

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO
TECNOLOGIA EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

ALEXANDRE AYRES DE ARRUDA

ROSENILDO ANJOS COSTA

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS METROVIÁRIOS

SÃO PAULO

JUNHO DE 2019

ALEXANDRE AYRES DE ARRUDA
ROSENILDO ANJOS COSTA

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS METROVIÁRIOS

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Faculdade de Tecnologia de São Paulo como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Tecnólogo em instalações elétricas. Sob a orientação do Professor Me. Romildo de Campos Paradelo Jr.

São Paulo
Junho, 2019

Lista de Figuras.

Figura 1 - Cadeia Produtiva da Elétrica	14
Figura 2 - Curva de Carga e Suas Aplicações	17
Figura 3 - Curva de Demanda	18
Figura 4 - Consumo Por Área	29
Figura 5 - Consumo de Energia Operação	33
Figura 6 - Luminárias na estação Paraíso	38
Figura 7 - Lâmpada Fluorescente	38
Figura 8 - Quadros de Distribuição	42
Figura 9 - Iluminância LED	46

Lista de Tabelas

Tabela 1: Energia Demandada Por Quilômetro Rodado.....	27
Tabela 2: Consumo Por Área.....	28
Tabela 3: Ações de Eficiência Energética	32
Tabela 4: Indicadores Ambientais.....	35
Tabela 5: Distribuição dos Circuitos.....	40
Tabela 6: Estimativa do Consumo Anterior.....	44
Tabela 7: Estimativa do Consumo Atual.....	45
Tabela 8: Substituições Realizadas.....	47
Tabela 9: Abrangência do Projeto, Chamamento Público.....	48

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRACEL - Associação Brasileira do Comercializadores de Energia Elétrica

ACC - Ambiente de Contratação Cativo'

ACL - Ambiente de Contratação Livre

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

CCEE - Câmara de Comércio de Energia Elétrica

CCO - Centro de Controle Operacional

COPEL - Companhia Paranaense de Energia

GGD - Grupo Gerador Diesel

GEE - Gás de Efeito Estufa

IHM - Interface Homem Máquina

ISO - International Organization for Standardization).

LED - Light Emitting Diode

NBR - Norma Brasileira aprovada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas

NR - Norma Regulamentadora

ONS - Operador Nacional do Sistema

PL - Painéis de Luz

QDFL - Quadro de Distribuição de Força para Iluminação

QGD - Quadro Geral de Distribuição

QPDA/QPDB - Quadros Principais de Distribuição das entradas A e B

RF - Radiofrequência

SIN - Sistema Interligado Nacional

VLT - Veículo Leve Sobre Trilho

Resumo

Vivemos em um cenário atual onde cada vez mais preocupa-se com a eficiência energética.

O presente trabalho aborda o uso de energia elétrica em sistemas de tração, desde a geração e distribuição até o consumidor, com destaque para o Metrô de São Paulo e as alternativas possíveis de serem implantadas no sistema.

Apresenta uma análise do consumo com iluminação, em especial nas plataformas.

Destaca também, o uso de lâmpadas led, como medida de diminuição do consumo e aumento da eficiência energética, sendo esta, uma importante medida também, de redução de impactos ambientais.

Estima os possíveis ganhos econômicos, no consumo de energia, de maneira que possa ser destinado para outras áreas.

Abstract

We live in a current scenario where we are increasingly concerned about energy efficiency.

The present work deals with the use of electric power in traction systems, from generation and distribution to the consumer, with emphasis on the São Paulo Metro and the possible alternatives to be implanted in the system.

It presents an analysis of consumption with lighting, especially on platforms. It is also worth noting the use of led lamps as a means of reducing consumption and increasing energy efficiency, which is an important measure also to reduce environmental impacts.

It estimates possible economic gains in energy consumption in order to be used in other areas.



Sumário

1.Introdução e objetivos do trabalho.	9
1.1 Apresentação do problema a ser estudado.	11
1.2 Objetivos gerais e específicos	12
1.4 Como o trabalho será estruturado	14
2.Sistemas de Energia Elétrica	15
2.1 Cadeia produtiva da energia elétrica	15
2.2 Demanda e Energia	16
2.3 Curvas de carga e suas aplicações	18
2.4 Tarifas	21
2.5 Mercado Livre de Energia.	22
3.Uso de Energia Elétrica em Sistemas Metroviários.	23
3.1 Fundamentos e Princípios de Funcionamento.	23
3.1.1.Ordens de Grandeza.	23
3.1.2 Potência desenvolvida.	25
3.2 Dados de Demanda no Metrô de São Paulo.	30
3.3 O que tem sido feito para economizar energia elétricas nos sistemas de tração.	32
4 Propostas para melhorar a eficiência energética no Metrô de São Paulo.	33
4.2 Proposta para substituição da Iluminação fluorescente por LED	39
4.3 Quanto pode ser economizado de energia.	45
4.4 Resultados encontrados	48
5. Conclusão	51

1.Introdução e objetivos do trabalho.

