

Prêmio

**INOVAÇÃO  
EM REDE**



Estação Cerejeiras  
Linha 19 - Celeste

# Energias alternativas, eficiência energética e sustentabilidade em projetos de expansão da rede metroviária de São Paulo

## **Companhia do Metropolitano de São Paulo - Metrô**

Gerência de Projetos / Diretoria de Engenharia e Planejamento

Autores: Carlos Eduardo Paixão de Almeida, Adalberto de Paula Ramos e Felipe Copche

Categoria do projeto: Eficiência energética

Estudo de caso: Projeto básico da Linha 19 - Celeste

São Paulo, 12 de novembro de 2024.



# Linha 19 - Celeste

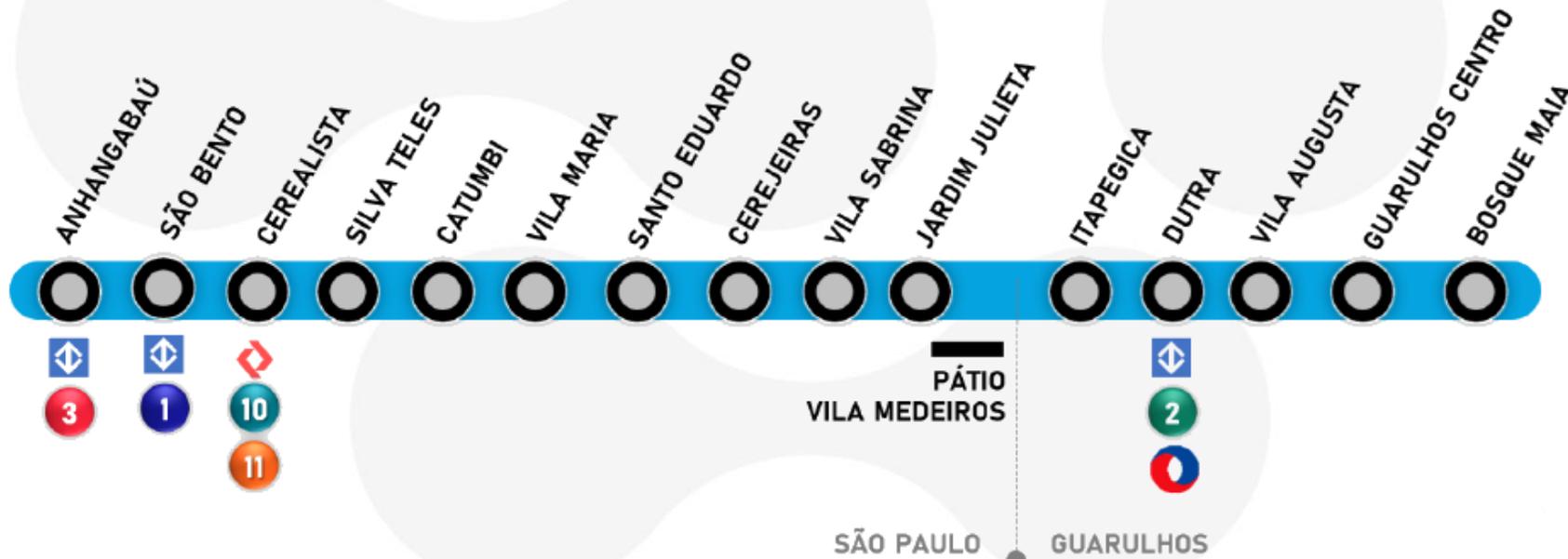
Primeiro trecho entre Anhangabaú e Bosque Maia (Guarulhos)

EXTENSÃO  
OPERACIONAL

ESTAÇÕES

17,6 km

15



PÁTIO  
VILA MEDEIROS

SÃO PAULO

GUARULHOS

Prêmio  
INOV  
AÇÃO  
EM REDE

ANP  
TRILHOS

# Linha 19 - Celeste



Extensão operacional  
**17,6** km



Subestações  
**2**



Profundidade estações  
**25** m em média



Estações  
**15**



Retificadoras  
**15**



Distância entre estações  
**1227** m em média



Demanda diária  
**684,9** mil pass.



1 Pátio  
**170** mil m<sup>2</sup>



Benefício social  
**R\$ 2,4** bilhões/ano



Carregamento HP  
**41,7** mil pass./sentido



Frota total  
**31** trens



Headway  
**125** segundos

# Linha 19 - Celeste

Traçado previsto na RMSP, com 5 estações em Guarulhos

(mantidos os nomes iniciais das estações)

