



PROPOSTA DE AUTOMAÇÃO APLICADA EM COLETOR DE CORRENTE PARA TRÓLEBUS

Evandro Rostirolla Bortoloto
evandrobor@gmail.com
ITA

Francisco Carlos Parquet Bizarria
fcpbiz@gmail.com
UNITAU

José Walter Parquet Bizarria
jwpbiz@gmail.com
UNITAU

Resumo: Este trabalho apresenta as principais etapas realizadas no desenvolvimento de uma proposta de sistema para automatizar a operação do coletor de corrente que é utilizado em Trólebus, visando, principalmente, monitorar continuamente o contato com rede elétrica aérea e, também, prover o movimento coordenado de recolhimento em situações de desconexão do circuito, a fim de reduzir a incidência de colisões entre coletor e a estrutura mecânica dessa rede. Essas melhorias são direcionadas para contribuir com a qualidade no serviço de transporte coletivo, fator que corrobora para ampliar novas rotas de transporte coletivo em massa que utilizem fontes renováveis de energia, em substituição aos tradicionais veículos movidos a combustão com combustível fóssil. O método empregado e os detalhes contidos nessa proposta permitem utilizar uma parte expressiva do projeto tradicional do coletor de corrente, sendo sugerida a substituição de partes, adequação da estrutura mecânica relacionada aos pontos de fixação dos componentes, instalação de elementos sensores, elementos atuadores e controlador programável com algoritmo dedicado para essa aplicação. Os resultados positivos observados nas avaliações computacionais do circuito eletrônico e pneumático, os quais são gerenciados por algoritmo de controle dedicado para esses sistemas, sugerem que os recursos e componentes propostos neste trabalho quando forem efetivamente integrados em Trólebus serão capazes de atenderem as finalidades para as quais se destinam.

Palavras Chave: Automação - Coletor de Corrente - Transporte Coletivo - Trólebus -

1. INTRODUÇÃO

As principais medidas que foram elaboradas pelos países integrantes da Organização das Nações Unidas para reduzir a emissão de gases nocivos na camada de ozônio e, também, minimizar outros impactos relacionados ao efeito estufa estão contidas no Protocolo de Kyoto (1997), sendo que estão destacadas nesse protocolo aquelas medidas provenientes da queima de combustível fóssil para prover a crescente necessidade de mobilidade urbana (BARCZAK; DUARTE, 2012).

Diversas estratégias são utilizadas a fim de mitigar a emissão desses gases e contribuir com o crescimento sustentável do planeta, em particular, o uso de tecnologias limpas e provindas de fontes renováveis, o desenvolvimento de sistemas embarcados com maior eficiência energética e o incentivo a adesão de veículos não poluentes para o transporte coletivo em massa nas áreas urbanas (SILVA; SOUZA, 2005).

Entre os diferentes veículos automotores de grande porte que são aplicados no transporte coletivo em vias públicas convencionais nos grandes centros urbanos, podem ser destacados para essa aplicação aqueles que utilizam sistema de tração elétrica, ou seja, equipados com motores e outros dispositivos que possuem a capacidade de converter energia a elétrica em mecânica para prover o deslocamento do veículo (MAGAGNIN, 2008).

No Brasil, o tipo predominante de veículo utilizado para atender as mencionadas características é denominado por Trólebus. Esse veículo utiliza dois coletores de corrente instalados sobre o teto e na sua estrutura mecânica, para se conectar a uma rede elétrica aérea, a qual possui como principal finalidade o fornecimento de energia para diversos veículos em uma mesma linha (FERREIRA, 1995).

Atualmente, esses coletores são mecanicamente impulsionados por meio de molas, sendo o deslocamento vertical restringido pelo contato com a rede elétrica aérea. Em geral, a estabilidade desse contato é afetada, principalmente, pela condição estrutural da rede, habilidade dos motoristas em manter os veículos dentro das faixas toleráveis de operação e condição de conservação do leito carroçável das vias de circulação (MACEDO, 2017).

A negligência em observar essas condições pode contribuir para a desconexão do circuito, possibilitando que a extremidade do coletor de corrente ultrapasse o nível superior da rede elétrica aérea, podendo resultar na colisão com a estrutura de sustentação dessa rede, danificando o coletor e desenergizando o circuito que atende o Trólebus (FERREIRA, 2015).

Incidentes dessa natureza podem ocorrer devido a operação incorreta do mecanismo que é destinado para identificar a súbita aceleração vertical do coletor de corrente, a qual é proveniente da desconexão com rede elétrica aérea e, assim, realizar o recolhimento desse coletor para a posição de repouso (FERREIRA, 2015).

Com a meta de apresentar medidas para minimizar a mencionada colisão entre o coletor de corrente e a estrutura de sustentação da rede elétrica aérea, este trabalho apresenta as principais etapas do desenvolvimento de uma proposta de sistema para automatizar a operação do coletor de corrente para Trólebus, visando dessa forma em contribuir para reduzir incidentes dessa natureza e prover melhor qualidade no serviço de transporte coletivo.

2. OBJETIVOS

Os principais objetivos deste trabalho são: i) propor sequência básica de etapas para desenvolver um sistema automático de aplicação integrada ao coletor de corrente padrão que é utilizado em Trólebus, ii) apresentar os benefícios mais relevantes que podem ser obtidos com implementação desse sistema, e iii) apresentar comparação entre as características técnicas, funcionais e operacionais do sistema tradicional e o automatizado proposto.

3. METODOLOGIA

Os procedimentos estabelecidos no âmbito de sistema e que foram aplicados no desenvolvimento da mencionada proposta de automação do coletor de corrente são apresentados a seguir:

- Realizar pesquisa bibliográfica, direcionada principalmente em identificar trabalhos cujos conceitos tenham como base os elementos utilizados para realizar a conexão de Trólebus com a rede elétrica aérea.
- Definir os requisitos funcionais e construtivos para os componentes do sistema proposto.
- Elaborar proposta de circuito eletrônico, pneumático e mecânico, para compor um sistema automático e especialista aplicado no monitoramento e controle de conjunto coletor de corrente utilizado para conectar o Trólebus na rede elétrica aérea.
- Estabelecer as características mínimas que devem ser atendidas para os principais componentes desse sistema automatizado.
- Apresentar estrutura de controle e operação em alto nível dos coletores de corrente.
- Elaborar texto explicitando as etapas e os resultados esperados com a utilização dessa proposta.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

Segundo Macedo (2017), os primeiros experimentos envolvendo veículo com propulsão elétrica suprido por meio de contato com cabos aéreos foi realizado por Werner Von Siemens em abril de 1882, na Alemanha. Entretanto, somente na Exposição Universal de Paris realizada no ano de 1900, o francês Lombard-Gérin realizou uma linha experimental de Trólebus, seguido após dois anos pelo alemão Max Schiemann, responsável pela primeira instalação de Trólebus bem-sucedida.

O Trólebus pode circular em vias públicas normais e em meio aos demais veículos, sendo que esse tem instalado sobre o teto e na sua estrutura mecânica dois coletores que possuem movimento horizontal e vertical independentes, ambos impulsionados tradicionalmente por molas para prover o contato elétrico com a rede elétrica aérea de energia (MACEDO, 2017). Os principais elementos relacionados com esse tipo de meio de transporte são apresentados na Figura 1.



