

COMPARATIVO DO CONFORTO TÉRMICO ENTRE AS LINHAS VERMELHA E AZUL DO METRÔ DE SÃO PAULO UTILIZANDO O MÉTODO DE VOLUMES FINITOS

Alunos: Ana Beatriz Monteiro Theodoro, Bárbara Fiocchi Perez, Fuad Jamil Yatim, Gustavo Nakamura, Rafael de Oliveira Guariza; Orientador: Professor Cyro Albuquerque Neto



RESUMO

O Metrô recebe reclamações diárias dos usuários via SMS sobre o desconforto térmico, levando em consideração esses dados de reclamações, avaliam-se as taxas de queixas de calor e frio, sendo a Linha 3 - Vermelha a que recebe mais reclamações, seguida pela Linha 1 - Azul. Apesar dos ajustes já realizados nos sistemas de ventilação e ar-condicionado, o Metrô ainda não obteve resultados satisfatórios. O objetivo do estudo é entender e simular as condições climáticas dentro dos carros, a fim de, analisar a fonte do desconforto térmico dos passageiros. Especificamente, serão analisadas as frotas H da Linha 3 - Vermelha e J da 1 - Linha Azul, identificando o fluxo de ar e a troca térmica entre os elementos dentro do carro e os passageiros, avaliando como isso afeta o conforto. Para realizar este estudo térmico, foi utilizado o software ANSYS, por meio do seu solver "Fluent", para simular a troca térmica e propor alterações que aprimorem o ambiente no interior dos carros, tornando mais propício para uma condição apropriada e confortável termicamente a seus usuários. Além disso, foram realizadas instrumentações no interior dos carros, em operação normal, para coleta e análise dos dados de temperatura e umidade, nos carros da frota H.

MOTIVAÇÃO

Este projeto possui como motivação, avaliar através de simulações em softwares de volumes finitos, a circulação de ar que os aparelhos de ar condicionado dos carros das linhas, proporcionam durante as viagens e se estão cumprindo seu papel de forma eficiente e como esperado. Por meio do software Ansys, será utilizado seu solver de análise de fluidos, o "Fluent", para realizar essa análise e comparação de conforto térmico entre as linhas escolhidas, de forma conjunta com o Metrô de São Paulo

OBJETIVO

Este projeto possui como objetivos, avaliar através de simulações em softwares de volumes finitos, a circulação do ar que os aparelhos de ar condicionado dos carros das linhas, como ocorrem durante as viagens e se estão cumprindo seu papel conforme o esperado. Por meio do software Ansys, será utilizado seu solver de análise de fluidos, o "Fluent", para realizar essa análise e comparação de conforto térmico entre as linhas escolhidas, de forma conjunta com o Metrô de São Paulo. Vale ressaltar que, com base nas visitas realizadas pelo grupo nos pátios das duas linhas do metrô, foi possível verificar que, a saída de ar dentro dos carros da frota J da linha 1 - Azul é diferente da saída de ar nos carros da frota H da linha 3 - Vermelha, isto será um outro fator importante para realizar as análises no software de forma mais realista. Tudo isso visando a melhoria do conforto térmico dos usuários.

METODOLOGIA

O modelo mais viável para o desenvolvimento do projeto de análise do conforto térmico, são através de referências bibliográficas, a partir de artigos e estudos anteriores, e posteriormente, realizar estudos de casos a partir de dados coletados. No cenário global, existem artigos específicos avaliando a condição de conforto térmico em sistemas de metrô, como o artigo "On the determination of the thermal comfort conditions of a metropolitan city underground railway" desenvolvido pela universidade de Atenas, os autores avaliaram as condições que o metrô da cidade de Atenas está sujeito com o ambiente, avaliando a forma como a localização de cada estação afeta o percentual de satisfação, como ocorre a circulação interna do ar dentro de vagões e como o local onde o ar circula com maior eficácia tende a gerar um maior conforto para os usuários do transporte. A fim de estudar o carro do metrô, foi levado em consideração certos conceitos da engenharia como: a mecânica dos fluidos, transferência de calor e ar-condicionado, pois para promover um melhor conforto térmico aos usuários do metrô, é necessário entender o funcionamento atual do fluxo de ar dentro dos carros e então estimar uma troca térmica entre os elementos do carro e os passageiros. Para compreender os parâmetros estudados, será realizada uma modelagem do carro das linhas do metrô simulando diferentes situações, de início o carro será modelado em 3D utilizando o software Siemens NX, após as simulações serão feitas no software Ansys, através do seu solver "Fluent".

