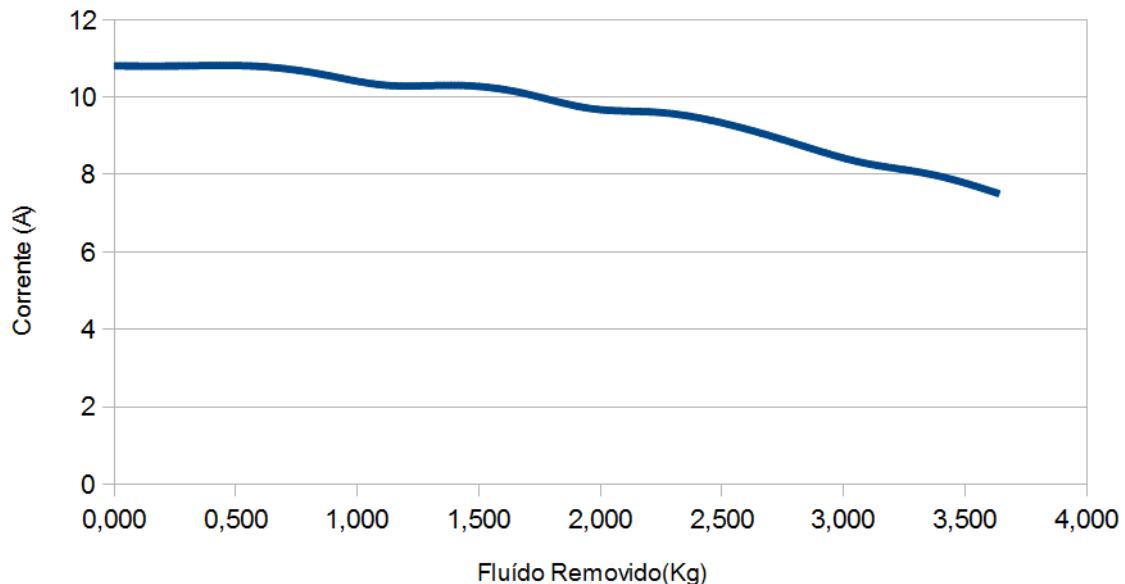


Figura 36 - Resposta da corrente do compressor pela massa de fluido removida

4.4 SEGUNDO TESTE DE RETIRADA DO FLUIDO REFRIGERANTE

Realizado com a estrutura da máquina de lavar trens do Pátio de Manutenção do Jabaquara. Foram monitorados a corrente, a pressão de alta e a pressão de baixa, com foco no vazamento de FR.

Nessa oportunidade, observou-se novamente a diminuição da corrente com a diminuição do FR (ver a Figura 37); a pressão de alta apresentou o mesmo comportamento da corrente (ver a Figura 38), pois a pressão de baixa está controlada pela válvula de expansão. Até o momento em que ocorreu o colapso do equilíbrio da pressão de baixa (ver a Figura 39), a controladora do sistema sinalizou falha de avaria no sistema de ar condicionado, através da IHM, desligando o compressor.

Após a realização de um reset no sistema, a falha torna-se intermitente, voltando a fixar somente quando esse CF é solicitado devido a uma determinada demanda por refrigeração.

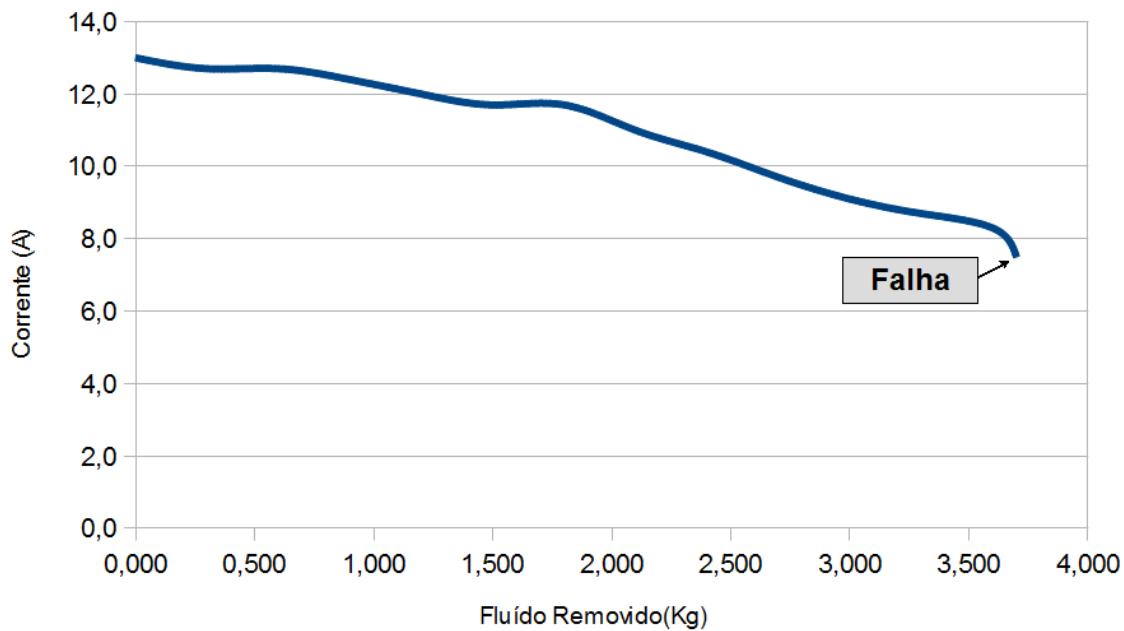


Figura 37 - Resposta da corrente do compressor com a retirada de Fluido Refrigerante

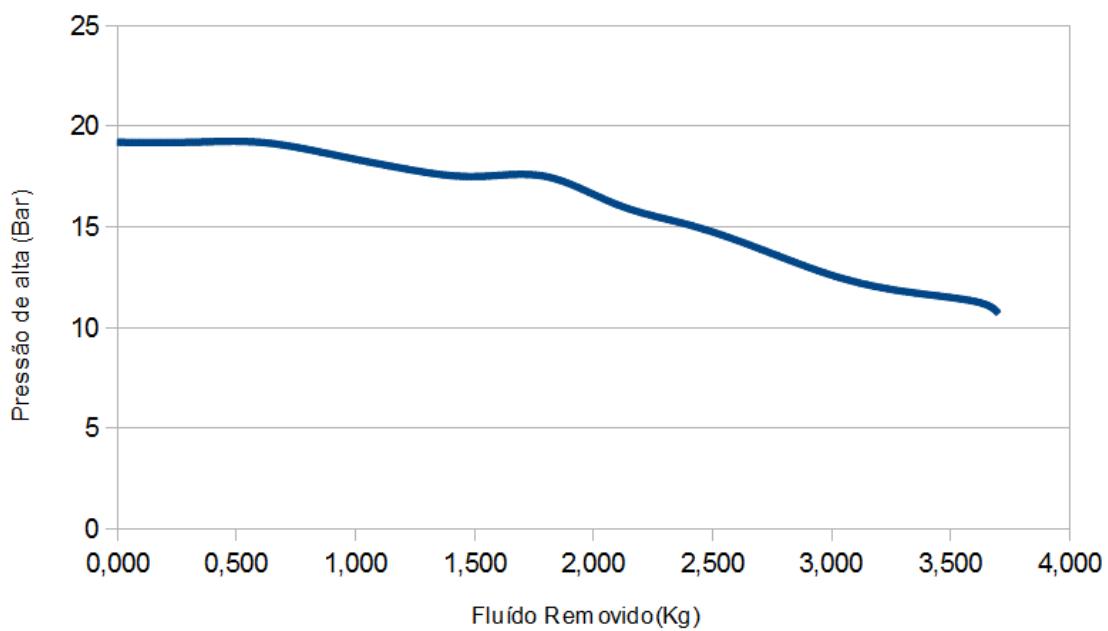


Figura 38 - Resposta da pressão de alta com a retirada de Fluido Refrigerante

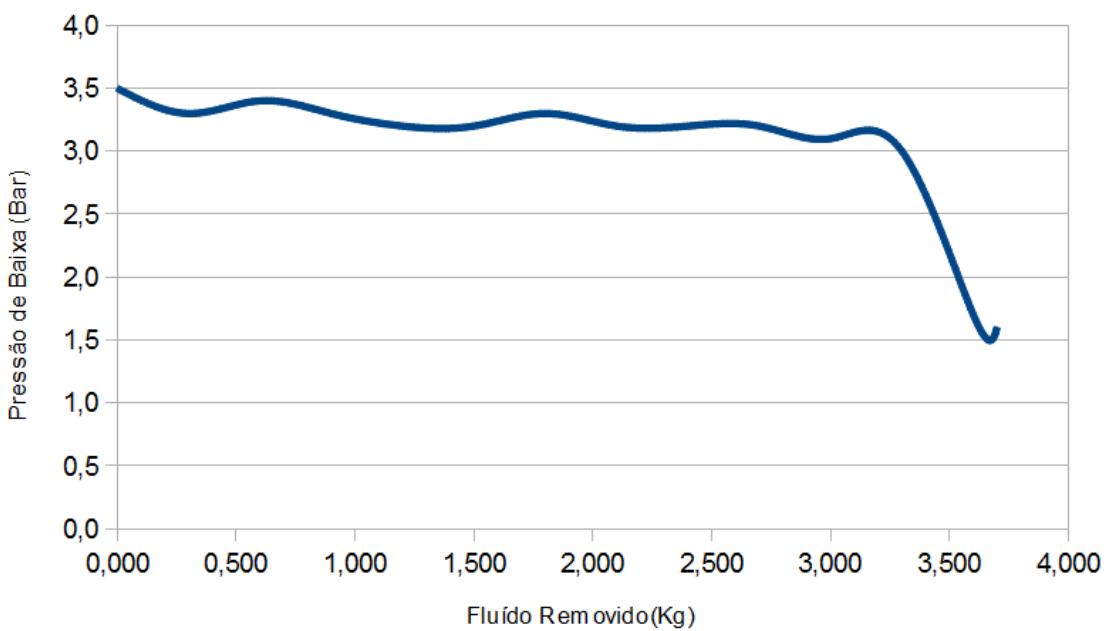


Figura 39 - Resposta da pressão de baixa com a retirada de Fluido Refrigerante

5 PROPOSTA DE MONITORAÇÃO

A proposta de monitoração tem como foco o indicador corrente do compressor, pela sua efetividade e simplicidade, possibilitando uma nova forma de interagir com o sistema de ar condicionado.

5.1 OBJETIVO DA MONITORAÇÃO DO INDICADOR

Monitorar o indicador corrente do compressor é acompanhar a quantidade de energia fornecida ao CF, que é afetada pela vazão mássica, pela taxa de troca efetuada pela evaporadora e pelo condensador — ver figura 7 e eq. (5). O fato de o sistema do ar condicionado ter vários CFs idênticos em cada carro proporciona várias vantagens, pois apresentam:

- teoricamente, os mesmos ajustes de sub-resfriamento e superaquecimento;
- as mesmas perdas de energia, pela semelhança dos equipamentos;
- os mesmos ambientes internos e externos, compartilhados;
- as mesmas solicitações térmicas, de temperatura e de umidade, interna e externa;
- o mesmo plano de manutenção, limpeza, troca de filtro;
- o mesmo circuito de controle e alimentação que monitora o ambiente e determina quais circuitos devem atuar naquele instante.

Para detectar a variação da energia fornecida pelo compressor, é necessário instrumentar o circuito de potência do compressor, de forma não invasiva, pois é possível monitorar sem abrir ou introduzir nenhum elemento no circuito elétrico que alimenta e controla o compressor. Pode-se medir somente uma fase de cada compressor, considerando-se a simetria do motor trifásico e a proteção efetuada pelos circuitos de controle e proteção do sistema de ar condicionado. Nesse caso, é necessário monitorar em algumas frotas o acionamento das válvulas que protegem o compressor e alteram o comportamento do fluxo do FR. Desconsiderando-se esses momentos, em outras frotas provavelmente será necessário monitorar a chave seletora de nível de refrigeração, pois existe um tratamento diferenciado na quantidade de compressores que atuarão.

As medidas de corrente e pressão efetuadas no item 4.4 mostram o comportamento do CF com a retirada do FR. Destaca-se o controle efetuado pela válvula de expansão, em que a pressão de baixa é mantida numa faixa controlada, até o momento em que a quantidade de massa de FR no sistema é insuficiente para manter o equilíbrio entre o lado de alta e o lado de baixa, atuando o pressostato de baixa.

Durante a retirada de FR, o ar condicionado manteve as suas funções, desligando o compressor somente no momento da atuação do pressostato de baixa.