Figura 1: Trólebus conectado à rede aérea

Fonte: Adaptado de Paula (2020)

No Brasil, foram implementadas diversas linhas entre 1950 e 1960, principalmente nas cidades de São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte, Niterói, Porto Alegre, Salvador e

Fortaleza. As principais vantagens e desvantagens desse tipo de veículo quando comparado ao ônibus de transporte coletivo, que utiliza a queima de combustível fóssil para impulsionar o veículo, são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Características operacionais

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Alto índice de eficiência energética. • Confiabilidade e durabilidade dos motores elétricos. • Operação silenciosa. • Menor exposição ao calor. • Aceleração contínua e sem solavancos. • Menor rastro ambiental. • Emissão zero de poluentes. • Ausência de câmbio. • Melhor dirigibilidade. • Menor custo de manutenção. 	<ul style="list-style-type: none"> • Trajeto depende de rede aérea. • Falha no fornecimento de energia elétrica. • Rompimento da rede aérea. • Maior custo de implantação. • Escape do coletor de corrente da rede aérea. • Mão de obra especializada para manutenção.

Fonte: Ferreira (2015)

4.1. COLETOR DE CORRENTE CONVENCIONAL

Os coletores de corrente são utilizados para estabelecer contato e conduzir a energia da rede elétrica aérea até aos sistemas de controle e atuação do Trólebus, esses coletores são comumente instalados sobre um suporte fabricado em perfis metálicos enrijecidos e fixados sobre o teto e na estrutura mecânica desse veículo. Em cada Trólebus são instalados dois coletores de corrente, conforme apresentado na Figura 2, esses possuem movimento horizontal e vertical independentes, a fim de garantir a contínua conexão com a rede elétrica aérea, durante o deslocamento do veículo em vias públicas.

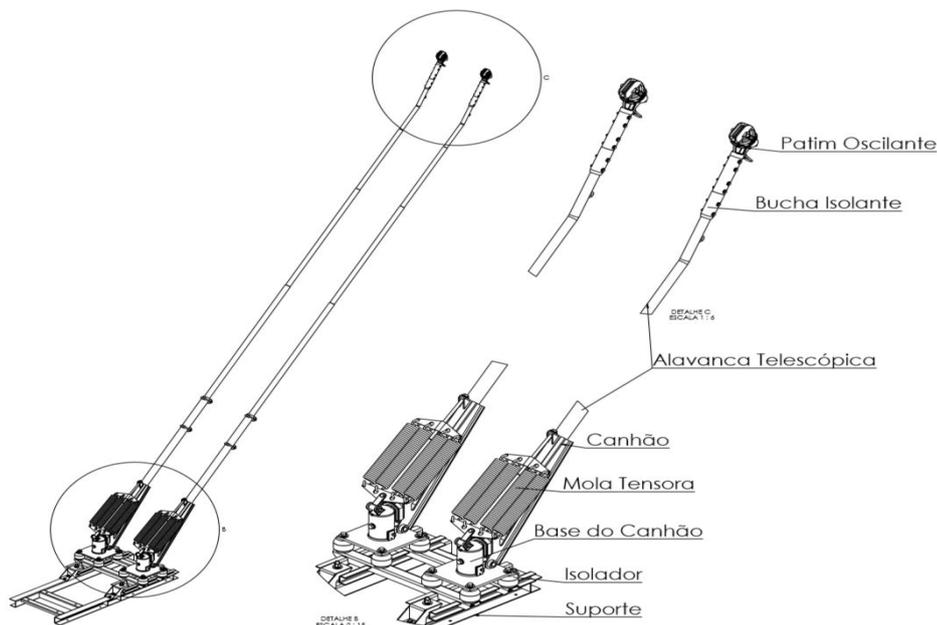


Figura 2: Coletor de corrente do Trólebus

Fonte: Autor (2020)

4.1.1. DESLOCAMENTO VERTICAL

O deslocamento vertical do coletor de corrente possibilita compensar a variação na altura da rede elétrica aérea em relação ao nível do veículo durante seu deslocamento em via pública. Esse movimento é possível decorrente do grau de liberdade existente na articulação localizada na base do canhão, conforme apresentado na Figura 3 (a), e pela força aplicada por meio do conjunto de molas tensoras. Os limites do movimento vertical do coletor de corrente são estabelecidos por meio das restrições indicadas na Figura 3 (a).

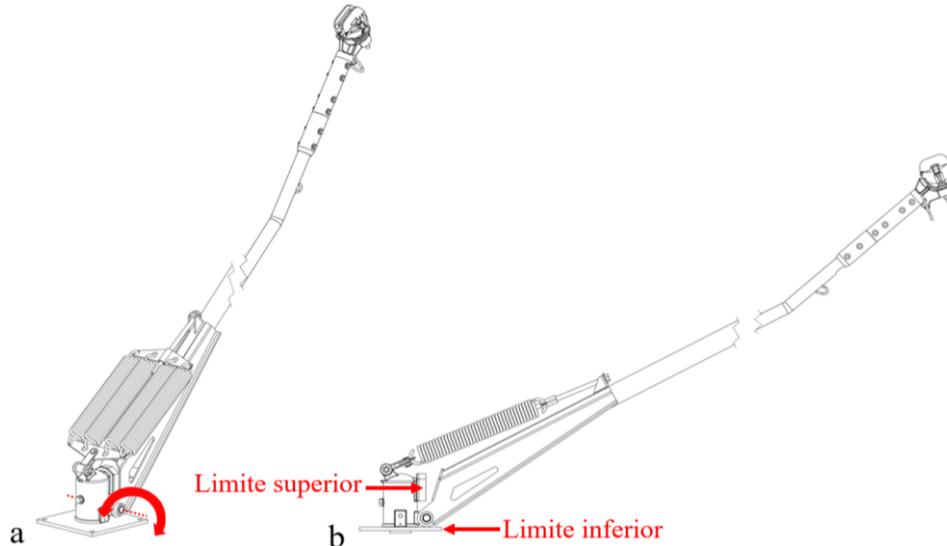


Figura 3: Movimento vertical
Fonte: Autor (2020)

Essas molas tensoras são dimensionadas e calibradas na posição de referência para exercerem força de contato, tipicamente, entre 10 e 12 kgf do patim oscilante com a rede elétrica aérea, entretanto, decorrente de variações na altura da rede podem ocorrer situações na qual a força de contato esteja fora dessa faixa, ocasionando a redução na vida útil dos componentes de contato elétrico localizados no patim oscilante.

4.1.2. DESLOCAMENTO HORIZONTAL

O deslocamento horizontal do coletor de corrente possibilita compensar o desalinhamento lateral do Trólebus em relação à posição da rede elétrica aérea durante o deslocamento do veículo, permitindo desviar de obstáculos, realizar de manobras e curvas. Esse movimento é possível decorrente do grau de liberdade existente no centro da base do canhão, conforme apresentado na Figura 4 (a).

Os limites do movimento horizontal, representados na Figura 4 (b), do coletor de corrente são estabelecidos por meio de restrição imposta por um tirante flexível que interliga o recuperador a extremidade superior do coletor, conforme indicado na Figura 4 (a).

