

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



CATEGORIA (3)

**Autores**

Engº Atilio Henrique Laudanna - Metrô-SP

Engº Massaru Saito - Metrô-SP

Arqº Thiago Moysés de Lima - Metrô-SP

Engº Adalberto de Paula Ramos - Metrô-SP

**PROJETO DE SISTEMA DE TRANSPORTE, INOVAÇÃO TECNOLÓGICA,  
APRIMORAMENTO DE TÉCNICAS DE IMPLANTAÇÃO -  
SISTEMA FOTOVOLTAICO**

**INTRODUÇÃO**

O desenvolvimento dos projetos de sistemas de transporte, utilizando ferramentas como o “BIM”, *BUILDING INFORMATION MODELING* (Modelagem da Informação no aspecto da construção), permite a integração de diferentes profissionais e modalidades da engenharia e arquitetura no processo de elaboração dos projetos, desde a sua concepção até sua implantação. Desta forma, durante as etapas de construção, pode-se obter um melhor detalhamento do empreendimento, propiciando um trabalho colaborativo e interdisciplinar.

A integração das diferentes áreas permite uma representação mais realista, que possibilita uma análise prévia das prováveis interferências que somente seriam detectadas durante a etapa de instalação. Tais análises, facilitadas por meio de visualizações em três dimensões, viabilizaram a

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



implementação de uma miniusina de geração de energia elétrica no projeto da Estação Ipiranga da Linha 15 – Prata, que é justamente o destaque do trabalho ora apresentado.

Compreendido pela sustentabilidade aplicada à tecnologia da construção, este trabalho, que trata da captação e transformação de energia solar em energia elétrica, foi desenvolvido de forma interdisciplinar e colaborativa entre as equipes de arquitetura, civil e sistemas elétricos, com a finalidade de reduzir custo de projeto e implantação, por meio da utilização de equipamentos mais eficientes e modernos.

O projeto desta miniusina foi configurado com a expectativa de aumentar a eficiência energética e, conseqüentemente, proporcionar uma economia no tarifário de energia elétrica, o que caracteriza uma inovação para o sistema de baixa tensão nos atuais sistemas aplicados nas estações de Metrô.

As placas fotovoltaicas, responsáveis pela conversão da luz solar em energia elétrica, são conectadas aos inversores, os quais alimentam diretamente o sistema elétrico de baixa tensão. Tal configuração evitou a utilização de um transformador na saída dos inversores da planta do sistema elétrico fotovoltaico, o que permitiu uma significativa simplificação no circuito. O sistema fotovoltaico, ligado diretamente à fonte de energia da estação, produzirá um potencial que não interfere com a rede externa de alimentação da concessionária. Deste modo, toda energia elétrica gerada pelo sistema será consumida internamente pelas cargas da estação. Caso a energia produzida pela usina seja superior à quantidade requerida naquele instante, o excedente será transmitido para demais cargas conectadas ao sistema de alimentação elétrica da rede de energia do Metrô, resultando em um aproveitamento total da energia gerada e conseqüente eficiência elétrica para o sistema.

## DIAGNÓSTICO

Esse projeto de captação de energia solar foi incorporado ao projeto básico da Estação Ipiranga, previamente elaborado, com a premissa de respeitar integralmente a concepção arquitetônica pré-estabelecida, a fim de evitar mudanças significativas no projeto. Sendo uma construção elevada, a estação possui uma cobertura de cerca de 3.600 m<sup>2</sup>, com faixas transversais de iluminação zenital, onde será aplicado o sistema de captação de energia solar – figura 1. Dessa forma, as equipes trabalharam conjuntamente para viabilizar a distribuição e posicionamento das placas, respeitando o desenho da cobertura, dos encaminhamentos dos cabos até as salas técnicas e viabilizando espaços para instalação de equipamentos, sem prejuízo para o projeto civil já elaborado.