Na construção do diagrama Ph, demonstrado na Figura 40, foram consideradas algumas das medidas obtidas no item 4.4. Observa-se a ocorrência da diminuição na diferença entre a pressão de alta e a pressão de baixa e constata-se a diminuição da energia fornecida pelo compressor ao FR.

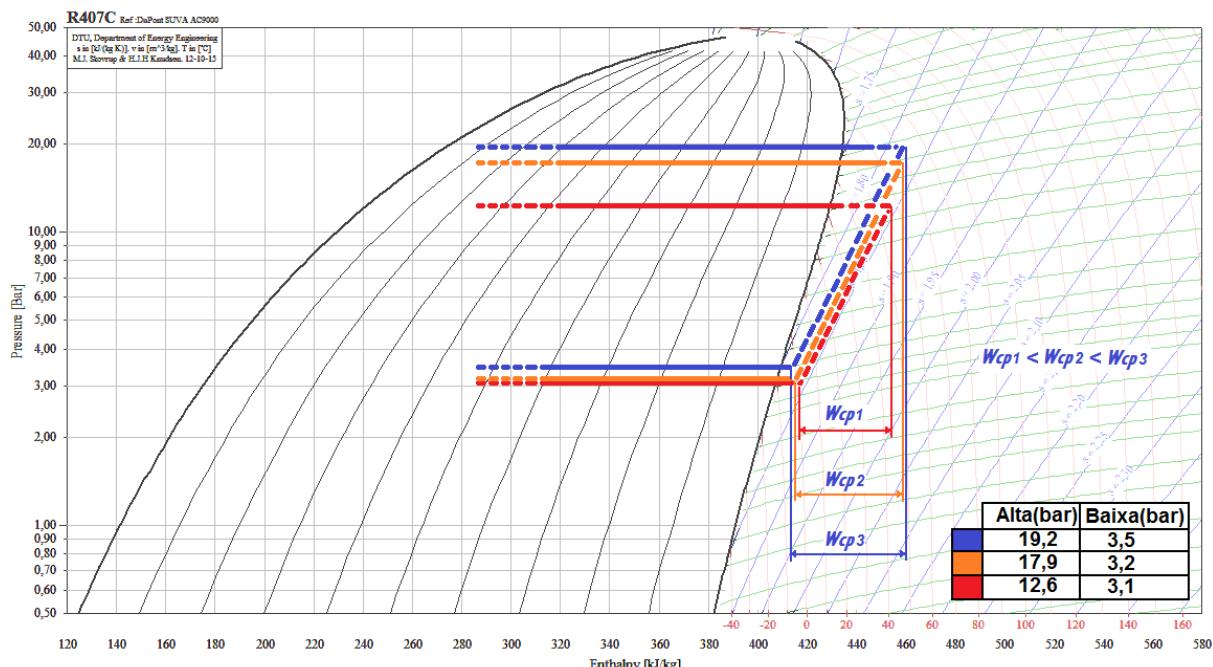


Figura 40 - Comportamento do circuito frigorífico com a retirada de Fluido Refrigerante

5.2 GERAÇÃO DE ALARMES

A monitoração das correntes dos compressores permite detectar o funcionamento dos CFs em regime permanente. Desprezando-se as partes transitórias, é viável comparar as intensidades das correntes, desconsiderando-se os momentos em que temos 50% ou menos CFs acionados; a Figura 41 ilustra essas situações.

Ao efetuar as médias de forma absoluta e relativa, utilizando o critério descrito, no qual a maior corrente será a referência da medida relativa, pode-se detectar um desvio em algum circuito.

Quando as médias relativas são efetuadas, os valores obtidos são proporções do maior, reduzindo-se as variações de corrente provocadas por causas que afetam todos os CFs, como, por exemplo, carga térmica, sujeira nas condensadoras e evaporadoras, filtro sujo, etc. Quando ocorrer uma diferença considerável nas medias relativas, teremos um desvio detectado.

A proposta de monitoração fornece informações “online” e “off-line”, possibilitando às equipes de manutenção e engenharia receber e analisar os alarmes e o comportamento das correntes, “off-line”, pois todos os sinais amostrados serão gravados. Isso permite o refinamento do processo de detecção de desvios.

Na geração de alarmes, para cada circuito, serão enviadas as médias relativas do momento e do dia anterior, a previsão de vazão e a quantidade de dias até a falha, no caso da detecção de um possível vazamento de FR, para análise “online” por parte da equipe de manutenção.

As médias efetuadas seguindo os critérios definidos acima (ver a Figura 35), geradas e armazenadas para cada dia, serão utilizadas para gerar dois histogramas (ver as Figuras 42 e 43). Isso é importante, porque se ocorrer um alarme, a taxa de queda de ampères por dia pode ser calculada, retratando a inclinação do gráfico.

Com o valor relativo da média do dia e a inclinação, pode-se, por intermédio dos dados levantados no item 4.4, estimar a vazão e a quantidade de dias até a falha.

Para possibilitar o cálculo da vazão e a quantidade de dias, ajustou-se uma equação para retratar o comportamento dos dados levantados no item 4.4, conforme eq. (7) e a Figura 44.

No caso do histograma das médias relativas, os alarmes indicam que está ocorrendo um desvio no CF. Na análise do histograma das médias absolutas, é possível identificar a alteração da corrente provocada pela manutenção preventiva, informação que é mascarada pela média relativa.

$$f(x) = 0,079 \ln(x) + 1,12 - 0,166x \quad (7)$$

Os alarmes estão definidos em dois níveis:

- 0 - sem alarme;
- 1 - ajustado para 0,9;
- 2 - ajustado para 0,8.

Estima-se que a falha ocorra abaixo de 0,7. (ver a Figura 43). A eq.(7) vai ser utilizada na faixa de 1.500mg até 3.600mg de massa perdida, mesmo estando ajustada para atender desde 300mg de massa perdida, no caso da frota estudada.