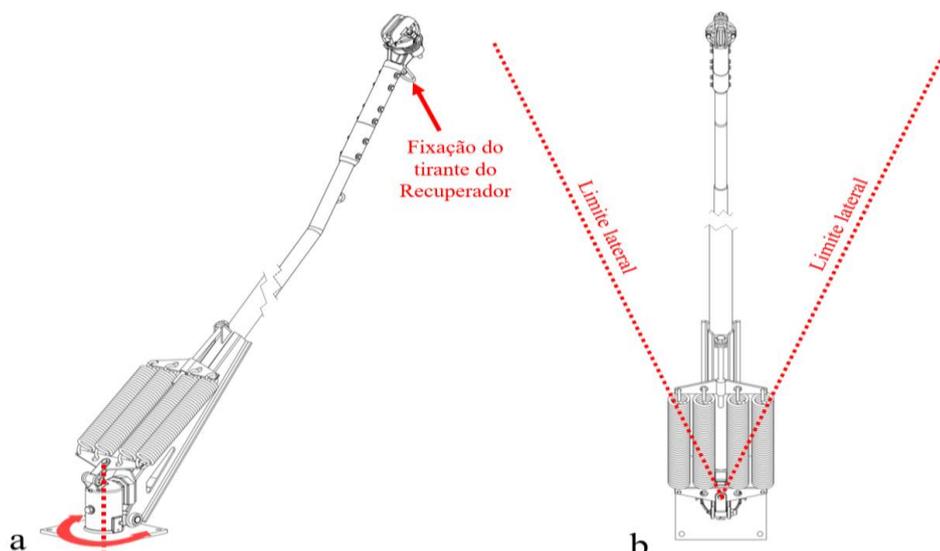


Figura 4: Movimento horizontal
Fonte: Autor (2020)

4.2. RECUPERADOR

Trata-se de item semelhante a um carretel instalado na parte traseira do veículo, seu mecanismo interno é composto por duas molas de torção, cada qual com diferente intensidade de força e operação independente. O recuperador tem como objetivo principal realizar as seguintes ações:

- Limitar curso do coletor: restrição que é decorrente do comprimento estabelecido pelo tirante flexível que interliga o recuperador ao coletor.
- Manter a tensão do tirante: condição é garantida por meio da força exercida por uma das molas de torção, independentemente da posição do coletor, possibilitando menor tempo de reposta quando o sistema de recuperação é acionado.
- Recolher o coletor de corrente: atuação do mecanismo provê o deslocamento do coletor para posição de repouso, localizada na região central e superior do veículo.

Em situações nas quais o patim oscilante escapa da rede elétrica aérea, ocorre a súbita aceleração vertical do coletor de corrente em razão da força exercida pelo conjunto de molas tensoras localizadas na base do canhão, nessa condição, um gatilho é acionado no mecanismo do recuperador ocasionando o desarme da segunda mola de torção e liberando a energia contida, a qual possui intensidade superior ao conjunto de molas tensoras, provendo o recolhimento do coletor para um suporte localizado na posição de repouso, conforme apresentada na Figura 5.



Figura 5: Posição de repouso do coletor de corrente
Fonte: Autor (2020)

Decorrente do acionamento do mencionado mecanismo, o veículo é desconectado da rede elétrica aérea e o fornecimento de energia para os sistemas eletrônico e de potência do Trólebus são interrompidos, ocasionado parada do veículo e interrupção no fluxo de ônibus neste local da linha. Nessa condição, é necessária atuação manual de profissional devidamente qualificado e capacitado para realizar a sequência de etapas que consistem em:

1. Realizar verificação visual a fim de identificar a integridade ou existência de danos no coletor de corrente e na rede elétrica aérea.
2. Na hipótese de algum dano ser identificado, comunicar ao departamento relacionado para serem realizadas as ações pertinentes.
3. Na hipótese de não haver danos, manipular por meio dos tirantes flexíveis o coletor de corrente para reestabelecer a conexão com a rede elétrica aérea.
4. Rearmar a segunda mola de torção e acionamento do mecanismo de recolhimento.
5. Reiniciar o sistema eletrônico e de potência do veículo.

Os principais elementos relacionados ao recolhimento dos coletores de corrente de Tróibus são apresentados na Figura 6.

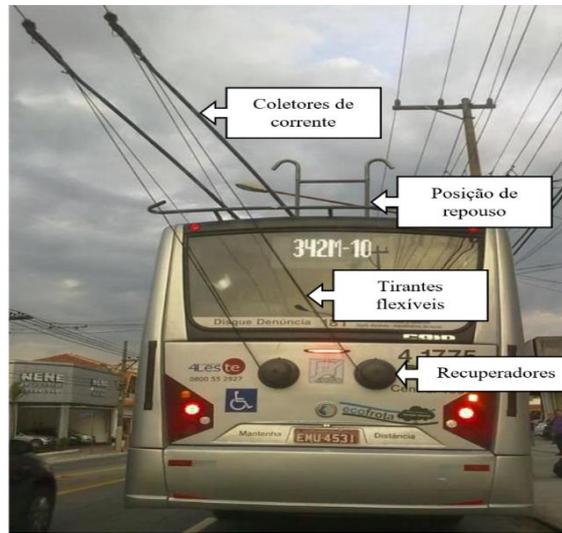


Figura 6: Recuperador
Fonte: Adaptado de Paula (2020)

Em algumas situações foram observados que os recuperadores dos coletores de corrente operam incorretamente, nesses casos, a aceleração do tirante flexível não é identificada ou ocorre com atraso, permitindo que a extremidade superior do coletor ultrapasse a cota da rede elétrica aérea e, dessa forma, ocasione a colisão com elementos da estrutura física instalada sobre as vias de circulação do Tróibus, as quais são utilizadas para disponibilizar a energia elétrica a ser captada e transferida para o veículo.

Os principais elementos que compõem a mencionada estrutura são apresentados no esquema elétrico da Figura 7.

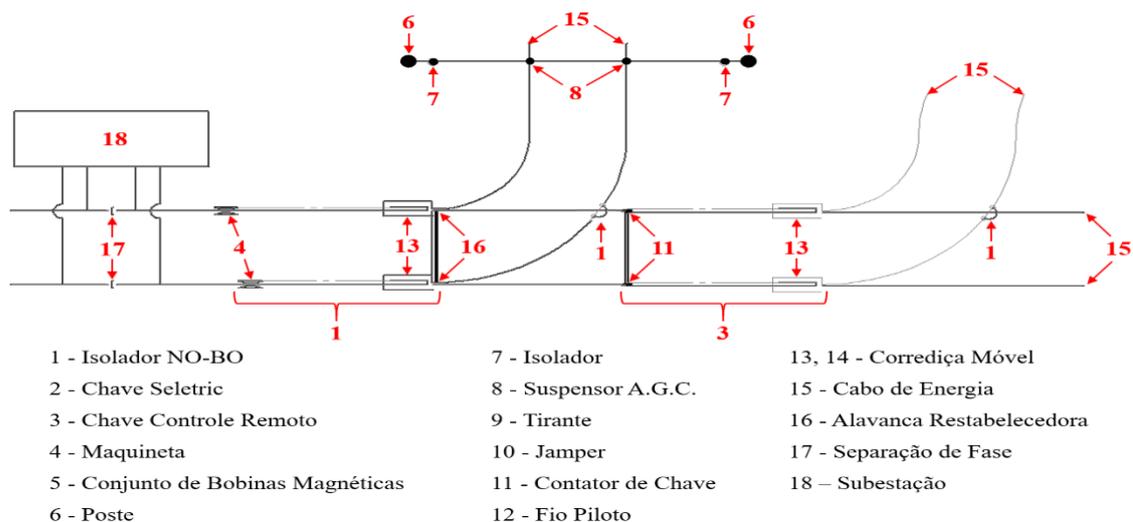


Figura 7: Esquema de rede aérea
Fonte: Adaptado de Paula (2020)

5. DESENVOLVIMENTO

A etapa do desenvolvimento abrange a definição de requisitos e apresentação de proposta de concepção do sistema para automatizar a operação dos coletores de corrente do Tróibus, conforme explicitado nos subitens seguintes.