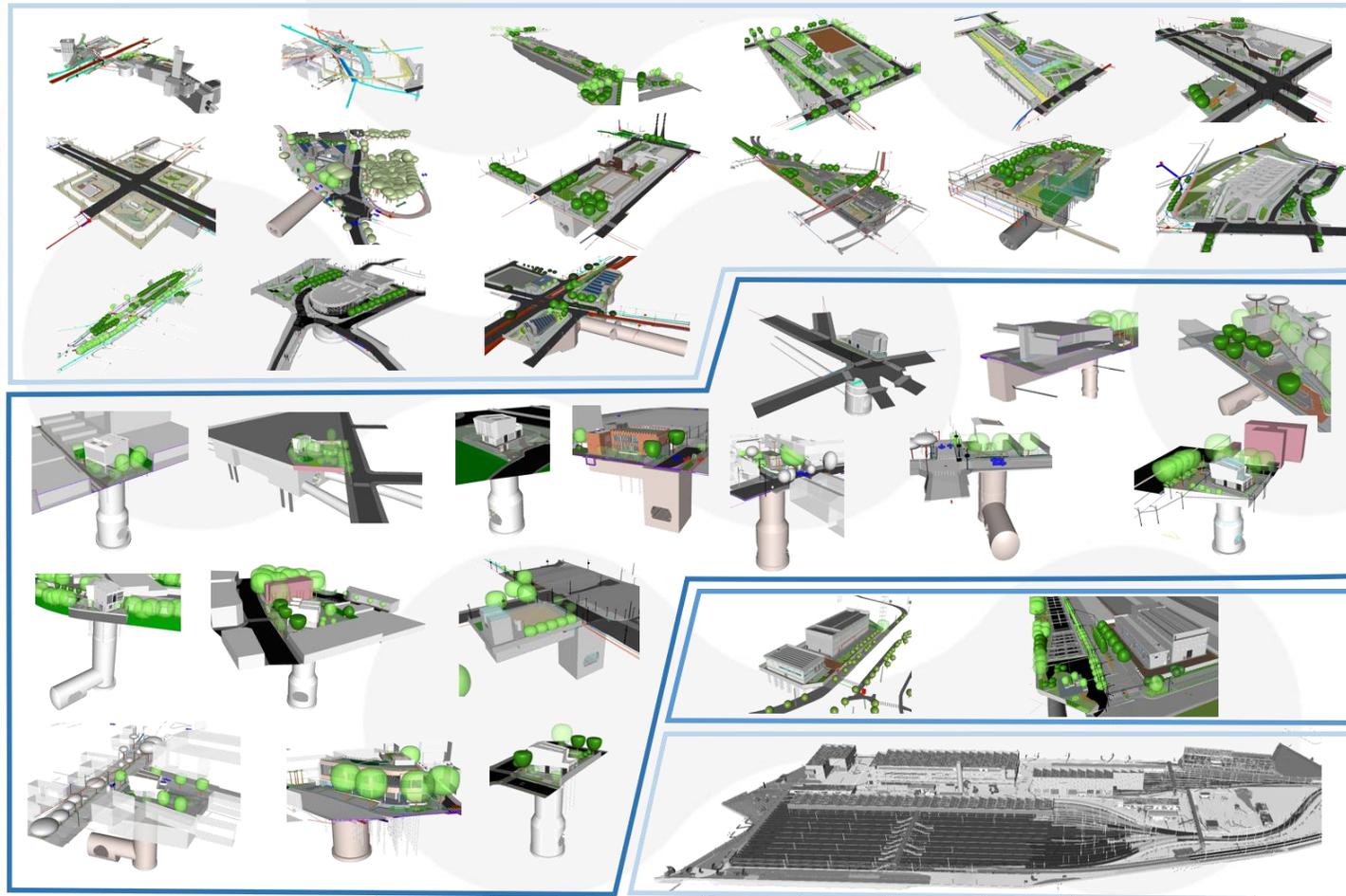


Prêmio  
INOVAÇÃO  
EM REDE

ANP  
TRILHOS

# Linha 19 - Celeste

Primeiro projeto de linha de metrô de grande porte concebido em BIM no Brasil



15 estações



18 VSE



2 subestações



1 pátio



+27k arquivos



623 modelos

inovAçãoBIM 

DE  
GPR

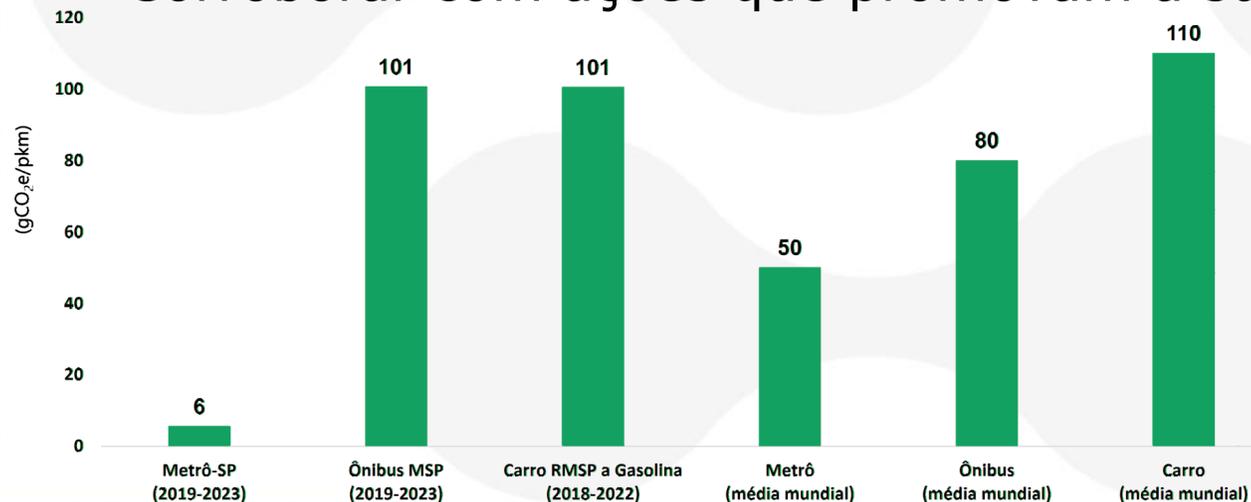
Prêmio  
INOV  
AÇÃO  
EM REDE

ANP  
TRILHOS

# Desenvolvimento sustentável

Mudanças climáticas, metas de descarbonização e transição energética

- Eletrificação via matriz energética de baixo carbono (6gCO<sub>2</sub>e/pkm)
- Aumento da eficiência energética
- Adoção de energias alternativas e renováveis
- Corroborar com ações que promovam a sustentabilidade ambiental



# Eficiência energética

A energia elétrica é o maior insumo para a operação do sistema metroviário.

O sistema de propulsão dos trens consome cerca de 70% da energia elétrica de uma linha metroviária.

Novas tecnologias mais eficientes e vantajosas para a propulsão elétrica de trens em fase de adoção, ou nos testes finais em serviço com passageiros.

**AÇÃO:** Redução do consumo de energia:

- pelo maior aproveitamento da energia regenerada durante as frenagens dos trens;
- com a atualização tecnológica em sistemas embarcados de propulsão, obtendo maior eficiência energética.

# Energias alternativas e renováveis

A massificação exponencial do uso de painéis para captação da energia solar tem tornado a tecnologia mais eficiente, robusta e acessível.

O aproveitamento de parte da área de pátio, estações, e subestações primárias para a instalação de painéis fotovoltaicos pode suplementar parte da demanda de energia elétrica dessas unidades construtivas.

**AÇÃO:** Corroborar com a viabilidade financeira e ambiental da nova linha pela:

- geração de um percentual da energia elétrica através de fontes alternativas abundantes, renováveis e ininterruptas, como a solar;
- aproveitamento total e instantâneo da energia gerada pelas cargas da unidade construtiva, ou pelas demais cargas conectadas à rede do sistema de alimentação elétrica.

# Sustentabilidade

A construção de uma linha metroviária com cerca de 16 km em túnel e com 15 estações demanda dezenas de milhares de caminhões para a retirada do volume de terra escavado.

Estações menos profundas e diâmetros internos menores de túnel reduzem o volume escavado. Diâmetros menores permitem a redução da espessura do anel do túnel, reduzindo também o volume de concreto empregado.

Uma vida útil maior das estruturas civis das estações diminui a quantidade de resíduos gerados na reposição ou na manutenção das mesmas.

A água potável é um recurso limitado e que compõe o custo operacional.

**AÇÃO:** Otimizar o projeto das estruturas civis levando em conta também a menor emissão de CO<sub>2</sub> durante as obras. Fazer bom uso de recursos naturais como a água.