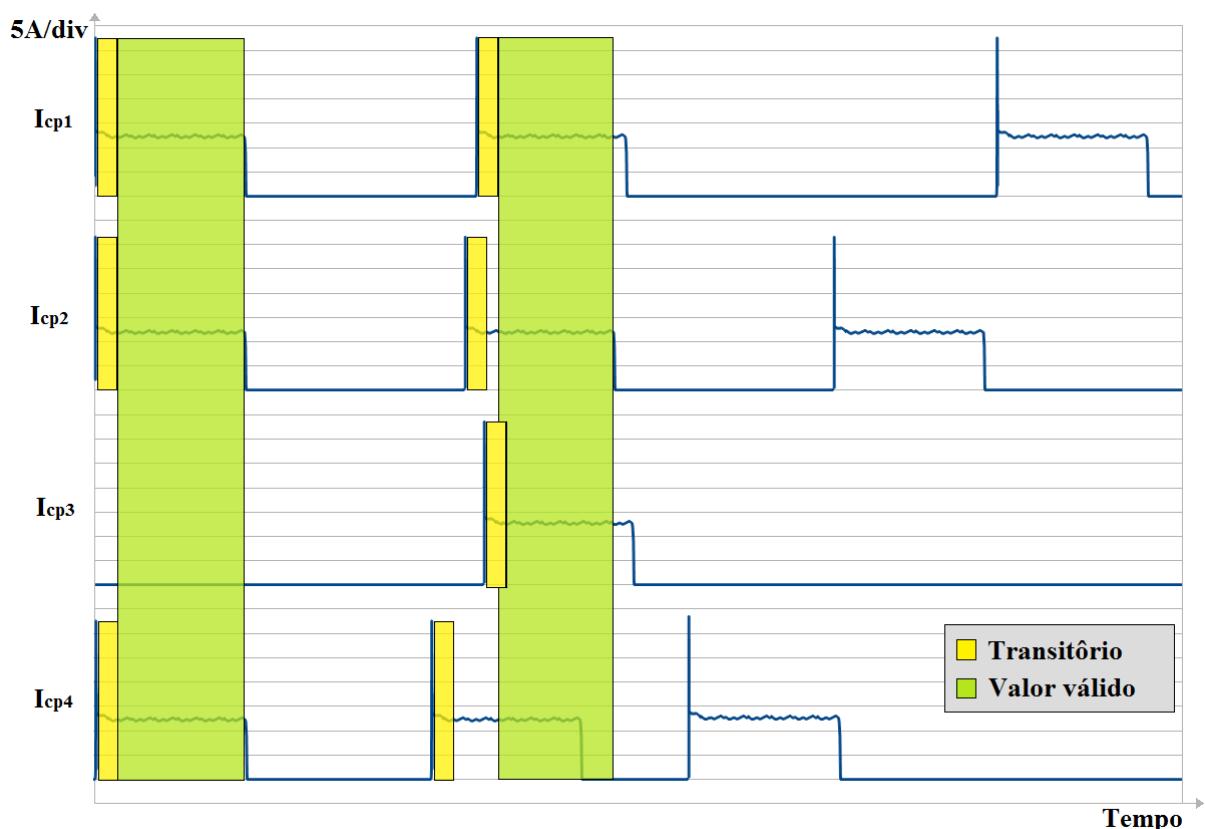


Figura 41 - Correntes dos compressores e o critério para análise

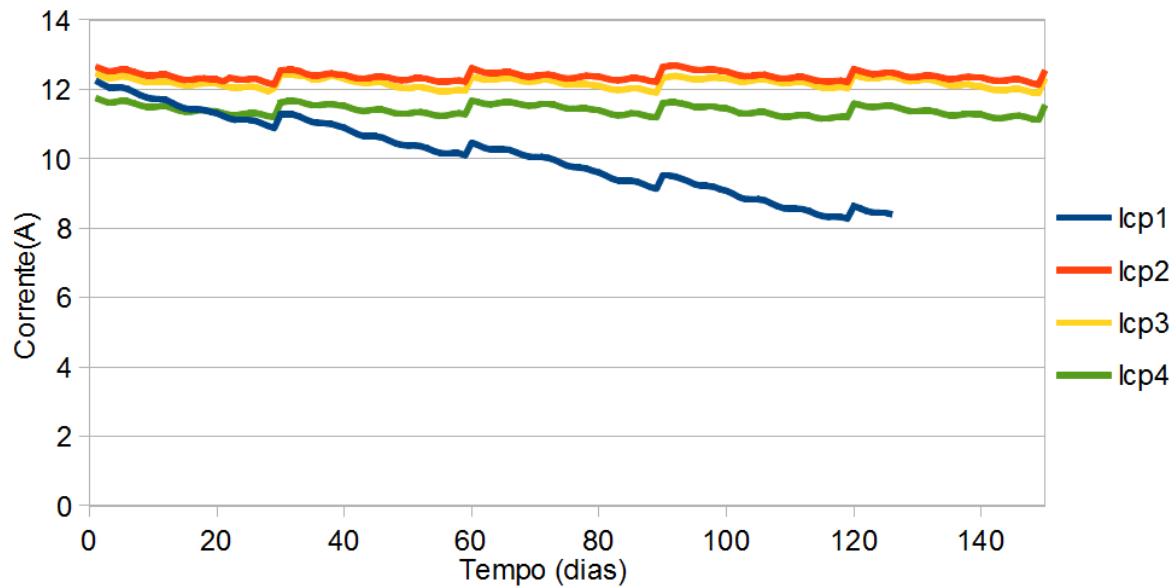


Figura 42 - Exemplo do histograma das médias absolutas diárias

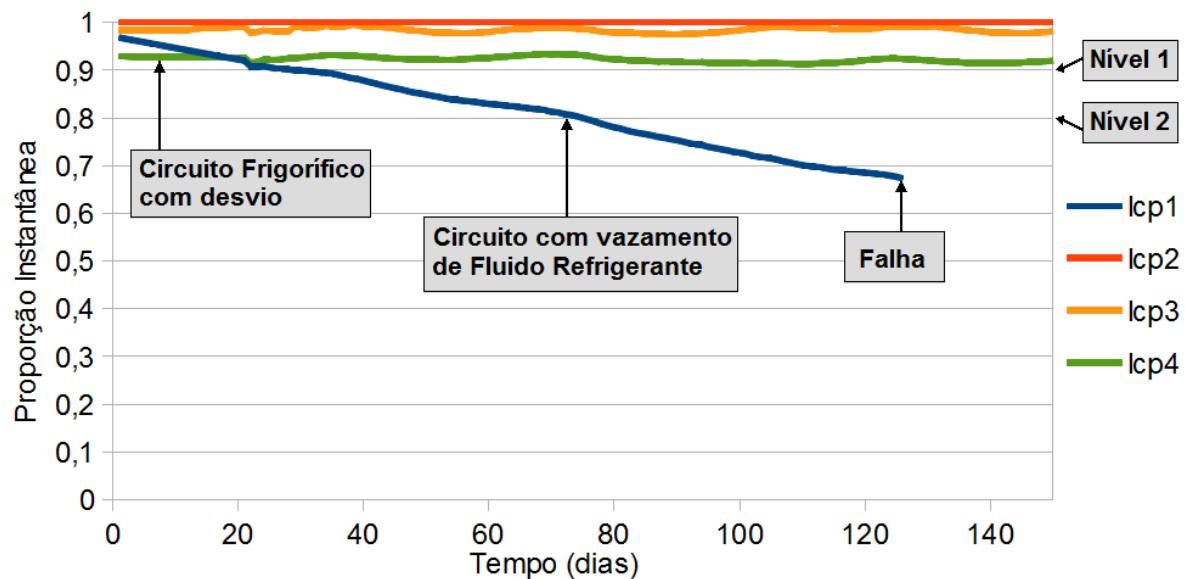


Figura 43 - Exemplo do histograma das médias relativas diárias

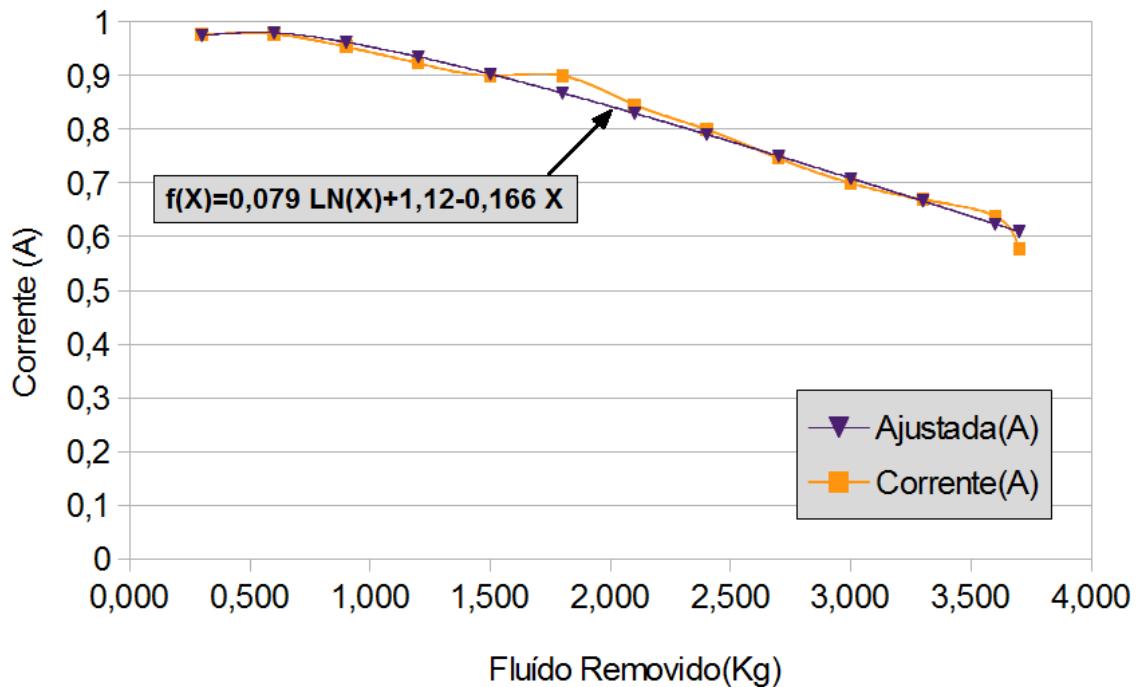


Figura 44 - Gráfico com a função de ajuste relativo

5.2.1 Conexão nos sistemas da Modernização

Para disponibilizar os alarmes para as equipes de manutenção de trens, será necessário introduzir as informações no sistema de monitoração em uma das redes internas do trem, além de prever o tratamento dessas informações para ser transmitidas e recebidas nas bases de manutenção específicas de cada frota. Na Figura 45, temos um diagrama com as conexões da Placa de Monitoração (PM) proposta para o sistema de monitoração e os sistemas do trem.

Com as informações das correntes dos compressores, disponíveis na rede interna do trem, será possível para o CD coletar, tratar e enviar informações para a manutenção. Esse equipamento está em fase de concepção, isto é, está sendo especificado para contratação externa.

Está prevista a conexão do CD com o SCMVD embarcado. Isso permitirá, por intermédio do STD, o envio dos alarmes até uma IHM do SAM, ficando assim disponível para consulta por parte da equipe de manutenção (ver a Figura 46).

A PM terá capacidade “Web Server”, disponibilizando uma página WEB com os alarmes (ver a Figura 47).

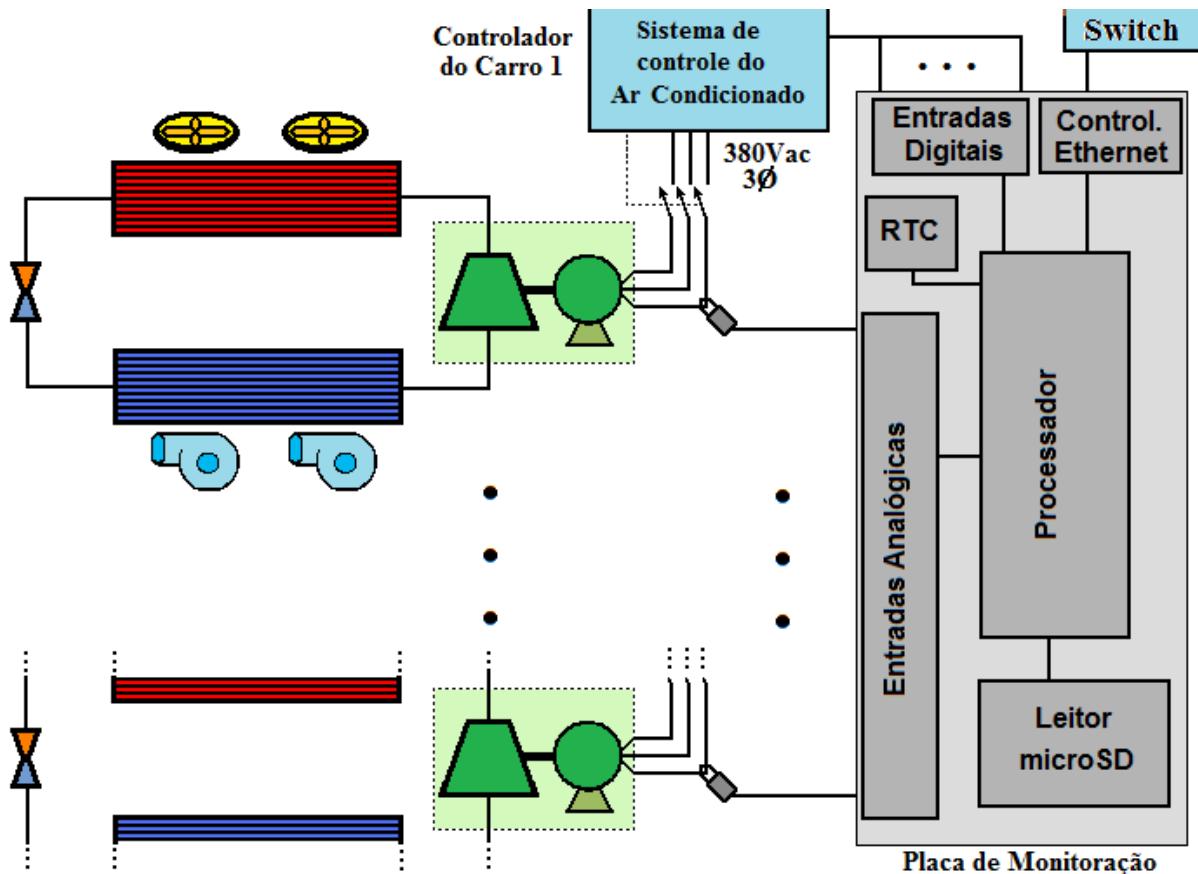


Figura 45 - Interligação com o circuito frigorífico e a placa de monitoração

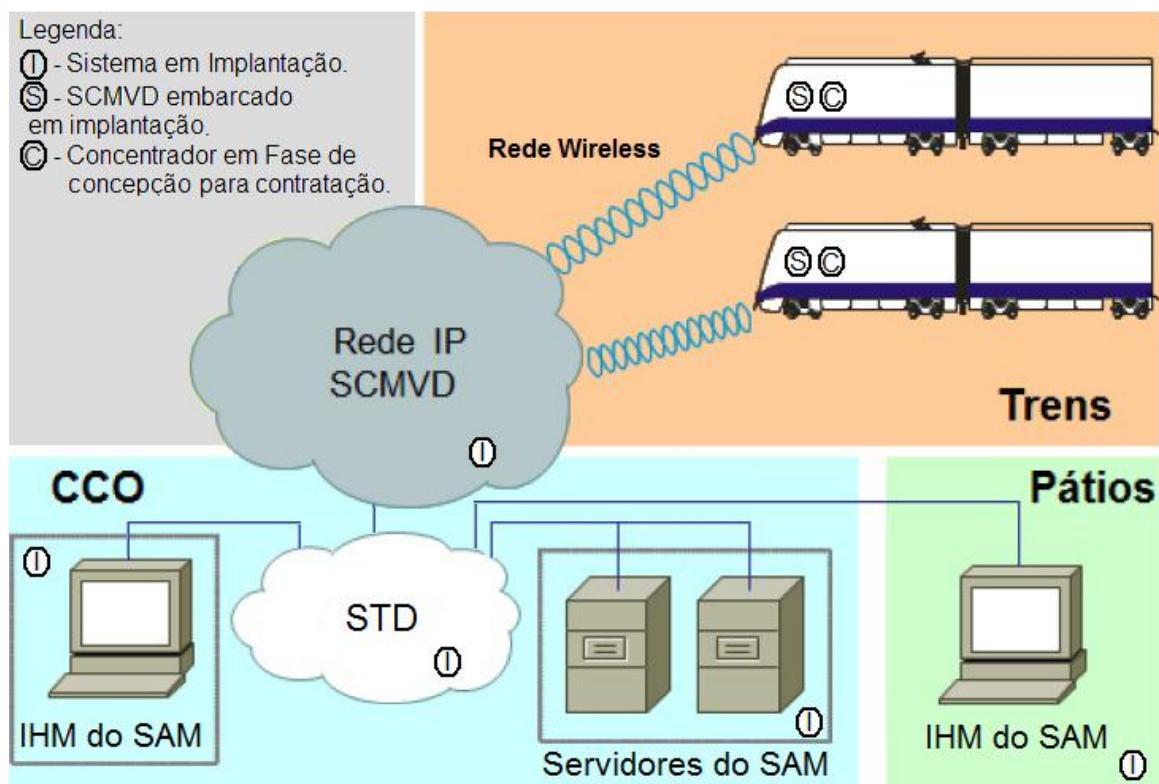


Figura 46 - Interligação entre os sistemas com a monitoração

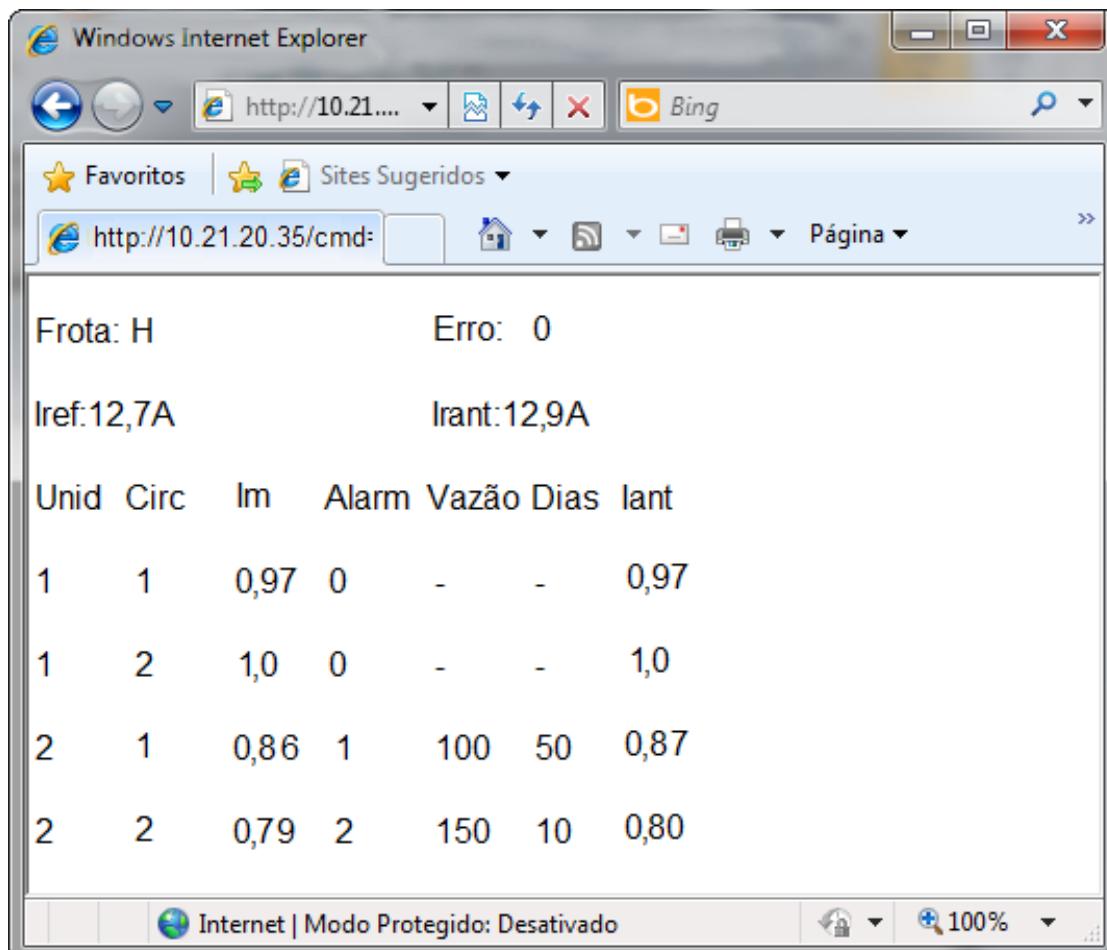


Figura 47 - Tela disponibilizada pela placa de monitoração

As informações disponíveis na tela WEB da placa de monitoração serão:

- Frota => Indica a frota configurada, confirma a correta configuração;
- Iref => Valor absoluto da corrente de referência da média do dia;
- Irant => Valor absoluto da corrente de referência da média do dia anterior;
- Erro => Indica erro no sistema de aquisição;
- Unid => Indica a unidade;
- Circ => Indica o circuito;
- Im => Valor médio relativo da corrente do compressor;
- Alarm => Indica o nível do alarme, determinado pela média Relativa;
- Vazão => Vazão estimada em mg por dia;
- Dias => Estimativa da quantidade de dias até a falha;
- Iant => Valor médio relativo da corrente do compressor, do dia anterior.

O envio das médias relativas e das correntes de referências absolutas permitem:

- uma análise em outra dimensão, em que, com os dados de cada carro, é possível detectar o desvio de corrente para mais, usando as correntes médias absolutas dos outros carros como referência, quando não se tem a monitoração desse trem;
- recriar o histograma relativo em outro banco de dados;
- observar o último valor médio relativo (I_m) e o valor médio do dia anterior (I_{rant}), para uma análise comparativa entre um dia frio e um quente.

O software do SAM e o software do CD serão de domínio da manutenção, sendo possível a sua alteração para atender as necessidades da monitoração proposta. A lista de alarmes apresentada na Tabela 6 deverá ser ampliada para atender essa proposta.

A tela principal do SAM possui quatro partes: superior, lateral, meio e inferior; pode-se omitir alguma delas conforme a necessidade da navegação. Na parte superior, ficam os botões de navegação, cuja função é selecionar e informar a existência de um alarme. No caso do login para equipamento rodante, cada botão corresponde a um trem de uma determinada frota; caso exista um alarme em um determinado trem, o botão piscará amarelo se for um alarme leve, nível 1 da PM, ou vermelho, se for grave, nível 2 da PM. Como é a detecção de um desvio e não uma falha, pode ser que para o sistema de monitoração as cores sejam alteradas, para não se confundir com uma falha.

Na lateral da tela, apresentam-se o menu principal do sistema e a identificação da IHM, em que existe o “login” que define os filtros e consequentemente as informações que serão apresentadas nessa IHM – no caso, o equipamento rodante e as frotas que serão apresentadas.

No meio da tela, apresentam-se, de acordo com o nível de consulta, os estados dos sistemas, subsistemas, até o último nível, para o trem selecionado nos botões de navegação. Selezionando-se o sistema de ar condicionado, é possível visualizar os carros com os estados dos subsistemas correspondentes, identificados pela cor. No caso de existir um alarme, é possível descer os níveis da tela até o equipamento; é possível, inclusive, selecionar o equipamento para se ter acesso a documentos e aplicações específicas, como as informações de monitoração.

A parte inferior da tela do SAM é reservada para os alarmes “on-line”, apresentando os últimos alarmes pertinentes ao tipo de “login” da IHM.

Na Figura 48, temos a proposta de telas do SAM, seguindo a filosofia “Top Down”.

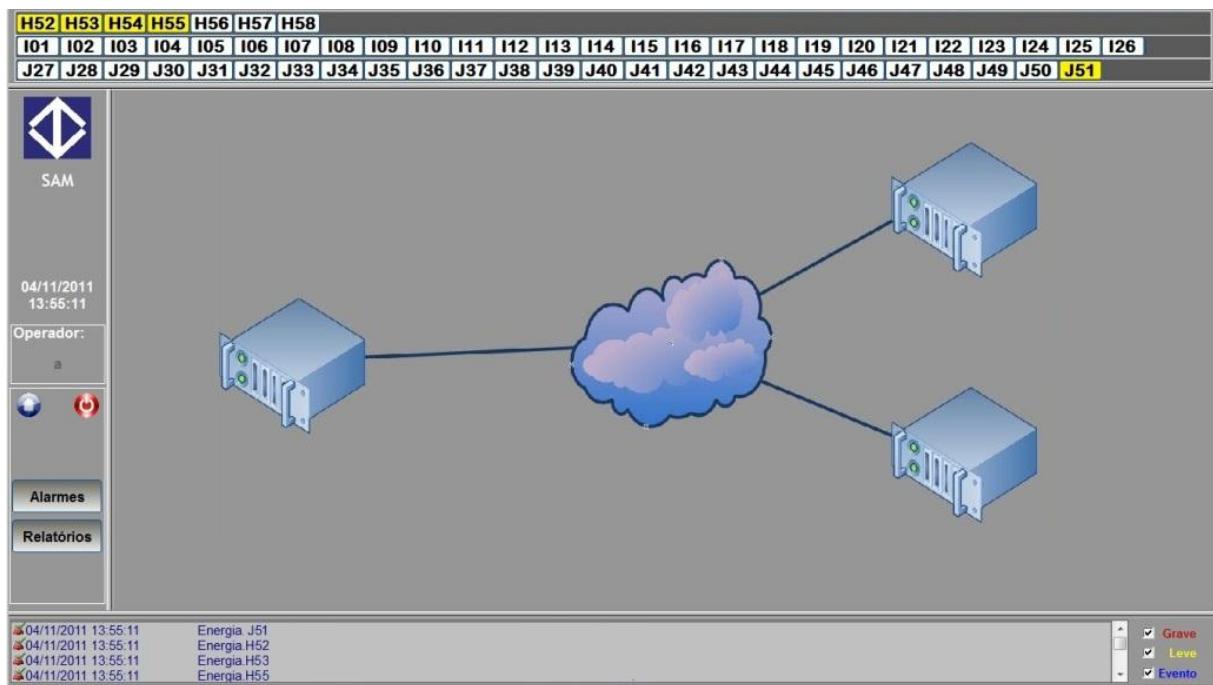


Figura 48 - Exemplo de tela inicial do SAM (Diagnóstico dos servidores)

A PM manterá o sincronismo horário utilizando o protocolo NTP. Tendo o CD como servidor NTP ou outro servidor disponível na rede, utilizará uma memória micro SD como memória de armazenamento para as formas de ondas das correntes e variáveis e executará um autodiagnóstico informando ao CD o erro. Além disso, manterá na memória micro SD um arquivo com o registro de eventos, com as seguintes informações:

- Data e hora da inicialização.
- Data e hora do erro no sincronismo NTP.
- Data e hora da limpeza de disco.

Os erros informados na tela WEB do sistema de monitoração serão:

- erro na memória SD;
- erro de RTP (bateria);
- erro de NTP.

5.3 PROPOSTA DE PLACA DE MONITORAMENTO (PM)

5.3.1 Arquitetura da Placa de Monitoramento

Como existem no máximo oito circuitos por carro, será necessário monitorar no máximo oito variáveis analógicas e oito digitais por carro. Essa monitoração será feita por PMs interligadas por uma rede interna de telecomunicações.

Como se trata de um equipamento embarcado, é interessante o desenvolvimento de uma placa específica, utilizando-se conectores específicos e evitando-se o uso de várias placas. A arquitetura proposta será a do Arduino (IBOARD_DS, 2012), mas será confeccionada uma placa à qual as funcionalidades serão agregadas.

O uso do Arduino como plataforma para a PM permitirá o uso das interfaces ilustradas na Figura 49, com Ethernet, micro SD, RTC e entradas analógicas e digitais.

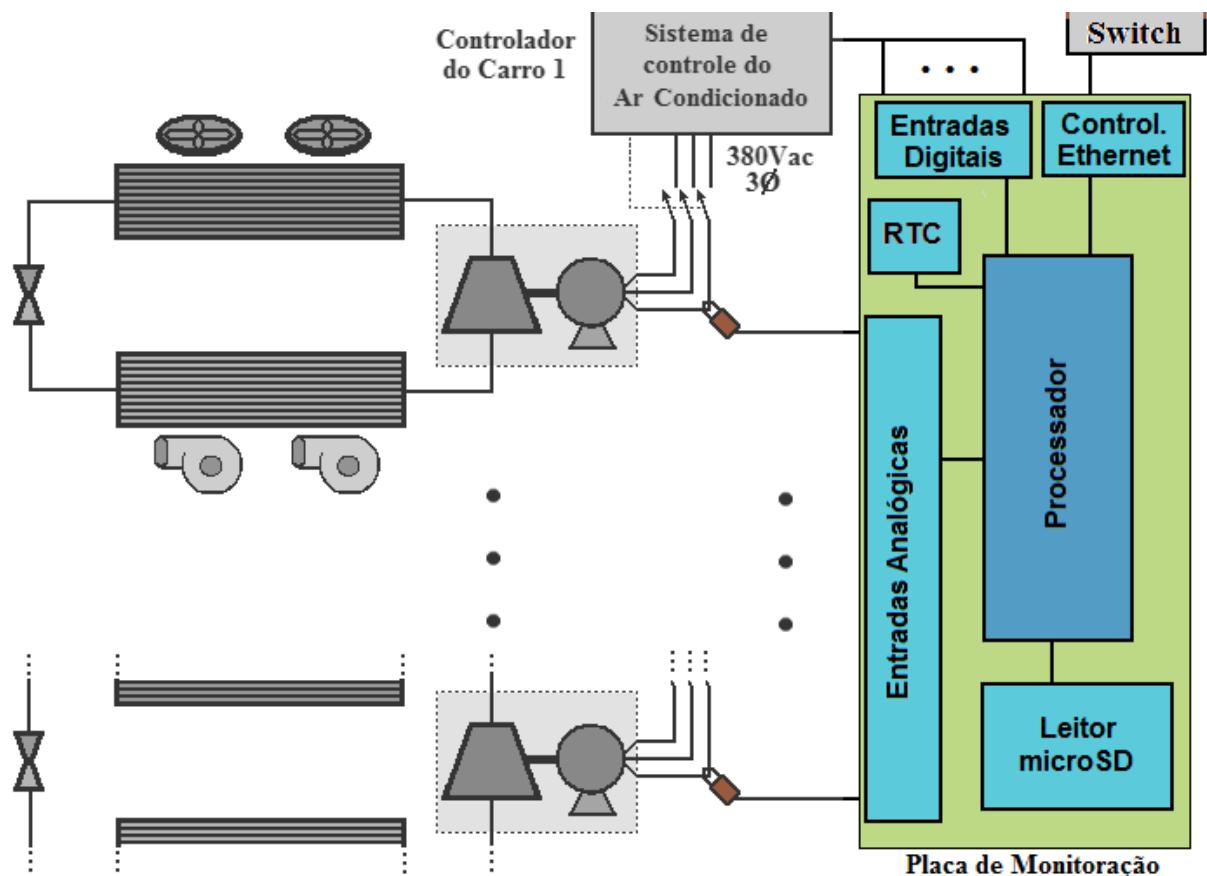


Figura 49 - Arquitetura de hardware da placa de monitoração e conexões ao sistema do ar condicionado.

As facilidades na modularidade de Hardware do Arduino são semelhantes às modularidades de Software, em que é possível acrescentar as bibliotecas das interfaces listadas para a PM, facilitando o desenvolvimento e a alteração do software e com baixo custo para o aprendizado, pois usa linguagem C.

