

### **CATEGORIA 3**

**Eficiência Energética no Metrô-SP: *Estratégias para reduzir o consumo de energia nos trens através de ações de eficiência energética***

#### **INTRODUÇÃO**

No ano de 2019, o Metrô-SP transportou 1,098 bilhão de passageiros, sendo necessários 473 GWh de energia elétrica para operar o sistema. Após as inaugurações das estações da Linha 15: Sapopemba, Fazenda da Juta e São Mateus, em Dezembro de 2019, o metrô na cidade de São Paulo superou a marca de 100 km de extensão.

Diante deste cenário, as ações de eficiência energética se apresentam como uma excelente alternativa para reduzir os custos operacionais decorrente dos gastos com energia elétrica, além de propiciar a redução de emissões de gases de efeito estufa. Portanto, a eficiência energética pode colaborar com a melhoria da qualidade de vida dos cidadãos através de um sistema de transporte público sustentável e energeticamente eficiente.

#### **Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é fazer um estudo de análise energética nos trens do METRÔ-SP e descrever possíveis ações de eficiência energética que podem ser implantadas. Estas ações buscam reduzir os custos operacionais, tornando a empresa mais sustentável do ponto de vista financeiro e ambiental, além de melhorar a qualidade dos serviços na operação dos trens do METRÔ-SP.

Algumas propostas de ações de eficiência energética demandam apenas mudanças de rotinas operacionais e pouco investimento, ou seja, é possível obter ótimos resultados sem implantar novas tecnologias ou soluções complexas.

Porém, outras ações possuem maior complexidade para serem implantadas, principalmente, devido ao fato das composições permanecerem a maior parte do tempo em operação. Entretanto, tais propostas podem ser incluídas nos projetos de novos trens.

### **Objetivos específicos**

- Avaliar os sistemas consumidores de energia;
- Analisar e propor ações de melhorias nos processos operacionais, através de novos procedimentos que possam contribuir com a redução do consumo de energia.
- Analisar e propor ações de melhorias nos sistemas auxiliares do trem: iluminação, ar condicionado e pneumática.
- Reavaliar e propor melhorias na função *stand-by*.
- Justificar as propostas de investimentos através de estudo de viabilidade

## **Justificativa**

Conforme demonstra Souza (2003), o custo com a energia elétrica representa entre 7 a 26% do custo operacional das empresas do setor de transporte Metroferroviário.

De acordo com o METRÔ-SP (2020), o custo total com energia elétrica para a operação passou de R\$ 197 milhões em 2018 para R\$ 227,4 milhões em 2019, devido à elevação do preço da energia.

De acordo com FILHO *et al.* (2016), o consumo decorrente da tração representa 70% de toda energia consumida no METRÔ-SP.

Portanto, investir em ações de eficiência energética é uma ótima alternativa do ponto de vista da sustentabilidade econômica e ambiental.

## **Eficiência energética**

A norma ABNT ISO 50001 define eficiência energética como sendo a razão entre um desempenho, serviço, produto ou energia em relação à energia utilizada na entrada.

Por exemplo, podemos dizer que uma lâmpada LED que produz 100 lm/W é mais eficiente que uma lâmpada incandescente que produz apenas 15 lm/W.

No caso dos trens, um dos principais indicadores de eficiência energética é o consumo específico kWh/carro.km, que representa a energia consumida por km rodado (por cada carro).

De acordo com a ABESCO (2019), um projeto de eficiência energética inicia-se pela avaliação dos sistemas consumidores de energia. Após isso, o projeto deve indicar os aportes necessários para a implantação das ações.

De acordo com SENAI-SP (2017), os ganhos com a implantação da eficiência energética não se limitam apenas à economia com os gastos de energia, mas, também, pelos seguintes benefícios:

- Redução dos impactos negativos ao meio ambiente;
- Redução dos custos com manutenção;
- Redução dos custos logísticos (estocagem e armazenamento, transporte, descarte, etc);
- Redução da emissão dos gases causadores de efeito estufa;
- Redução do número de falhas;
- Aumento da segurança elétrica do sistema;
- Melhoria da qualidade dos serviços;
- Desenvolvimento tecnológico.

### **Eficiência energética nos sistemas metroviários**

Há diversos sistemas que podem ser estudados na busca de eficiência energética.

Esses sistemas são relativos a trens, equipamentos fixos de estação e túnel, sinalização e controle, pátios, edificações administrativas, etc.

A seguir, foram destacadas algumas possibilidades de estudo de eficiência energética para o setor Metroferroviário:

- Geração de energia renovável;
- Redução das perdas no sistema elétrico (subestações, 3º trilho, etc.);

## 26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



- Iluminação dos trens, estações e túneis;
- Ventilação das estações e túneis;
- Regeneração e/ou armazenagem da energia de frenagem;
- Subestações reversíveis;
- Otimização do sistema de sinalização e controle;
- Sistema de gestão de energia e certificação;
- Otimização do tempo de parada, taxas de aceleração/frenagem e velocidade;
- Aerodinâmica e atrito;
- Isolação térmica dos trens;
- Sistema pneumático;
- Redução do consumo dos trens estacionados (*stand-by*, desligamento);
- Redução do peso das composições.
- Eficiência dos motores do sistema de tração;

### **Análise de viabilidade**

Neste artigo, foram feitas avaliações dos potenciais de economia, que foram justificadas através da análise de viabilidade, utilizando as ferramentas de engenharia econômica. Segundo NAKANO (1964), essas ferramentas procuram harmonizar a eficiência tecnológica com a eficiência econômica.

O SENAI-SP (2017) descreve que a análise da viabilidade tem por objetivo verificar se um projeto possui condições econômicas de ser executado, além de definir prioridades nas implantações das ações. Neste artigo, é feito o cálculo de viabilidade, que compara o valor do investimento em relação à sua economia, gerando como resultado o tempo necessário para que o investimento se pague por completo (*payback*).

NOGUEIRA (2011) cita que o *payback* é um método muito utilizado para se avaliar viabilidade econômica das alternativas de investimento. Em várias situações, o método do *payback* é escolhido devido a sua fácil operacionalização e simples entendimento pelos os analistas, pois esse método fornece o tempo necessário para que o capital investido seja recuperado, permitindo assim, avaliar se a alternativa é viável e relevante. Neste trabalho, será utilizado o *payback* simples, que pode ser calculado através da divisão entre o investimento inicial e os ganhos esperado no período.

### **Sustentabilidade Ambiental**

Segundo MENKES (2004), a maioria dos autores que trata das questões sobre eficiência energética, aponta que esta é um dos instrumentos-chave para a diminuição dos impactos ambientais em níveis locais, regionais e globais, especialmente, no que se refere à redução das emissões de gases de efeito estufa.

### **Gases de efeito estufa**

As emissões de Gases de Efeito Estufa, geradas pela produção de energia elétrica, ocorrem devido à utilização de combustíveis fósseis na matriz energética brasileira.

Segundo ANDRADE e D'AGOSTO (2013), o principal fator capaz de reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> nos sistemas Metroviários é a eficiência energética.

De acordo com SESTINI (2019), as empresas podem se beneficiar do marketing ambiental positivo gerado por suas ações. Cabe ressaltar que a contabilização das emissões é uma determinação legal.

## Distribuição do consumo de energia elétrica em sistemas metroviários

GONZÁLEZ-GIL *et al.* (2014) detalham em seu artigo a distribuição do consumo de energia no Metrô de Londres. Através do gráfico, é possível observar que a maior parte da energia elétrica é consumida pela circulação de trens (tração). Apenas 20% da energia são consumidas pelas estações e demais sistemas fixos.

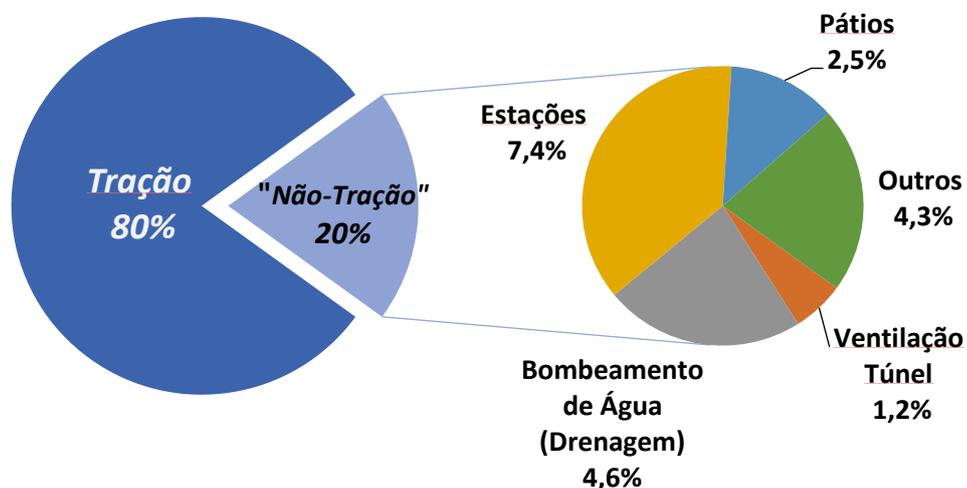


Figura 1 - Distribuição do Consumo de energia no Metrô de Londres

No Metrô-SP, o consumo de energia pela tração (circulação de trens) é de aproximadamente 70%. Entretanto, não há dados precisos referentes à distribuição do consumo dentro do grupo "Não-Tração".



Figura 2 - Distribuição do Consumo no Metrô-SP

## Distribuição do consumo nos trens europeus

GONZÁLEZ-GIL *et al* (2014) ilustram, através de um fluxograma, o consumo e o fluxo de energia consumidos pelos trens dos sistemas europeus.

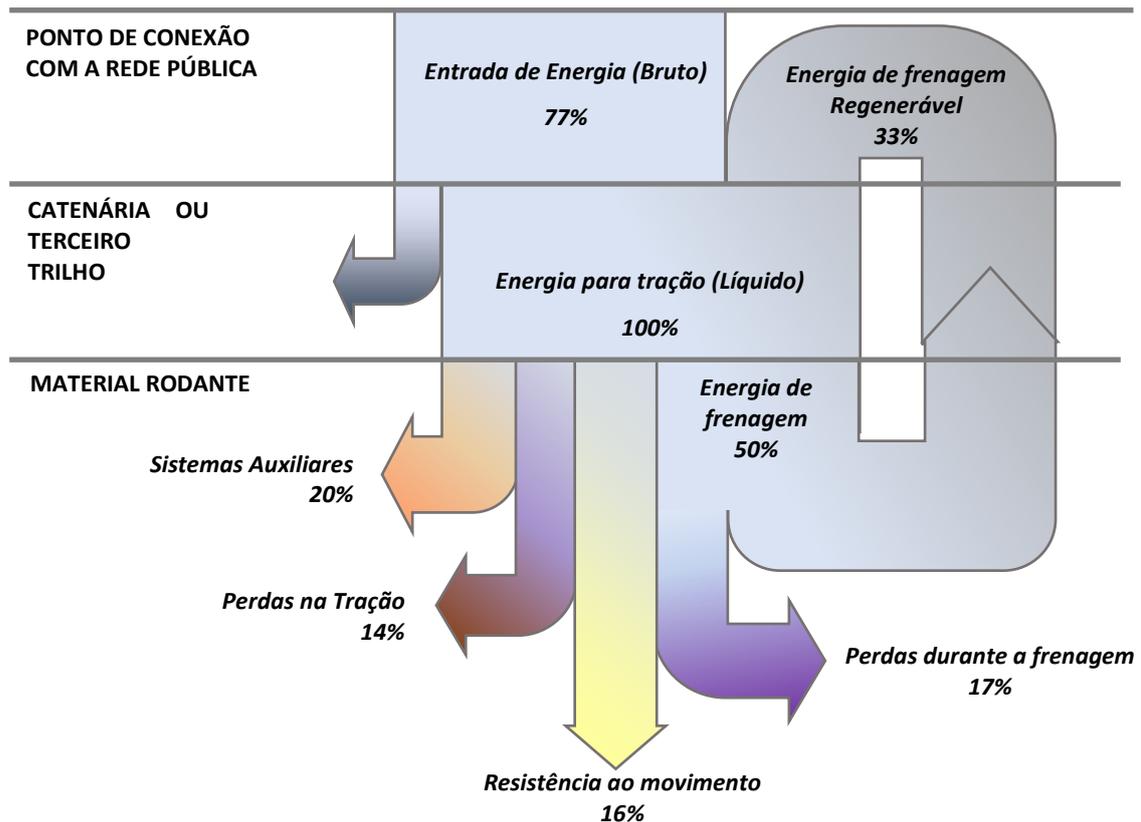


Figura 3 - Fluxo típico da energia da tração

É possível observar que os sistemas auxiliares do trem consomem em torno de 20% do total da energia, sendo um dos principais consumidores.