5.1. REQUISITOS

Os requisitos básicos que devem ser atendidos para o desenvolvimento do sistema de automação a ser integrado no coletor de corrente que é abordado neste trabalho são divididos em funcionais e construtivos, sendo descritos na Tabela 2.

Tabela 2: Requisitos

Funcionais	Construtivos
RF 1 - Monitorar continuamente o contato com rede elétrica aérea. RF 2 - Cada coletor de corrente deve atuar de modo independente. RF 3 - Possuir dois estágios de movimento vertical. RF 4 - Possuir um estágio de movimento horizontal. RF 5 - Manter a força de contato com rede elétrica aérea compatível com mecanismo convencional. RF 6 - Simples de operação e de fácil manutenção. RF 7 - Limitar movimento horizontal em +/- 45°. RF 8 - Dispor três pontos para acionamentos de emergência. RF 9 - Possuir acionamento de reconexão dos coletores para a rede elétrica aérea independente.	RC 1 - Permitir integração ao do coletor de corrente convencional. RC 2 - Suprir o sistema de controle com 24 Vcc. RC 3 - Operar sistema pneumático com pressão máxima de 10 bar. RC 4 - Ser de fácil instalação. RC 5 - Utilizar componentes de natureza aplicada ao veículo. RC 6 - Possuir resistência ao intemperismo e ambiente externo. RC 7 - Dispor de interface para configuração de funcionalidades. RC 8 - Reconexão equivalente ao método tradicional. RC 9 - Dispor os acionamentos de emergência localizados ao lado dos recuperadores, coletores de corrente e motorista. RC 10 - Instalar os acionamentos para reconexão dos coletores de corrente ao lado dos recuperadores.

Fonte: Autor (2020)

5.2. AUTOMAÇÃO DO DESLOCAMENTO VERTICAL

Para atender esta aplicação em conformidade com os requisitos RF 2, 3, 5, 6 e RC 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 estabelecidos na Tabela 2, é proposto neste trabalho substituir o conjunto de molas tensoras que exerce força permanente de elevação do coletor de corrente, o qual é apresentado na Figura 8 (a), por dois atuadores pneumáticos assistidos por elementos sensores e com controle dedicado, possibilitando o movimento coordenado de recolhimento do coletor, sempre que for identificado escape da rede elétrica aérea ou se essa ação for realizada por meio do acionamento de comandos específicos.

As principais etapas que devem ser seguidas para atender esta proposta de alteração são apresentadas na Figura 8 e descritas a seguir:

Figura 7 (a): considera-se esta configuração para iniciar as alterações propostas.

Figura 8 (b): retirar conjunto de molas tensoras e componentes relacionados.

Figura 8 (c): remover suporte de fixação dos esticadores das molas.

Figura 8 (d): instalar base para fixar suporte dos atuadores.

Figura 8 (e): dispor conjunto de atuadores pneumáticos intitulados “A” e “B”.

Figura 8 (f): integrar conjunto de atuadores no coletor de corrente.

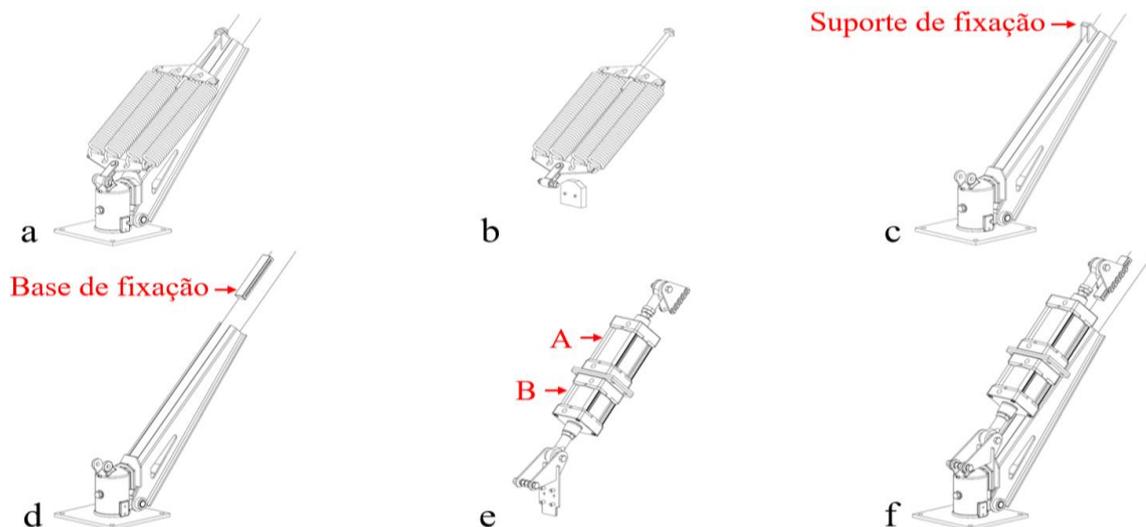


Figura 8: Automação do deslocamento vertical

Fonte: Autor (2020)

5.3. AUTOMAÇÃO DO DESLOCAMENTO HORIZONTAL

Para atender esta aplicação em conformidade com os requisitos RF 2, 4, 6, 7 e RC 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 estabelecidos na Tabela 2, é proposto neste trabalho alterar a restrição do movimento horizontal imposta pelo comprimento do tirante flexível por um atuador pneumático de comprimento e curso específico, assistido por elementos sensores e com controle dedicado, o qual deverá ser fixado na região localizada na base do canhão, conforme apresentado na Figura 9 (a), o qual deve operar despressurizado para não gerar resistência no deslocamento, sendo acionando somente para possibilitar o movimento coordenado durante o recolhimento do coletor.

As principais etapas que devem ser seguidas para atender esta alteração são apresentadas na Figura 9 e descritas a seguir:

Figura 8 (a): considera-se esta configuração para iniciar as alterações propostas.

Figura 9 (b): dispor de atuador pneumático intitulado “C” e suportes para fixação.

Figura 9 (c): integrar atuador e suportes no coletor de corrente.

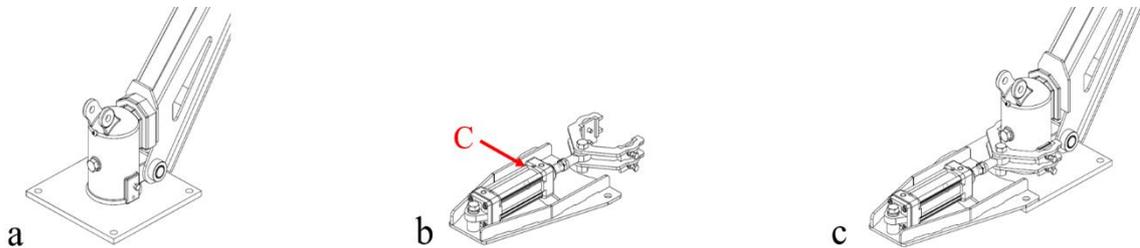


Figura 9: Automação do deslocamento horizontal

Fonte: Autor (2020)

5.4. MONITORAMENTO DO CONTATO COM REDE AÉREA

Para atender os requisitos RF 1, 2, 6 e RC 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 em conformidade com o estabelecido na Tabela 2, é proposto neste trabalho substituir o suporte do patim oscilante localizado na extremidade superior do coletor de corrente, o qual é apresentado na Figura 10 (a), por suporte equipado com sensor de posição, possibilitando identificar o contato com a rede aérea em situação na qual o nível de tensão elétrica fornecido pelo sistema de monitoramento é nulo, essa condição é proveniente da falta de energia ou descontinuidades causadas por elementos que compõe a rede elétrica aérea.