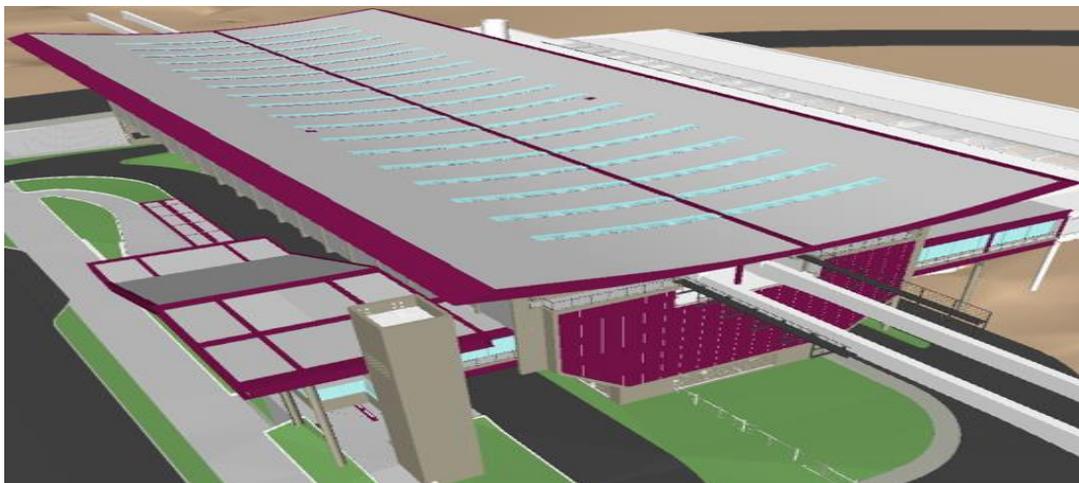


Figura 1 – Estação Ipiranga do Monotrilho- linha 15 - Prata

Atualmente o Metrô de São Paulo adquire previamente, no mercado livre, pacotes de energia elétrica em alta tensão, para utilização nos meses subsequentes. A aplicação deste sistema de geração de energia fotovoltaica é diferenciada e não está ligada diretamente à rede da concessionária, e assim não estará sujeita às normas do sistema de fornecimento convencional de energia elétrica, haja vista que a energia gerada será consumida na sua totalidade nas redes

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



internas do Metrô. Este projeto se caracteriza por ser *ON GRID*, o que permite a operação de forma interativa com a rede de energia de corrente alternada em 460 Vca da estação e trata-se uma inovação que contribuirá para redução do consumo de energia elétrica do sistema de baixa tensão.

O panorama indicado, *SNAPSHOT OF GLOBAL PV (PHOTOVOLTAIC) MARKETS 2020 da INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA)* relativo ao ano de 2019, *PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME* mostra a China classificada em 1º lugar com geração elétrica de 30,1GW (giga watts), seguido da Europa inteira 2º lugar com 16,0 GW, e em 3º os EUA com 13,3 GW, como partes do total com outros países, totalizando 115 GA figura 2 apresenta a classificação mencionada.