Em torno de 50% da energia da composição são consumidas pelo sistema de frenagem, sendo que 33% da energia são regeneradas e retornam para o sistema de alimentação elétrica. Entretanto, 17% da energia se transformam em perdas.

## Distribuição do consumo nos trens do Metrô-SP

O METRÔ-SP (2016) descreve, para cada frota, a energia consumida pela tração, sistemas auxiliares e a potência que é dissipada nas resistências de frenagem.

A seguir, temos um resumo deste relatório:

- O consumo específico das frotas atuais é em média 0,96 kwh/km (por carro).
- O consumo médio dos sistemas auxiliares é em torno de 30% de toda a energia consumida pela composição.
- Aproximadamente, 5,8% de toda energia consumida é dissipada nas resistências de frenagem elétrica.

## **DIAGNÓSTICO**

Nos próximos itens, será descrita uma visão geral sobre os sistemas em que foram detectadas oportunidades de ações de eficiência energética. Como o METRÔ-SP opera diversas frotas de trens em diferentes linhas, foi necessário compilar as características dos equipamentos durante o desenvolvimento dos temas.

## **MEDIÇÃO E FATURAMENTO DA ENERGIA ELÉTRICA**

De acordo com GALOCHA (2019), a medição e o faturamento do consumo de energia do Metrô-SP é feito através dos medidores da concessionária de distribuição, instalados nas subestações primárias do METRÔ-SP.

Nas subestações retificadoras e auxiliares, também existem medidores, entretanto, as medições não são utilizadas para fins de faturamento.

## **CONTRATAÇÃO E CUSTOS DA ENERGIA ELÉTRICA NO METRÔ-SP**

De acordo com CLÍMACO (2010), o METRÔ-SP migrou para o ambiente de contratação livre de energia em 2005, devido às oportunidades de redução dos gastos com a energia elétrica em relação ao mercado cativo.

Segundo o METRÔ-SP (2020), o custo médio da energia em 2019 foi de aproximadamente R\$ 466,85 R\$/MWh, valor 23,5% maior que em 2018.

No contrato atual de fornecimento de energia do METRÔ-SP, consta uma cláusula conhecida como *Take or Pay*, que assegura ao vendedor da energia um recebimento mínimo, relativo a um limite inferior de consumo de energia. Entretanto, mesmo que o consumo de energia fique abaixo do limite do *Take or Pay*, o METRÔ-SP terá o direito de vender, no mercado de energia de curto prazo, a diferença entre o limite inferior contratado e o efetivamente consumido.

## **SISTEMA DE TRAÇÃO**

O sistema de tração é composto pelos equipamentos responsáveis pela movimentação das composições como, por exemplo, os inversores de tração, os motores de tração, unidades de controle, redutores de engrenagem, eixos, rodas, etc.

### **Inversores de Tração**

Em alguns trens, para que os inversores trabalhem corretamente, é necessário que o calor gerado durante a modulação da tensão seja dissipado. Essa dissipação de calor é auxiliada pelos ventiladores de tração.

Entretanto, os inversores de tração da Frota H são do tipo *Fanless*, ou seja, dispensam o uso de ventiladores para a sua refrigeração. Este tipo de equipamento é mais eficiente em relação aos inversores que gastam energia para alimentar a ventilação.

## **Motores de Tração**

Em cada carro, existem quatro motores de tração com potência de aproximadamente 180 kW. Na maioria das frotas, o tipo de motor utilizado é o assíncrono AC, com o rotor em curto-circuito, cujo rendimento é em torno de 93%.

Entretanto, os trens da frota E possuem motores de corrente contínua, sendo este um tipo de motor com menor eficiência energética.

Já os trens da frota M possuem os modernos motores síncronos de ímã permanente, que são atualmente o tipo de motor elétrico mais eficiente para ser aplicado no sistema de tração.

As perdas de energia no sistema de tração são, predominantemente, causadas pelas ineficiências dos motores, enquanto que as perdas nos inversores e nos redutores são relativamente pequenas. Portanto, as maiores melhorias na eficiência no sistema de tração são alcançadas, principalmente, através do uso de motores mais eficientes.

Os motores síncronos de ímã permanente representam uma alternativa promissora para substituir as máquinas assíncronas, devido à sua alta eficiência de até 97%.

## **SISTEMA DE FREIO**

O sistema de freio tem por finalidade reduzir a velocidade da composição, ou ainda, pará-la totalmente. Este sistema é composto pelo freio elétrico e pelo freio de atrito.

### **Freio Elétrico**

Durante a atuação do freio elétrico, os motores de tração passam a atuar como geradores, utilizando a energia cinética do trem. O freio elétrico pode ser classificado como regenerativo ou reostático.

No caso do freio elétrico regenerativo, a energia retorna para a linha de alimentação elétrica, sendo reutilizada por outra composição.

O freio elétrico reostático é aplicado quando não houver outro trem capaz de consumir a energia regenerada. Quando isso ocorre, a tensão na linha de alimentação se torna elevada (não receptiva) e a energia é dissipada e perdida em forma de calor, através dos bancos de resistência localizados na própria composição.

### **Freio de Atrito**

O freio de atrito é um item de segurança utilizado em situações de emergência e, também, para complementar o freio elétrico, a fim de atingir a taxa de frenagem.

Neste caso, a energia cinética da composição é transformada em calor, através do atrito das pastilhas com o disco de freio. A aplicação do freio de atrito é o menos eficiente do ponto de vista energético, uma vez que a sua aplicação causa a perda da energia cinética, desgaste das pastilhas e discos, além de consumir ar comprimido durante o seu acionamento.

## Alimentação dos sistemas auxiliares do trem

O Conversor Auxiliar (CVS) tem a função de converter a energia coletada no 3º trilho e distribuí-la aos diversos sistemas auxiliares do trem, conforme figura a seguir.

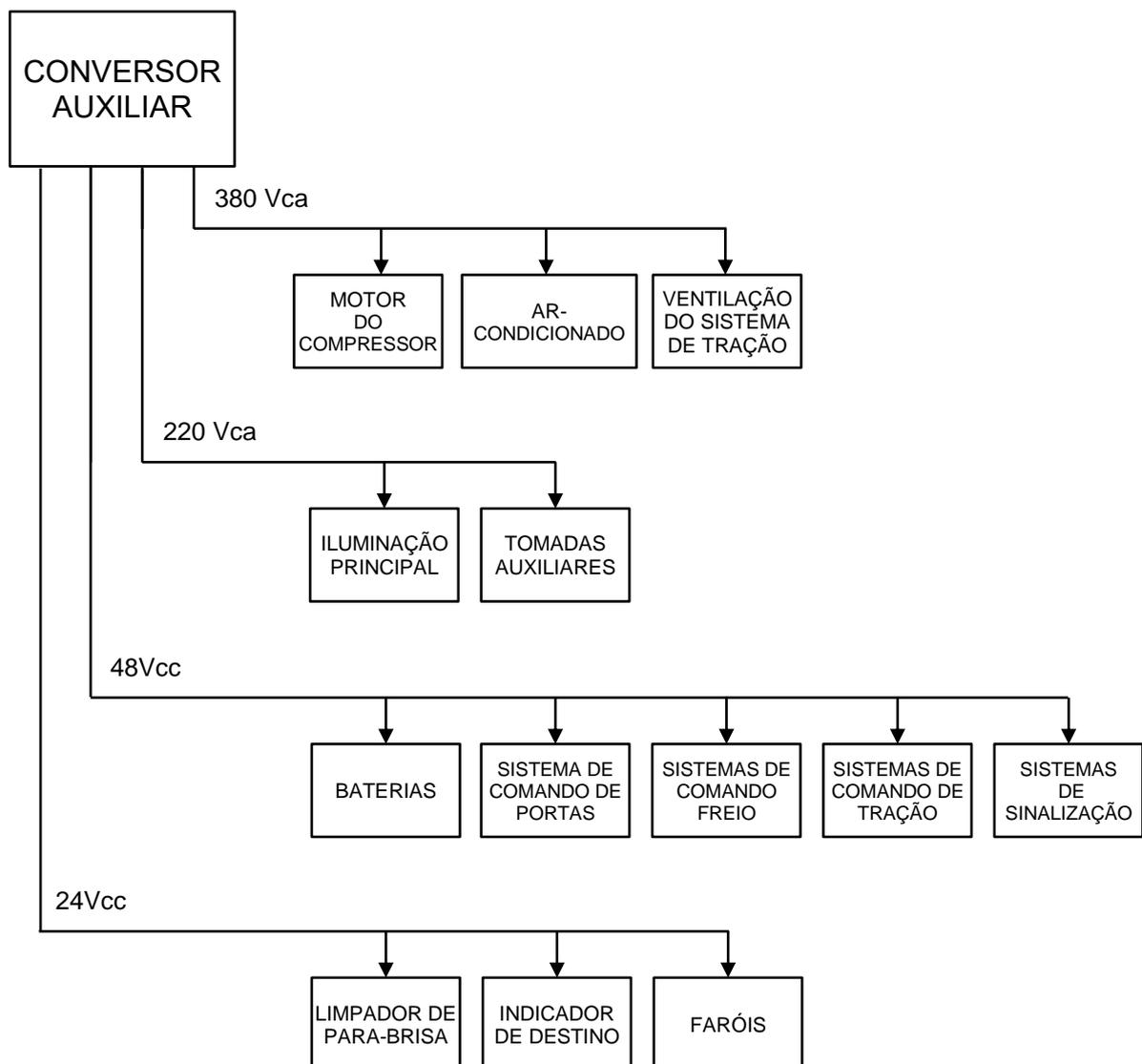


Figura 4 – Alimentação dos sistemas auxiliares pelo CVS

## Eficiência energética dos CVS

Os CVS instalados nos trens do METRÔ-SP possuem potência nominal em torno de 117KVA / 99,45KW e eficiência de 90%.

Conforme descreve VINBERG (2018), a eficiência dos inversores de tração e dos conversores auxiliares está entre 98,5 a 99,5%, principalmente, os equipamentos que utilizam tiristores GTO ou IGBT.

### **EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA ILUMINAÇÃO**

Conforme descreve PEARCE (2010), após o sistema de tração e ar condicionado, a iluminação é o terceiro maior consumidor de energia nos trens.

Em relação à iluminação, podemos destacar os seguintes itens a serem avaliados:

- Tipo de tecnologia empregada e a sua eficiência energética;
- Iluminação artificial excessiva ou insuficiente;
- Possibilidade do uso de Iluminação natural;
- Número de pontos de seccionamentos adequados;
- Possibilidade do uso de automação e dimerização;
- Manutenção e limpeza das luminárias;
- Hábitos de uso das pessoas.

PEARCE (2010) destaca que a vida útil é um parâmetro essencial na seleção da iluminação a ser instalada, pois os equipamentos com maior vida útil reduzem os custos de manutenção e aumentam a disponibilidade dos trens.