5.3.2 Proposta de Hardware

Para implementar a PM apresentada no item 3.5.1, a proposta é o desenvolvimento de uma placa, utilizando-se como base uma plataforma de prototipagem eletrônica Arduino, “open-source”, especificamente, o Iteaduino (Iteaduino Ethernet, 2012), Complementa-se com um relógio, RTC (PCF8563 RTC Board.rar, 2012), um porte paralelo de 8 bits (PCF8574-IO-Expansion-Board, 2012) e proteções específicas para as entradas digitais e analógicas. No apêndice A, temos o esquema elétrico proposto para a PM. O custo total da PM está estimado em \$95.00, para um total de 852 placas, excluindo-se a Linha 5-Lilás.

Para o sensor de corrente, a proposta é o transdutor de corrente AT 50 B10 da LEM, semelhante ao utilizado na monitoração citada no item 2.1.8, com capacidade de entrada para até 50Aca, saída de 0 até 10Vcc e sobrecarga de corrente de 75Aca, sendo que a proteção PM limitará a tensão de entrada no conversor em 5Vcc. O custo total do sensor de corrente está estimado em \$45.00, para um total de 5136, excluindo-se a Linha 5-Lilás.

O hardware proposto aceita ampliações, sendo possível atender à necessidade de monitorar a temperatura interna do trem, em vários pontos do carro (ver a Figura 50) O objetivo é registrar e fornecer “on-line” a temperatura de vários pontos, o que permite à manutenção e à operação confrontar de forma objetiva as reclamações subjetivas dos passageiros. O custo do sensor de temperatura está estimado em \$7.00; se considerarmos quatro sensores por carro, teremos um total de 3408, excluindo-se a Linha 5-Lilás.

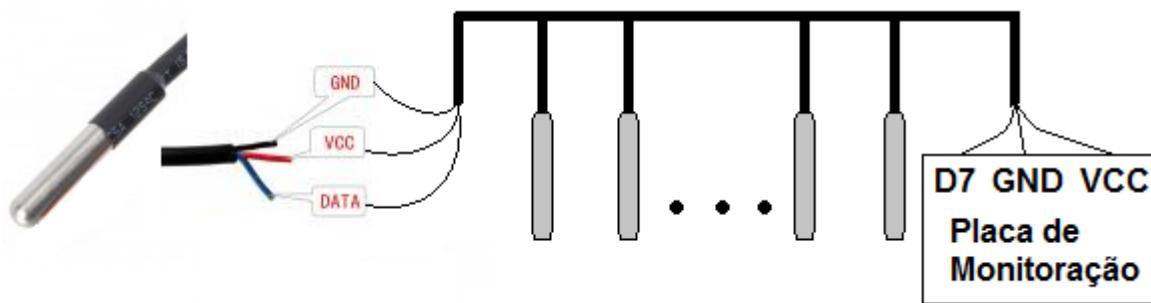


Figura 50 - Rede usando termômetros DS18B20, controlados pela placa de monitoração.

5.3.3 Software

O ambiente de desenvolvimento do Arduino torna fácil escrever o código e enviar para a PM. Ele funciona em Windows, Mac OS X e Linux. O ambiente de programação é escrito em Java e baseado em Processing, avr-gcc, Wiring e outros softwares de código livre.

O software da PM utiliza as bibliotecas ethernet e SD (Arduino Eth+ SD Soft, 2012), RTC (Arduino RTC-PCF8563, 2012), 8574(Arduino I2C Port Soft, 2012) (tutorial-sobre-pcf8574, 2012), com o ambiente do Arduino (Arduino Download, 2012) e o Windows. Na Figura 51, temos o fluxograma do programa e no item 4.5.3.1, a descrição das funções principais.

O processador utilizado é o ATmega328, que possui 32KB de memória Flash, 2KB SRAM e 1KB de memória EEPROM para uso das configurações da PM.

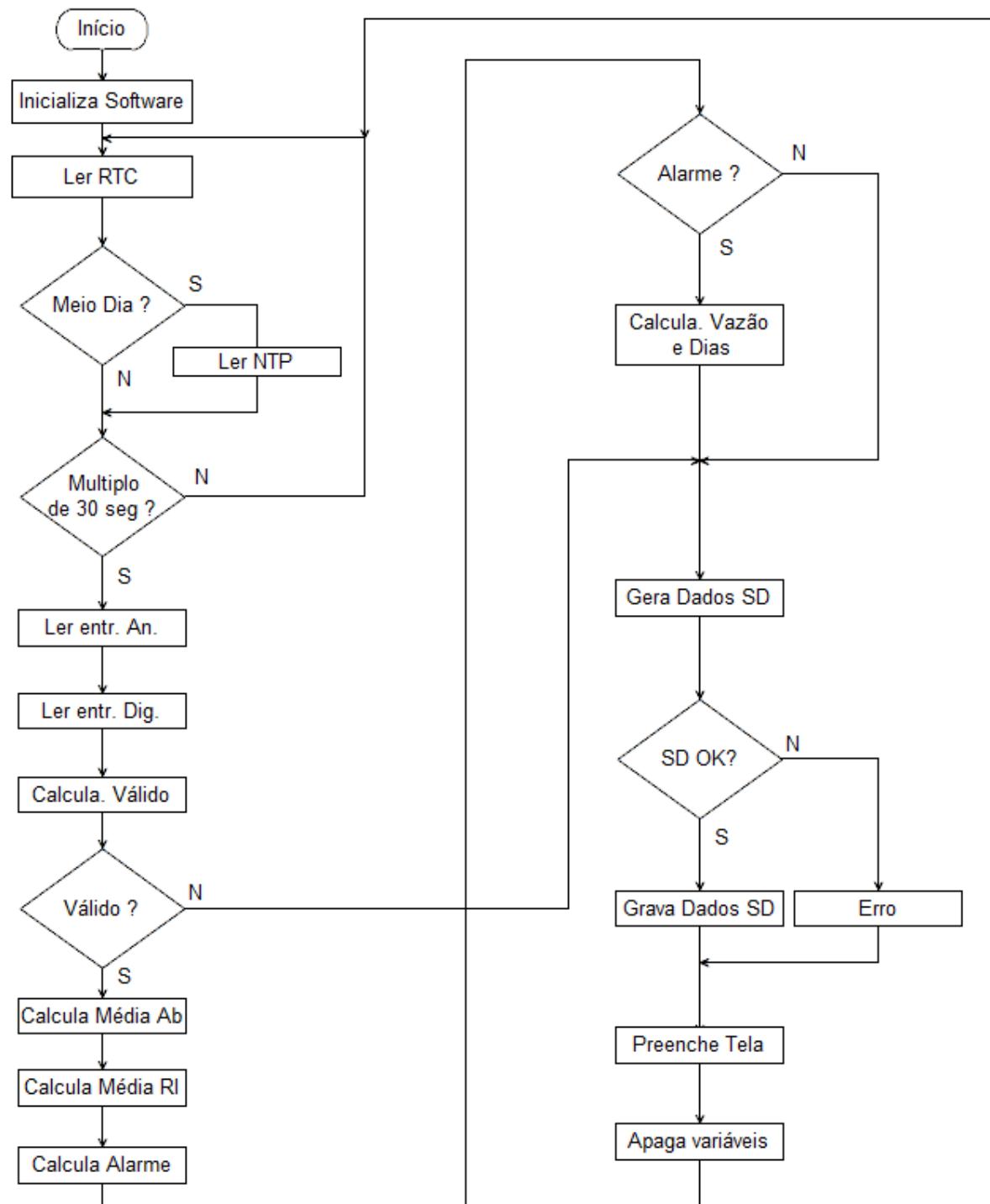


Figura 51 - Fluxograma com as funções principais

5.3.3.1 Descrições das funções

5.3.3.1.1 Inicializa Software (Setup)

Prepara o Hardware e o Software para o looping principal.

- Programa os periféricos da Placa (pinos, cartão micro SD, Ethernet, RTC, 8574...).
- Atualiza a data e a hora, chamando a função Ler NTP.
- Cria o Arquivo de Eventos, registrando data e hora da inicialização e o erro; se não existir, um arquivo dessa data será criado.
- Cria as variáveis (se não existir), inclusive para a EEprom e o micro SD.
- Cria as variáveis para armazenamento de dados de aquisição, exemplos:
 - Icp1, Icp2, ... Icp8 -> Corrente instantânea;
 - Im1, Im2, ... Im8 -> Corrente média absoluta;
 - Itot1, Itot2, ... Itot8 -> Corrente total para gerar média absoluta;
 - Ncp1, Ncp2, ..., Icp8 -> N° de amostras para gerar média.

As variáveis com as medidas dos dias anteriores e do dia, para desligamentos do circuito durante o dia, serão gravadas e recuperadas da memória EEprom da PM, para o caso de falha da memória SD.

5.3.3.1.2 Ler RTC

- Fornece data hora.
- Gera erro, se necessário.

5.3.3.1.3 Ler NTP

- Busca no Servidor de NTP a data e a hora.
- Gera erro, se necessário.
- Grava data e hora no RTC, se não houver erro, verificando a diferença da nova com a velha; se maior do que 1 min, informa erro de bateria.

5.3.3.1.4 Ler entrada analógica.

- Lê os valores de cada entrada analógica, quatro vezes, gerando média para cada corrente e gravando na matriz para cada compressor.
- Gera erro, se necessário.

5.3.3.1.5 Ler entrada digital

- Lê os valores de cada entrada digital e grava na matriz digital.
- Gera erro, se necessário.

5.3.3.1.6 Calcula Válido

- Verifica os níveis de correntes em cada entrada; maior do que 2 A, é o padrão para indicar ligado; alimenta a matriz para ligado.
- Alimenta a matriz com o contador de tempo para ligado, se ocorrer uma detecção de ligado.
- Verifica a matriz de contador de tempo, verificando o valor de transitório configurado, e atualiza matriz de válido.
- Verifica a matriz digital para cada circuito frigorífico, apagando na Matriz de válidos aqueles que não têm a válvula aberta ou chave; depende da frota.
- Verifica a quantidade de válidos; se atenderem, registra válido.

5.3.3.1.7 Calcula Média Ab

- Usa a matriz de válidos; para atualizar a matriz, soma o total do dia e a matriz nº de medidas, utilizada para a média diária.

5.3.3.1.8 Calcula Média RI

- Calcula a matriz relativa instantânea, determinando a maior corrente como referência.
- Usa a matriz; para atualizar a matriz, soma a relativa do dia e a matriz nº de medidas, utilizada para a média diária.

5.3.3.1.9 Calcula Alarme

- Usa a matriz de válidos para verificar os valores relativos, determinado se existe alarme para cada corrente, sendo 0 (Zero) para sem alarme, 1 para menores que 0,9 e 2 para menores que 0,8.

- Preenche a matriz de alarme.

5.3.3.1.10 Verifica Alarme

- Retorna, se existe algum alarme na matriz alarme.

5.3.3.1.11 Calcula Vazão e dias

- Usa a matriz de alarme e a matriz histograma relativo; para calcular a inclinação, usa pontos na curva padrão da frota para preencher a matriz vazão e a matriz dias.

5.3.3.1.12 Gera dados SD

- Gera linha para o micro SD com as variáveis calculadas.
- Gera linha para o micro SD com os eventos.
- Gera erro, se necessário.

5.3.3.1.13 Grava Dados SD

- Grava linha para o micro SD com as variáveis calculadas.
- Grava linha para o micro SD com os eventos.
- Gera erro, se necessário.

5.3.3.1.14 Cria Arq Eventos

- Verifica o espaço da memória SD e apaga, se necessário.
- Verifica se existe erro de processamento ou sensor.

5.3.3.1.15 Preenche Tela

- Atualiza a página Web com as informações das variáveis.

5.3.3.1.16 Apaga as variáveis

- Inicializa as variáveis para novo ciclo de medidas.

6 PROPOSTA DE UM NOVO PLANO DE MANUTENÇÃO

6.1 AÇÕES IMPORTANTES PARA UM PLANO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA

Na concepção do plano de manutenção preventiva, fundamental para se manterem as condições de operacionalidade do sistema, é importante padronizar as rotinas de trabalho e seguir algumas orientações já definidas como boas práticas, conforme a Tabela 7.

Tabela 7 - Oportunidades para a melhoria do sistema de ar condicionado (PROCEL, 2005)

OPORTUNIDADE	DESCRÍÇÃO
Facilitar a circulação de ar através dos evaporadores	Melhora a transferência de calor, possibilitando o aumento da temperatura de evaporação
Facilitar a circulação de ar através dos condensadores	Melhora a transferência de calor e reduz a temperatura de condensação
Ajustar o sub-resfriamento	Melhora a eficiência do sistema
Ajustar o superaquecimento	Melhora a eficiência do sistema
Eliminar o vazamento de fluido refrigerante.	Minimiza as perdas desses fluidos e mantém o sistema operando nos níveis adequados de pressão de evaporação.
Trocar periodicamente os filtros secadores	Reduz a perda de pressão no sistema
Repor o Fluido Refrigerante	Capacitação das equipes para realizar as atividades
Evacuar e desidratar o sistema	Capacitação das equipes para realizar as atividades

6.1.1 Aumento da temperatura de evaporação

Para elevar a temperatura de evaporação, é necessário manter as superfícies de transferência de calor sempre limpas, não permitindo o acúmulo de poeira, óleo ou formação de incrustações. Também é fundamental limpar e trocar periodicamente os filtros do FR, de forma que a perda de pressão através deles seja mínima.