Este trabalho é o resultado de uma pesquisa a respeito do sistema de geração, transmissão, distribuição, e consumo, com destaque para o sistema metroviário de São Paulo, como grande consumidor.

Ele foi desenvolvido a partir de um levantamento feito em uma estação como exemplo de consumo com iluminação. Descreve como esta energia chega às estações e como ela é distribuída e utilizada. Desenvolveu-se um estudo com base nos cálculos do consumo médio como uso de lâmpadas fluorescentes.

Pesquisou-se também, quais ações de eficiência energética a companhia estaria adotando e destacou-se entre elas, a modernização do sistema através da implantação de novos sistemas de gerenciamento de energia e o uso de lâmpadas LED

Verifica-se que os ganhos sócio-ambientais decorrentes do uso racional da energia são extremamente importantes, tanto no aspecto econômico financeiro para a companhia como em qualidade de vida para a população em geral

Considera - se eficiência energética a razão entre uma saída de desempenho, produto, serviço ou trabalho realizado e uma entrada de energia.

No caso da energia elétrica, a razão entre a energia demandada e a utilizada, para executar um determinado trabalho. Verifica-se quando se faz o mesmo trabalho, com menos energia e também quando se faz mais trabalho com a mesma quantidade de energia. Por definição, a eficiência energética consiste da relação

entre a quantidade de energia empregada em uma atividade e aquela disponibilizada para sua realização.

1.1 Apresentação do problema a ser estudado.

A princípio o trabalho seria desenvolvido, com base no sistema de tração. Pois este representa a maior parcela de consumo de energia elétrica no sistema metroviário e passou por recente modernização, com a substituição dos motores de corrente contínua, por motores de corrente alternada, o que permitiu, através do uso de inversores de frequência, além de economia nas acelerações e frenagens, regenerar parte da energia para as subestações. Porém a medida que os trabalhos foram avançando, não foi possível obter dados técnicos para embasar cálculos e fundamentar propostas. Passou se então a abordar a atual substituição da iluminação das estações.

1.2 Objetivos gerais e específicos

Neste trabalho aborda-se a eficiência energética do sistema metroviário e ações propostas para melhoria do desempenho energético.

O real objetivo de fazer a troca de lâmpadas convencionais por lâmpadas de LED, nas estações do Metrô de São Paulo é bem claro. Fazendo esta substituição o sistema terá ganhos energéticos e financeiros, devido a lâmpada de LED proporcionar uma eficiência e luminosidade maior nas estações. Como são muitas estações a serem beneficiadas com esta substituição, espera se demonstrar que o ganho econômico será significativo.

Apresentar um panorama geral do sistema de geração, transmissão e distribuição no Brasil e do mercado de energia.

Analisar uso de energia em sistemas metroviários estimar o consumo material rodante que constitui a maior parcela de consumo de energia nestes sistema, seguido pelas estações.

Propor a melhoria da eficiência energética nas estações através da modernização da iluminação com o uso de lâmpadas LED, adotando-se como modelo repetível, as plataformas das estações.

Fazer considerações quanto ao consumo de energia, iluminância em lux e uma estimativa dos valores gastos e economizados.

Além de ser um procedimento ecologicamente correto, que visa preservar as reservas naturais, e trazer benefícios ambientais, importantes ganhos econômicos podem ser observados quando se pratica o uso eficiente da energia.

No cenário atual, com a recente revisão da norma ABNT NBR NR 50.0001, Gestão de Energia, as empresas devem procurar cada vez mais, implantar um sistema eficiente de gestão de energia e por consequência adotar medidas de eficiência energética em suas instalações e processos.

1.4 Como o trabalho será estruturado

O presente trabalho está estruturado da seguinte maneira:

No capítulo 1 são apresentados os objetivos do trabalho bem como a sua estrutura. Já no capítulo 2, apresenta-se um panorama geral do sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica no Brasil bem como alguns aspectos referentes ao mercado de energia. No capítulo 3 destaca-se o material rodante e as linhas de contato, que constituem a maior parcela de consumo de energia nestes sistema, seguida pelas estações.

A proposta para melhoria da eficiência energética nas estações é apresentada, através da modernização da iluminação, com o uso de lâmpadas LED, no capítulo 4.

O trabalho foi desenvolvido a partir de um levantamento feito em uma estação de Metrô, onde foram contadas luminárias, identificadas as lâmpadas, a distribuição dos circuitos de alimentação e feito um levantamento fotométrico.