VISITAS AOS PÁTIOS DO METRÔ

Foram realizadas algumas visitas pelo grupo nos pátios da Linha 1 - Azul e 3 - Vermelha a fim de entender a estrutura interna dos carros das frotas a serem estudadas, os sistemas de ventilação interno, o ar condicionado instalado no carro e como é realizado o controle de temperatura dos mesmos, pelos operadores dos trens. Bem como, foi realizada também, para retirar as medidas internas dos carros das frotas e para coletar os dados de temperatura e umidade com a frota em operação normal.



COMPARATIVO DO CONFORTO TÉRMICO ENTRE AS LINHAS VERMELHA E AZUL DO METRÔ DE SÃO PAULO UTILIZANDO O MÉTODO DE VOLUMES FINITOS

Alunos: Ana Beatriz Monteiro Theodoro, Bárbara Fiocchi Perez, Fuad Jamil Yatim, Gustavo Nakamura, Rafael de Oliveira Guariza; Orientador: Professor Cyro Albuquerque Neto



NORMAS

Para o estudo foram usadas duas normas que serão comentadas ao longo deste tópico, entretanto dando ênfase na primeira. A norma *Railway Applications—Air Conditioning for Urban and Suburban Rolling Stock—Part 1: Comfort Parameters* estabelece os parâmetros e condições necessárias para que o ambiente do trem seja considerado propício ao conforto térmico. Tais parâmetros são: Temperatura do Ar, Velocidade do ar, Umidade relativa do ar e Temperatura das superfícies interiores. A norma classifica os trens em duas categorias, tendo condições diferentes para cada categoria.

Considerando o Metrô de São Paulo a categoria aqui avaliada é a “A”. Sendo assim os parâmetros referentes a temperatura considerados são:

- Variação da temperatura média: Até 2°C
- Variação da temperatura ao longo do carro: Até 4°C
- Variação da temperatura vertical dentro do carro: Até 4°C

Agora pensando em umidade relativa e velocidade do ar, elas dependem da temperatura ambiente para serem definidas.

E por fim, a ASHRAE -55 define que o conforto térmico é uma experiência subjetiva de cada indivíduo, sendo assim outro ponto trazido pela norma é que para um ambiente ser considerado termicamente confortável menos de 10% das pessoas podem demonstrar desconforto com o ambiente.

CARGA TÉRMICA DO SER HUMANO

O cálculo de carga térmica é realizado por meio da equação posta abaixo, em que Q_{O_2} representa a taxa volumétrica de consumo de oxigênio e A_d é a área do corpo responsável pela troca de calor ou, área da Superfície de DuBois. Além disso, R_Q é um termo adimensional que estabelece a relação entre a quantidade de CO_2 exalada e o O_2 inalado.

$$M = \frac{Q_{O_2} * (21 * 0,32 * R_Q + 0,77)}{A_d}$$

Para determinar a Área da Superfície de DuBois, utiliza-se a equação a seguir, na qual m representa a massa e L a altura:

$$A_d = 0,202 * m^{0,426} * L^{0,725}$$

O R_Q será estimado em 0,83 para todos os passageiros por não estarem realizando um esforço físico pesado. Foi assumido um esforço moderado para todos, com um consumo de oxigênio fixo de 16 ml/s.

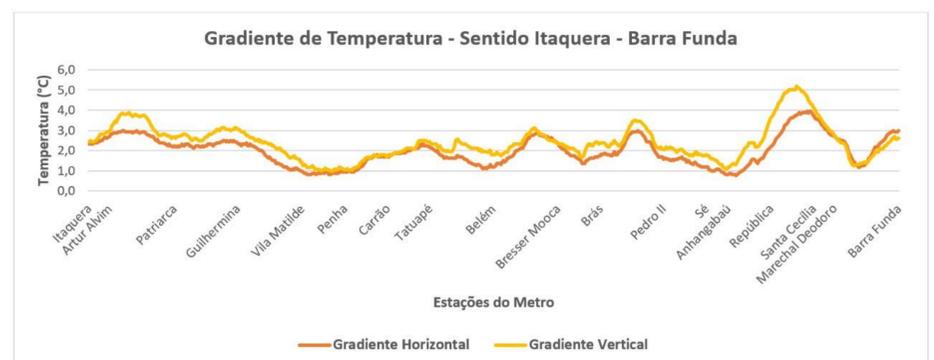
COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi realizada na linha -3 vermelha do metrô de São Paulo em um carro da frota H. Durante a coleta foi realizado o trajeto Itaquera – Barra funda/ Barra funda – Itaquera. Foram utilizados 12 sensores de temperatura, 3 de umidade e mais 3 Arduino. Na próxima imagem temos uma das instalações no carro do Metrô.