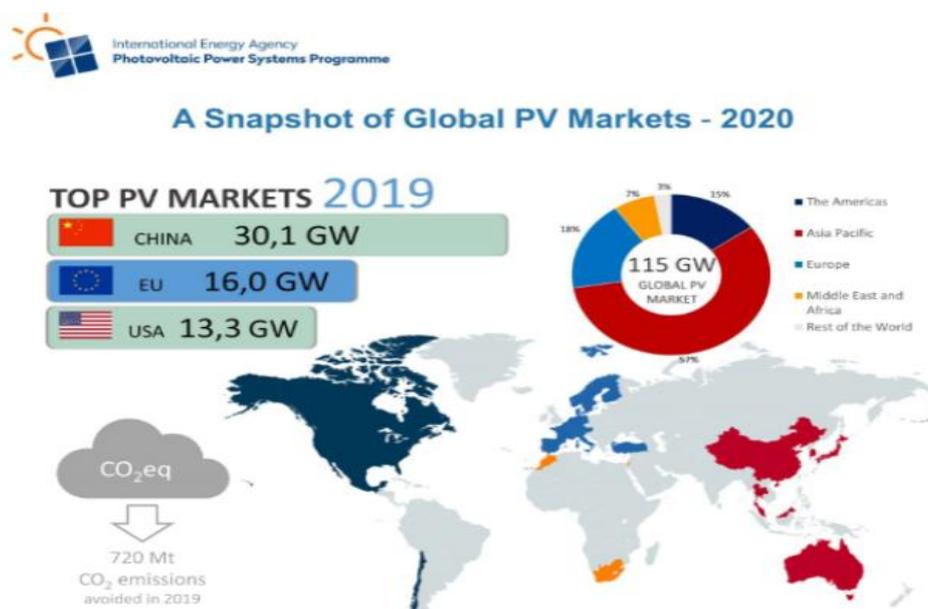


Figura 2-SNAPSHOT OF GLOBAL PHOTOVOLTAIC MARKETS 2020 (INDICES 2019)\*

\* Fonte: SNAPSHOT - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA)

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



O estudo teve como ponto de partida a adoção de tecnologia sustentável na aplicação de usina geradora de energia elétrica solar, aproveitamento da área de cobertura existente da Estação Ipiranga, com a prerrogativa do máximo aproveitamento energético, seja pela posição das placas fotovoltaicas, ou seja, pelo aproveitamento de toda energia elétrica que será gerada pelo sistema previsto de transformação de luz em energia elétrica.

O Metrô de São Paulo, em sua norma NGR-10-200 - Fontes Alternativas de Energia e Eficiência Energética, publicada em 2018, dispõe sobre diretrizes básicas, no âmbito da Arquitetura, dos Sistemas Elétricos e do Material Rodante, elaborada para concepção e desenvolvimento de projetos de novas linhas e para a modernização e atualização das linhas existentes, com a finalidade de obtenção de formas alternativas de geração e economia de energia, o que vem ao encontro da proposta deste trabalho.

O Sistema Fotovoltaico no Brasil segue o disposto na Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL, atualizada posteriormente pela Resolução ANEEL nº687/2015, a qual regulamenta e orienta o panorama da produção da energia elétrica, com o objetivo de estabelecer requisitos técnicos mínimos a serem elaborados nas instalações elétricas consumidoras conectadas a rede de média e baixa tensão das distribuidoras do território nacional.

As Normas existentes orientam as condições para aplicações dos sistemas de geração elétrico fotovoltaico, aplicação de conversão de luz natural em energia elétrica, destacam-se: *IEC 62446 (CENELEC)*, ABNT NBR 16690:2019, ABNT NBR 5419-1:2015, ABNT NBR 16274:2014 e para os sistemas fotovoltaicos conectados à rede a ABNT NBR 5410:2004.

O sistema elétrico de baixa tensão tem elevada importância no funcionamento das estações, pois é responsável pelo conforto e segurança das pessoas que ali circulam diariamente. Devido ao porte deste empreendimento, que é composto por um grande conjunto de equipamentos

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



associados, uma série de sistemas são desenvolvidos e controlados, tais como: iluminação, escadas rolantes, redes de fibra óticas, ventilação, elevadores, bombas de diversos tipos, sistema de câmeras, sonorização, sistema de bloqueios, rotas de fuga, o quais são necessários para realizar a segurança e orientações em caso de emergência e oferecer aos passageiros a excelência no atendimento do transporte público, sem deixar de observar o aporte de demanda elétrica necessária para o funcionamento de uma estação do Metrô.