Depois analisa-se a utilização operacional deste sistema de iluminação, evidenciando-se que as praticidades e automatismos já existentes, visam as necessidades operacionais.

Foram elaborados cálculos com os padrões atuais de consumo e com a iluminação em LED, buscando-se, evidenciar os ganhos de iluminância e financeiros.

2.Sistemas de Energia Elétrica

2.1 Cadeia produtiva da energia elétrica

Neste tópico será mostrado em um diagrama, como funciona o sistema energético brasileiro, desde a geração até a distribuição ao consumidor.

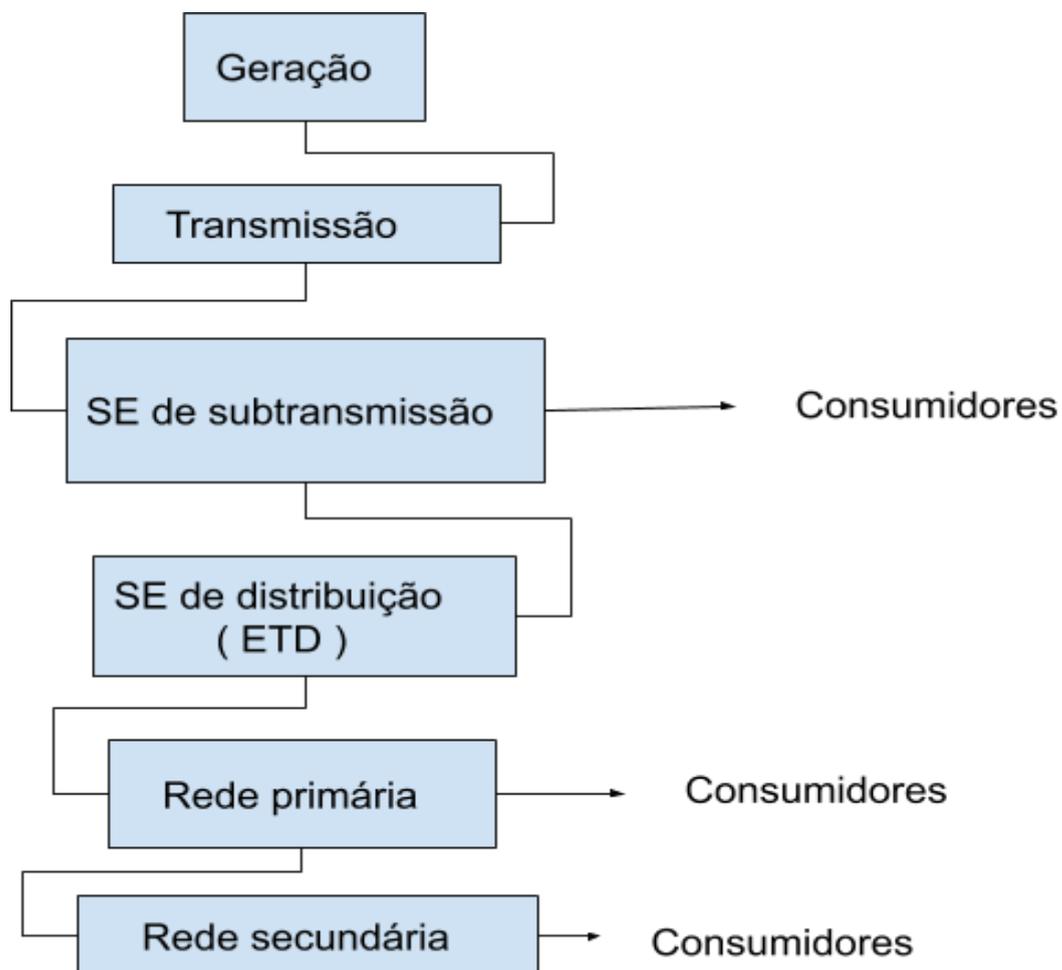
A fonte energética do Brasil é predominante hídrica, 90 % , com a geração concentrada e distante dos centros de consumo.

O Sistema Interligado Nacional SIN, conta com longas linhas de transmissão. Estas linhas são operadas pelo ONS, Operador Nacional do Sistema, que é responsável pela operação e planejamento.

Na outra ponta da transmissão estão os operadores locais que são responsáveis pela comercialização e distribuição.

O agente regulador de todas essas etapas é a ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. O diagrama apresentado na figura 1, mostra a cadeia produtiva de energia elétrica no Brasil.

Figura 1: Cadeia produtiva da energia elétrica.