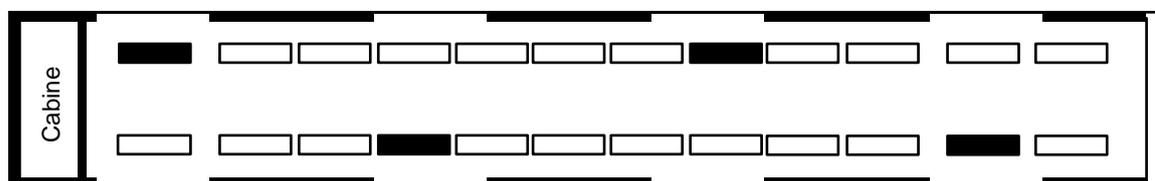
Segundo ANEEL (2014), a redução da carga térmica emitida pela iluminação, por efeito interativo, também reduz o consumo de energia pelo ar condicionado.

### **Sistemas de Iluminação dos trens**

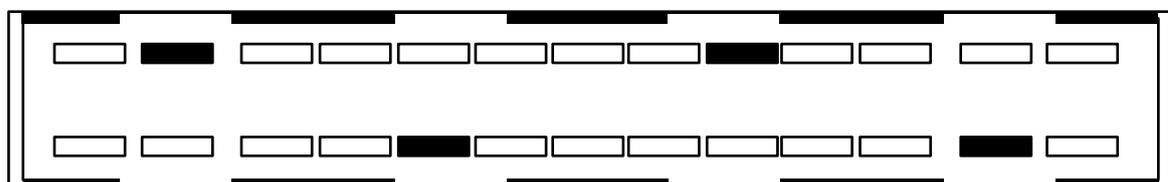
O nível adequado de iluminação é essencial para o conforto visual e segurança dos passageiros. Nos trens do METRÔ-SP, o nível de iluminação é de 500 lux (a 800 mm do piso). Para atingir essa iluminação, os carros líderes possuem em torno de 26 luminárias e os carros intermediários possuem 28 luminárias, distribuídas pelo salão de passageiros. Cada luminária possui duas lâmpadas tubulares.

### **Iluminação Principal e Iluminação de emergência**

Nos carros existem dois tipos de luminárias, a maior parte delas pertence ao circuito de iluminação principal. Entretanto, em cada carro existem quatro luminárias de emergência. Estas luminárias continuam acesas mesmo em caso de interrupção no fornecimento de energia, pois uma de suas lâmpadas é alimentada pelas baterias.



Carros Líderes



Carros Intermediários

□ Luminárias - Iluminação Principal      ■ Luminárias de Emergência

**Figura 5 - Distribuição típica das luminárias nos carros**

### **Retrofit da iluminação**

Na maior parte das frotas, a iluminação principal passou por *retrofit* e, atualmente, são compostas por duas lâmpadas tubulares T8 LED de 18W. Entretanto, as lâmpadas de emergência permaneceram com os modelos originais fluorescentes, uma vez que é utilizado um tipo de reator/inversor especial para o nível de tensão das baterias (48 / 72 Vcc).

### **Sistema de Iluminação da Frota H**

Na frota H, não houve o *retrofit* da iluminação principal para o modelo LED, sendo mantido o seu modelo original com lâmpadas fluorescentes T5 de 28 W e reatores/inversores eletrônicos de 3 W.

A modernização da iluminação da frota H demanda uma análise mais aprofundada, uma vez que não é possível simplesmente trocar os tipos de lâmpadas, pois a alimentação da iluminação desta frota é feita em tensão de bateria (72Vcc), enquanto que as lâmpadas tubo LED funcionam com tensão de alimentação de 127/220 Vca.

### **EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NOS SISTEMAS DE AR CONDICIONADO**

De acordo com o LONDON UNDERGROUN (2014), houve um aumento das expectativas dos passageiros londrinos em relação ao conforto térmico dentro do transporte público. Esse fenômeno ocorreu principalmente pela introdução de sistemas de condicionamento de ar nos novos trens e ônibus.

No METRÔ-SP, a maior parte dos trens foi modernizada e recebeu ar condicionado. Atualmente, 93% dos trens operados pela empresa possuem condicionamento de ar.

Diferente dos outros sistemas, o ar condicionado pode ter grandes variações de consumo de energia devido às condições operacionais, como por exemplo, temperatura externa, número de passageiros (nível de ocupação), insolação, etc. VINBERG (2018) ilustra o modelo térmico de um carro de passageiros.

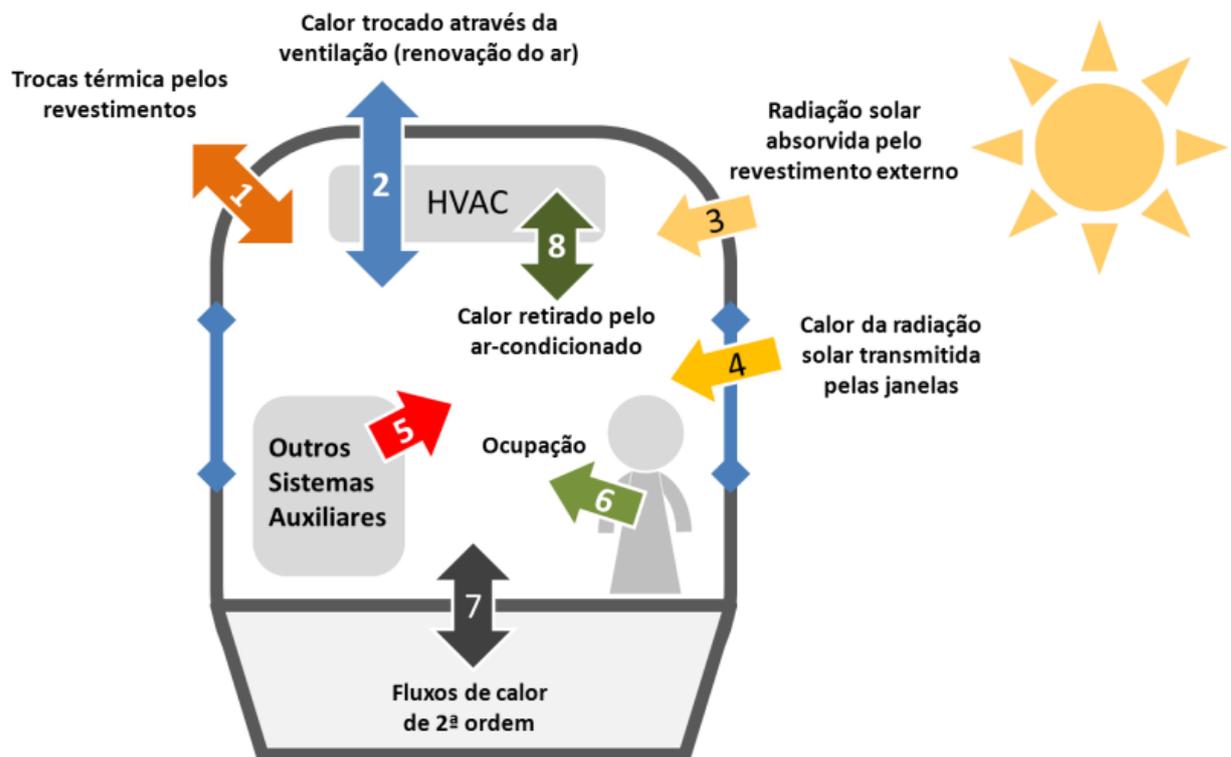


Figura 6 - Modelo térmico do carro

No METRÔ-SP, a potência empregada pelo sistema de ar condicionado pode variar em torno de 2,8 a 35 kW, em cada carro.

GONZÁLEZ-GIL *et al.* (2014) descrevem que a demanda de HVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado) em veículos ferroviários pode ser reduzida através:

- Aumento do isolamento térmico das laterais, cobertura, piso, folhas de portas e janelas dos carros;

- Uso de janelas inteligentes que ajustam automaticamente a sua opacidade de acordo com a intensidade da luz solar;
- Renovação do ar controlado por demanda, com base na concentração de CO<sub>2</sub>.
- Redução do número de aberturas de portas;
- Pequeno aumento da temperatura (*set-point*) de resfriamento;
- Utilização de equipamentos de refrigeração atualizados tecnologicamente.

### **Sistema de ventilação e ar condicionado dos trens**

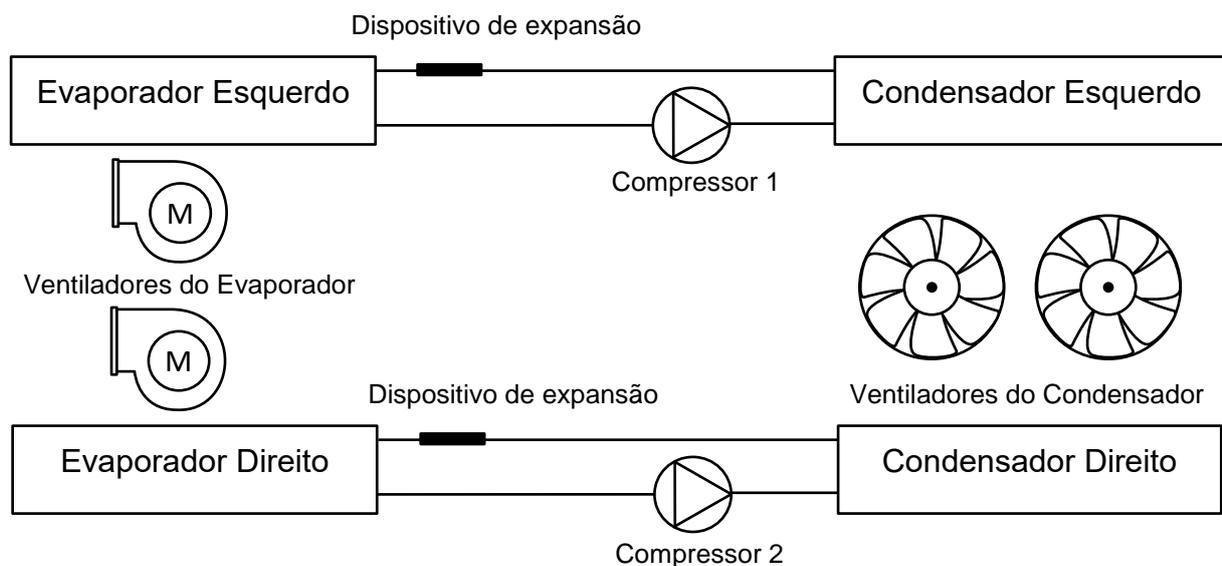
O sistema de ventilação e ar condicionado é responsável por manter a temperatura do salão dentro de níveis que propiciem conforto térmico para aos passageiros, além de ser responsável pela circulação e renovação do ar no interior dos carros.

Cada carro é equipado por duas unidades produtoras de ar condicionado. Cada unidade é interligada a um duto de ar que percorre todo carro.



**Figura 7 - Localização das unidades de ar-condicionado**

Cada unidade de ar condicionado é composta por compressores, trocadores de calor do condensador e da evaporadora, formando assim dois circuitos frigoríficos por unidade, totalizando quatro circuitos frigoríficos por carro.



**Figura 8 – Alimentação dos sistemas auxiliares pelo CVS**

Entre as frotas, existem algumas diferenças no arranjo dos circuitos frigoríficos, como por exemplo, número de compressores, dispositivos de expansão, etc.

### **Controle da temperatura**

O sistema de ar condicionado controla a temperatura interna do salão de passageiros através de algoritmo, utilizando sensores de temperatura.

Quando a temperatura interna está abaixo de 23°C, a refrigeração é desligada automaticamente e somente os ventiladores do evaporador permanecem ligados, a fim de fazer a renovação de ar.

Quando a temperatura interna é igual ou maior que 23°C, o sistema atua para manter o conforto térmico de acordo com a equação:

$$T_{ir} = 22 + 0,25 (T_e - 19)$$

Nesta equação, *T<sub>ir</sub>* é a temperatura interna de referência, ou seja, é a temperatura em que o sistema irá manter dentro do salão de passageiros (*set-point*), enquanto que *T<sub>e</sub>* é a temperatura externa do ambiente.

### **Renovação do ar**

O sistema de ar condicionado também é responsável pela renovação do ar dentro do salão de passageiros, ou seja, o ar refrigerado é uma mistura entre ar fresco e o ar recirculado. O sistema é projetado para renovar o ar do salão a uma taxa de 8m<sup>3</sup>/h por passageiro, considerando o carregamento máximo de pessoas. Portanto, o volume total de ar do salão é renovado em poucos minutos.