# Alguns impactos positivos

Ao longo do ciclo de vida do empreendimento:

- Melhor uso do solo, subsolo e aproveitamento da luz natural
- Redução do custo da obra civil do túnel e de algumas estações
- Menor emissão de CO<sub>2</sub> durante as obras
- Redução do custo operacional da linha em relação aos gastos com energia
- Redução da manutenção civil de estações
- Otimização do uso da água potável



# Principais ações

## Eficiência energética

- Ajuste do perfil geométrico da via comercial entre estações
- Adoção de rampas com até 5% em alguns trechos de via
- Uso de inversores regenerativos da energia de frenagem ao longo da linha
- Atualização tecnológica para sistema de propulsão mais eficiente
- Melhorias na gestão de cargas elétricas auxiliares do trem
- Sistema de alimentação elétrica de média tensão em 34,5 kV CA

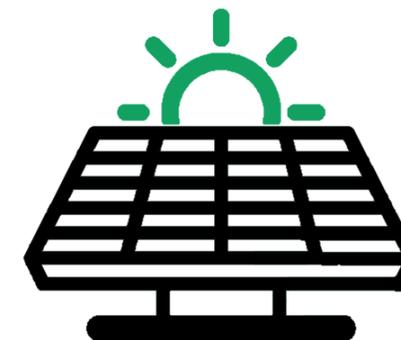


## Energias alternativas e renováveis

- Projeto estruturado de energia fotovoltaica nas estações, pátios e subestações primárias

## Sustentabilidade

- Redução na emissão de CO<sub>2</sub> com menor:
  - diâmetro e espessura do anel do túnel
  - volume de escavação de algumas estações
- Aumento da durabilidade do concreto das estações
- Uso eficiente da água limpa
- Qualificação do espaço urbano & paisagismo

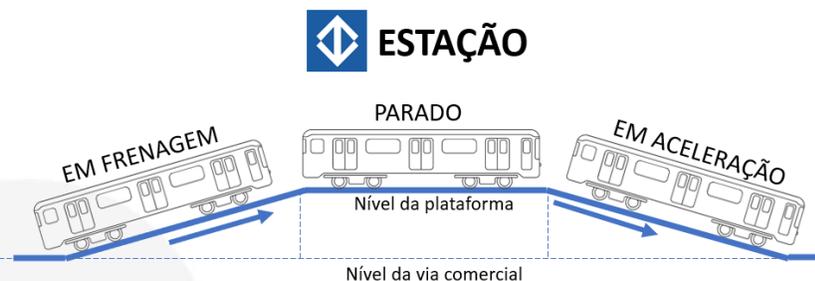


# Eficiência energética

Ajuste do perfil geométrico da via entre estações

Trecho de Via	Distância entre estações (m)	Greide	%
VSE 01 - Bosque Maia		Active	+0,5
Bosque Maia - Guarulhos Centro	1096	Active	+0,5 +1,2
Guarulhos Centro - Vila Augusta	1020	Em V	-3,2 +0,9
Vila Augusta - Dutra	1635	Em V	-0,8 +0,6
Dutra - Itapegica	1003	Active	+1,7 -0,5
Itapegica - Jd. Julieta	1074	Em V	-4,4 +0,9
Jd. Julieta - Vila Sabrina (Jd. Brasil)	1391	Em V	-2,0 +4,7
Vila Sabrina (Jd. Brasil) - Cerejeiras (Jd. Japão)	1346	Em V	-2,3 +0,7
Cerejeiras (Jd. Japão) - Santo Eduardo (Curuçá)	2000	Em V	-2,0 +0,5
Santo Eduardo (Curuçá) - Vila Maria	1092	Em V	-0,5 +0,8
Vila Maria - Catumbi	1382	Em V	-3,3 +4,1
Catumbi - Silva Teles	684	Em V	-0,5 +4,0
Silva Teles - Cerealista (Pari)	1579	Em V	-3,4 +3,9
Cerealista (Pari) - São Bento	1271	Em V	-4,0 +2,5
São Bento - Anhangabaú	608	Active	+1,5
Anhangabaú - VSE18		Active	+1,5 +4,4

distância média entre estações: 1227,2



11 trechos entre estações em “V”

**Rampas com até 5% (via 100% subterrânea)**

“Mais flexibilidade no traçado vertical, buscando conceber estações mais rasas, menor volume de escavação e a inserção de unidades construtivas padronizadas em BIM.”

Prêmio  
**INOV  
AÇÃO  
EM REDE**

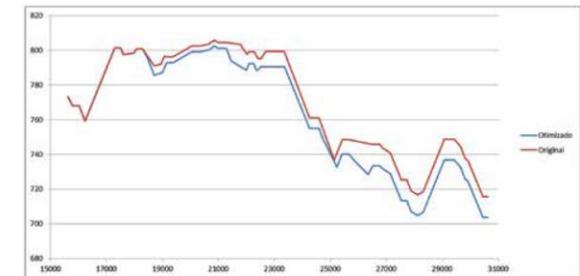
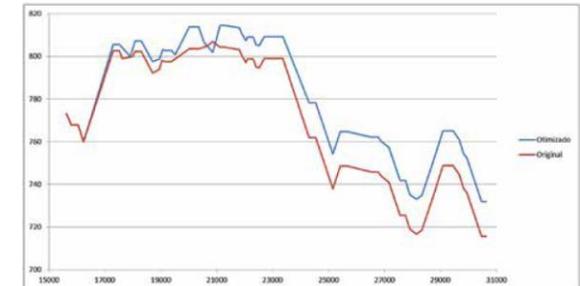
**ANP  
TRILHOS**

# Eficiência energética

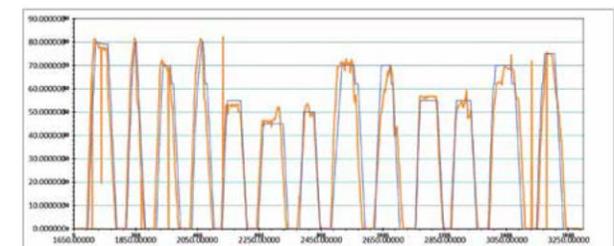
Ajuste do perfil geométrico da via entre estações

**Estudo de referência: Simulação de marcha e elétrica na Linha 2 – Verde**

- Alteração da via com rampas próximas às estações durante o processo de otimização, trecho entre Vila Prudente e Vila Madalena
- Cálculo do consumo de energia durante um mês com o perfil de via otimizado, simulando uma operação ATO no software *EBahn* com dados históricos de medições para calibração
- Redução calculada de cerca de **4%** no consumo elétrico dos trens com o perfil otimizado versus a via original da Linha 2 – Verde na simulação, que equivale a **270 MWh** mensais de economia de energia
- Considerando um consumo mensal residencial médio de 152,2 KWh, essa economia de energia assemelha ao consumo de **1.775 lares**



Traçados original e otimizado para vias 1 e 2



Velocidade x percurso na via 2

# Eficiência energética

## Uso de inversores regenerativos da energia de frenagem

Simulação de marcha e elétrica realizada pelo CITEF (Centro espanhol de pesquisa em tecnologias ferroviárias, vinculado a Poli de Madri).