As principais etapas que devem ser seguidas para atender esta alteração são apresentadas na Figura 10 e descritas a seguir:

Figura 10 (a): considera-se esta configuração para iniciar as alterações propostas.

Figura 10 (b): retirar suporte do patim oscilante e dos seus componentes relacionados.

Figura 10 (c): dispor suporte equipado com sensor de posição.

Figura 10 (d): integrar conjunto intitulado detector de posição no coletor de corrente.

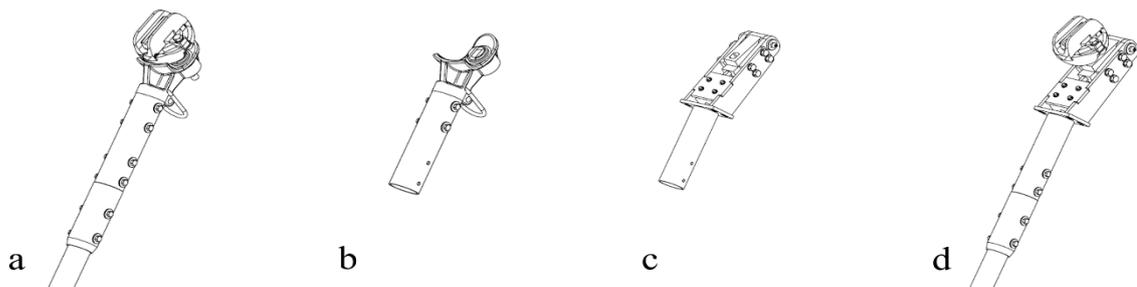


Figura 10: Detector de posição do patim oscilante

Fonte: Autor (2020)

O suporte proposto nesta aplicação é composto por duas partes, sendo uma fixa e equipada com sensor tubular fotoelétrico, e outra articulada e equipada com receptor tubular fotoelétrico, conforme apresentado na Figura 11 (a). O movimento entre as partes é possível decorrente do grau de liberdade existente e força aplicada.

O sinal de comando proveniente do sensor é alterado em razão do feixe de luz gerado pelo sensor, ou seja, em situações na qual o coletor de corrente encontra-se desconectado da rede elétrica aérea, o feixe nominal de luz não é captado pelo receptor, conforme apresentado na Figura 11 (b), condição que é alterada após conectar o coletor a rede elétrica aérea, ocasionando alinhamento dos elementos e detecção do feixe nominal de luz, conforme apresentado na Figura 11 (c).

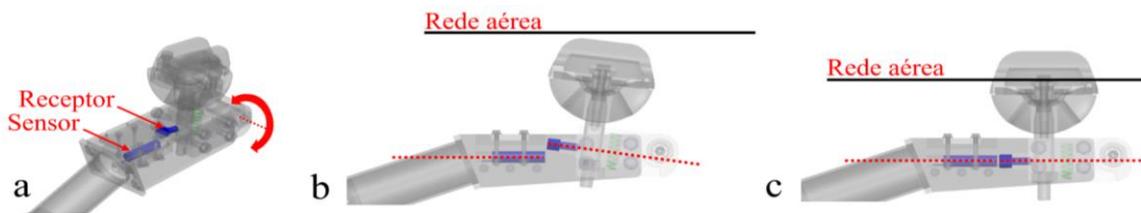


Figura 11: Acionamento do sensor de posição
Fonte: Autor (2020)

5.5. CIRCUÍTO DE ACIONAMENTO E CONTROLE

Para atender as modificações propostas neste trabalho em conformidade com os requisitos RF 1, 2, 6, 8, 9 e RC 2, 3, 4, 6, 7, 9, 10 estabelecidos na Tabela 2, é necessária a integração de sistema de controle contendo uma programação dedicada, elementos sensores para monitorar os sinais necessários ao controle, meios de comando para possibilitar que agentes externos atuem no sistema e atuadores pneumáticos para prover a força necessária para movimentar o coletor de corrente.

A integração desses elementos tem por objetivo prover a adequada tomada de decisão do sistema em decorrência dos eventos relacionados com a operação do veículo, estando os principais itens que compõe esses sistemas apresentados na Figura 12, na qual, o diagrama simplificado representa os itens atribuídos aos dois coletores de corrente.

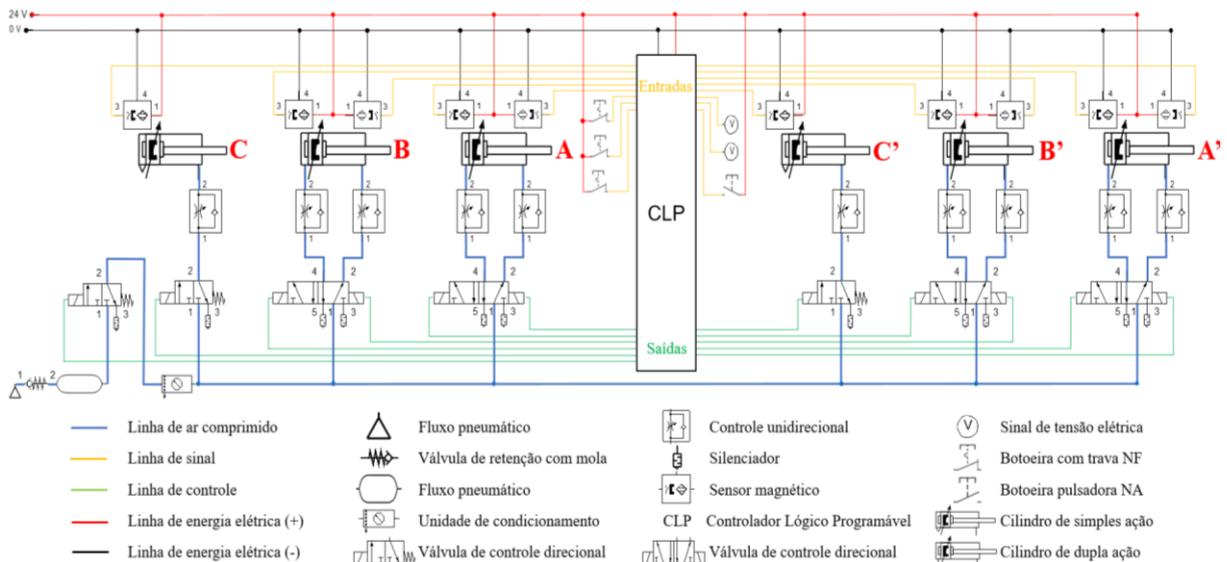


Figura 12: Diagrama eletropneumático
Fonte: Autor (2020)

5.6. ALGORITMO

Dentre as várias funções que podem ser programadas com os recursos contidos no Controlador Lógico Programável (CLP) proposto para esta aplicação, foram consideradas aquelas necessárias para definir a sequência lógica de instruções previstas para realizar a automação do coletor de corrente do Trólebus.

O algoritmo elaborado estabelece a sequência ordenada de ações a ser executada para efetuar o gerenciamento do sistema, o qual utiliza como base, principalmente, o arranjo de dados previamente definido e informações que são constantemente fornecidas por meio de dispositivos sensores e elementos de comando, os quais determinarão os sinais que serão gerados pelo controle para atender cada tarefa.