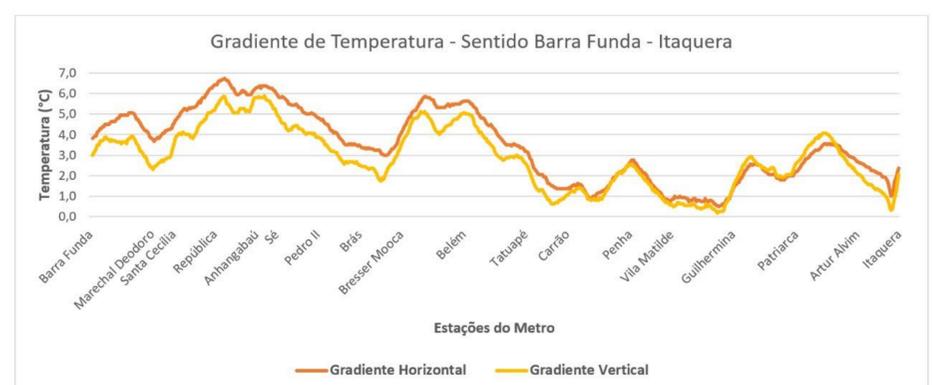


Os sistemas de aquisição de dados foram divididos pelo carro em três zonas de coleta diferentes para que validasse os gradientes de temperatura do trem em operação. Abaixo é possível observar o gradiente de temperatura do percurso Itaquera - Barra Funda.

GRADIENTE DE TEMPERATURA SENTIDO ITAQUERA - BARRA FUNDA



GRADIENTE DE TEMPERATURA SENTIDO BARRA FUNDA - ITAQUERA



COMPARATIVO DO CONFORTO TÉRMICO ENTRE AS LINHAS VERMELHA E AZUL DO METRÔ DE SÃO PAULO UTILIZANDO O MÉTODO DE VOLUMES FINITOS

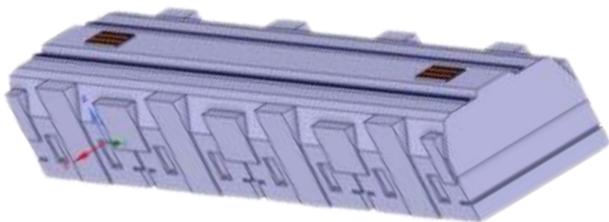
Alunos: Ana Beatriz Monteiro Theodoro, Bárbara Fiocchi Perez, Fuad Jamil Yatim, Gustavo Nakamura, Rafael de Oliveira Guariza; Orientador: Professor Cyro Albuquerque Neto



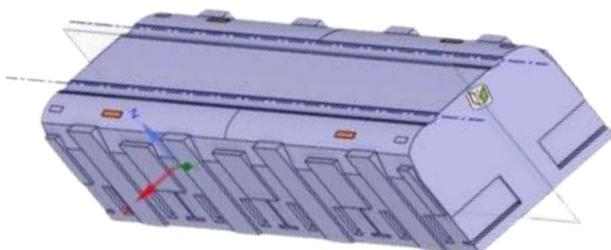
SIMULAÇÕES

As simulações foram realizadas através do solver Fluent, que é uma ferramenta do software Ansys, com a modelagem dos carros realizada em CAD no software Siemens NX. As simulações foram efetuadas a fim de validar como está a temperatura e como é o fluxo de ar dentro dos carros com os passageiros. Dando sequência as simulações, foram avaliadas as duas frotas utilizando o mesmo número de pessoas dentro de cada carro, 120 passageiros, colocando ambos na mesma situação, para que fosse possível avaliar alguns fatores como: a velocidade do ar dentro dos carros e temperatura do ar. As simulações foram realizadas também, para que fosse possível validar os dados obtidos na instrumentação dos carros.