Uso do software *Hamlet* para condições nominais e degradadas para análise dos parâmetros e necessidades para o projeto de rede de distribuição elétrica.

Considerando a escolha pelo **cenário 2A**, em condições ideais, a perspectiva do valor recuperado anual equivale a cerca de **8%** do consumo anual da Linha 1 – Azul, ou uma de economia 13 GWh/ano, que equivale a energia elétrica necessária para suprir anualmente **7.121 lares** brasileiros.

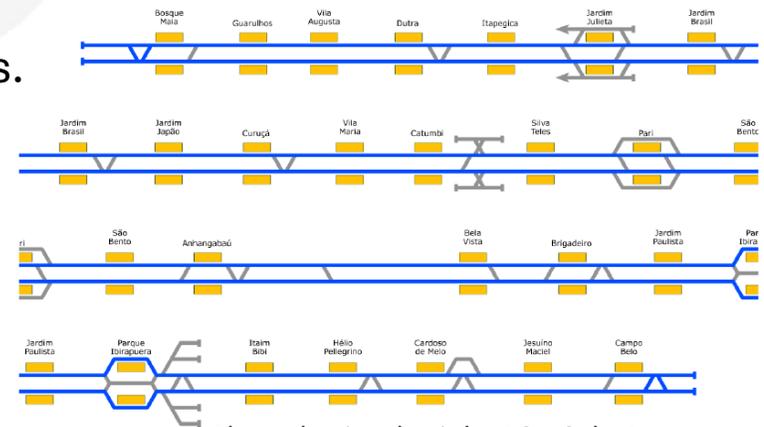
Uma economia em condições reais de **3%** terá um *payback* de 7 anos.

Cenário	Quantidade de inversores (unid.)	Energia recuperada (kWh)	Total previsto de investimento (R\$)	Valor recuperado anual (R\$)	Período de retorno (anos)
1	2	1.995,4	9.005.294,12	4.268.565,11	2,1
2	3	2.248,3	13.507.941,18	4.809.523,98	2,8
2A	3	2.383,3	13.507.941,18	5.098.400,47	2,6

Headway de 180 segundos, trem carregado, durante 15 horas de vale (média operacional diária)

Subestação	Energia recuperada [kWh]
SER01_BQM	
SER02_GUA	666,84
SER03_AUG	
SER04_DTR	
SER05_ITG	
SER06_JDJ	
SER07_JDB	
SER08_JAP	
SER09_CUR	
SER10_VLM	
SER11_CAT	
SER12_STL	664,97
SER13_PAR	
SER14_BTO	
SER15_GBU	1.051,52

TOTAL: 2.383,3  
Cenário 2A



Plano de vias da Linha 19 - Celeste

# Eficiência energética

Sistema de alimentação elétrica de média tensão em 34,5 kV CA

Com o avanço de materiais e tecnologia de isolamento elétrica, o custo de equipamentos na classe de 34,5 KV CA ficou similar e acessível ao 22 KV CA, o que levou a optar pela aplicação na Linha 19 – Celeste, com os seguintes benefícios:

- Menores correntes elétricas em cabos e equipamentos, conseqüente menor queda de tensão, menor valor de curto-circuito e melhor custo-benefício.
- Até 33% de menor ocupação de espaço físico na instalação dos cabos de potência.
- Em torno de 18% de redução de perda por Efeito Joule, contribuindo com a redução do consumo elétrico.
- Cerca de 60% de redução no custo de aquisição e instalação dos cabos.

# Eficiência energética

Uso de motores síncronos de ímã permanente e carbeto de silício nos inversores



Motor PMSM

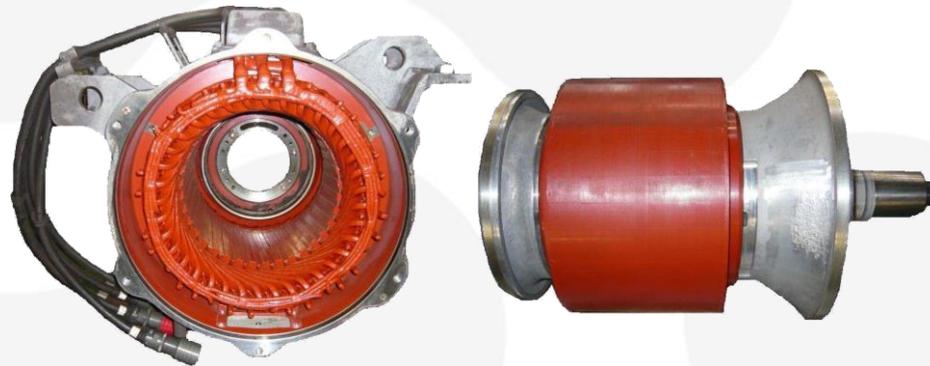
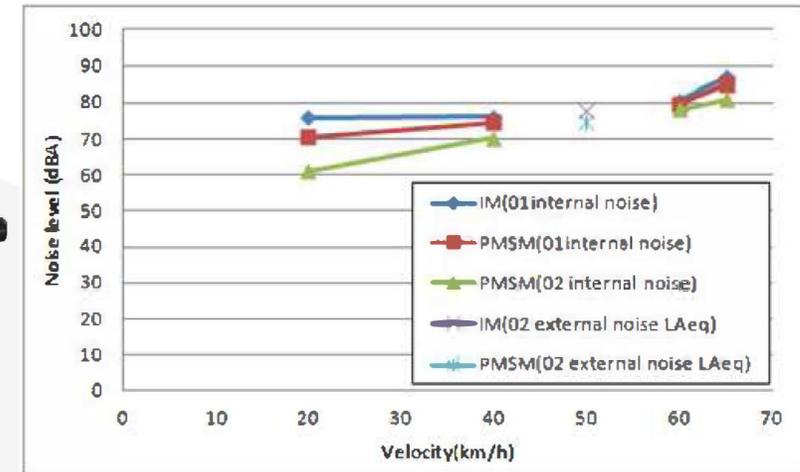


Imagem do interior do motor após 361 mil km rodados



- Maior eficiência energética comparado ao motor de indução
- Requer menos manutenção
- 3dB mais silencioso para uma velocidade média de 50 km/h



Inversor de Tração SiC

- Eficiência energética superior para inversores de tração
- Possibilidade de simplificar o sistema de resfriamento
- Redução do volume e peso
- Menor ruído (sem ventoinha e operando em frequência mais alta)