Isso significa que trens que não operam a uma taxa de ocupação de 100% terão uma renovação de ar fresco acima do necessário, resultando em desperdício de energia.

### **EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NOS SISTEMAS PNEUMÁTICOS**

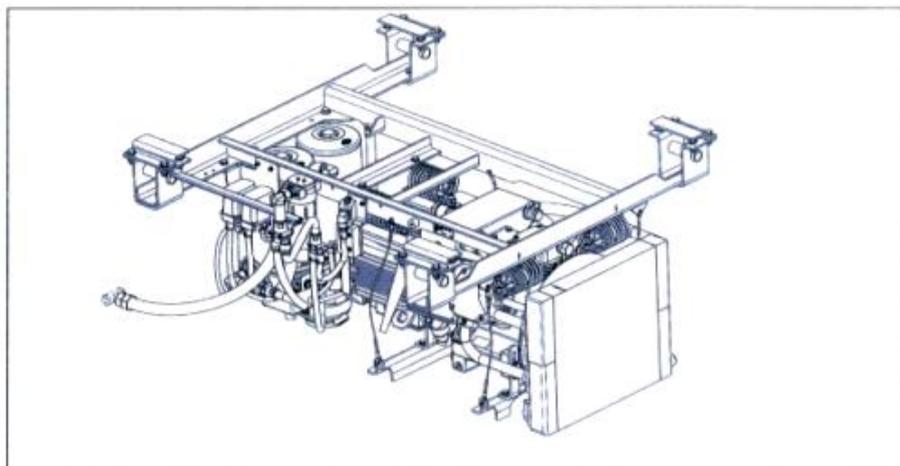
Nas aplicações Metroferroviárias, o ar comprimido é a fonte de energia utilizada por diversos sistemas fundamentais do trem, como por exemplo, acionamento dos freios da composição, abertura das portas e nivelamento do piso do salão com a plataforma (sistema de suspensão). Segundo SCHUMANN (2018), essas aplicações trazem desafios

para o projeto de suprimento de ar, que geralmente não são enfrentados por aplicações industriais.

De acordo com MONTEIRO *et al.* (2005), em torno de 80% da energia consumida durante o processo de geração do ar comprimido se perde em forma de calor.

### **Sistemas pneumáticos dos trens**

A unidade compressora é responsável por produzir o ar comprimido que será utilizado pela composição. Ela é formada por compressor de ar, motor elétrico (acoplado no compressor), painel de comando e secador de ar por adsorção. Todos esses equipamentos são montados em um único chassi e fixados sob a caixa do trem.



**Figura 9 - Unidade Compressora (VV120)**

Em cada carro, o ar comprimido é armazenado nos reservatórios principais e distribuído para os sistemas de freios, bolsas de ar da suspensão e portas pneumáticas.

Nem todos os carros possuem a unidade compressora. Esses carros são alimentados através da tubulação principal, pelo ar produzido em outros carros da composição.

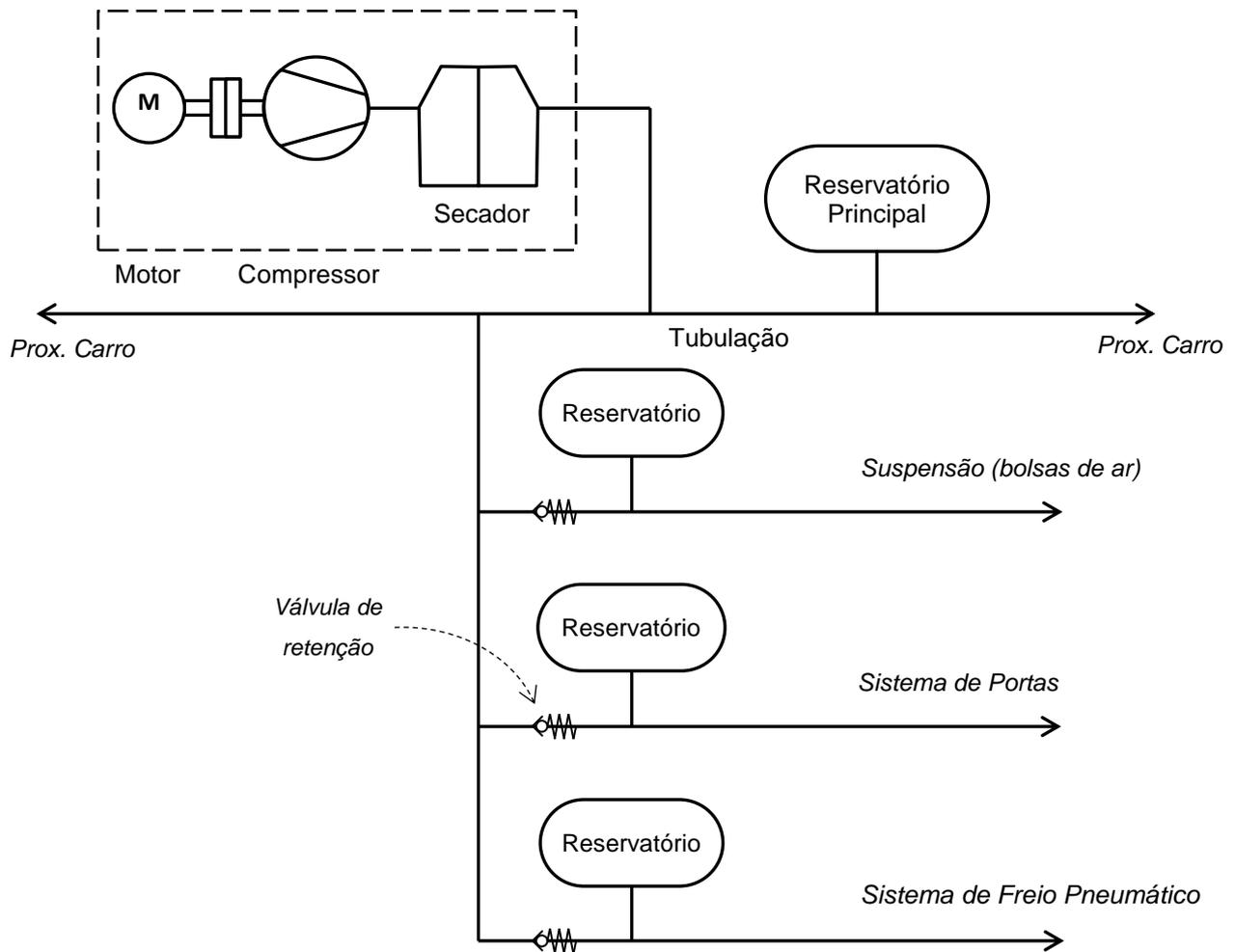


Figura 10 – Sistema pneumático do carro simplificado

### Unidades compressoras

No METRÔ-SP existem dois modelos de unidades compressoras, conhecidas como D4A e VV120. O Modelo D4A possui capacidade de produzir 600 l/min, com potência nominal de 5,5KW, enquanto que o compressor VV120 é mais eficiente, pois consegue produzir 1100l/min com 7,5KW.

Os dois modelos operam com compressores a pistão. Esse tipo de compressor, apesar de possuir desvantagens como contaminar o ar comprimido com óleo, possui

elevados níveis de ruído e alto consumo de energia, são amplamente utilizados em trens devido a sua robustez e facilidade de manutenção.

Vale destacar que, no METRÔ-SP, devido a necessidade de atualização tecnológica, os modelos D4A estão sendo gradativamente substituídos pelos VV120, que além de serem mais eficientes, produzem menos ruídos e vibrações que o D4A.

### **Sistemas de controle da pressão**

O controle da pressão na tubulação principal é feito através de pressostatos, que fazem a partida dos compressores quando a pressão na tubulação cai abaixo de 130 psi e desligam os mesmos ao atingir 150 psi. Esses valores garantem que a pressão do sistema esteja acima dos 93 psi, valor necessário para o correto funcionamento do sistema de freios.

Nas frotas E, I, J, K e L, quando a pressão cai abaixo dos 130 psi, todos os compressores entram em funcionamento de maneira sincronizada.

Entretanto, nas frotas G e H, somente parte dos compressores são selecionados pelo sistema informatizado do trem (TCMS) para entrar em funcionamento. Neste caso, o TCMS faz o revezamento entre os compressores a fim de equilibrar o número de partidas entre os equipamentos.

Conforme explica SCHUMANN (2008), a vantagem do controle por seleção de compressores é o de reduzir o número total de partidas de cada equipamento.

A redução do número de partidas resulta em menor desgaste do motor elétrico e dos componentes do compressor, além de tornar o sistema mais eficiente.

## **TRENS FORA DE SERVIÇO**

Os trens podem ser retirados de operação por necessidade de manutenção, treinamento, limpeza, redução programada ou encerramento do horário de operação. Nestas situações, os trens são estacionados nos pátios ou em estacionamentos localizados ao longo da linha.

### **Função *stand-by***

Quando a composição permanece fora de operação (sem comando ativo) por mais de 15 minutos, a função *stand-by* é ativada automaticamente pela rede informatizada do trem (TCMS), a fim de poupar energia. Nesta condição, a iluminação principal do carro é desligada, ficando apenas acesa a iluminação de emergência. Já o sistema de ar condicionado permanece apenas no modo ventilação, renovando o ar dentro do salão.

Antes de entrar em operação comercial, o trem passa por diversos testes e inspeções que são conhecidas como preparação do trem.

Em *stand-by*, os sistemas eletrônicos de controle permanecem ativos e a tubulação permanece carregada, devido a isso, a composição pode ser retirada de *stand-by* e, em seguida, preparada para entrar em operação comercial.

### **Trens fora de serviço – Linha 2**

A Linha 2 é uma exceção, pois os trens não entram em *stand-by* automaticamente, isso ocorre devido ao fato do trem fora de operação estar sempre com uma das cabines

ativa (com comando). Esta é uma característica do CBTC da Linha 2, cujo o projeto prevê que o trem sempre esteja pronto para entrar em operação comercial.

No CBTC, existe a previsão de implantação da função *Train Wake Up* (TWU). Esta função permitirá desligar e religar totalmente o trem de maneira remota, pelo Centro de Controle.

### **Consumo de energia dos diversos sistemas dos trens**

Para estimar a energia consumida pelos sistemas dos trens, na maior parte dos casos, foram utilizados os dados de potência informados pelos fabricantes.

No caso dos sistemas de ar condicionado, devido a sua elevada potência e grande variação do consumo, optou-se por instrumentar o equipamento a fim de se obter estimativas mais precisas.



Figura 11 - Wattímetro instalado na alimentação de uma unidade de ar-condicionado. As estimativas do consumo de energia encontram-se no anexo “memórias de cálculo”.

### **PROPOSTAS DE AÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Nos próximos itens, serão descritas as oportunidades de melhoria do desempenho energético. As escolhas das ações foram baseadas na expertise do autor e, após reuniões técnicas, nas considerações feitas pelo coordenador de engenharia de operações do METRÔ-SP.

Os cálculos dos potenciais de cada ação podem ser consultados no “memórias de cálculo”.

## **DESLIGAMENTO DO SISTEMA DE AR CONDICIONADO E VENTILAÇÃO DOS TRENS ESTACIONADOS NOS PÁTIOS**

### **Recomendações técnicas**

- 1) Nas linhas 1, 2 e 3, quando o trem for recolhido e estacionado após o final da operação comercial, não é necessário que o sistema de ar condicionado permaneça em funcionamento (refrigerando o salão de passageiros ou no modo ventilação), pois a composição somente prestará serviço no próximo dia. Sendo assim, é recomendado desligar totalmente esse sistema, após o recolhimento no período noturno. Nos trens das linhas 1, 2 e 3, essa ação pode ser feita através da IHM do console de operação do trem.
- 2) Durante o dia, quando os trens forem estacionados, recomenda-se mantê-los no modo ventilação. Não é aconselhado o desligamento da ventilação durante o dia, a fim de evitar o superaquecimento do salão de passageiros e permitir que o trem possa retornar para a operação comercial mais rapidamente. Nas linhas 1 e 3, os trens desligam a refrigeração e passam para o modo ventilação

automaticamente (função *stand-by*), não sendo necessário nenhuma intervenção humana. Entretanto, na linha 2, o trem deverá ser configurado para o modo ventilação através da IHM.