6.1.2 Diminuição da temperatura de condensação

Para reduzir a temperatura de condensação, é necessário manter as superfícies de transferência de calor sempre limpas, não permitindo o acúmulo de poeira, óleo ou formação de incrustações. Também é fundamental estabelecer um plano de manutenção, com inspeções periódicas quanto ao desbalanceamento e às vibrações das hélices dos motores dos ventiladores das condensadoras.

6.1.3 Ajuste do sub-resfriamento

Verificar o ajuste do sub-resfriamento a cada seis meses. Para a determinação desse valor, medir a pressão e a temperatura do CF na entrada da válvula de expansão, como mostra esquematicamente a Figura 52.

A partir da pressão e utilizando-se uma tabela de propriedades termodinâmicas para o FR, obtém-se a temperatura de saturação. A diferença entre a temperatura de saturação e a temperatura medida resulta no sub-resfriamento.

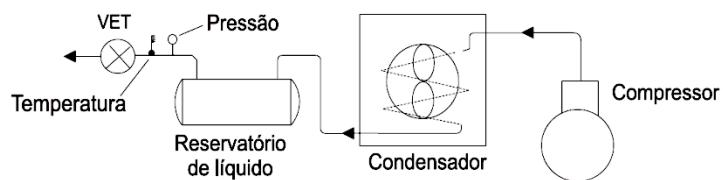


Figura 52 - Determinação do sub-resfriamento (PROCEL, 2005)

6.1.4 Ajuste do superaquecimento

Verificar o ajuste do superaquecimento a cada seis meses. Para a determinação desse valor, medir a pressão e a temperatura do FR na entrada do compressor, como mostra esquematicamente a Figura 53.

A partir da pressão e utilizando-se uma tabela de propriedades termodinâmicas para o FR, obtém-se a temperatura de saturação. A diferença entre a temperatura medida e a temperatura de saturação resulta no superaquecimento.

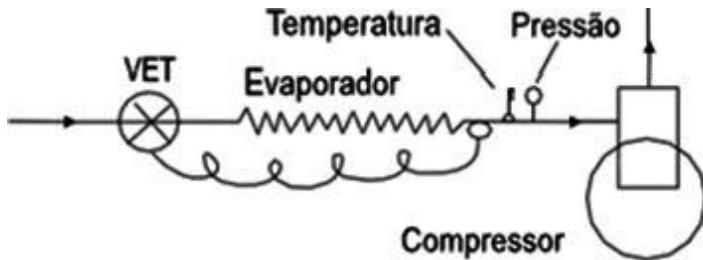


Figura 53 - Determinação do superaquecimento (PROCEL, 2005)

6.1.5 Eliminação de vazamentos de Fluido Refrigerante

A carga de FR afeta fortemente o consumo de energia de sistemas de refrigeração de pequeno porte. A falta ou o excesso de carga degradam o desempenho do sistema de refrigeração (CHOI e KIM, 2003).

A maioria das instalações de refrigeração perde FR devido à ocorrência de vazamentos, o que é extremamente prejudicial, do ponto de vista tanto do consumo de energia quanto dos aspectos ambientais.

À medida que o vazamento do FR progride, o desempenho do CF é afetado, uma vez que faltará FR para o sistema operar corretamente. Testes demonstram que 15% de perda da carga de FR podem resultar em até 45% de redução da capacidade frigorífica do sistema (GPG-178, 1997).

O tipo de vazamento mais dispendioso em termos energéticos é aquele pequeno e de forma contínua. Ocorre tanto com o sistema de refrigeração em funcionamento quanto com o sistema parado. Em uma instalação frigorífica, os pontos mais sujeitos a ocorrência de vazamentos são:

- juntas de dilatação e válvulas de controle;
- selo mecânico da ponta de eixo dos compressores;
- pontos de conexão dos instrumentos de medição;
- pontos com vibrações, principalmente nos tubos e nas juntas próximas ao compressor.

6.1.6 Troca do filtro secador

O FR não deve conter umidade ou qualquer outro material estranho, pois a umidade pode congelar na válvula de expansão, restringindo ou bloqueando completamente o fluxo de FR. Pequenas partículas podem ter o mesmo efeito, além de danificarem partes internas, como as válvulas e o compressor.

Com o passar do tempo, os filtros secadores saturam e passam a impor uma perda de carga significativa, a qual compromete a eficiência do sistema. Assim, deve-se trocar os filtros secadores periodicamente, principalmente após o reparo de vazamentos.

6.1.7 Evacuação e desidratação do sistema

Uma bomba de alto vácuo deverá ser conectada em ambas as válvulas de serviço de evacuação nos lados de alta e baixa pressão do sistema, mediante tubo de cobre ou mangueiras de vácuo de diâmetro interno mínimo de $\frac{1}{4}$ " (um quarto de polegada). Um vacuômetro capaz de registrar pressões em micra de Hg deverá ser adaptado ao sistema para leitura destas.

A bomba de vácuo deverá operar até que uma pressão de 500 micra de Hg seja atingida, devendo nesse momento “quebrar” o vácuo com nitrogênio seco pelo menos duas vezes, até que a pressão do sistema se eleve acima de “0” psig. A quebra do vácuo é sempre necessária, pois o nitrogênio seco, quando injetado, absorve a umidade contida no sistema que não foi removida pela bomba de vácuo.

6.1.8 Carga de refrigerante

Durante a carga inicial de fluidos, recomenda-se aproveitar o vácuo no sistema para carregar com maior quantidade de líquido refrigerante possível o tanque.

É importante pesar o(s) cilindro(s) de refrigerante (s) antes da carga, para manter o controle exato da quantidade de gás que entrará no sistema.

Alguns dos fluidos são misturas não-azeotrópicas (temperatura glide > 0 K). Assim, para se certificar do carregamento da composição correta do FR, é necessário que a

maior parte do fluido seja carregada na fase líquida. Tal carregamento deve ser feito na parte de alta do sistema, para evitar “golpe de líquido” no compressor.

A verificação da carga deverá ser feita por meio da análise dos seguintes parâmetros: pressão de sucção e de descarga, superaquecimento e subrefriamento, corrente elétrica do(s) compressor(es), nível de líquido do tanque e visor de líquido (diagrama na Figura 54).

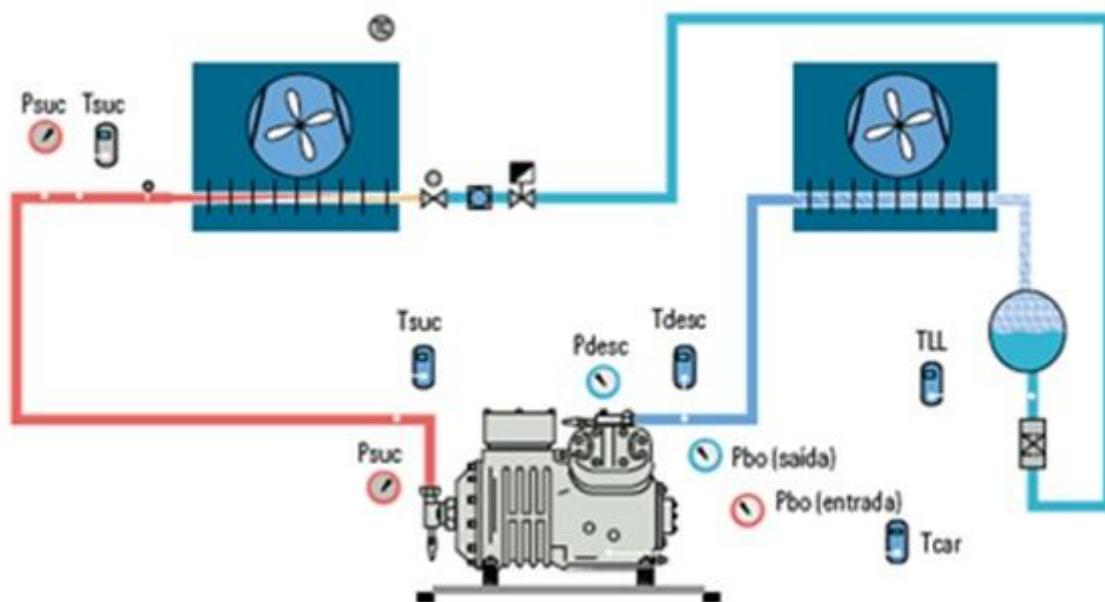


Figura 54 - Verificação das condições de operação do equipamento frigorífico (ASHRAE-HANDBOOK, 2006)

Na figura, temos:

- T_{desc} = Temperatura de descarga (psig)
- P_{desc} = Pressão de descarga (psig)
- T_{suc} = Temperatura de sucção (psig)
- P_{suc} = Pressão de sucção (psig)
- P_{bo} (entrada) = Pressão de entrada da bomba de óleo (psig)
- P_{bo} (saída) = Pressão de saída da bomba de óleo (psig)
- T_{car} = Temperatura do cárter (°C)
- T_{LL} = Temperatura da linha de líquido (°C)

Fórmulas adicionais:

- Superaquecimento (útil) = T_{suc} (saída evaporador) – Temp. evaporação (convertida da P_{suc})
- Superaquecimento (total) = T_{suc} (compressor) – Temp. evaporação
- Sub-resfriamento = Temp. condensação (convertida P_{desc}) – TLL
- Diferencial de pressão da bomba de óleo = P_{bo} (saída) - P_{bo} (entrada)

Valores de referência recomendados pelos fabricantes:

- Superaquecimento útil (saída do evaporador): 3 – 7K
- Superaquecimento total (sucção do compressor): 6 – 20K
- Sub-resfriamento (saída do condensador): 3 – 5K
- Temperatura máxima de descarga: 125°C

6.2 FICHA DE ACOMPANHAMENTO DA CORRENTE DOS COMPRESSORES

Desenvolveu-se uma ficha para atender a necessidade de acompanhar a atuação dos fornecedores. Por ser um processo não invasivo, não afeta a garantia técnica (ver a Figura 55).

Trata-se de medidas instantâneas, isto é, a análise deverá ser feita com uma margem de erro maior do que a realizada por média. É necessário que o intervalo entre as medidas seja curto, sendo possível com essas informações montar um banco de dados utilizado para gerar um histograma semelhante ao do circuito de monitoramento, o que cria outra dimensão na análise.

Como exemplo, temos um teste em um carro, no qual se verificou que o circuito com falha estava com uma corrente de fase de 8,4Aca, um segundo circuito estava com 10,4Aca e outros dois circuitos estavam com 12,4Aca. Detectou-se que além do circuito com falha existia outro que necessitava de análise por parte do fornecedor, pois está em condição anormal, dentro do período de garantia técnica.

Um mapeamento foi realizado em 19 trens que possuem CFs, com o objetivo de verificar falhas intermitentes, para procurar desvios. O resumo é apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Circuitos analisados

Trens analisados	Circuitos Frigoríficos	Com desvio
19	456	21

Embora o resultado, em primeira análise, seja pouco significativo (4,6% da quantidade de circuitos instalados), esses circuitos representam 76% de todas as falhas abertas no período analisado. Muitas delas foram resolvidas por reset na controladora, porém, quando o sistema novamente era solicitado com uma carga térmica elevada na operação comercial, a falha reincidia.

Cabe ressaltar que os circuitos reparados apresentaram vazamento de FR.

		Acompanhamento da Corrente do Compressor do Ar Condicionado			
		TREM: _____	DATA: ____/____/____	HORA: ____:____	
Recomendações:					
<ul style="list-style-type: none"> -Medir a corrente, de uma fase, de todos os compressores, sem interrupção, repetir se necessário; -Usar multímetro alicate, CAT III, verificar a validade da Aferição; -Confirmar o correto fechamento do alicate, num único condutor; -A valvula de líquido deverá estar aberta, verificar no caso do acionamento por software; -Aguardar de 1 até dois minutos, após o acionamento de todos os circuitos; -Anotar na Obs. a presença de algum alarme ou outra anormalidade no sistema; -Cuidado ao manusear o cabeamento do Armário, evitar movimentações excessivas; -Usar EPI para o manuseio do multímetro. 					
Carro	Unid.	Corrente no Circuito (A)			
		1	2	3	4
1	1				
	2				
2	1				
	2				
3	1				
	2				
4	1				
	2				
5	1				
	2				
6	1				
	2				
Obs.: <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/>					
GMT/MTR/MRN/MRC		Resp.: _____	Visto: _____		

Figura 55 - Ficha de acompanhamento da corrente do compressor do Ar Condicionado

7 ANÁLISE E CONCLUSÃO

7.1 ANÁLISE DA PROPOSTA

Foi atingido o objetivo básico de fornecer uma ferramenta para detecção de desvio, através do estudo de indicadores, para possibilitar que a equipe de manutenção faça a preditiva do sistema de ar condicionado, atuando antes que a falha ocorra, ou até permitir que esse circuito entre em falha, programando a manutenção de acordo com a taxa de vazamento, a demanda de atividades e a situação dos outros circuitos, proporcionado pelos mecanismos analisados.