Nesse sentido, uma sequência específica de ações prevista para esse algoritmo é representada na Figura 13, por meio de fluxograma sintético que retrata os principais passos da programação proposta neste trabalho.

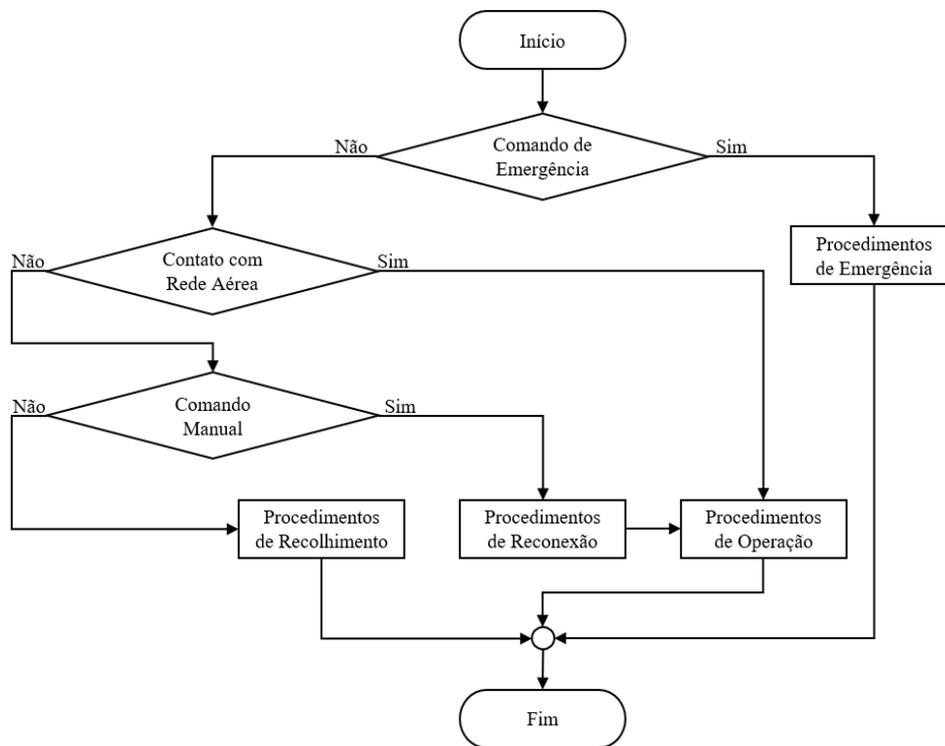


Figura 13: Fluxograma Sintético

Fonte: Autor (2020)

5.7. DIMENSIONAMENTO DOS ATUADORES PNEUMÁTICOS

Atualmente, a frota de Trólebus em operação é composta por veículos de diferentes modelos e fabricantes, cada qual, contendo características construtivas particulares e que podem influenciar nas principais variáveis a serem consideradas no dimensionamento dos atuadores pneumáticos.

Decorrente dessas características e dos requisitos RF 5, 6 e RC 3 estabelecidos na Tabela 2, foram elaborados modelos numéricos com a meta de auxiliar na execução dos cálculos a serem utilizados na aplicação proposta.

O diagrama de corpo livre apresentado na Figura 14 contém as informações utilizadas para estabelecer o modelo numérico referente ao deslocamento vertical do coletor de corrente.

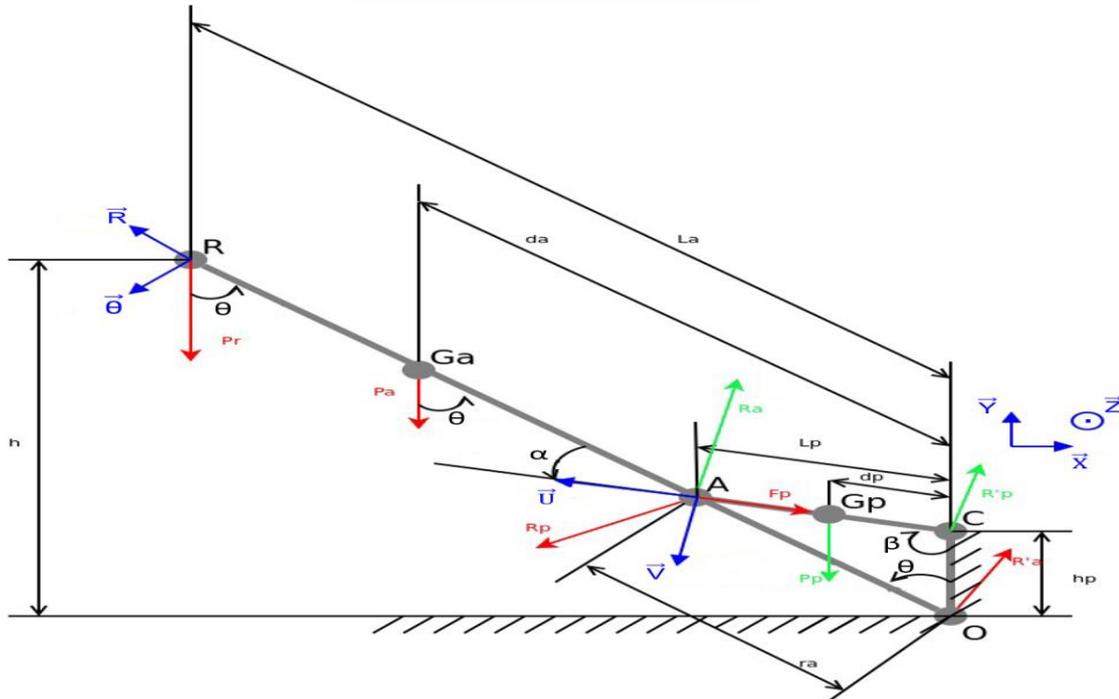


Figura 14: Diagrama de corpo livre - Deslocamento vertical

Fonte: Autor (2020)

A partir das informações contidas nessa figura e definições matemáticas pertinentes é possível dimensionar a força exercida, por meio da equação (1), para os atuadores pneumáticos apresentados na Figura 8 (e), sendo a distância definida por \overline{AGp} referente ao atuador “A” e distância definida por \overline{GpC} referente ao atuador “B”.

$$F_p = m_p \cdot g \cdot \frac{L_a \cdot h_p - r_a \cdot h}{L_a \cdot r_a - h_p \cdot h} \frac{d_p \cdot h_p^3 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{h}{L_a}\right)^2}}{r_a^2 \cdot \left(h_p^2 + r_a^2 - 2h_p \cdot r_a \cdot \frac{h}{L_a}\right)} + \frac{d_a \cdot m_a + L_a \cdot m_r}{r_a \cdot h_p} \cdot g \cdot \sqrt{h_p^2 + r_a^2 - 2h_p \cdot r_a \cdot \frac{h}{L_a}} \quad (1)$$

As nomenclaturas contidas nessa equação possuem os seguintes significados:

F_p : força do atuador pneumático A e B [N].

m_p : massa dos atuadores pneumáticos A e B [kg].

g : aceleração gravitacional [m/s²].

L_a : comprimento do coletor de corrente [m].

h_p : distância do ponto articulado até fixação do atuador pneumático B [m].

r_a : distância do ponto articulado até fixação do atuador pneumático A [m].

h : distância do ponto articulado até extremidade do coletor de corrente [m].

d_p : comprimento do atuador B [m].

d_a : distância do ponto articulado até centro de massa do coletor de corrente [m].

m_a : massa do coletor de corrente [kg].

m_r : massa relacionada ao contato com rede elétrica aérea [kg].