### **Potencial ao desligar a ventilação / ar condicionado - período noturno**

Tabela 1 – Potencial de economia na linha 1 (período noturno)

Economia anual de energia	1,0 GWh/ano
Tempo de retorno ( <i>Payback</i> )	8 Dias
Emissão evitada de CO <sub>2</sub>	76 tCO <sub>2</sub> /ano

Tabela 2 – Potencial de economia na linha 2 (período noturno)

Economia anual de energia	8,2 GWh/ano
Tempo de retorno ( <i>Payback</i> )	1 Dias
Emissão evitada de CO <sub>2</sub>	618 tCO <sub>2</sub> /ano

Tabela 3 – Potencial de economia na linha 3 (período noturno)

Economia anual de energia	1,4 GWh/ano
Tempo de retorno ( <i>Payback</i> )	6 Dias
Emissão evitada de CO <sub>2</sub>	106 tCO <sub>2</sub> /ano

### **Potencial ao configurar os trens para o modo ventilação - período diurno**

Tabela 4 - Potencial de economia na linha 2 (período diurno)

Economia anual de energia	0,4 GWh/ano
Tempo de retorno ( <i>Payback</i> )	9 Dias
Emissão evitada de CO <sub>2</sub>	33 tCO <sub>2</sub> /ano

**Observações:** Com o desligamento do sistema de ar condicionado e ventilação, além de economizar energia, os filtros de ar serão poupados. Portanto, essa ação contribuirá com a redução dos custos de manutenção.

## **DESLIGAMENTO DOS TRENS ESTACIONADOS NOS PÁTIOS**

### **Recomendações técnicas**

- 1) Nas vésperas dos finais de semana e feriados, recomenda-se o desligamento dos trens após o final da operação comercial.
- 2) É estimado o número de trens que pode permanecer desligado:
  - a) Vésperas dos sábados: 06 trens na L1, 04 trens na L2 e 06 trens na L3.
  - b) Vésperas dos domingos e feriados: 08 trens na L1, 06 trens na L2, 08 trens na L3.
- 3) Recomenda-se sempre deixar alguns trens reservas ligados e preparados.
- 4) Nas Linhas 1 e 3, deve-se priorizar o desligamento dos trens das frotas E e H , visto que estes possuem o sistema de tração menos eficiente (METRÔ-SP, 2016).
- 5) Após a liberação da função TWU, do sistema CBTC, o desligamento dos trens poderá ser feito remotamente, pelo Centro de Controle.

### **Potencial de economia (L1, L2 e L3)**

Tabela 5 - Desligamento dos trens nas vésperas de sábados

Economia anual de energia	0,7 GWh/ano
Tempo de retorno ( <i>Payback</i> )	11 Dias
Emissão evitada de CO <sub>2</sub>	54 tCO <sub>2</sub> /ano

Tabela 6 - Desligamento dos trens nas vésperas de domingos e feriados

Economia anual de energia	1,9 GWh/ano
Tempo de retorno ( <i>Payback</i> )	4 Dias
Emissão evitada de CO <sub>2</sub>	141 tCO <sub>2</sub> /ano

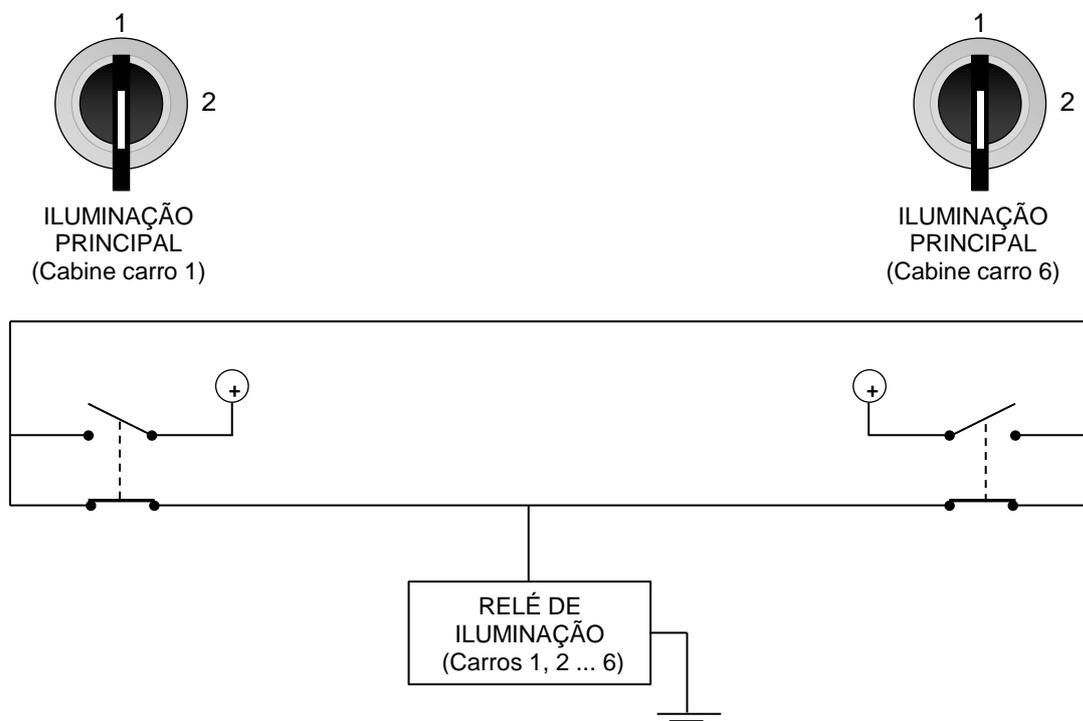
**Observação:** Esse estudo foi baseado no trabalho de RAMOS *et al.* (2004)

## INSTALAÇÃO DE CHAVES PARA DESLIGAR A ILUMINAÇÃO PRINCIPAL

Na situação atual, a iluminação principal somente é desligada após o trem ser estacionado e entrar automaticamente no modo *stand-by*. No caso da linha 2, mesmo após o recolhimento da composição, a iluminação permanece totalmente acesa, pois a função *stand-by* não é ativada (o trem permanece com comando ativo pelo CBTC).

### Recomendações técnicas

- 1) Recomenda-se a instalação de chaves nas cabines dos trens, a fim de propiciar o desligamento manual da iluminação principal.



**Figura 12 - Circuito simplificado para Iluminação Principal**

- 2) Por segurança, a iluminação de emergência não deverá ser desligada por chaves.

- 3) Essa função poderá ser solicitada na especificação de novos trens. Neste caso, poderá ser implementada via rede de dados, possibilitando o desligamento da iluminação através da cabine de comando ou remotamente pelo CCO.

### **Potencial de economia**

Tabela 7 – Instalação de chaves para desligar a iluminação principal

Economia anual de energia	0,3 GWh/ano
Tempo de retorno ( <i>Payback</i> )	26 Dias
Emissão evitada de CO <sub>2</sub>	23 tCO <sub>2</sub> /ano

**Observações:** Além da economia de energia, com essa ação, haverá a diminuição dos custos de manutenção, devido à redução de falhas nos equipamentos da iluminação.

### **RETROFIT DA ILUMINAÇÃO PRINCIPAL DA FROTA H**

Os trens da frota H possuem a iluminação principal composta por lâmpadas fluorescentes T5. Essa é a única frota em que não houve o *retrofit* da iluminação, com a substituição por LED. Apesar da lâmpada T5 ser o melhor modelo entre as fluorescentes, as lâmpadas LED possuem eficiência e vida útil superiores.

### **Recomendações técnicas**

- 1) Recomenda-se converter a iluminação principal da frota H para LED. Para isso, é necessário alterar a alimentação do circuito de iluminação de 72Vcc para 220Vca.
- 2) A iluminação de emergência não deve ser alterada.

Tabela 8 - Instalação de chaves para desligar a iluminação principal

Economia anual de energia	0,327 GWh/ano
---------------------------	---------------

## 26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Tempo de retorno ( <i>Payback</i> )	10 Meses
Emissão evitada de CO <sub>2</sub>	24,6 tCO <sub>2</sub> /ano

---

**Observações:** Além da economia de energia, haverá a redução com os custos de manutenção, pois a vida útil do LED é superior à vida útil da lâmpada fluorescente.

A redução da carga térmica da iluminação economizará energia no ar condicionado.

### **STAND-BY NO SISTEMA CBTC**

Por uma característica de projeto, o sistema CBTC mantém o trem com o comando ativo, impossibilitando a entrada do modo *stand-by*. Neste caso, o trem permanece com o ar condicionado no modo automático, refrigerando o salão. Além disso, a iluminação principal e os faróis são mantidos acesos.

É desejável que o trem entre em *stand-by* automaticamente, principalmente, porque o sistema CBTC irá substituir o sistema ATC nas linhas 1 e 3.

### **Recomendações técnicas**

- 1) Recomenda-se alterar o circuito elétrico da composição, nas linhas operadas com CBTC, de maneira que se possa deixar o trem sem comando ativo. Pois dessa maneira, a composição entrará automaticamente em *stand-by*.

### **Potencial de economia**

Tabela 9 – Stand-by no sistema CBTC

Economia anual de energia	0,01	GWh/ano
Tempo de retorno ( <i>Payback</i> )	33	Meses
Emissão evitada de CO <sub>2</sub>	0,6	tCO <sub>2</sub> /ano

---

A implantação desta proposta garantirá que a refrigeração e a iluminação principal sejam desligadas após o trem ser retirado de serviço, pois trata-se de uma função automática. Além disso, essa ação permitirá que os faróis sejam desligados, após a remoção do comando ativo.

### **DESLIGAMENTO AUTOMÁTICO DA VENTILAÇÃO EM STAND-BY**

Quando os trens entram em *stand-by*, apesar do ar condicionado ser desligado, a ventilação permanece em funcionamento. Porém, a fim de poupar energia, a ventilação poderia ser desligada automaticamente pelo sistema TCMS, desde que ela fosse religada quando a temperatura interna ultrapassar a 32°C. Essa medida é necessária para evitar o superaquecimento do salão de passageiros.

### **Recomendações técnicas**

- 1) Sugere-se que este item seja um requisito de projeto para os novos trens. Durante o *stand-by*, a ventilação do salão de passageiros deverá permanecer desligada enquanto a temperatura interna estiver a abaixo de 32°C. A ventilação deverá ser religada automaticamente quando a temperatura estiver igual ou acima de 32°C.
- 2) Estima-se que essa proposta não irá elevar significativamente os custos de um trem novo, pois se trata de uma programação simples de ser implantada.

### **Potencial de economia**

- Desligamento automático da ventilação nas condições não necessárias.
- Redução dos custos de manutenção, pois os filtros de ar serão poupados.

## **REDUÇÃO DA PRESSÃO DE TRABALHO EM MODO STAND-BY**

Quando os trens entram em *stand-by*, a pressão do sistema pneumático permanece dentro dos seus valores normais de trabalho, variando entre 120 a 135 psi. Entretanto, a pressão poderia ser mais baixa quando o trem estiver fora de serviço.

De acordo com MONTEIRO (2005, p. 34) “O aumento de 1 bar no ajuste da pressão de desarme leva a um aumento de 6% a 10% na potência consumida pelos motores dos compressores, para pressões em torno de 6 a 7 bar.”

### **Recomendações técnicas**

- 1) Durante a permanência do trem em *stand-by*, é recomendado que a pressão seja reduzida, passando a trabalhar na faixa de 105 a 120 psi.
- 2) Manter este nível de pressão, enquanto o trem está fora de serviço, não irá gerar transtornos operacionais, pois ao retirar a composição de *stand-by*, a pressão retornará rapidamente para os níveis normais de trabalho.
- 3) Essa implantação poderá ser feita totalmente através de software nos novos trens.