2.2 Demanda e Energia

A demanda corresponde a carga nos terminais receptores, tomada em valor médio em um determinado intervalo de tempo. Representa também a relação entre

a energia consumida pelo sistema ou instalação elétrica pelo respectivo intervalo de tempo a ser considerado efetivamente no cálculo.

Para fins de contrato, é a quantidade obrigatória e continuamente disponibilizada pela fornecedora. A energia específica consumida é o ponto de partida para o cálculo da demanda a ser contratada. Não somente para o dimensionamento das instalações, como também, para o planejamento financeiro e estratégias de operação. A determinação do consumo específico é peça fundamental.

De acordo com a ANEEL, demanda contratada é demanda de potência ativa a ser obrigatória e continuamente disponibilizada pela distribuidora, no ponto de entrega, conforme valor e período de vigência fixados em contrato, e que deve ser integralmente paga, seja ou não utilizada durante o período.

Já a demanda de ultrapassagem, segundo a COPEL é a parcela da demanda medida que excede o valor da demanda contratada, expressa em quilowatts (kW).

Faturamento da Ultrapassagem de Demanda (abrange contratos convencionais e horários): Quando os montantes de demanda de potência ativa medidos excederem em mais de 5% (cinco por cento) os valores contratados, aplica-se a cobrança da ultrapassagem conforme a equação 1

Equação 1

$$D_{\text{ULTRAPASSAGEM}}(p) = [\text{PAM}(p) - \text{PAC}(p)] \times 2 \times \text{VR}_{\text{DULT}}(p)$$

Onde:

$D_{\text{ULTRAPASSAGEM}}(p)$ = valor correspondente à demanda de potência ativa por posto horário “p”, quando cabível, em Reais (R\$);

$PAM(p)$ = demanda de potência ativa medida em cada posto horário “p” no período de faturamento, quando cabível, em quilowatt (kW);

$PAC(p)$ = demanda de potência ativa contratada, por posto horário “p” no período de faturamento, quando cabível, em quilowatt (kW);

$VR_{\text{DULT}}(p)$ = valor de referência equivalente às tarifas de demanda de potência aplicáveis aos subgrupos do grupo A ; e

p = indica posto horário, ponta ou fora de ponta.

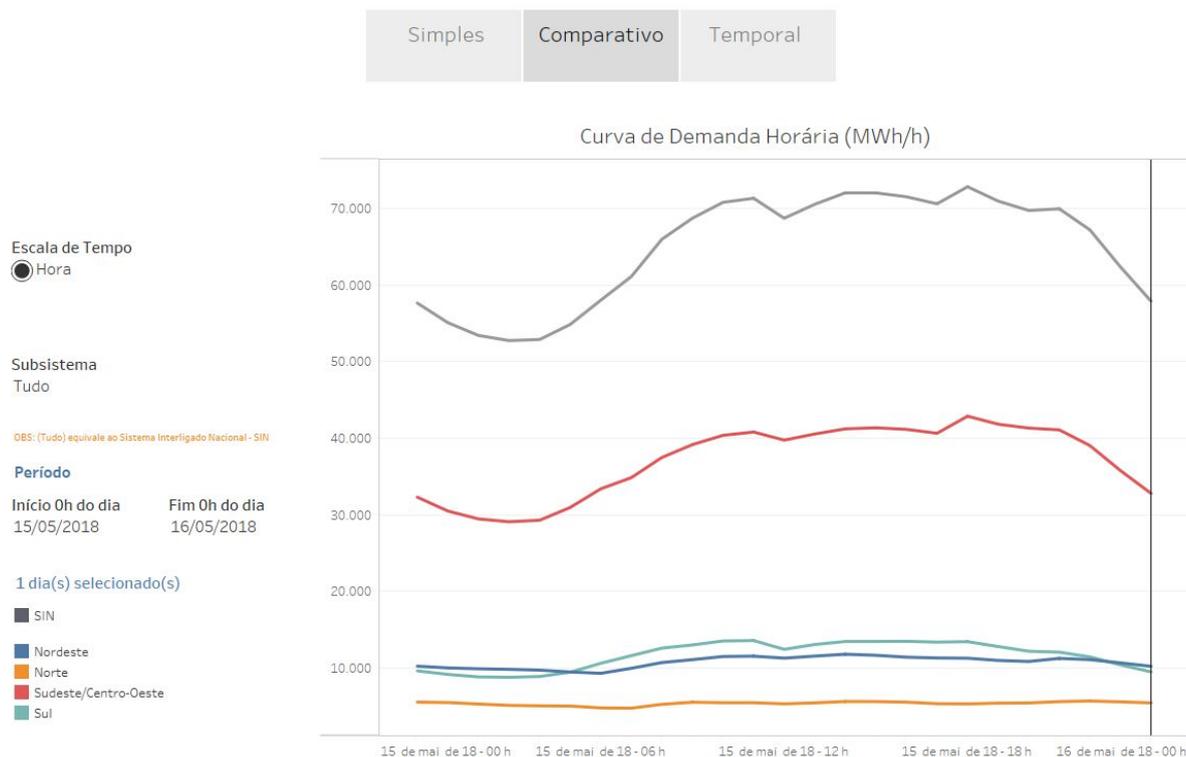
O procedimento descrito deverá ser aplicado sem prejuízo do disposto no artigo 165 da Resolução ANEEL nº 414/2010, que trata do aumento de carga.