O projeto básico do sistema elétrico de baixa tensão da Estação Ipiranga, foi complementado como sistema de geração de energia fotovoltaica composto de módulos solares que serão instalados no espaço disponível da cobertura da estação cuja função é de converter a luz natural em energia elétrica. A energia destes conjuntos de módulos, já transformada em potencial de corrente contínua (CC) será direcionada através de cabos para conversores, do tipo inversores, localizados nas salas técnicas da estação. Estes inversores convertem a energia recebida em corrente contínua para corrente alternada, e este potencial será adicionado ao quadro principal de distribuição (QPD), na tensão nominal de 460 Vca.

A conexão dos inversores ao quadro de distribuição principal será direta, sem a utilização de transformador, cuja principal função é equipotencializar a tensão da rede e isolar galvanicamente os circuitos aplicados, funções realizadas pelos inversores na conversão da energia CC (corrente contínua) para CA (Corrente Alternada).

A não obrigatoriedade de uso dos transformadores implicará em ganho de espaço físico na sala técnica da estação e conseqüente redução de instalação de cabos de interligações, equipamentos de proteção e monitoramento deste equipamento. Os inversores por meio de seus controles suprem a necessidade de implantação do transformador, pois possuem um

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



sistema de segurança elétrica processado com multifunções elétricas e controle através de monitoramento, bem como o sensoriamento da rede elétrica conectada a este equipamento.

No inversor destacam-se duas funções automáticas de proteção. A primeira é a função de anti-ilhamento, que é responsável por garantir que a rede de alimentação em corrente alternada que será alimentada pelo inversor está íntegra e pode operar de forma interativa, ou seja o sistema de energia fotovoltaico desligará no caso de: falta de tensão na rede do lado de corrente alternada, falta de fase, curto-circuito, operação de desligamento por manobra, abertura dos disjuntores das saídas do QPD. sistema. A segunda função de proteção refere-se ao teste de isolação que o inversor realiza no sistema elétrico conectado, os inversores testam as conexões, cabos e ligações acopladas, injetando uma tensão de teste de isolação, a partir da aplicação desta tensão, valores previstos são esperados e caso ocorra alguma anomalia o sistema é desligado e alarmes são emitidos.

Este teste é realizado diariamente ao raiar da luz nos módulos da cobertura, no momento que os inversores detectam a energia gerada imediatamente é aplicado o teste de isolação na rede elétrica conectada. Uma vez realizada as verificações o sistema está apto a iniciar sua operação, de maneira que os IGBTs são disparados produzindo a tensão de 460 Vca, na frequência de 60Hz e conectados ao barramento do QPD.

O potencial da rede começa a subir, acontecendo o que chamamos de sincronização do potencial acoplado, isto ocorre durante a existência de luz solar até o nível máximo da incidência de luz sobre os módulos instalados na cobertura da estação, ou seja, o potencial elétrico irá variar de acordo com as condições climáticas.

A figura 3 apresenta um diagrama básico do projeto de instalação elétrica do sistema fotovoltaico previsto para a Estação Ipiranga.