# Eficiência energética

## Teste comparativo com motor síncrono de ímã permanente (PMSM)

### Linha 1 – Azul (2023)

- 5.035.363 km percorridos
- Frota média de 40 trens
- Média de 125.884 km por trem



	Consumo de energia Tração (kWh/km)	Energia regenerada (kWh/km)	Taxa de regeneração	Consumo de energia Sistemas auxiliares (kWh/km)	Consumo total de energia (kWh/km)
Propulsão síncrona por ímã permanente (PMSM)	13,57	8,7	64,1%	2,75	7,61
Propulsão assíncrona (IM)	16,26	7,86	48,3%	2,73	11,13
Taxa de regeneração de energia	16,5%	10,7%	32,7%	-	31,6%

Testes realizados na Linha 1 do Metrô da cidade chinesa de Changsha

	Energia consumida (km)	Consumo anual de energia (kWh)
Motor convencional	11 kWh	1.320.000
Motor PMSM	7,7 kWh	924.000

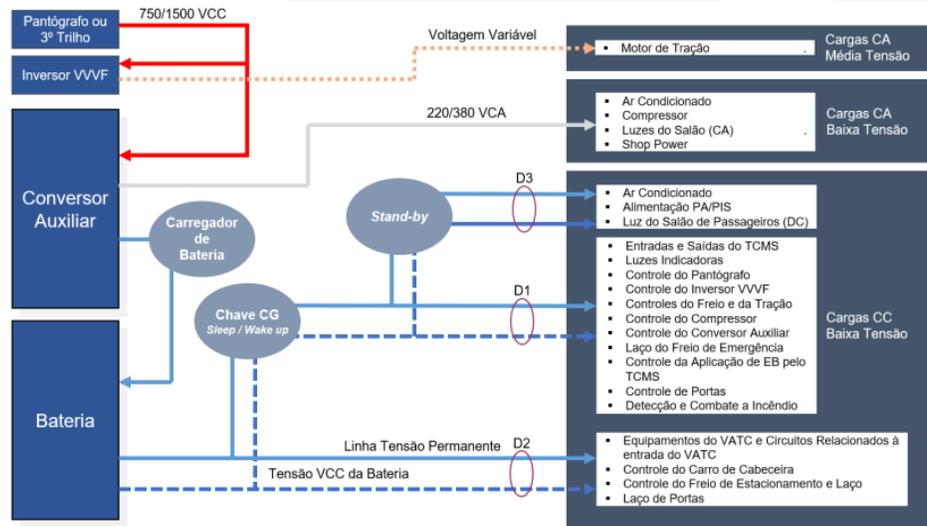
Carro tipo B, 1500V, 80 km/h, 12.000 km/ano

Composição com 6 carros, sendo 4 com sistema de propulsão

- CAPEX do PMSM cerca de 20% maior do que IM.
- Retorno de investimento estimado em 3 anos considerando 12 mil km percorridos por ano.

# Eficiência energética

Melhorias na gestão de cargas elétricas auxiliares do trem



Funções *Stand-by* (salão) e *Sleep* (geral) para gestão de cargas do trem em operação em UTO;

Ar condicionado do salão com velocidade variável do compressor (uso de inversor);

Variável "peso do carro" no controle do ar condicionado (carga térmica dos passageiros);

Uso de iluminação em LED com temperatura de cor variável.



**LED**  
Light

Prêmio  
**INOVAÇÃO  
EM REDE**

**ANP  
TRILHOS**

# Energias alternativas e renováveis

Projeto estruturado de captação de energia solar modelado em BIM



UNIDADE CONSTRUTIVA	QUANT. DE PLACAS	GERAÇÃO POR DIA (MWh)	GERAÇÃO MENSAL (MWh)	GERAÇÃO ANUAL (GWh)	CAPEX (R\$)	TEMPO DE RETORNO (Anos)
ESTAÇÕES	2.750	6	188	2.3	16,3 milhões	13.8
PÁTIO (blocos)	4.899	11	335	4.0	18,0 milhões	10.2
SUBESTAÇÕES PRIMÁRIAS	472	1	32	0.4	2,8 milhões	13.7
<b>TOTAL</b>	<b>8.121</b>	<b>19</b>	<b>555</b>	<b>6.7</b>	<b>37,1 milhões</b>	

Projeto considerando os devidos reforços estruturais, acessos e pontos hidráulicos necessários para a limpeza periódica das placas solares.

Degradação de potência no primeiro ano menor que 2%. Anos subsequentes menor que 0,55%. Perda máxima de 7% na geração de energia após 10 anos de operação.

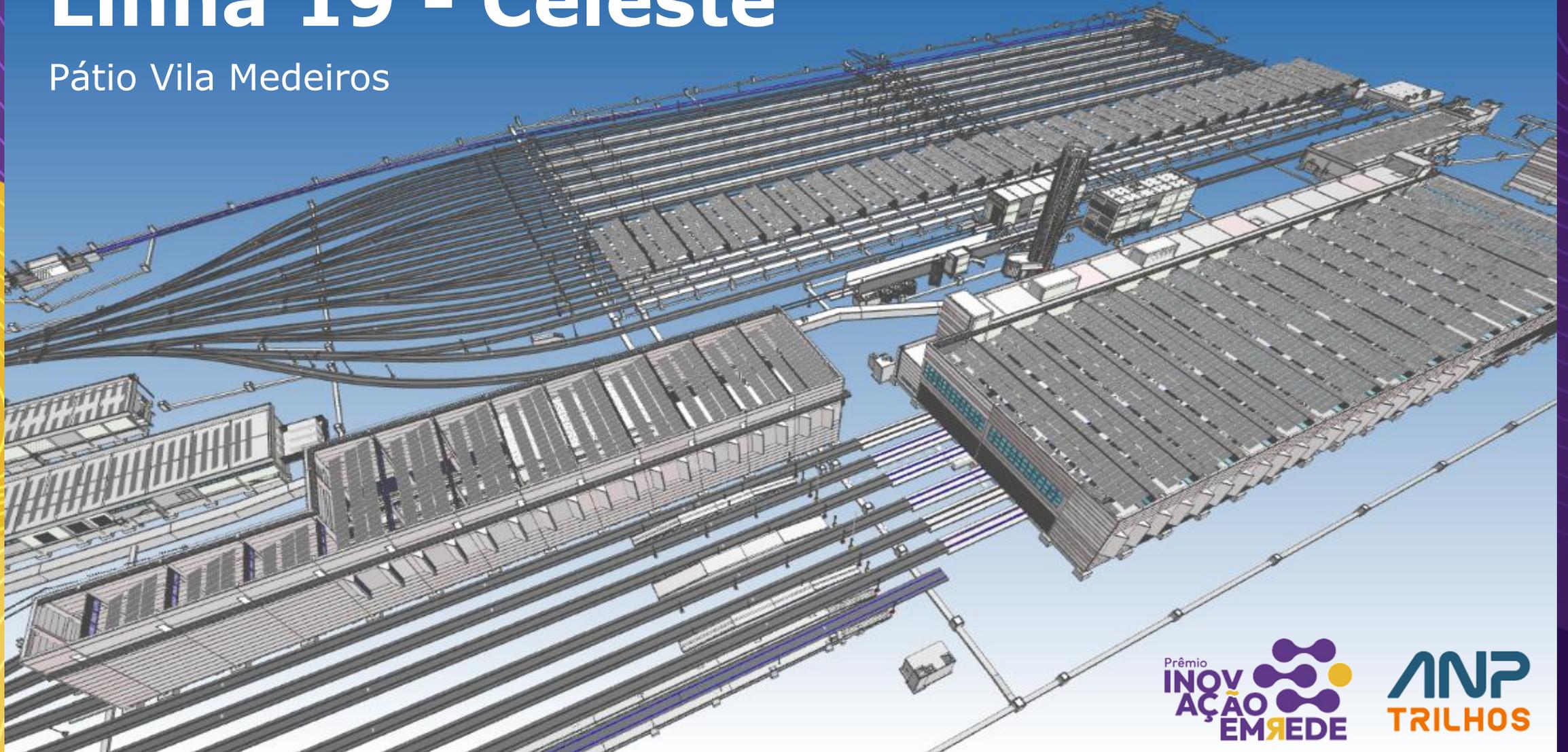
O potencial de geração de 6,7 GWh/ano representa **cerca de 8%** do consumo anual da Linha 2 – Verde, por exemplo, e que equivale à energia elétrica necessária para suprir **3.670 lares** brasileiros.