As explicações dos conceitos de demanda acima se aplicam ao mercado de energia com contratação livre que será explicado a seguir no tópico 2.5.

2.3 Curvas de carga e suas aplicações

A figura 2 dá um exemplo da curva de carga do ONS por região e total.

Figura 2: Curva de Carga e Suas aplicações



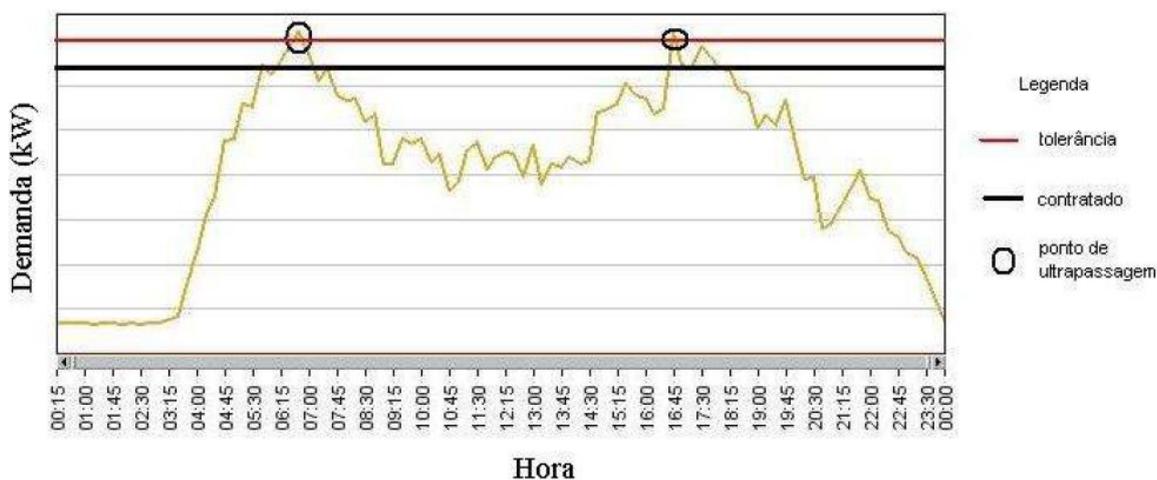
Este gráfico representa a curva de carga do Sistema interligado nacional SIN, ao longo do dia. Com a curva de carga é possível verificar a demanda de cada região em tempo real. É possível verificar no site do ONS, praticamente em tempo, real a demanda de cada região.

As curvas de carga servem para se fazer cálculos importantes a respeito da contribuição de cada consumidor, seja por unidade consumidora, por conjuntos elétricos ou por região, tanto para adoção de estratégias de distribuição, como para

conhecimento dos fatores, de carga, de demanda, de contribuição, de utilização entre outros que servirão para cálculos financeiros, inclusive penalidades.

A figura 3 mostra a curva de demanda de uma subestação primária do sistema metroviário, com destaque para a ultrapassagem de demanda em horário de pico.

Figura 3 - Curva de Demanda



O consumo total das subestações primárias, por onde entra toda a energia do Metrô, varia ao longo do dia e não pode ultrapassar o limite contratado. Embora haja uma tolerância, são adotadas estratégias para mantê-lo nos níveis desejados, sem prejudicar a oferta de viagens nem ocasionar multas.

2.4 Tarifas

Tarifa de energia no Brasil é calculada considerando variados fatores como a infraestrutura de geração, transmissão e distribuição bem como fatores econômicos de incentivos a modalidade tarifária e sinalização ao mercado.

Modalidades tarifárias correspondem ao conjunto de aplicações de tarifa de consumo de energia elétrica, levando em conta as seguintes modalidades: Tarifa azul, verde, convencional binômia, convencional monômia e Branca

- Tarifa azul: modalidade caracterizada pela aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, assim como de tarifas diferenciadas de demanda de potência, de acordo com as horas de utilização do dia. Consumidores do grupo A, obrigatória até 69kV

- Tarifa Verde: modalidade caracterizada pela aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, assim como de uma única tarifa de demanda de potência

- Tarifa convencional binômia: é constituída por valores monetários aplicáveis ao consumo de energia elétrica ativa e à demanda faturável.