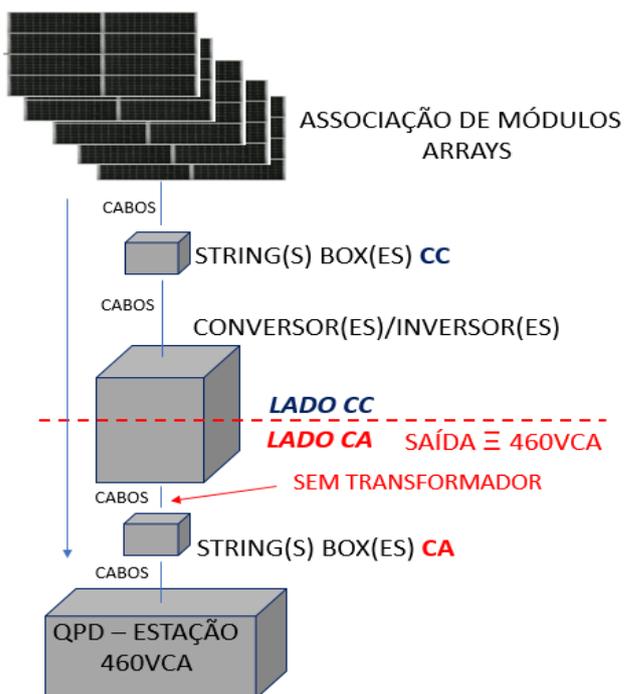


Figura 3-Unifilar do Sistema Fotovoltaico da Estação Ipiranga

Dentro da infraestrutura para instalação de miniusina fotovoltaica na Estação Ipiranga, a área destinada para implantação medindo aproximadamente 3000 m<sup>2</sup>, maior do que a premissa inicialmente adotada para cálculo de viabilidade desta implantação que seria de, no mínimo, 1000 m<sup>2</sup>, o ponto de maior relevância foi a checagem da estrutura da cobertura.

Após a distribuição e posicionamento das placas na cobertura, foi possível verificar se a carga distribuída adotada pelo projeto da cobertura suportaria o peso das placas e de seus suportes, sabendo que o projeto estrutural previa um valor de 15 kgf/m<sup>2</sup>. Com base nessas informações, foi verificado que poderão ser instaladas cerca de 532 placas fotovoltaicas, considerando as dimensões em torno de 200 x 100 = 2 m<sup>2</sup>, padrão encontrado no mercado.

A inclinação das placas foi definida com base nas estimativas encontradas nos atlas de irradiação solar para o estado de São Paulo, detalhado para a região Metropolitana de São Paulo. (Atlas de

irradiação solar, no caso luz, kWh/m<sup>2</sup>/dia, desenvolvido pelo governo do estado e disponibilizado para utilização pública).

A figura 4, apresentada a seguir, mostra o corte longitudinal da cobertura da estação e os detalhes previstos nas instalações dos equipamentos de captação de luz na cobertura da estação Ipiranga L15-Prata e na sequência a figura 5, demonstra o detalhe no corte transversal, identificando o número de módulos por *STRINGS*, ou fileiras de módulos.

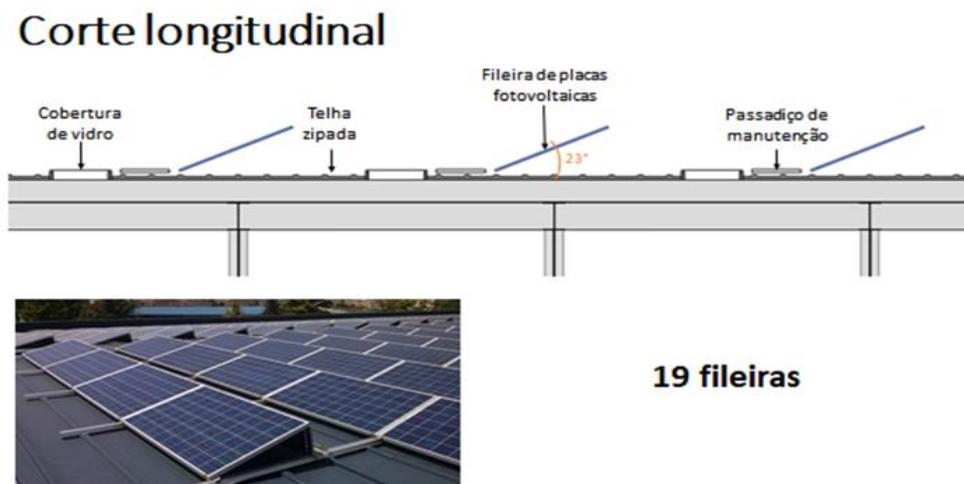


Figura 4- Corte Longitudinal Posição dos Módulos na Cobertura da Estação Ipiranga