Para dimensionar o atuador atribuído ao movimento horizontal é necessário realizar as considerações particulares dessa aplicação, neste sentido, é apresentado na Figura 15 (a) o diagrama de corpo livre com principais pontos do conjunto proposto para o coletor de corrente, sendo apresentado na Figura 15 (b) os mais relevantes para essa aplicação.

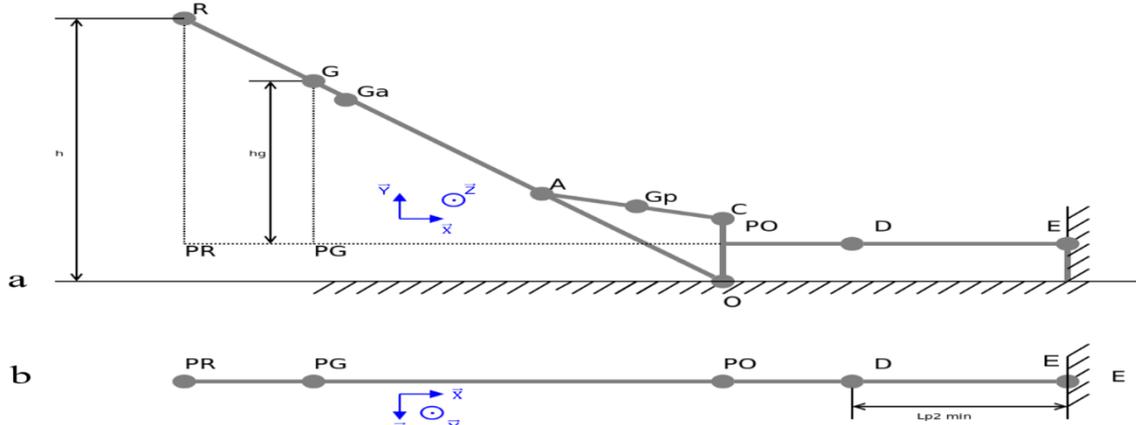


Figura 15: Diagrama de corpo livre – (a) Vista Lateral e (b) Vista Superior
Fonte: Autor (2020)

Utilizando os pontos considerados na Figura 15 (b) e nomenclaturas pertinentes, o diagrama de corpo livre apresentado na Figura 16 contém as informações utilizadas para estabelecer o modelo numérico referente ao deslocamento vertical do coletor de corrente.

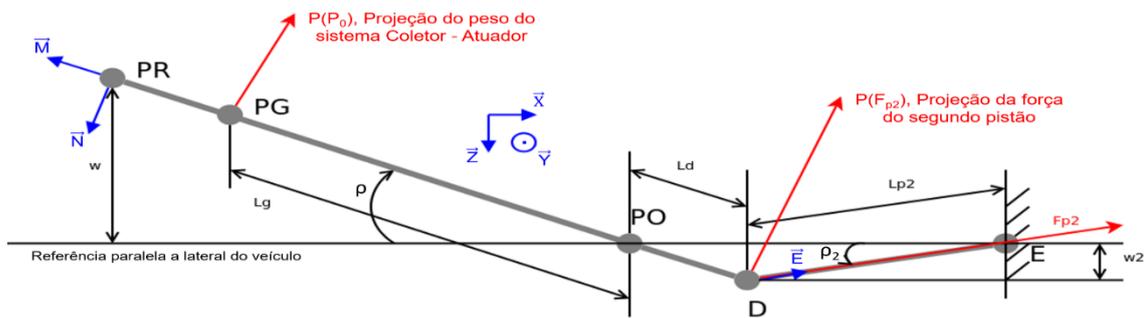


Figura 16: Diagrama de corpo livre – Deslocamento horizontal
Fonte: Autor (2020)

A partir das informações contidas nessa figura e definições matemáticas pertinentes é possível dimensionar a força exercida, por meio da equação (2), para o atuador pneumático apresentado na Figura 9 (c), sendo a distância definida por \overline{DE} referente ao atuador “C”.

$$F_{p2} = (m_a + m_p) \cdot g \cdot \frac{L_g}{L_d} \cdot \frac{\cos \varrho \sin \varphi}{\sin(\varrho + \varrho_2)}, \text{ com } \varrho = \arcsin \frac{w}{\sqrt{L_a^2 - h^2}} \text{ e } \varrho_2 = \arctan \frac{L_d w}{L_{p2 \min} \sqrt{L_a^2 - h^2}} \quad (2)$$

As nomenclaturas contidas nessa equação possuem os seguintes significados:

F_{p2} : força do atuador pneumático C [N].

m_a : massa do coletor de corrente [kg].

m_p : massa do atuador pneumático C [kg].

g : aceleração gravitacional [m/s²].

L_g : distância do ponto articulado até centro de massa do coletor de corrente [m].

L_d : distância do ponto articulado até fixação do atuador pneumático C [m].

w : distância do ponto articulado até extremidade do coletor de corrente [m].

L_a : comprimento do coletor de corrente [m].

h : distância do ponto articulado até extremidade do coletor de corrente [m].

L_{p2} : comprimento do atuador pneumático C [m].

ϱ : ângulo entre lateral do veículo e coletor de corrente [°].

ϱ_2 : ângulo entre lateral do veículo e atuador pneumático C [°].

5.8. DIFICULDADES ENCONTADAS

Para tornar possível o desenvolvimento proposto neste trabalho, algumas etapas anteriores foram necessárias, dentre essas, atividades de campo em conjunto com empresas operadoras de transporte coletivo na cidade de São Paulo para avaliar, principalmente, a operação do veículo, os procedimentos adotados para reconexão, características da rede elétrica aérea de energia, diferenças entre os veículos utilizados, definição de requisitos, entre outras particularidades relacionadas ao uso de Trólebus.

Entre as etapas realizadas em campo, a caracterização do coletor de corrente demandou maior tempo e recurso, decorrente da indisponibilidade de documentação técnica desse item, sendo necessário realizar engenharia reversa do mecanismo.

Para essa atividade, um coletor de corrente foi desmontado, sendo suas partes e peças analisadas por equipe capacitada a fim de reproduzi-las eletronicamente com recursos contidos no ambiente virtual de desenvolvimento denominado SolidWorks®, da fabricante Dassault Systèmes S.A., o qual utiliza computação paramétrica a partir de operações geométricas elementares para elaborar formas tridimensionais (SHIH; SCHILLING, 2020).

6. RESULTADOS

A proposta de automação do coletor de corrente apresentada neste trabalho permite adequar o legado por meio da substituição de partes, adequação da estrutura mecânica relacionada aos pontos de fixação dos componentes, instalação de elementos sensores, elementos atuadores e controlador programável contendo algoritmo dedicado.

As principais funcionalidades estabelecidas no controlador e elementos contidos no diagrama apresentado na Figura 12, foram validadas por meio de simulação computacional que representa o limite das solicitações consideradas, mostrando serem adequadas para aplicação proposta e superior nos critérios de segurança, tempo de resposta e índice de falhas, quando comparada ao mecanismo tradicional do coletor de corrente.

Neste contexto, são apresentadas na Figura 17 as principais diferenças entre o coletor de corrente mecanicamente impulsionado por meio de molas e o modelo contendo componentes que permitem sua automação, o qual é proposto neste trabalho.