### **Potencial de economia**

Com o trem fora de serviço, a economia será de 6 a 10 % no sistema pneumático.

## **MONITORAMENTO DE VAZAMENTOS NO SISTEMA PNEUMÁTICO**

Os trens não possuem um sistema que detecte vazamentos. O alto consumo de ar comprimido, causado por vazamentos, além de diminuir a eficiência energética do sistema, pode resultar em transtornos durante a operação comercial.

### **Recomendações técnicas**

- 1) Recomenda-se que o sistema informatizado do trem (TCMS) monitore continuamente a pressão no encanamento principal. Caso a pressão reduza em velocidade superior aos níveis normais, o sistema deverá alarmar a ocorrência de alto consumo de ar comprimido.
- 2) Sugere-se que o TCMS meça o tempo que os compressores levam para recarregar a tubulação. Após a partida dos compressores, se a pressão não atingir o nível de desligamento no tempo estabelecido, o sistema deverá emitir um alarme.

### **Potencial de economia**

- Economia de energia elétrica, pois o vazamento será reparado rapidamente;
- Redução de transtornos operacionais causados por vazamentos;
- Menor desgaste dos elementos do sistema pneumático.

### **CONTROLE DOS COMPRESSORES POR SELEÇÃO DA REDE**

Recomenda-se que se utilize a partida dos compressores através de seleção pela rede informatizada (TCMS).

### **TRAÇÃO COM MOTORES SÍNCRONOS DE IMÃ PERMANENTE**

As soluções com motores de ímã permanente, apesar de mais eficientes, normalmente possuem custos maiores. Portanto, recomenda-se que durante o projeto de um novo trem, seja feita a comparação entre as tecnologias e seu custo-benefício.

## **TREINAMENTO DAS EQUIPES**

Muitas ações apresentadas neste trabalho são mudanças de rotinas operacionais e demandam a participação dos empregados operativos da empresa.

Sugere-se aplicar treinamento às equipes do METRÔ-SP, a fim de esclarecer os objetivos das novas ações de eficiência energética e seus benefícios.

## **Divulgação**

Foi desenvolvida uma arte para servir como ilustração durante a campanha. Essa arte poderá ser utilizada na confecção de panfletos, banners, além de compor o material didático do treinamento.



**Figura 13 - Figura da campanha**

## ANÁLISE DOS RESULTADOS

As propostas que envolvem ações operacionais possuem um excelente custo-benefício, haja vista, que os investimentos de maior retorno necessitam apenas, para a sua implantação, de novos procedimentos operacionais, treinamento das equipes operativas, ou ainda, em alguns casos, pequenas alterações de projeto.

## SÍNTESE DAS PROPOSTAS – AÇÕES OPERACIONAIS

**Tabela 10 – AÇÕES OPERACIONAIS**

MEDIDAS DE MELHORIAS	PAYBACK	CO2 EVITADO	ECONOMIA ANUAL
Desligamento do ar condicionado e ventilação dos trens durante o período noturno - L1	8 dias	76 tCO2	1,02 GWh
Desligamento do ar condicionado e ventilação dos trens durante o período noturno - L2	8 dias	70 tCO2	0,93 GWh
Desligamento do ar condicionado e ventilação dos trens durante o período noturno - L3	6 dias	106 tCO2	1,41 GWh
Configurar os trens para o modo ventilação no período diurno – L2	9 dias	33 tCO2	0,45 GWh
Desligamento dos trens nas Linhas 1, 2 e 3 - Véspera de sábado	11 dias	54 tCO2	0,72 GWh
Desligamento dos trens nas Linhas 1, 2 e 3 - Véspera de domingo e feriados	7 dias	88 tCO2	1,18 GWh
<b><i>Economias Totais (Anual)</i></b>			<b><i>5,71 GWh</i></b>

## SÍNTESE DAS PROPOSTAS – MELHORIAS TÉCNICAS DOS TRENS ATUAIS

**Tabela 11 – Ações de melhorias dos trens atuais**

MEDIDAS DE MELHORIAS	PAYBACK	CO2 EVITADO	ECONOMIA ANUAL
Instalação de chaves para desligamento da iluminação principal - L2	78 dias	23 tCO2	0,30 GWh

<i>Retrofit</i> da iluminação principal da frota H	10 meses	25 tCO <sub>2</sub>	0,33GWh
<i>Stand-by</i> no CBTC – L2	33 meses	0,6 tCO <sub>2</sub>	0,01 GWh
<b><i>Economias Totais (Anual)</i></b>			<b><i>0,34 GWh</i></b>

## SÍNTESE DAS PROPOSTAS - NOVOS PROJETOS

- Desligamento automático da ventilação em *stand-by*;
- Redução da pressão de trabalho em modo *stand-by*;
- Monitoramento de vazamentos no sistema pneumático;
- Controle dos compressores por seleção da rede;
- Tração com motores síncronos de ímã permanente.

Essas propostas são preferíveis para serem implantadas nos trens que serão adquiridos futuramente. A maioria dessas ações não elevarão significativamente os custos das novas composições, pois se trata de melhorias de *softwares*, não sendo necessário o investimento em *hardwares* adicionais.

## CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho demonstram que existem diversas oportunidades de redução de consumo de energia, principalmente, para os momentos em que os trens encontram-se fora de serviço.

Além disso, os sistemas auxiliares, como ar condicionado, iluminação e pneumática, possuem grande relevância e potencial para receber ações de eficiência energética.

Nesse artigo, foram apresentadas propostas com mudanças de rotinas operacionais, melhorias técnicas para os trens atuais e para os novos projetos. É estimado que as

somas das ações operacionais e melhorias técnicas sejam capazes de poupar 6,05 GWh por ano, o que evitará emissões de 475 toneladas de CO<sub>2</sub>.

Além disso, foram elaboradas cinco propostas para os projetos dos novos trens. Essas ações poderão colaborar com o crescimento sustentável do sistema Metroferroviário.

Vale destacar que o assunto referente à eficiência energética está alinhado com os objetivos estratégicos do METRÔ-SP, como, redução do custeio, melhoria do desempenho e da imagem da empresa.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ABESCO. **Como funciona um projeto de Eficiência Energética**. Disponível em: <<http://www.abesco.com.br/pt/como-funciona-um-projeto-de-eficiencia-energetica>>.

Acesso em: 10 nov. 2019.

ANDRADE Carlos Eduardo Sanches de; D'AGOSTO, Márcio de Almeida. Análise da emissão de CO<sub>2</sub> em Sistemas Metroviários. In: **19ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**, 2013, São Paulo. Disponível em:<<http://www.aeamesp.org.br/biblioteca/stm/19smtf130911T14ap.pdf>>. Acesso em: 09 out. 2018.

CLÍMACO, Fernando Gomes. **Gestão de consumidores livres de energia elétrica**. 2010. Dissertação (Mestrado em Energia) - USP, Programa de pós-graduação em energia, São Paulo, 2010. Disponível em: <https://mercadolivredeenergia.com.br/wp-content/uploads/2012/05/DissFernando.pdf>. Acesso em: 10 set. 2018.

FILHO, Alberto Francisco Dos Santos; QUEIROZ, Luiz Carlos Evangelista de; PIMENTA, Marcio Annibal; ROSA, Marcos Jurado. **Uso de simulação para análise de estratégias que visam a economia de energia em sistemas Metroferroviários e tecnologias disponíveis de armazenamento**. 2016. Monografia (Especialista em Tecnologia Metroferroviária) - Escola politécnica, USP, São Paulo, 2016. Intranet do METRÔ-SP.

**26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**



GALOCHA, Jackson de Carvalho. Monitoramento on-line do consumo e da qualidade de energia consumida pelo Metrô de São Paulo. In: **25ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROVIÁRIA**, 2019, São Paulo. Disponível em: <<http://www.semanadetecnologia.com.br/25semana/chronosly/t18/>>. 10 nov. 2019.

GONZÁLEZ-GIL, A; PALACIN, R; BATTY, P; POWELL, JP. **A systems approach to reduce urban rail energy consumption**. Energy Conversion and Management, NewRail – Centre for Railway Research, Newcastle University, School of Mechanical and Systems Engineering, Stephenson Building, Newcastle upon Tyne NE1 7RU, UK, ed. 80, p. 509-524, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.01.060>. Acesso em: 1 fev. 2020.

LONDON UNDERGROUND (Inglaterra). **New Tube for London: Feasibility Report**. 2014. Disponível em: [content.tfl.gov.uk/ntfl-feasibility-report.pdf](http://content.tfl.gov.uk/ntfl-feasibility-report.pdf). Acesso em: 17 abr. 2019

MENKES, Monica. **Eficiência energética, políticas públicas e sustentabilidade**, 2004. Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Disponível em: [https://hosting.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Arquitetural/efici%eancia%20energ%.e9tica/Pesquisa/eficiencia\\_energetica\\_politicas\\_publicas\\_e\\_sustentabilidade.pdf](https://hosting.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Arquitetural/efici%eancia%20energ%e9tica/Pesquisa/eficiencia_energetica_politicas_publicas_e_sustentabilidade.pdf). Acesso em: 20 fev. 2020.

METRÔ-SP. **Medição do consumo de energia dos trens – instrumentação e tratamento dos dados**: RT-9.86.00.00/700-002, 2016. Intranet do METRÔ-SP.

METRÔ-SP. **Relatório de integrado**. 2020. Disponível em: <<https://transparencia.metrosp.com.br/sites/default/files/Relat%C3%B3rio%20Integrado%20%E2%80%93%20Metr%C3%B4%20de%20S%C3%A3o%20Paulo%20-%202019.pdf>> Acesso em: 01 mar. 2020.

MONTEIRO, M.A.G.; ROCHA, C.A. **Eficiência energética em sistemas de ar comprimido**. Rio de Janeiro: Eletrobras; Procel, 2005. 208 p. (Manual Prático).

NOGUEIRA, Edemilson. **Introdução à Engenharia Econômica**. São Carlos: EdUFSCar, 2011. 111 p. (Coleção UAB-UFSCar).

**26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**



PEARCE, Phil. Advances in Energy Efficiency of Trains for New South Wales. In: **Conference On Railway Engineering Wellington, 2010**, Nova Zelândia.

SCHUMANN, Stanley Paul. Air Compressor Systems for Passenger Rail Applications. In: **International compressor engineering conference**, 2008, S. Carolina, USA. Disponível em: <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2917&context=icec>.

Acesso em: 3 jun. 2019.

RAMOS, Adalberto de Paula; MARTINS, Edivaldo Wagner; IGARASHI, Miguel Yugi.

**Estudo para a racionalização de energia elétrica consumida nos trens do METRÔ-SP.**

2004. 48 f. Monografia (Especialista em Tecnologia Metro-Ferroviária) - Escola politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

SENAI-SP. **Diagnóstico De Eficiência Energética**: Escola SENAI “Jorge Mahfuz” Pirituba. In: Relatório. 2017. Arquivo digital fornecido na graduação em eficiência energética.

SESTINI, Marcelo F. **A importância do inventário de carbono para empresas**, 2019. Disponível em: <<https://www.teraambiental.com.br/blog-da-tera-ambiental/a-importancia-do-inventario-de-carbono-para-empresas>>. Acesso em: 01 Dez. 2019.

SOUZA, Conrado Grava de. O IMPACTO DA TARIFA DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA METROFERROVIÁRIO. In: **9ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROVIÁRIA**, 2003, São Paulo. Disponível em: <[www.aeamesp.org.br/biblioteca/stm/9SMTF0309T16.pdf](http://www.aeamesp.org.br/biblioteca/stm/9SMTF0309T16.pdf)>.

Acesso: 10 out. 2018.

VINBERG, Erik Magni. **Energy Use in the Operational Cycle of Passenger Rail Vehicles**. 2018. MASTER OF SCIENCE THESIS (MSc thesis in Vehicle Engineering) - KTH Royal Institute of Technology, School of Engineering Sciences, Department of Aeronautical and Vehicle Engineering, STOCKHOLM, SWEDEN, 2018. Disponível em: <http://www.swedtrain.org/wp-content/uploads/sites/4/2019/05/Energy-use-in-the-operational-cycle-of-passenger-rail-vehciles-Erik-Vinberg.pdf>. Acesso em: 1 mar. 2020.