- Usando a corrente do compressor como indicador, a ferramenta matemática média relativa como filtro e outros CFs como padrão de comparação, consegue-se detectar um desvio no CF, baseado na simetria dos CFs e na conservação de massa e de energia.
- Usando as médias relativas de vários dias e a ferramenta histograma, consegue-se detectar um desvio provocado por vazamento de FR, baseado na curva obtida.
- Com o histograma relativo e a curva ajustada, para um determinado tipo de ar condicionado, consegue-se prever a vazão de FR e a quantidade de dias até a falha do CF.
- Usando o histograma relativo e a previsão de vazão, de cada dia, consegue-se verificar se o vazamento está aumentando; consequentemente, a quantidade de dias até a falha diminui.
- No histograma das médias absolutas, podem-se detectar desvios que afetam todo o conjunto, em que a média relativa mascara o resultado; observa-se que a corrente absoluta apresenta uma tendência para todos os CFs. Isso determina o melhor momento para algum tipo de manutenção preventiva, tais como troca de filtro e lavagem da evaporadora, baseado na simetria dos CF e na conservação de energia.
- Usando a ficha de acompanhamento da corrente do compressor do ar condicionado, é possível efetuar um trabalho de levantamento de desvios,

obtendo-se resultados suficientes para eliminar algumas falhas intermitentes e controlar falhas que estão relacionadas ao CF.

- Com o sincronismo fornecido pelo CCO e o uso da PM, será possível recriar a viagem do trem, considerando os vários ambientes transitados (pátio, via aberta, túnel e estações). Esse procedimento viabiliza a análise de falhas recorrentes ou permite verificar quantos CFs estavam acionados, confrontando a hora com a reclamação de um passageiro e considerando as definições do que é conforto térmico.

A proposta da PM para monitorar o ar condicionado é flexível, aceita ampliações, como no caso da rede de termômetros, é de fácil inserção no sistema, não é invasiva, tem baixo custo, principalmente quando comparado aos custos do FR, do filtro secante, da mão de obra, da logística para equipamentos e de manobra do trem; serão 5.376 CFs no final de todas as reformas.

7.2 NOVOS ESTUDOS

Semelhantes à complexidade da realimentação de um sistema de ar condicionado, com suas interações, são as possibilidades de melhoria dos processos, dependendo do ponto de vista dos agentes envolvidos:

- Manutenção - manter funcionando os CFs.
- Operação não existir transtornos na via, consumo de energia, etc.
- Passageiros - conforto térmico.

Do ponto de vista dos processos de manutenção, destacam-se:

- Envelhecimento provocado por vibração;
- Monitoração da vibração dos eixos dos motores utilizados;
- Monitoração das correntes de outros motores, com foco na manutenção preventiva e preditiva;

- Estudo sobre os pontos de vazamento, foco no projeto de ar condicionado embarcado;
- Estudo sobre estruturas e processos para reparo de ar condicionado metro-ferroviário;
- Refinamento do sistema de monitoração, utilizando os histogramas e as correntes amostradas dos compressores;
- Elaboração de plano de manutenção preventiva;
- Estudo do rendimento de sistemas com capilares como elemento de expansão em sistema de ar condicionado metro-ferroviário;
- Utilização de válvulas de expansão eletrônica e inversores de potência para o controle do compressor;
- Estudos do ponto de vista do passageiro basicamente voltados para o conforto térmico, para o qual a implantação da monitoração da rede com termômetros pode contribuir.

7.3 CONCLUSÃO

O objetivo foi alcançado no sentido de que o indicador corrente contribui para as necessidades de monitoração de sistemas metro-ferroviários, em que existem vários CFs idênticos atuando em conjunto, possibilitando à equipe de manutenção fazer a preditiva do sistema de ar condicionado, a fim de efetuar a manutenção antes que a falha ocorra.

Na aplicação do conceito estabelecido, usando-se a ficha de acompanhamento ou a PM, obtêm-se benefícios pela simplicidade de implantação e efetividade com que tais ferramentas permitem comparar o balanço energético dos CFs, identificando desvios.

Na análise da amostra de 21 trens, observou-se que 76% das ocorrências estavam concentradas em 21 CFs. Após a atuação específica dos fornecedores, o número de ocorrências caiu de 172 falhas, em setembro de 2012, para 21, em dezembro de 2012 — e destas, 11 já identificadas em apenas dois carros.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 16401. **Instalações de Ar Condicionado - Sistemas Centrais e Unitários**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Brasil. 2008.

ARDUINO 328. **Arduino**, 2012. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Hacking/PinMapping168>>. Acesso em: 15 out. 2012.

ARDUINO Eth + SD. **Arduino**, 2012. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardEthernet>>. Acesso em: 15 out. 2012.

ARDUINO Eth+ SD Soft. **Ladyada**, 2012. Disponível em: <<http://www.ladyada.net/learn/arduino/ethfiles.html>>. Acesso em: 15 out. 2012.

ARDUINO I2C Port Soft. **Arduino Playground**, 2012. Disponível em: <<http://www.arduino.cc/playground/Main/I2CPortExpanderAndKeypads>>. Acesso em: 15 out. 2012.

ARDUINO RTC-PCF8563. **Arduino Playground**, 2012. Disponível em: <<http://www.arduino.cc/playground/Main/RTC-PCF8563>>. Acesso em: 15 out. 2012.

ARDUINO Wire Library. **Arduino**, 2012. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Reference/Wire>>. Acesso em: 15 out. 2012.

ARDUINO Donwload. **Arduino**, 2012. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Main/Software>>. Acesso em: 15 out. 2012.

ASHRAE-HANDBOOK. **HVAC Systems and Applications - Refrigerating and Air Conditioning Engineers**. American Society of Heating. [S.I.]. 1996.

ASHRAE-HANDBOOK. **HVAC Systems and Applications - Refrigerating and Air Conditioning Engineers**. American Society of Heating. [S.I.]. 2006.

CAF; GEMINYS. **Manual de manutenção- MM-9.86.01.23/610-001**. Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles (CAF). São Paulo, p. 81. 2010.

CHOI, J. M.; KIM, Y. C. **Capacity Modulation of an Inverter - Driven Multi-air conditioner Using Electronic Expansion Valvules**. [S.I.], p. 28. 2003.

CMSP GCS/CSC. **DS-9.83.XX.XX/6XX-301 - Dossiê de Análise Crítica e Consolidação do Projeto do Sistema de Apoio à Manutenção.** Companhia do Metropolitano de São Paulo. São Paulo. 2009.

CMSP GCS/CSC. **DS-9.88.XX.XX/6XX-302 - DOSSIÊ TÉCNICO DO PROJETO DO SAM.** Companhia do Metropolitano de São Paulo. São Paulo. 2011.

CMSP GCS/CSC. **MM-9.83.CM.XX/6XX-101 - MANUAL DE MANUTENÇÃO DO SISTEMA DE COMUNICAÇÃO MÓVEL DE VOZ E DADOS.** Companhia do Metropolitano de São Paulo. São Paulo. 2012.

CMSP GCS/CSC. **MM-9.83.TD.XX/6XX-100 - MANUAL DE MANUTENÇÃO DO STD.** Companhia do Metropolitano de São Paulo. São Paulo. 2012.

CMSP GCS/CSC. **MM-9.88.AM.XX/6XX-301 - Manual de Manutenção do Sistema de Apoio a Manutenção – SAM.** Companhia do Metropolitano de São Paulo. São Paulo. 2012.

COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO. Portal Metrô Memória. **História** em **temas**, 2009. Disponível em: <<http://www.metromemoria.com.br/conteudo.html#>>. Acesso em: 25 Junho 2011.

COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO. Missão, Visão e Objetivos Estratégicos. **Metrô**, 2011. Disponível em: <<http://www.metro.sp.gov.br/empresa/missao/temissao.shtml>>. Acesso em: 29 Junho 2011.

DOSSAT, R. J. **Princípios de Refrigeração.** [S.I.]: Brasil:Hemus, 2004.

DTU, T. U. O. D. CoolPack. **IPU Technology Development**, 2011. Disponível em: <<http://www.ipu.dk/English/IPU-Manufacturing/Refrigeration-and-energy-technology/Downloads/CoolPack.aspx>>. Acesso em: 23 nov. 2011.

DUPONT. **Boletim de informação do Produto - DuPont Suva@ 407C.** DUPONT do Brasil SA. [S.I.], p. 2. 2009.

ELPASO / Rtc_Pcf8563 Soft. **Github**, 2012. Disponível em: <https://github.com/elpaso/Rtc_Pcf8563>. Acesso em: 15 out. 2012.

FERRAZ, F.; GOMES, M. **Apostila Refrigeração**. CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DA BAHIA - UNIDADE DE ENSINO. Santo Amaro, p. 76. 2012.

GALOCHA, J. C.; MORENO, L. A.; SANTOS, L. M. A. **PROPOSTAS DE MELHORIAS NA MANUTENÇÃO DO SISTEMA DE AR-CONDICIONADO DO METRÔ**. Universidade Paulista - UNIP. São Paulo, p. 112. 2009.

GPG-178. **Cutting the Cost of Refrigerant Leakage**. Energy Efficiency Best Practice Programme. ETSU, Oxfordshire, UK. 1997.

IBOARD_DS. iBoard_DS.pdf. **Itead Studio**, 2012. Disponível em: <http://iteadstudio.com/store/images/produce/Platform/ArduinoCom/IBoard/iBoard_DS.pdf>. Acesso em: 15 out. 2012.

ISO 7730. **ISO 7730 Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria**. International Standard. [S.I.], p. 60. 2005.

ITEADUINO Ethernet. **Itead studio**, 2012. Disponível em: <<http://iteadstudio.com/store/images/produce/Platform/ArduinoCom/IBoard/sch-iboard.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2012.

MILLER, R.; MILLER, M. R. **Refrigeração e Ar Condicionado**. LTC. Rio de Janeiro, p. 524. 2008.

MOURÃO, M. S.; PALMEIRA JUNIOR, G. L. **Desenvolvimento de um Sistema de Detecção e Diagnóstico de Falha aplicado em um Sistema de refrigeração**. Universidade de Brasília. Brasília, p. 112. 2011.

NATIONAL INSTRUMENTS. **LabView**. National Instruments. [S.I.]. 2009.

NEGRI, A. A.; KAKO, J. C. **Confiabilidade do Ar Condicionado Modelo RO56, dos Trens Série 2000 da CPTM**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2004.

PCF8563 RTC Board.rar. **Google drive**, 2012. Disponível em: <https://docs.google.com/file/d/0B2_rhDNAxM4sZDk1MjZiYTgtMjJjNS00MzNhLTljYjctNzIIZTQyODg1NjM1/edit>. Acesso em: 15 out. 2012.

PCF8563 RTC soft. **Arduin Forum**, 2012. Disponível em: <<http://arduino.cc/forum/index.php/topic,16939.0.html>>. Acesso em: 15 out. 2012.

PCF8574-IO-EXPANSION-BOARD. **Google Drive**, 2012. Disponível em: <https://docs.google.com/file/d/0B2_rhDNAxM4sbTIQZUo5M2JTd0twTFpDQ1VrVWQ2Zw/edit?pli=1>. Acesso em: 15 out. 2012.

PINTO, C. A. P.; BARRACHO, J. C.; NEVES, S. H. S. **Estudo do Comportamento do Sistema de Ar Condicionado dos Trens da Frota "F" do Metrô-SP por Meio de Monitoramento Contínuo**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 94. 2010.

PIRANI, M. J. **Princípios de Refrigeração**. Universidade Federal de Bahia. [S.I.], p. 208. 2006.

PÖTTKER, G. **Análise do efeito combinado de compressores e expansores de ação variável sobre o desenvolvimento de sistemas de refrigeração**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 178. 2006.

PROCEL. **EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO MANUAL PRÁTICO INDUSTRIAL E COMERCIAL**. EFFICIENTIA/FUPAI - ELETROBRÁS/PROCEL. Rio de Janeiro, p. 75. 2005.