- Tarifa convencional monômia, é constituída por valor monetário aplicável unicamente ao consumo de energia elétrica ativa, obtida pela conjunção da componente de

demanda de potência e de consumo de energia elétrica que compõem a tarifa binômia

- Tarifa Branca, esta tarifa é aplicada aos consumidores do grupo B, exceto subgrupos e grupos de classe de baixa renda. É uma tarifa horária com maiores valores para os horários de ponta e menores valores para os horários de baixo consumo.

A todos os consumidores cativos, ou seja, àqueles que não compram no ACL Ambiente de Contratação Livre da CCEE, Câmara de Comércio de Energia Elétrica, é aplicado o sistema de bandeiras. Este sistema aplica acréscimos quando as condições de geração estão menos favoráveis e varia ao longo do ano.

- Bandeira verde - condições de geração e distribuição normais, sem acréscimos.

- Bandeira amarela - condições não estão favoráveis acréscimos de 1 centavo para cada quilowatt-hora consumido.

- Bandeira vermelha - condições custosas de geração acréscimos de até 3 centavos.

- Bandeira vermelha patamar 2 - condições de geração muito onerosas, uso de termelétricas, acréscimo máximo, de cinco centavos por quilowatt. As bandeiras tarifárias são aplicadas a todos os consumidores cativos.

2.5 Mercado Livre de Energia.

A Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE é o ambiente responsável pela comercialização dos lotes de energia produzidos no país.

A comercialização pode ser dividida entre dois tipos de consumidores, os livres e cativos.

Os consumidores livres são aqueles que podem negociar com seus fornecedores através de leilões, licitações ou simplesmente fazem compra direta conforme a oferta e procura. Assim é o chamado ACL, Ambiente de Contratação Livre.

Já os outros consumidores, denominados cativos são os que compram sua energia através do ambiente de contratação cativo, ACC, que são os que têm contrato de compra e venda permanente assim como os citados no item 2.4 sujeitos a tarifas específicas.

Estes dois ambientes são fortemente regulados pela ANEEL.

3. Uso de Energia Elétrica em Sistemas Metroviários.

- **3.1 Fundamentos e Princípios de Funcionamento.**
- **3.1.1. Ordens de Grandeza.**

Para se ter uma idéia das grandezas envolvidas, note-se que 1 joule equivale a 0,000239006 quilocalorias.

Transformando o joule por segundo para 0,000277778 watt-hora, obtém-se unidades muito pequenas, quando se pretende expressar o consumo de energia elétrica.

Assim, o consumo de uma residência, por exemplo, fica melhor expresso em kWh, (aproximadamente 3600 joules por segundo). Devido a magnitude das grandezas envolvidas neste trabalho, muitas vezes, será usado MW, 1 milhão de Watts ou ainda GW, 1 bilhão de Watts.

Para trens, pode-se expressar a potência também em HP, (Horse Power), ou CV, (Cavalo Vapor).

$$1 \text{ HP} = 1,0138 \text{ CV} = 745,69987 \text{ W, ou}$$

$$1 \text{ CV} = 0,98632 \text{ HP} = 735,499 \text{ W.}$$

Ainda para uma ideia geral das grandezas envolvidas, o número de passageiros diário é estimado próximo a 5 milhões, o consumo mensal de energia em quase 50 milhões de kW mês ou 50 mil GW, o que daria para alimentar 200.000 residências considerando um consumo médio de 200 kWh, sendo uns 75% disto usado para alimentar os trens. O restante para os edifícios administrativos, oficinas de manutenção e estações. Mas, veremos a seguir, formas mais específicas de se estimar o consumo.

- 3.1.2 Potência desenvolvida.

Potência dos motores ou carros:

De acordo com o livro Engenharia Elétrica Ferroviária e Metroviária. “O *esforço resistente no aro das rodas, é a soma do esforço no engate e a resistência da locomotiva ...referir os esforços do motor e resistente ao aro das rodas é questão de hábito e tradição*”

A equação 2 pode representar as variáveis envolvidas de forma simplificada:

Equação 2

$$Fm - R = m \times a.$$

onde:

Fm = Esforço do motor

R = Esforço Resistente

m = massa considerada conforme o tipo de carga

a = aceleração

O primeiro membro da equação, $Fm - R$, também é conhecido como esforço útil, (Fu), e representa o esforço necessário à aceleração, sendo positivo durante a tração e negativo durante a frenagem.

A Potência mecânica desenvolvida pelo trem é dada pela equação 3.