## ANEXO - MEMÓRIAS DE CÁLCULO

### ESTIMATIVAS DE CONSUMO DE ENERGIA

#### Consumo de energia elétrica na iluminação

#### Frotas E, G, K, L, I

Tabela 12 - Consumo de energia elétrica na iluminação nas frotas E, G, K, L, I

EQUIPAMENTOS	POTÊNCIA UNID.	QUANTIDADE POR TREM	POTÊNCIA POR TREM
Iluminação Principal Lâmpada Tubular LED	18 W	304	5472 W
Iluminação de Emergência Lâmpada Fluorescente c/ Reator	35 W	24	840 W

Observação: Entre essas frotas, existem pequenas diferenças no número de lâmpadas.

#### Frota H

Tabela 13 - Consumo de energia elétrica na iluminação na frota H

EQUIPAMENTO	POTÊNCIA UNID.	QUANTIDADE POR TREM	POTÊNCIA POR TREM
Iluminação Principal Lâmpada Fluorescente t5 c/ reator	32 W	304	9728 W
Iluminação de Emergência Lâmpada Fluorescente t5 c/ reator	32 W	24	768 W

#### Frota M

Tabela 14 - Consumo de energia elétrica na iluminação na frota M

EQUIPAMENTOS	POTÊNCIA UNID.	QUANTIDADE POR TREM	POTÊNCIA POR TREM
<b>Iluminação Principal</b> Luminárias Longas - Módulos LED	22,5 W	28	630 W
<b>Iluminação Principal</b> Luminárias Curtas - Módulos LED	9 W	52	468 W
<b>Iluminação de Emergência</b> Luminárias Longas - Módulos LED	22,5 W	28	630 W

**Iluminação de Emergência**  
Luminárias Curtas - Módulos LED

9 W

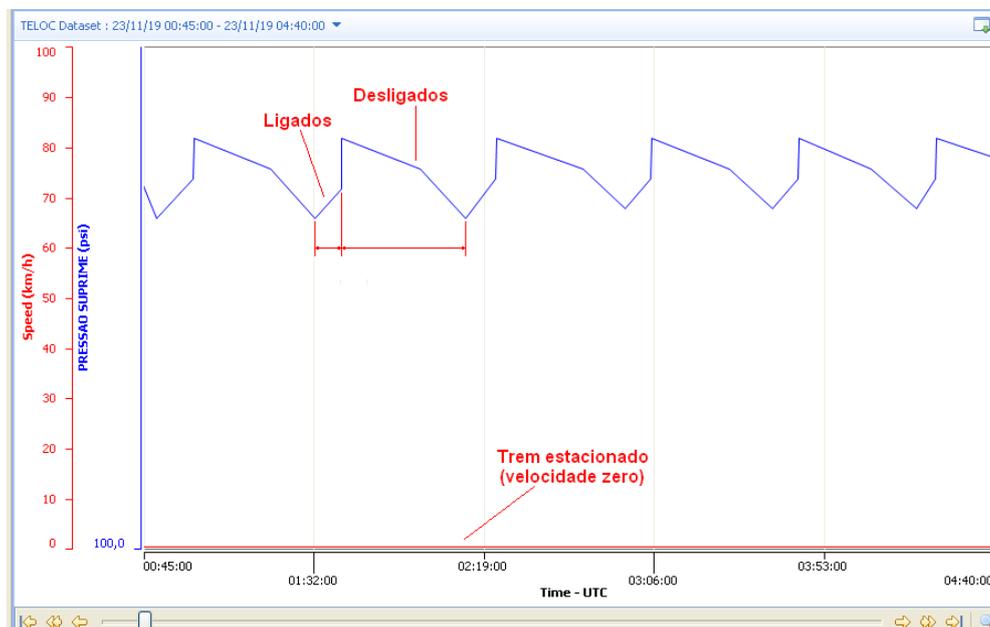
28

252 W

## Consumo de energia elétrica pelo sistema pneumático

Estimou-se o consumo de energia utilizando o ciclo de trabalho, ou seja, a proporção de tempo em que os compressores permanecem em funcionamento.

Para se calcular o ciclo de trabalho, foram utilizados os dados gravados no registrador do trem I17. O período avaliado foi das 00:45 às 04:40 do dia 23/11/2019, situação em que o trem foi retirado de serviço e estacionado, após o encerramento da operação comercial.



**Figura 14- Ciclo de trabalho dos compressores da frota I**

Com base neste levantamento, para os momentos em que o trem está fora de serviço, estima-se que o ciclo de trabalho dos compressores seja em torno de 20%.

Tabela 15 - Consumo de energia elétrica nos compressores

EQUIPAMENTOS	POTÊNCIA UND.	QUANTIDADE	CICLO DE TRABALHO	POTÊNCIA MÉDIA TREM
Moto-Compressor	8500 W	4	20%	6800 W

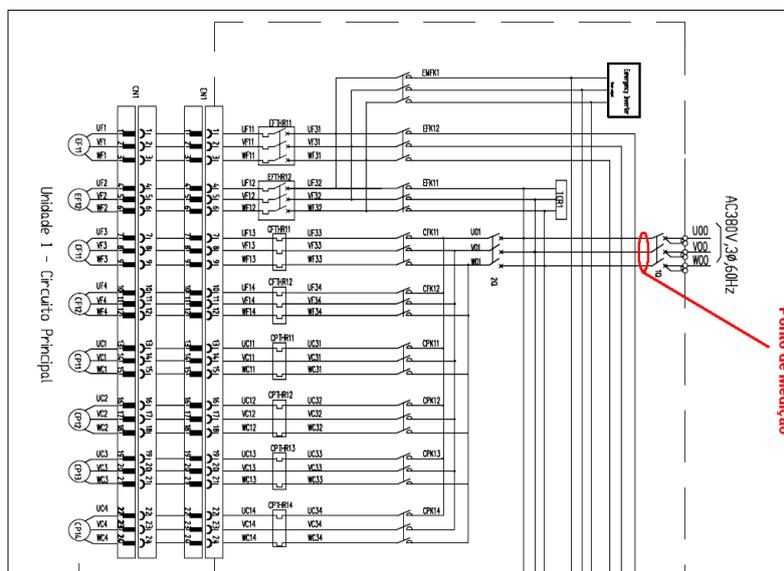
Observação: Essa estimativa foi utilizada nos cálculos de todas as frotas.

## Consumo de energia elétrica no sistema de ar condicionado

### 1 – Medição da potência dos estágios de refrigeração

No dia 19/06/2020, com o trem I05 estacionado no pátio da Linha 2 (Pátio Tamanduateí), utilizou-se um wattímetro para medir a corrente consumida por uma unidade de ar condicionado do carro 1. As correntes foram medidas para os estágios de refrigeração: “alta”, “média”, “baixa” e “ventilação”.

O instrumento foi instalado a fim de se medir a corrente na entrada da unidade de ar condicionado, conforme indicado no diagrama a seguir.



**Figura 15- Ponto de medição – Circuito elétrico do ar condicionado da frota I**

A potência elétrica, dos diversos estágios, foi calculada através da equação de potência para circuitos trifásicos.

$$P_{cr} = \sqrt{3} V_f I_f \cos(\theta)$$

Nessa equação,  $P_{cr}$  é a potência ativa,  $V_f$  é a tensão de fase do CVS (380V) e  $I_f$  é a corrente de linha medida. Utilizou-se o  $\cos(\theta)$  descrito no manual do fabricante de 0,86. A tabela a seguir descreve da potência do ar-condicionado para cada estágio:

Tabela 16 - Consumo de energia elétrica pelo ar condicionado

MODO	CORRENTE DE LINHA	TENSÃO DE FASE	POTÊNCIA APARENTE	COS $\theta$	POTÊNCIA ATIVA POR CIRCUITO	POTÊNCIA POR CARRO
VENTILAÇÃO	2,5 A	380,0 V	1645 VA	0,86	1415 W	2,8 kW
REFRIG. BAIXA	18,5 A	380,0 V	12176 VA	0,86	10472 W	20,9 kW
REFRIG. MÉDIA	24,3 A	380,0 V	15994 VA	0,86	13755 W	27,5 kW
REFRIG. ALTA	31,1 A	380,0 V	20469 VA	0,86	17604 W	35,2 kW

## 2 – Potência média do ar condicionado

No dia 19/06/2020, das 11:00 às 12:10, foi registrado o ciclo de trabalho do ar-condicionado do carro 1 do trem I05. A temperatura externa, medida pelos sensores do trem, estava em 28°C.

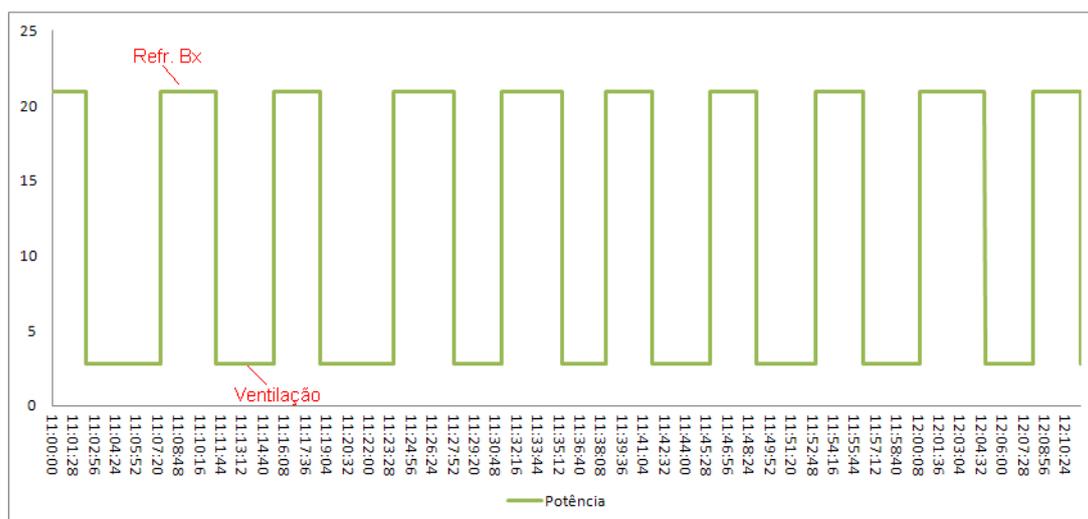


Figura 16- Potência do sistema de ar condicionado em dos carros da frota I

## 26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Durante o teste, foi possível observar que o ar-condicionado entra no modo “refrigeração baixa” (20,9 kW) quando a temperatura interna se eleva e atinge 24°C. O sistema retorna para o modo ventilação (2,8 kW) quando a temperatura interna reduz para 22°C.

De acordo com os dados coletados, quando a temperatura externa está em 28°C, estima-se que a potência média do ar-condicionado seja de 11,8 kW por carro, ou 70,6 kW por trem.

### Consumo de energia elétrica de outros sistemas auxiliares

A seguir, temos a estimativa das potências dos demais sistemas auxiliares somados.

Tabela 17 - Consumo de energia elétrica por outros sistemas auxiliares

EQUIPAMENTO	POTÊNCIA	QUANTIDADE	TOTAL PARCIAL
Indicador de destino	130 W	1	130 W
Unidade controladora de portas (DCU)	15 W	48	720 W
Unidade controladora geral de portas (CGP)	15 W	2	30 W
Monitores Multimídia de Publicidade	80 W	48	3840 W
Sistema TCMS = CPU + 3 IHM	250 W	1	250 W
Armário CBTC/ATC	250 W	2	500 W
Unidade de Freio	40 W	6	240 W
Unidade de Controle da tração	40 W	6	240 W
Unidade de Detecção de incêndio	40 W	6	240 W
Unidade de CFTV	40 W	6	240 W
Sistema Rádio VHF	50 W	1	50 W
RIOM	40 W	8	320 W
Par de Faróis baixos (lâmpadas halógenas)	120 W	1	120 W
<b>TOTAL</b>		<b>6,9 kW</b>	

## **CÁLCULO DE VIABILIDADE**

Em todos os cálculos foram considerados os seguintes parâmetros:

- Rendimento do sistema elétrico: 97,5%.
- Rendimento dos CVS: 90%.
- Fator de emissão médio de CO<sub>2</sub>: 0,075 tCO<sub>2</sub>/MWh (0,000075 tCO<sub>2</sub>/kWh)
- Números de trens da Linha 1: 47 trens.
- Números de trens da Linha 2: 33 trens.
- Números de trens da Linha 3: 50 trens.
- Números de trens da Linha 15: 27 trens.