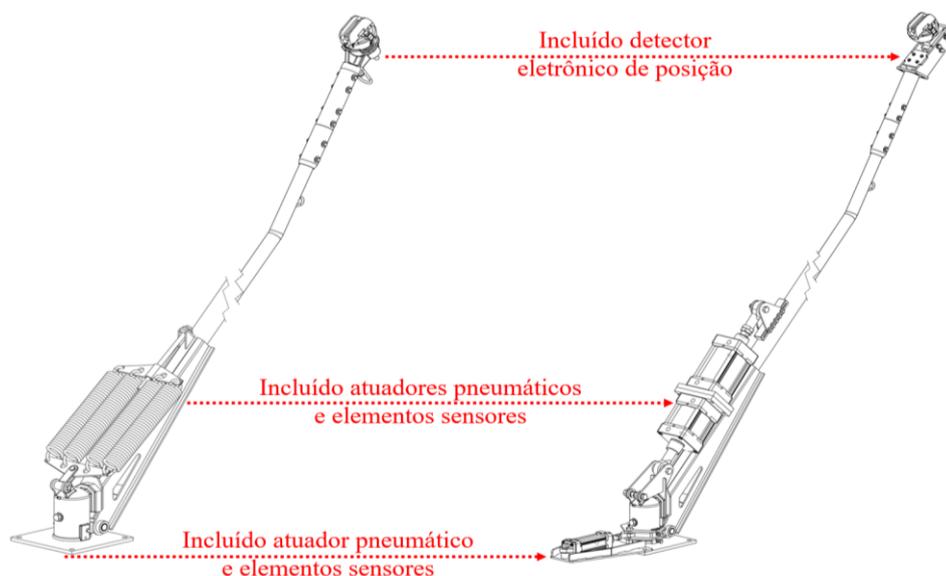


Figura 17: Coletor de corrente convencional e automatizado

Fonte: Autor (2020)

O sinal fornecido pelo detector eletrônico de posição permite ao controlador identificar o escape do coletor de corrente da rede elétrica aérea e enviar em tempo adequado os comandos pertinentes aos atuadores que realizam o movimento vertical e horizontal, provendo a sequência de etapas previstas para o deslocamento do coletor até a posição de repouso.

A sequência lógica de operações do sistema pode ser interferida por meio de comando manual realizado pelos operadores, em botoeiras dispostas em locais específicos, possibilitando a reconexão do coletor de corrente a rede elétrica aérea ou colocando o sistema em modo de emergência, condição na qual o sistema eletrônico de controle e sensoriamento é mantido energizado e inativo, enquanto o circuito de energia pneumática é despressurizado, o que torna possível o movimento manual do coletor.

Os modelos numéricos apresentados nas equações (1) e (2) permitem determinar a força necessária dos atuadores pneumáticos conforme as características de cada veículo e rede elétrica aérea, pois esses modelos levam em consideração as principais variáveis relacionadas no sistema proposto.

7. CONCLUSÕES

Os resultados positivos observados nas avaliações computacionais do circuito eletrônico e pneumático integrado ao algoritmo, os quais são propostos neste trabalho, sugerem que os recursos e componentes estabelecidos para automatizar o coletor de corrente para Trólebus permitirão aos operadores realizarem de modo intuitivo e seguro a operação e manutenção do sistema.

Os recursos previstos com a integração da automação visam: i) monitorar continuamente o contato com rede elétrica aérea; ii) identificar o escape do coletor de corrente; iii) realizar movimento coordenado de recolhimento; iv) manter força de contato com a rede constante, e v) reduzir a incidência de colisões do coletor de corrente com estrutura da rede elétrica aérea.

A possibilidade de automatizar o mecanismo tradicional busca contribuir para a implementação desse sistema na frota de Trólebus em operação, melhorando a qualidade do serviço de transporte coletivo prestados por esse tipo de veículo, fator que corrobora para ampliar novas rotas utilizando fontes renováveis de energia, em substituição aos tradicionais veículos movidos a combustão por combustível fóssil.

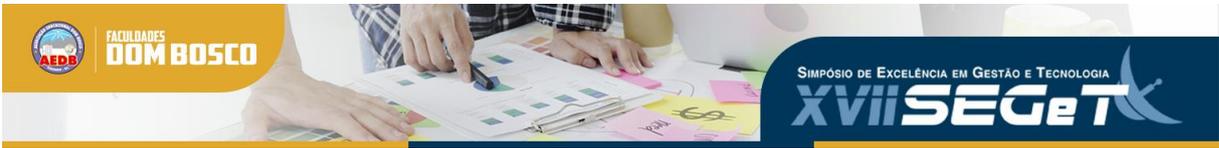
A expressividade e os detalhes contidos no sistema proposto para automatizar o coletor de corrente para Trólebus proporcionam operação simples e intuitiva aos usuários, sendo que essas condições minimizam eventuais equívocos e facilitam a utilização do sistema.

Esta proposta de automação do coletor de corrente foi apresentada aos operadores de Trólebus, equipes de manutenção e pessoas relacionadas, sendo observado interesse na implementação do sistema para testes funcionais, decorrente dos benefícios operacionais, redução dos danos a rede elétrica aérea e menor tempo de parada dos veículos, fatores que contribuem para o retorno do investimento.

8. REFERÊNCIAS

BARCZAK, R. & DUARTE, F. Licenciado sob uma Licença Creative Commons. *Brazilian Journal of Urban Management*), p. 13–32, 2012.

SILVA, A. N. R. & SOUZA, L. C. L. Pluris. In: 1º Congresso Luso-Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável STENTÁVEL, 1., 2005, São Carlos.



- MAGAGNIN, R. C.** A Percepção do Especialista Sobre o Tema Mobilidade Urbana. Transportes. v 16, n. 1, p. 25-35, jun. 2008.
- FERREIRA, E. R.** Trólebus, Espaço e Sociedade. 1995. 132 f. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.
- MACEDO, J. E. J.** Estudo de Linha de Trólebus em Natal. 61 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.
- FERREIRA, L. G. S.** Transporte Público no Município de Araraquara: origem, crise e as tramas da proposta de privatização da Companhia de Trólebus de Araraquara – C.T.A. 68 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Econômicas da Faculdade de Ciências e Letras, Unesp, Araraquara, 2015.
- PAVANI, S. A.** Comandos Pneumáticos e Hidráulicos. Universidade Federal de Santa Maria: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2010. 182 p.
- ZANCAN, M. D.** Controladores Programáveis. Universidade Federal de Santa Maria: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2010. 54 p.
- FREITAS, J. A. L.** Eletricidade. Universidade Federal de Santa Maria: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2010. 118 p.
- FUENTES, R. C.** Eletrônica. Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, Curso Técnico em Automação Industrial, 2009. 83 p.
- PAVANI, S. A.** Instrumentação Básica. Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial De Santa Maria, Curso Técnico Em Automação Industrial, 2009. 98 p.
- ZOLIN, I.** Materiais de construção: Mecânica. Universidade Federal de Santa Maria: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2010. 72 p.
- GONÇALVES, M. A. F.** Processos industriais. Universidade Federal de Santa Maria: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2010. 59 p.
- FREITAS, J. A. L.** Projetos. Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, Curso Técnico em Automação Industrial, Escola Técnica Aberta do Brasil, 2011. 60 p.
- PEIXOTO, N. H.** Segurança do trabalho. Universidade Federal de Santa Maria: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2010. 110 p.
- BONALDO, S. A.** Técnicas Digitais. Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, Curso Técnico em Automação Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, 2009. 72 p.
- SHIH, R. & SCHILLING, P.** Parametric Modeling with SOLIDWORKS 2020. New Orleans: Sdc Publications, 2020. 600 p.