Equação 3

$$P_1 = Fm * v = (Fm * V/3,6)$$

onde:

P_1 = Potência desenvolvida

Fm = Esforço do motor, (da roda no trilho, conjugado no eixo).

v = velocidade

V = Velocidade

E Potência desenvolvida pelo motor pode ser obtida pela equação 4.

Equação 4

$$P_1 = Cm * nm. \eta_t * \Omega_{rm}$$

Cm = conjugado do motor

n_m = número de motores,

η_t = rendimento da transmissão

Ω = Velocidade angular (de rotação do motor)

Potência desenvolvida pelo motor é apenas uma parcela dessa potência desenvolvida pelo trem, como na equação 5.

Equação 5

$$P_m = P_1 / n_m * \eta_t$$

P_m = Potência desenvolvida pelo motor

P_1 = Potência do trem

n_m = rendimento dos motores

η_t = rendimento da transmissão

E finalmente o rendimento na equação 6.

Equação 6

$$P_{el} = P_t / \eta_b$$

Potência elétrica

P_t = potência do trem

η_b = rendimento do trem.

3.1.3 Potência e Conservação de Energia

A energia específica consumida é o ponto de partida para o cálculo da demanda a ser contratada. Não somente para o dimensionamento das

instalações, como também, para o planejamento financeiro e estratégias de operação, a determinação do consumo específico é peça fundamental.

É estimado em um período médio com viagem de ida e volta em topografia igual, já que a resistência nas rampas de subida e nas curvas, devido ao atrito das rodas nos trilhos é desigual. E num trecho de descida onde os motores não fazem esforços é nula. Considera-se ainda, uniformemente carregado durante todo o percurso.

Os trens são acelerados até que o esforço da roda nos trilhos atinja um certo limiar, onde se inicia a movimentação do trem. A seguir, há um novo valor de aceleração até o trem atingir uma determinada velocidade, pré determinada para o trecho de via. E então, o trem entra num regime de deslizamento, permitindo um menor consumo de energia.

Isso é válido para trens de passageiro pois para trens de carga é necessário um esforço maior dos motores mesmo em velocidades baixas, quando mantém se nos motores um fluxo no entreferro com tensão constante. Já, no caso dos trens de passageiros citado acima, a potência se mantém constante. De maneira geral, considera-se que altas cargas ou altas velocidades demandam maiores potências.

O controle da aceleração e deslizamento contribuem para a conservação da energia. Assim também, observa-se mais adiante, que o controle da frenagem permite inclusive regenerar energia, devolvendo-a à rede, através do uso de inversores nos motores de c.a.

A tabela 1 dá a ideia do consumo de energia por km rodado em valores médios de alguns tipos de transporte comuns.

Tabela 1 Energia Demandada Por Quilômetro Rodado

TIPO	Whkm
Metrô	50 a 110
Trens Interurbanos	50 a 75
Trólebus e Monotrilho	90 a 130
Tramway	40 a 90
Tramway/VLT	60 a 80
Locomotiva Diesel-elétrica	ver observação 3

OBS 1 Referências de Vuchic, especialista em transportes.

2 Valores para transporte metroferroviários urbanos.

3 Considerando uma relação de 1 litro de diesel para entre 3,27 a 3,67 kWh, os valores foram englobados na tabela no item trens interurbanos. Mas, sabe-se que este modelo não tem sido usado no Brasil para trens de passageiros, sendo comum o uso de locomotivas diesel para trens de carga.

Os valores de kilowatt hora por quilômetro rodado, expressos na tabela 1, são apenas uma estimativa, com base em valores médios e servem para se fazer um cálculo simplificado, que fica próximo dos valores reais, consumidos em viagens, na prática.

Para se fazer um cálculo preciso, é necessário considerar a topografia e o carregamento em cada trecho da via. Mas, valores aproximados podem

ser obtidos considerando, por exemplo, que em uma viagem de ida e volta os esforços maiores numa subida, que demandam maior potência, seriam compensados por uma economia, numa equivalente descida na volta. Assim, considera-se os esforços e as resistências constantes, o rendimento de cada veículo e o número de veículos em circulação no período para determinar o consumo em uma subestação.

3.2 Dados de Demanda no Metrô de São Paulo.

Consumo por área em 2016 no Metrô de São Paulo.

Os dados do gráfico, ilustrado na figura 4 e da tabela 2 a seguir foram extraídos do relatório de sustentabilidade de 2016, do Metrô de São Paulo.

Tabela 2 : Consumo por Área (GW)

Área	Consumo
Prédios	5677
Pátio e CCO	16666
Obras	17075
Estações	128862
Tração	399564

Considere-se que alguns prédios administrativos, são abastecidos pela rede pública diretamente e têm uso compartilhado com outros setores do governo, não sendo atendidos pelas subestações primárias do Metrô.