### **DESLIGAMENTO DO AR CONDICIONADO/VENTILAÇÃO DOS TRENS DURANTE O PERÍODO NOTURNO**

Antes da ação, o cálculo considera que os trens ficam 4 horas em *stand-by*, após o encerramento da operação comercial, com a ventilação em funcionamento (ou ar condicionado na Linha 2). Após essa ação, como esse sistema será desligado, foi considerado “zero” o número de horas que o Ar condicionado/Ventilação será utilizado após o recolhimento do trem.

Nos cálculos a seguir, não foram considerados os 11 trens da frota E, uma vez que nessa frota não há recurso operacional para se desligar a ventilação de todo o trem.

As estimativas dos investimentos são decorrentes dos treinamentos das equipes, como por exemplo, custo de homem-hora dos instrutores, material de treinamento, etc.

**26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**



**Desligamento do ar condicionado/ventilação dos trens durante o período noturno L1**

Potência do sistema - Antes da Ação	17,0 kW
Potência do sistema - Após Ação	17,0 kW
Rendimento do sistema de Alim. Elétrica	90,00%
Rendimento do CVS	97,50%
Horas de uso - Antes da Ação	4 h
Horas de uso - Após a Ação	0 h
Número de trens	36
Dias Considerado no ano	365 d
Fator de Emissão Médio de CO2	0,00007500 tCO2/kWh
Investimento	R\$ 10.000,00

Economia anual de energia	1,0 GWh/ano
Tempo de retorno ( <i>Payback</i> )	8 Dias
Emissão evitada de CO2	76 tCO2/ano
<b>Economia anual</b>	<b>1,0 GWh/ano</b>

**Desligamento do ar condicionado/ventilação dos trens durante o período noturno L2**

Potência do sistema - Antes da Ação	17,0 kW
Potência do sistema - Após Ação	17,0 kW
Rendimento do sistema de Alim. Elétrica	90,00%
Rendimento do CVS	97,50%
Horas de uso - Antes da Ação	4 h
Horas de uso - Após a Ação	0 h
Número de trens	33
Dias Considerado no ano	365 d
Fator de Emissão Médio de CO2	0,00007500 tCO2/kWh
Investimento	R\$ 10.000,00

Economia anual de energia	0,9 GWh/ano
---------------------------	-------------

**26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**



Tempo de retorno ( <i>Payback</i> )	8 Dias
Emissão evitada de CO2	70 tCO2/ano
<b><i>Economia anual</i></b>	
	0,9 GWh/ano

**Desligamento do ar condicionado/ventilação dos trens durante o período noturno L3**

Potência do sistema - Antes da Ação	17,0 kW
Potência do sistema - Após Ação	17,0 kW
Rendimento do sistema de Alim. Elétrica	90,00%
Rendimento do CVS	97,50%
Horas de uso - Antes da Ação	4 h
Horas de uso - Após a Ação	0 h
Número de trens	50
Dias Considerado no ano	365 d
Fator de Emissão Médio de CO2	0,00007500 tCO2/kWh
Investimento	R\$ 10.000,00

Economia anual de energia	1,4 GWh/ano
Tempo de retorno ( <i>Payback</i> )	6 Dias
Emissão evitada de CO2	106 tCO2/ano
<b><i>Economia anual</i></b>	
	1,4 GWh/ano

**CONFIGURAR O AR CONDICIONADO DOS TRENS PARA O MODO VENTILAÇÃO DURANTE O PERÍODO DIURNO - L2**

Para essa estimativa, considerou-se que na Linha 2, cinco trens permanecem fora de serviço durante o dia, no período de vale. Em média, esses trens passam 4 horas estacionados, fora de serviço. Antes da ação, é estimado que a potência média da

**26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**



refrigeração, dos trens estacionados nos pátios, seja em torno de 70,6 kW (potência relativa a 28°C). Após a ação, a potência reduzirá para 17kW (modo ventilação).

**Modo ventilação durante o período diurno - L2**

Potência do sistema - Antes da Ação	70,6 kW
Potência do sistema - Após Ação	17,0 kW
Rendimento do sistema de Alim. Elétrica	90,00%
Rendimento do CVS	97,50%
Horas de uso - Antes da Ação	4 h
Horas de uso - Após a Ação	4 h
Número de trens	5
Dias Considerado no ano	365 d
Fator de Emissão Médio de CO2	0,00007500 tCO2/kWh
Investimento	R\$ 5.000,00

Economia anual de energia	0,45 GWh/ano
Tempo de retorno ( <i>Payback</i> )	9 Dias
Emissão evitada de CO2	33 tCO2/ano
<i>Economia anual</i>	
	0,45 GWh/ano

**DESLIGAMENTO TOTAL DOS TRENS – L1, L2 e L3**

Nessa estimativa, considerou-se que o ano contém 56 sábados, 56 domingos e 10 feriados em dias úteis.

Com base na programação, foi estimado o número de trens que pode ser desligado nas vésperas desses dias (após o recolhimento da composição).

a) Vésperas dos sábados:

**26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**



- 06 trens na Linha 1;
- 04 trens na Linha 2;
- 06 trens na Linha 3.

b) Vésperas dos domingos e feriados:

- 08 trens na Linha 1;
- 06 trens na Linha 2;
- 08 trens na Linha 3.

As estimativas de investimentos são decorrentes dos treinamentos das equipes, como por exemplo, custo de homem-hora dos instrutores, material de treinamento, etc.

**Desligamento dos trens nas Linhas 1, 2 e 3 - Véspera de sábado**

Potência do sistema - Antes da Ação	31,6 kW
Potência do sistema - Após Ação	0,0 kW
Rendimento do sistema de Alim. Elétrica	90,00%
Rendimento do CVS	97,50%
Horas de uso - Antes da Ação	24 h
Horas de uso - Após a Ação	0 h
Número de trens	16
Dias Considerado no ano	52 d
Preço Médio da energia	0,46685 R\$/kWh
Fator de Emissão Médio de CO2	0,00007500 tCO2/kWh
Investimento	R\$ 10.000,00

Economia anual de energia	0,7 GWh/ano
Tempo de retorno ( <i>Payback</i> )	11 Dias
Emissão evitada de CO2	54 tCO2/ano

*Economia anual*

0,7 GWh/ano

**Desligamento dos trens nas Linhas 1, 2 e 3 - Véspera de domingo e feriados**

Potência do sistema - Antes da Ação	31,6 kW
Potência do sistema - Após Ação	0,0 kW
Rendimento do sistema de Alim. Elétrica	90,00%
Rendimento do CVS	97,50%
Horas de uso - Antes da Ação	24 h
Horas de uso - Após a Ação	0 h
Número de trens	22
Dias Considerado no ano	62 d
Preço Médio da energia	0,46685 R\$/kWh
Fator de Emissão Médio de CO2	0,00007500 tCO2/kWh
Investimento	R\$ 10.000,00

Economia anual de energia 1,2 GWh/ano

Tempo de retorno (*Payback*) 7 Dias

Emissão evitada de CO2 88 tCO2/ano

*Economia anual*

1,2 GWh/ano

**INSTALAÇÃO DE CHAVES PARA DESLIGAMENTO DA ILUMINAÇÃO PRINCIPAL**

O cálculo considera, antes da ação, que os trens da linha 2 permanecem 4 horas com a iluminação acesa, após o encerramento da operação comercial. Após a ação, como a iluminação será desligada, foi considerado “zero” o número de horas que a iluminação principal ficará acesa após o recolhimento do trem.

Não foram feitos cálculos de economia de energia decorrentes da instalação desta chave para as linhas 1 e 3. Pois, os trens dessas linhas entram automaticamente em *stand-by*.

As estimativas de investimentos são decorrentes dos materiais necessários para essa alteração, como fiação, chaves e relés.

**Instalação de chaves para desligamento da iluminação principal - L2**

Potência do sistema - Antes da Ação	5,5 kW
Potência do sistema - Após Ação	0,0 kW
Rendimento do sistema de Alim. Elétrica	90,00%
Rendimento do CVS	97,50%
Horas de uso - Antes da Ação	4 h
Horas de uso - Após a Ação	0 h
Número de trens	33
Dias Considerado no ano	365 d
Fator de Emissão Médio de CO2	0,00007500 tCO2/kWh
Investimento	R\$ 30.000,00

Economia anual de energia	0,3	GWh/ano
Tempo de retorno ( <i>Payback</i> )	78	Dias
Emissão evitada de CO2	23	tCO2/ano
<b><i>Economia anual</i></b>	0,3	GWh/ano

**STAND-BY NO CBTC**

O cálculo considera que antes da ação, os trens da linha 2 permanecem 4 horas com os faróis acesos, após o encerramento da operação comercial. Após essa ação, como os faróis serão desligados, foi considerado “zero” o número de horas que os faróis ficaram acesos após o recolhimento do trem.

Essa estimativa considera que as propostas anteriores foram implantadas, ou seja, a iluminação e o ar condicionado dos trens, fora de serviço, serão desligados

**26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**



manualmente pelo operador. Sendo assim, optou-se por calcular somente a energia economizada com o desligamento dos faróis para os trens da linha 2.

As estimativas de investimentos são decorrentes dos materiais necessários para essa alteração, como fiação e chaves.

**Stand-by no CBTC - Linha 2**

Potência do sistema - Antes da Ação	0,14 kW
Potência do sistema - Após Ação	0,0 kW
Rendimento do sistema de Alim. Elétrica	90,00%
Rendimento do CVS	97,50%
Horas de uso - Antes da Ação	4 h
Horas de uso - Após a Ação	0 h
Número de trens	33
Dias Considerado no ano	365 d
Fator de Emissão Médio de CO2	0,00007500 tCO2/kWh
Investimento	R\$ 10.000,00

Economia anual de energia	0,01 GWh/ano
Tempo de retorno ( <i>Payback</i> )	33 Meses
Emissão evitada de CO2	0,6 tCO2/ano
<b><i>Economia anual</i></b>	0,01 GWh/ano

**RETROFIT DA ILUMINAÇÃO PRINCIPAL DA FROTA H**

Nos cálculos a seguir, é comparado o sistema atual, que utiliza lâmpadas fluorescentes T5, com a iluminação em LED. Essa estimativa utiliza o modelo LEDTUBE T5 de 16W, CorePro da Philips.

Para se estimar o investimento necessário nessa modernização, utilizou-se o preço unitário por lâmpada no valor de R\$ 47,95 (preço de mercado) e o número de

**26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**



lâmpadas necessárias para fazer a substituição completa em todos os trens da frota H (2624 lâmpadas).

**Retrofit iluminação: LED - Frota H**

Potência do sistema - Antes da Ação	5,08 kW
Potência do sistema - Após Ação	2,6 kW
Rendimento do sistema de Alim. Elétrica	90,00%
Rendimento do CVS	97,50%
Horas de uso - Antes da Ação	20 h
Horas de uso - Após a Ação	20 h
Número de trens	16
Dias Considerado no ano	365 d
Fator de Emissão Médio de CO2	0,00007500 tCO2/kWh
Investimento	R\$ 125.820,80

Economia anual de energia	0,327 GWh/ano
Tempo de retorno ( <i>Payback</i> )	10 Meses
Emissão evitada de CO2	24,6 tCO2/ano
<i>Economia anual</i>	0,327 GWh/ano