## Corte transversal

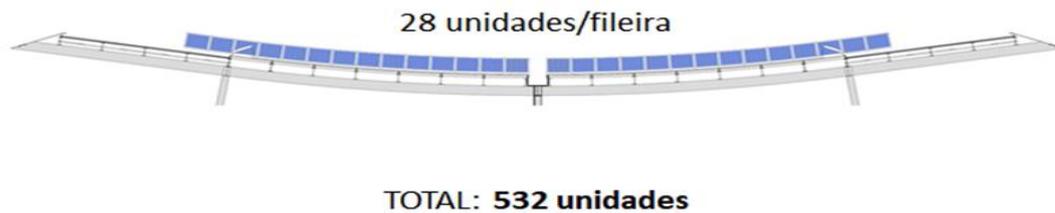


Figura 5- Corte Transversal na Cobertura da Estação Ipiranga.

## Energia produzida por placa

$$Ed = Es \times Ap \times \eta p \times \eta i$$

- $Ed$  = energia produzida por placa em kWh/dia
- $Es$  = energia diária recebida do sol em kWh/m<sup>2</sup>/dia
- $Ap$  = área da placa fotovoltaica em m<sup>2</sup>
- $\eta p$  = eficiência de conversão da placa fotovoltaica em % (potência máxima produzida pela placa dividida pela sua área). Considera-se eficiência de 19,41% para placa **monocristalina**.
- $\eta i$  = eficiência do inversor eletrônico em % (média adotada 90%)

Adotando-se o cálculo de energia produzida por placa, e considerando o módulo (placa ou painel) de 385 Wp (Watt pico) do tipo monocristalina, temos a seguir:

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



### • Energia produzida em MWh/ano

Para uma placa **monocristalina** com área de **1,98 m<sup>2</sup>** e adotando irradiação média anual de **4,6KWh/m<sup>2</sup>/dia**: **Placa do mercado por exemplo** de **385 Wp**

$$Ed = 4,6 \times 1,98 \times 19,41\% \times 90\%$$

1 placa	532 placas
<b>1,59 kWh/dia</b>	<b>846 kWh/dia</b>
<b>47,70 kWh/mês</b>	<b>25,40 MWh/mês</b>
<b>572,40 kWh/ano</b>	<b>304 MWh/ano</b>

### • Potência instalada em kWp

Para 532 placas de **0,385 kWp** (kilowatts/pico):

$$532 \times 0,385 = 205 \text{ kWp}$$

Para este projeto foram elaboradas outras pesquisas com outras aplicações relativas, e de sucesso com sistemas equivalentes. Reportando-se na notícia publicada sobre o Metrô de Brasília (Panorama Nacional 15-4-2019) com previsão econômica de R\$ 300 mil com a utilização da energia fotovoltaica em 2019, ([www.procelinfo.com.br](http://www.procelinfo.com.br)) Distrito Federal. O Metrô-DF conta atualmente com duas estações abastecidas por usinas solares. Para a primeira, a Estação Guariroba, inaugurada em 2017, foi montada uma estrutura com 578 painéis fotovoltaicos de 320 kWp que geram 288 MWh por ano, resultando em uma potência instalada de 187 kWp ou 187.000 Wp, valores registrados e verificados no local.

O custo total de implantação desta estação, incluindo projetos, implantação da Planta fotovoltaica, estrutura metálica adicional sobre o telhado e monitoramento por um ano, foi de R\$ 1.060.000,00. Sendo o custo por Watt pico gerado (R\$/Wp), tem-se:

$$1.060.000,00/187.000 = 5,67 \text{ R\$/Wp.}$$

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



Na mesma condição foi instalada a planta de geração fotovoltaica na Estação Samambaia Sul, inaugurada em dezembro de 2018 dentro do Programa Metrô Sustentável, recebendo o prêmio *GOLDEN CHARIOT INTERNACIONAL TRANSPORT AWARD*.