Linha	MWh por mês	Equivalência por ano (GWh)
1 - Azul	12791	153.5
2 - Verde	7122	85.5
3 - Vermelha	11073	132.9
15 - Prata	3479	41.7
<b>TOTAL</b>	<b>34465</b>	<b>413.6</b>

Consumo em MWh mensal (referência setembro/24)

# Linha 19 - Celeste

Pátio Vila Medeiros

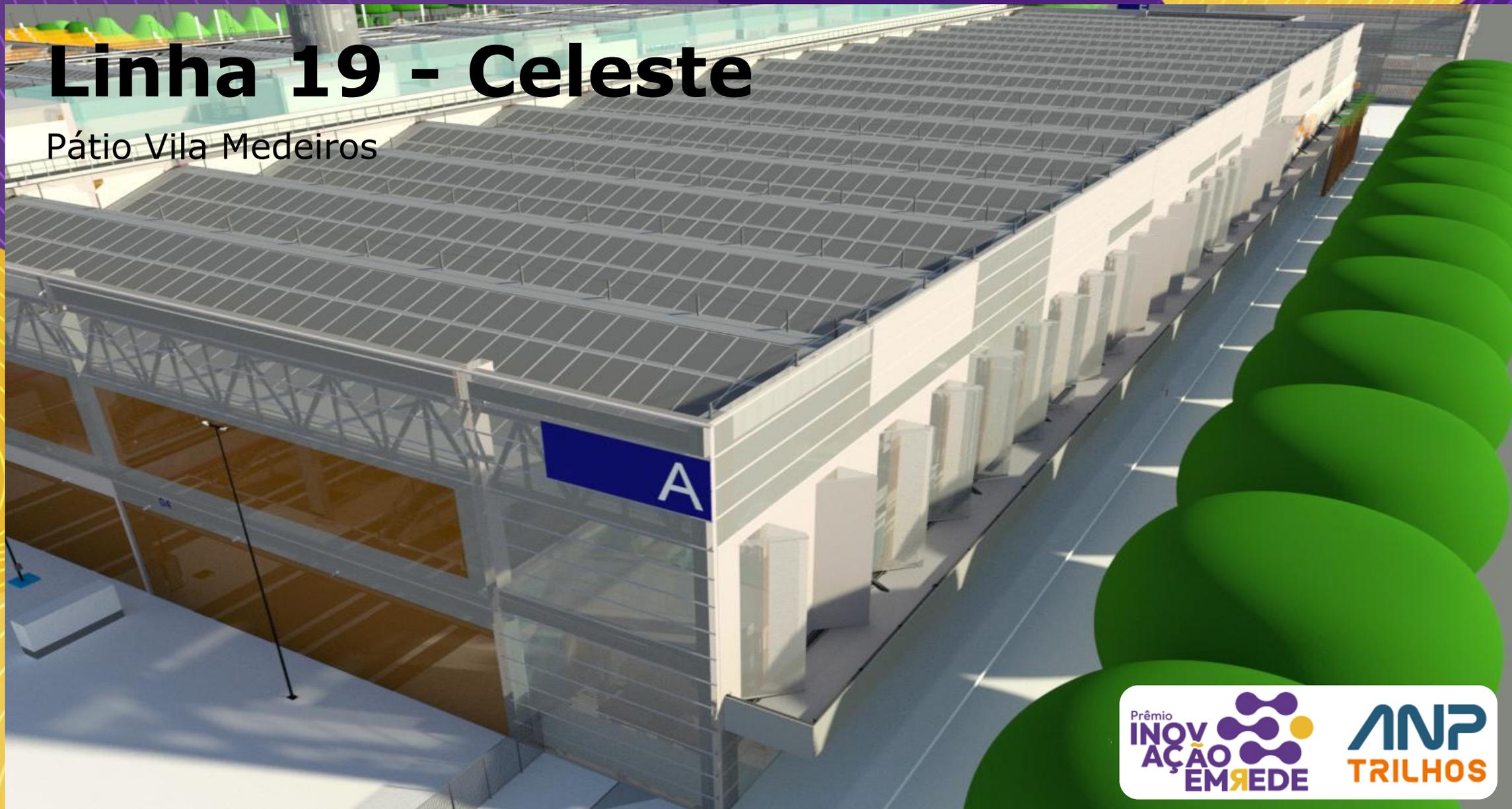


Prêmio  
**INOVAÇÃO  
EM REDE**

**ANP**  
**TRILHOS**

# Linha 19 - Celeste

Pátio Vila Medeiros



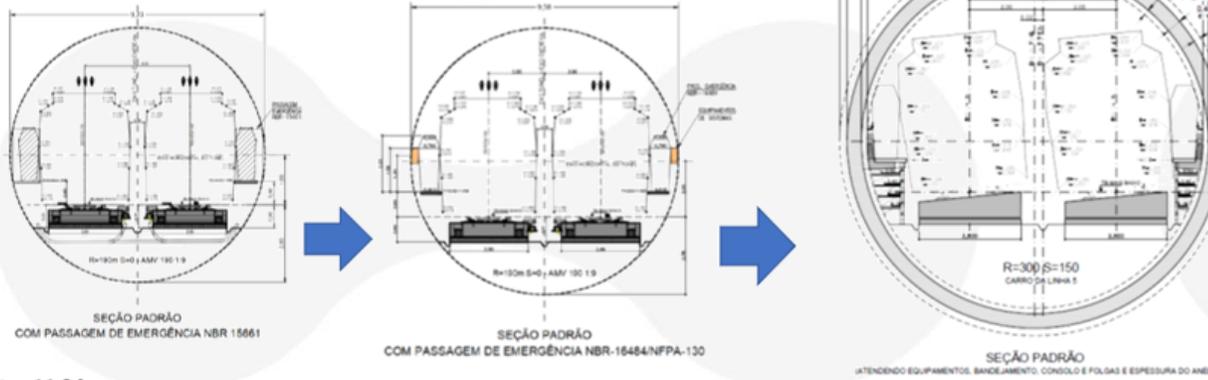
# Sustentabilidade

Redução do diâmetro do túnel e da espessura do anel; cobrimento da armação

Bitola: 1.435 mm

Largura do carro: 2,80 m

Catenária rígida nos túneis



$\phi - 11,24$  m

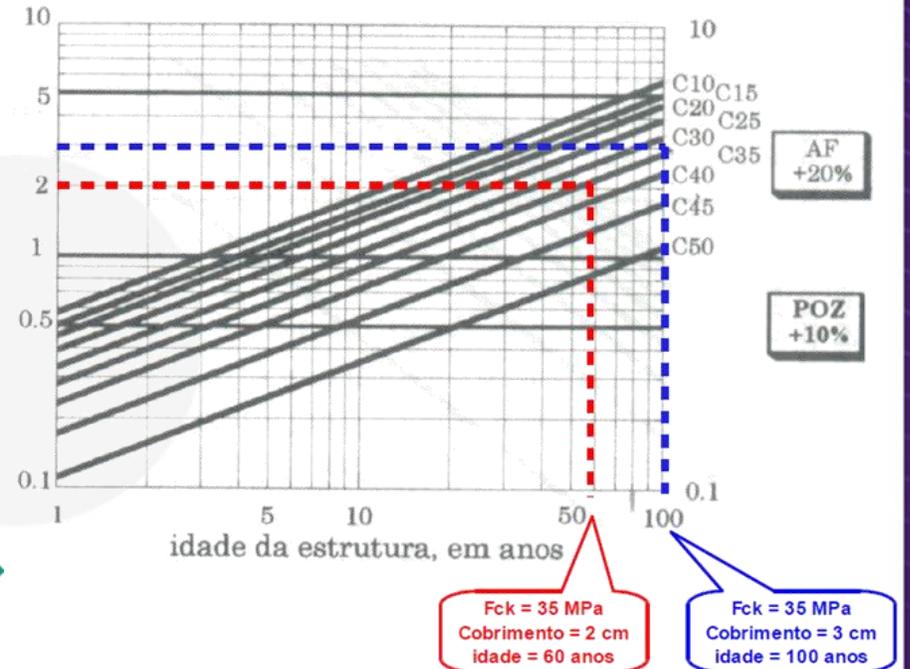
Espessura do anel: 0,45 m  
Volume de escavação: 99 m<sup>3</sup>/m  
Volume de concreto: 14,7 m<sup>3</sup>/m

$\phi - 11,06$  m

Espessura do anel: 0,45 m  
Volume de escavação: 96 m<sup>3</sup>/m

$\phi - 10,68$  m de escavação

Espessura do anel: 0,40 m  
Volume de escavação: 89,6 m<sup>3</sup>/m -> 10%  
Volume de concreto: 12,42 m<sup>3</sup>/m -> 16%



- Cerca de **157 mil m<sup>3</sup>** ou **19 mil** caminhões de terra e **37 mil m<sup>3</sup>** ou **4,6 mil** caminhões betoneira de concreto a menos para a construção do túnel
- Redução direta no CAPEX do empreendimento
- Redução da emissão de CO<sub>2</sub> com menos viagens de caminhões
- Redução do volume de “bota-fora”

- Garantir uma vida útil de projeto mínima de 100 anos
- Minimizar intervenções de diagnóstico, reparo, reforço e proteção durante sua vida útil