RUAS, Á. C. **Sistematização da avaliação de conforto térmico - em ambientes edificados e sua aplicação num software**. Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP. Campinas, p. 196. 2002.

SIMÕES MOREIRA, J. R. **Apostila TMF11 - Sistemas Mecânicos II**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2011.

STOECKER, W. F.; JONES, J. W. **Refrigeração e Ar Condicionado**. São Paulo: McGraw- Hill Ltda, 1985.

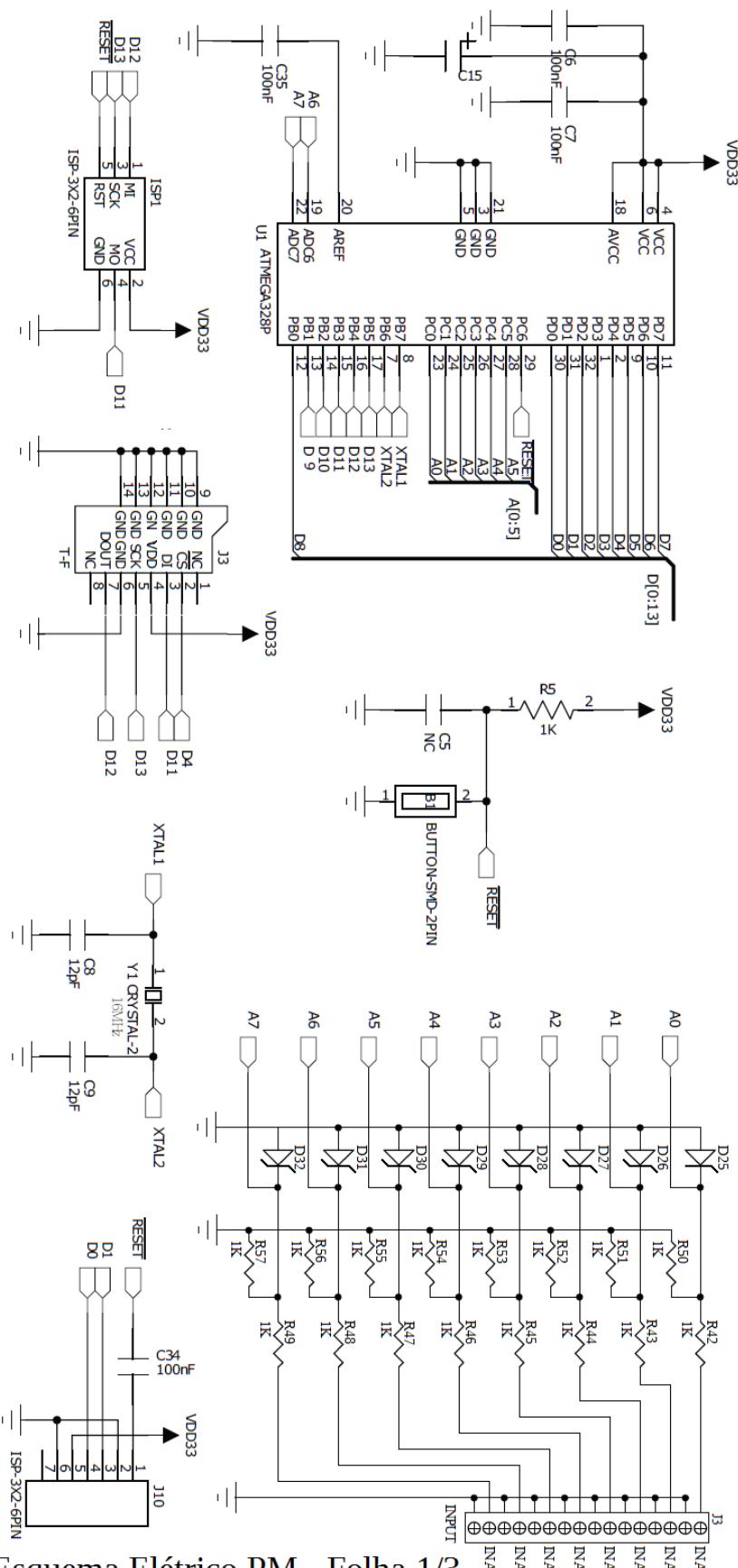
STOECKER, W. F.; SAIZ JABARDO, J. M. **Refrigeração Industrial**. 2º. ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 2002.

TUTORIAL-SOBRE-PCF8574. **Laboratório de Garagem**, 2012. Disponível em: <<http://labdegaragem.com/profiles/blogs/tutorial-sobre-pcf8574-e-como-utiliz-lo-com-arduino>>. Acesso em: 15 out. 2012.

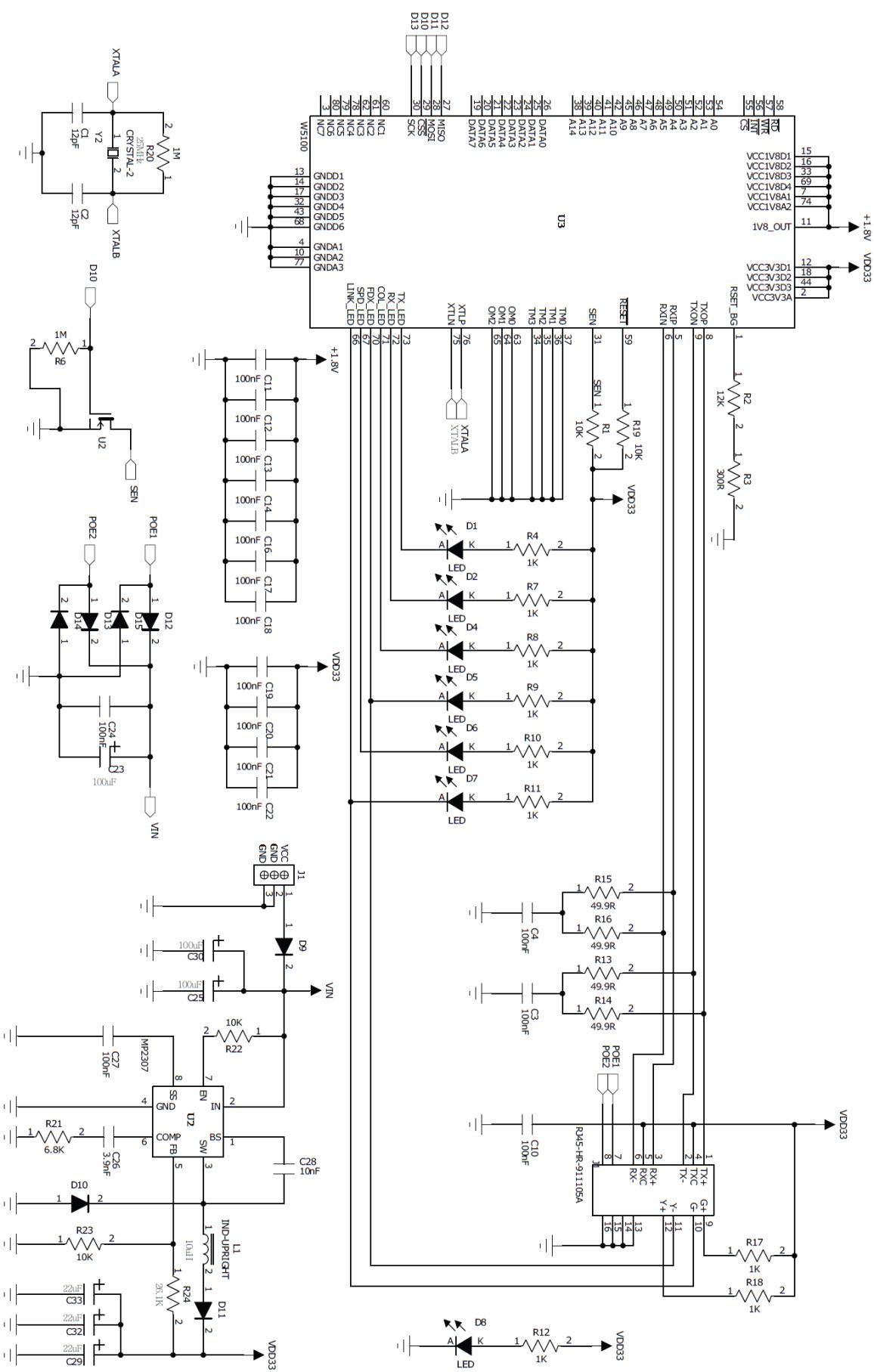
VENTURINI, O. J.; PIRANI, M. J. **Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração Industrial e Comercial**. Eletrobrás. Rio de Janeiro, p. 260. 2005.

VULKAN. **Catalogo Equipamentos par Instalação e Manutenção em sistemas de Refrigeração de Ar Condicionado**. Vulkan do Brasil. www.lokring.com.br, p. 20. 2010.

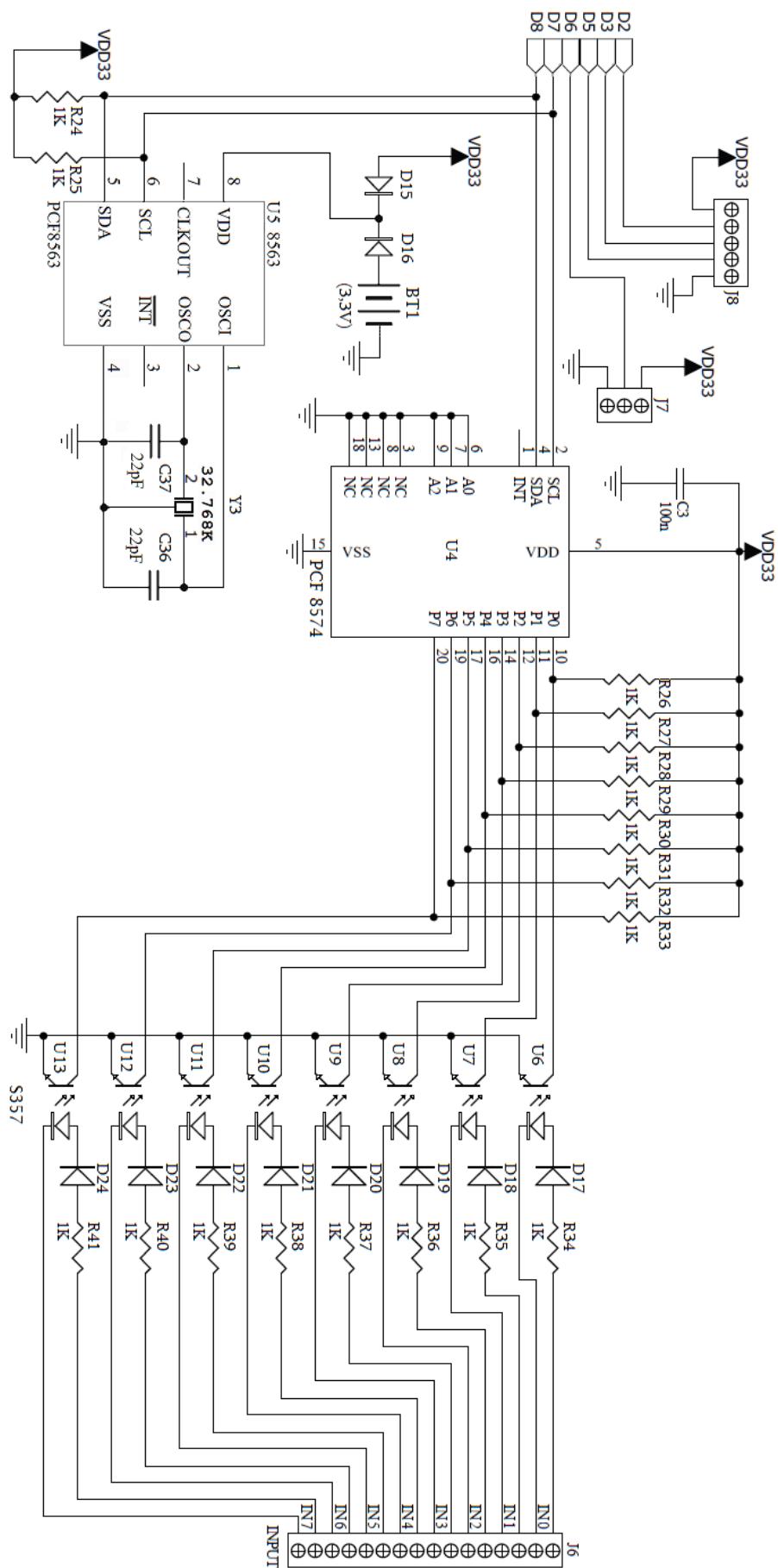
APÊNDICE A - Esquema elétrico



Esquema Elétrico PM - Folha 1/3



Esquema Elétrico PM - Folha 2/3



Esquema Elétrico PM - Folha 3/3