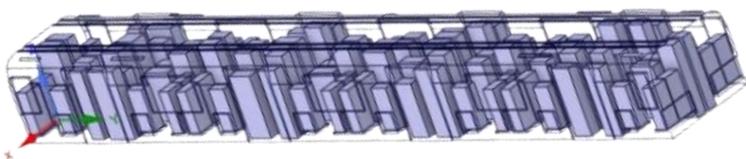
MODELO DO CARRO FROTA J COM O EXAUSTOR DESTACADO



MODELO DO CARRO FROTA H COM O EXAUSTOR DESTACADO



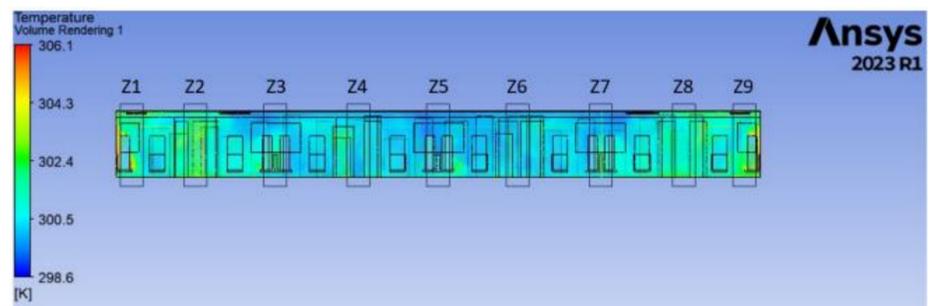
MODELO DO CARRO COM OS PASSAGEIROS



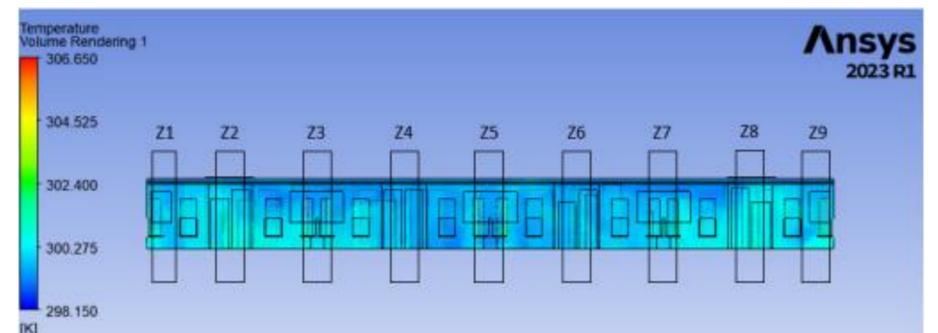
COMPARATIVO

A partir dos gradientes de temperatura é possível validar o motivo pelo qual a frota H recebe um número maior de reclamações, tendo uma grande variação da temperatura ao longo do carro, com o gradiente vertical variando consideravelmente, o que ocorre de forma contrária na frota J, com uma distribuição muito mais uniforme da temperatura ao longo do carro. Essa variação da frota H, ocorre principalmente no sentido Barra Funda Itaquera da linha 3- Vermelha, pois nesse sentido a um fluxo muito maior de passageiros do que o sentido contrário, com o gradiente de temperatura ficando fora da norma.

GRADIENTE DE TEMPERATURA AO LONGO DO CARRO DA FROTA H



GRADIENTE DE TEMPERATURA AO LONGO DO CARRO DA FROTA J



POSSÍVEIS MELHORIAS

Por meio da comparação entre as frotas algumas alterações na frota H devem ser consideradas:

- Melhoria nos dutos de distribuição de ar;
- Velocidade do ar mais elevada e uniforme ao longo do carro;
- Manutenção da temperatura média.

CONCLUSÕES

Através das simulações, utilizando os parâmetros definidos pelas normas e em seguida, aplicando os dados colhidos na instrumentação dos carros, atingiu-se os seguintes resultados, em que é possível perceber que as diferenças na disposição das entradas e saídas de ar, não são o que destoam uma frota da outra, mas sim os dutos do sistema de insuflamento na frota H, que podem ser a causa da disparidade no conforto térmico das duas frotas, sendo necessário um estudo focado no sistema de insuflamento da frota H para determinar a causa da má distribuição de ar. Apesar de ambas as frotas utilizarem o mesmo aparelho de ar condicionado, os dutos da frota J são capazes de distribuir uniformemente o ar por todo o comprimento de seus insufladores, enquanto a frota H peca nesse aspecto, não entregando ar em todo o comprimento do carro. Isso faz com que suas extremidades fiquem cerca de 5°C mais quentes do que a temperatura calibrada pelo ar condicionado. No entanto, ao simular a frota H com as mesmas condições da frota J, ou seja, com uma uniformidade na distribuição do ar, a frota H não apresentou os mesmos problemas, demonstrando a necessidade de redimensionar os dutos da frota H.