- Diminuir a quantidade de resíduos gerados

# Sustentabilidade



## Aproveitamento de água pluvial e adoção de economizadores

Previstos dois tipos de reservatórios dimensionados para captação de água nas estações:

- 1) Água de piso para retenção e devolução na rede pública (contenção contra enchentes)
- 2) Água de reaproveitamento da cobertura para fins não potáveis
  - Lavagem de piso da estação e irrigação
  - Bacias sanitárias (maior consumo nas estações com banheiros públicos)
  - Reserva de incêndio

Primeiros 2 mm da água de chuva são descartados. Tratamento com filtro e Cloro

Ações para redução do uso da água potável e de reaproveitamento das chuvas

- Banheiros públicos alocados na área paga das estações
- Torneiras de água potável com temporizador
- Bacias sanitárias com descarga de 3 e 6 litros
- Redutores de vazão para uso da água potável
- Mangueiras perfuradas no jardim para irrigar por gotejamento



Estação Vila Sabrina



Irrigação do paisagismo por gotejamento

# Sustentabilidade

Aproveitamento de água pluvial e adoção de economizadores

Potencial total estimado ao implantar em 6 estações da **Linha 19 - Celeste**:

Água pluvial com aparelhos redutores de consumo:

- Economia anual: **R\$ 414.000,00**
- Volume total captado e poupado: 23.651 m<sup>3</sup>

Eficiência na redução de consumo de água:

- **34 %** no uso de água de chuva como fonte não potável
- **47,5 %** somando água de chuva com aparelhos redutores de consumo (13,5%)

Retorno do investimento de até 6 anos (data base 2023)