### **Cálculo do *PAYBACK* para Estação Ipiranga**

Observando o número de placas de 532 placas de 385 Wp temos:

$$532 \times 385 = 205 \text{ kWp.}$$

Para cálculo de custo de implantação usa-se o fator Watt pico gerado que variam entre 4,5 a 6 R\$/Wp. Adotando fator R\$/ Wp = 5 e 6.

$$\text{Custo} = 5 \times 205.000 = 1.025.000,00 \text{ Reais}$$

$$\text{Custo} = 6 \times 205.000 = 1.230.000,00 \text{ Reais}$$

### **Cálculo de *PAYBACK* com 2 fatores alternativos.**

#### **Cálculo de *PAYBACK* 1:**

Investimento: 1.025.000 reais;

Energia gerada: 25.000 kWh/mês:

Tarifa atual: 0,41725 R\$/kWh – referência Gerência de Operação, data base (jan 2020).

$$\text{PAYBACK (mês)} = \text{investimento (R\$)} / [\text{energia gerada (kWh/m)} \times \text{valor da tarifa (R\$/kWh)}]$$

$$\text{PAYBACK} = 96 \text{ meses ou } 8 \text{ anos}$$

#### **Cálculo de *PAYBACK* 2:**

Investimento: 1.230.000 reais;

Energia gerada: 25.000 kWh/mês;

Tarifa atual: 0,41725 R\$/kWh

*PAYBACK* = 118 meses ou 10 anos

A seguir temos a comparação do consumo de uma estação similar em funcionamento, frente aos cálculos estimados para produção de energia da miniusina proposta.

## Contribuição no consumo total de energia

Consumo de uma estação típica da Linha 15 (referência: Estação Oratório)

**65 MWh/mês**

Energia produzida pelas placas fotovoltaicas da Estação Ipiranga (estimativa):

**25,40 MWh/mês**

Contribuição de energia gerada pelas placas em relação ao total de uma estação típica da Linha 15:

**39 % do consumo total**

## **CONCLUSÃO**

O desenvolvimento do projeto com a ferramenta *BIM*, além de permitir uma maior integração entre as equipes multidisciplinares, agregou múltiplos benefícios: melhor visualização do projeto como um todo; uma determinação mais precisa da quantidade de placas a serem utilizadas; detecção e resolução das interferências; otimização do uso de equipamentos, bem como facilidades para montagem e acessibilidade da manutenção aos equipamentos.

O projeto da miniusina fotovoltaica aplicado à Estação Ipiranga, do Metrô de São Paulo, não só foi desenvolvido no conceito de sustentabilidade e eficiência energética, com equipamentos ecologicamente aplicados, como também irá propiciar uma redução de cerca de 39% no custo de energia de uma estação típica do monotrilho.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:**

- ✓ Resolução normativa Nº687 da Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL;
- ✓ Atlas Solar do Estado de São Paulo- Governo do Estado de São Paulo;
- ✓ Energia Solar Fotovoltaica – Conceitos e Aplicações”, Marcelo Gradela Villalva e Jonas Rafael Gazoli; 2012 - Editora Érica Ltda;
- ✓ Energia Solar Paulista, Levantamento do Potencial – 2012” – Secretaria de Energia do Governo do Estado de São Paulo;
- ✓ Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira”, junho de 2012 - ABINEE (Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica);
- ✓ “Energia Renovável na Alemanha (*RENEWABLE ENERGY IN GERMANY*)”;
- ✓ Trabalho da 19ª semana de tecnologia Metroferroviária – Tema viabilidade de implantação de sistema fotovoltaica no Metrô de São Paulo;

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



- ✓ Livro: Wolfgang Palz - Energia Solar e fontes Alternativas – UNESCO PARIS- Edição:  
Hemus;
- ✓ Livro: Kerchner Corcoran – Circuitos de Corrente Alternada - Editora Globo
- ✓ Livro: Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica- Sistemas Elétricos de  
Potência: Engenharia Elétrica 621.3191 – Edição :Oficina de Textos.