# Sustentabilidade

Prêmio  
INOVAÇÃO  
EM REDE

ANP  
TRILHOS

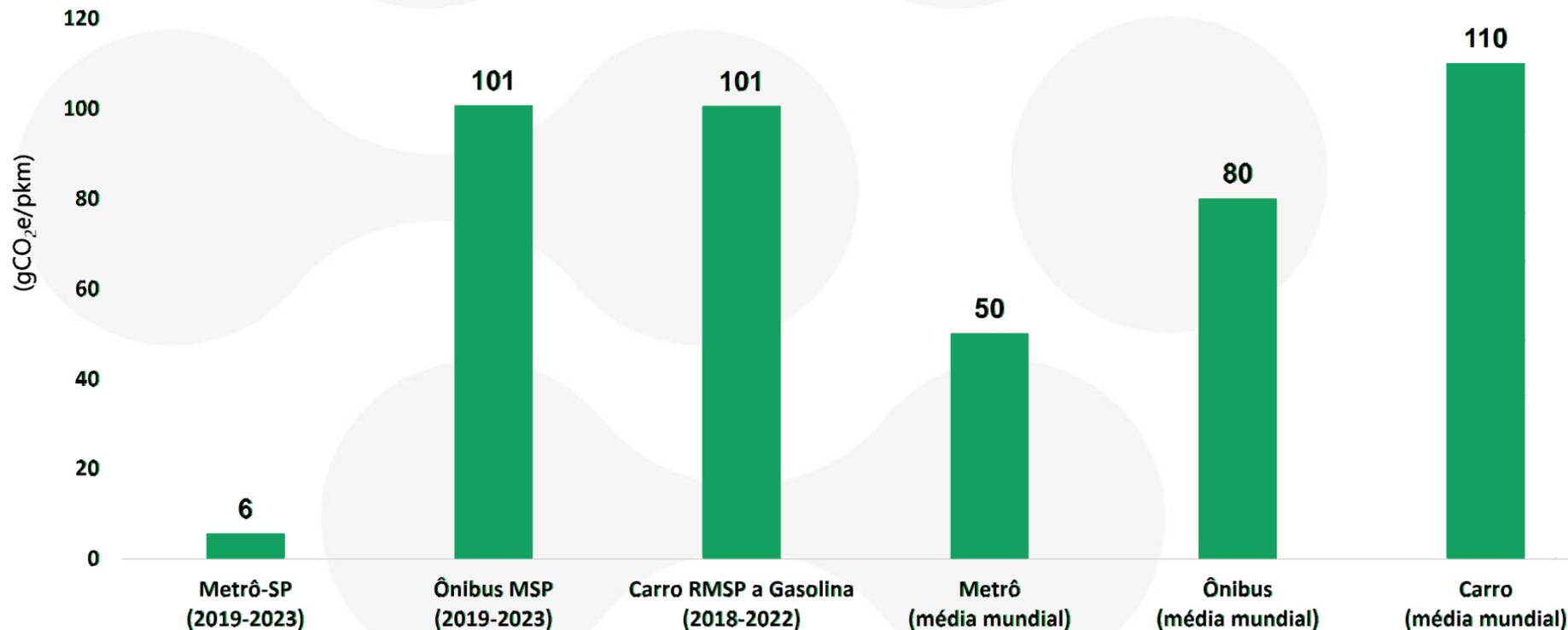
## Qualificação do espaço urbano & paisagismo

- Implantação de corredores verdes para ampliar a capacidade adaptativa a riscos e impactos resultantes das mudanças climáticas
- Promoção da circulação e conforto de pedestres e ciclistas na qualificação dos espaços públicos
- Aumento da cobertura vegetal para propiciar o resgate da biodiversidade e para ampliar a drenagem das águas superficiais
- Combater ilhas de calor, melhorar a qualidade do ar e maior absorção de CO<sub>2</sub>
- Implantação de infraestruturas verdes como biovaletas, jardins de chuvas, paredes verdes, tetos verdes, pisos drenantes, entre outros
- Seleção de vegetações nativas adaptadas ao paisagismo em escala urbana
- Menor volume de água para irrigação e menor manutenção (podas)



# O Metrô de São Paulo

Emissões de gases do efeito estufa por passageiro-km (gCO<sub>2</sub>e/pkm)



Dados de emissões de veículos à gasolina, considerando-se as atualizações de autonomia e frota da RMSP disponíveis (dados CETESB).

# Aderência às metas globais

Objetivos de Desenvolvimento sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU



Água potável e saneamento - **gestão sustentável da água**



Energia limpa e acessível - assegurar o acesso **sustentável à energia**



Indústria, inovação e infraestrutura - **construir infraestruturas resilientes e fomentar a inovação**

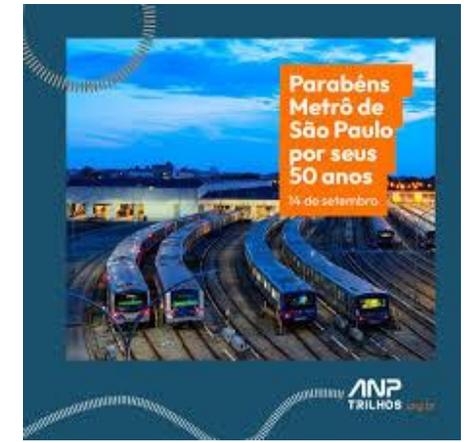
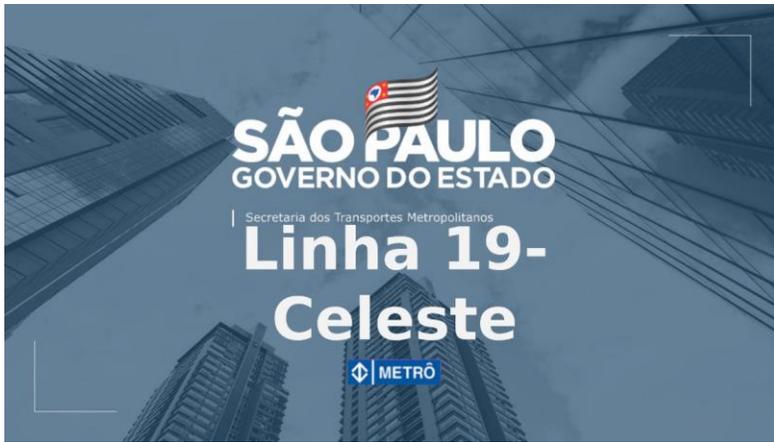


Cidades e comunidades sustentáveis - tornar as cidades e os assentamentos humanos **inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis**



Ação contra a mudança global do clima - tomar medidas urgentes para **combater a mudança do clima** e seus impactos

**Áreas verdes & paisagismo** relacionados aos Objetivos 3 e 15



Muito obrigado!

## Contatos

Eng. Carlos Eduardo Paixão de Almeida - DE/GPR [calmeida@metrosp.com.br](mailto:calmeida@metrosp.com.br)

Eng. Adalberto de Paula Ramos - DE/GPR/PRS [aramos@metrosp.com.br](mailto:aramos@metrosp.com.br)

Eng. Felipe Copche - DE/GPR/PRS/CSS [fcopche@metrosp.com.br](mailto:fcopche@metrosp.com.br)