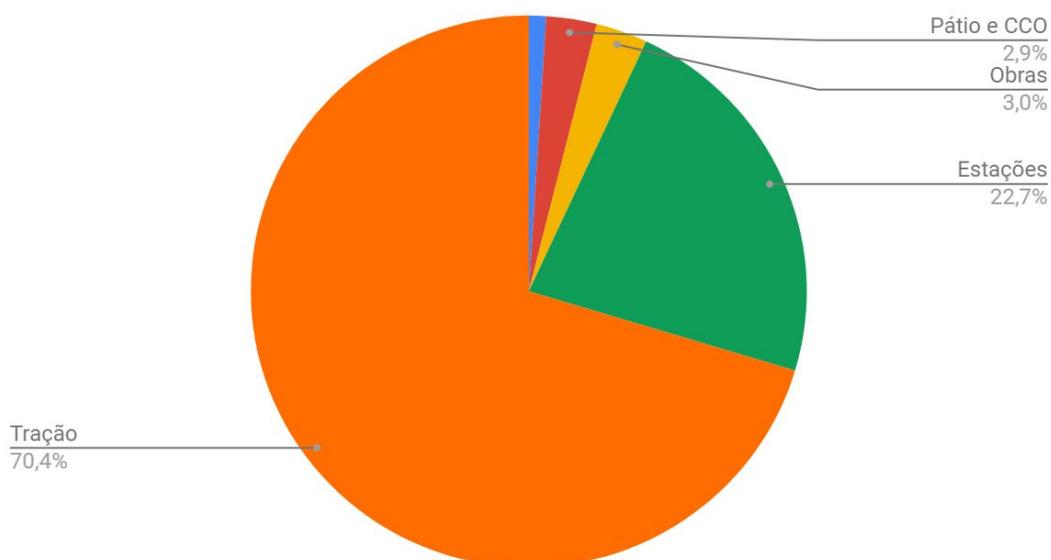
No ítem Pátio e CCO, além de estarem embutidas cargas importantes, encontram-se nestes locais a maioria das oficinas de manutenção.

Com relação às obras, estas variam muito ao longo dos anos, com períodos de franca expansão e obras aceleradas.

Enfim, observa-se que o consumo de tração é quase três quartos, e somando-se o ao das estações obtém-se um resultado de mais de 90% de toda a energia consumida, na operação do sistema, como observa-se na figura 4.

Figura 4: Consumo por Área

Consumo por área em 2016



- **3.3 O que tem sido feito para economizar energia elétricas nos sistemas de tração.**

Alternativas de eficiência energética para o sistema metroviário.

Implantação de fontes fotovoltaicas.

Instalação de painéis solares em pátios e estações do Metrô, para obter um ganho maior em eficiência energética do sistema, contando com energia limpa e abundante e diminuindo possíveis danos ao ambiente.

Substituição da iluminação convencional, hoje na sua maioria fluorescente, por lâmpadas LED nas estações, no intuito de aumentar eficiência luminosa e diminuir a demanda de energia.

Modernização das escadas rolantes com uso de inversores para controle de velocidade e ociosidade.

Modernização do sistema de tração, com o uso de motores em corrente alternada em substituição aos tradicionais de corrente contínua, o que permite regenerar energia para as subestações.

4 Propostas para melhorar a eficiência energética no Metrô de São Paulo.

Para cada ação de expansão do sistema é realizada uma análise e são elaborados planejamentos e soluções otimizadas para diminuir os impactos negativos e potencializando os ganhos socioambientais.

São realizadas diariamente manutenção das vias permanentes, nos sistemas eletromecânicos, nas subestações elétricas e etc. Além de implantação de novas subestações retificadoras melhorando a distribuição da alimentação elétrica para os trens.

Devido às melhorias e expansão da rede o sistema teve um aumento anual do consumo de energia média de 2,3 % anual. Apesar do total anual de energia consumida ter aumentado, o consumo pela operação do sistema tem se mantido estável, em virtude dos investimentos em eficiência energética e tecnológicas avançadas de sistemas e material rodante.

Em 2014, foi lançada a política de fontes alternativas de energia e eficiência energética. Esta proposta tem o intuito de considerar soluções que melhorem continuamente a eficiência energética; alternativas para geração próprias de energia, solar térmica e solar fotovoltaica.

Apresenta-se na tabela 3 as propostas do Metrô dentre as quais destaca-se o uso de lâmpadas LED, que é abordado neste trabalho.

Tabela 3 Ações de Eficiência Energética

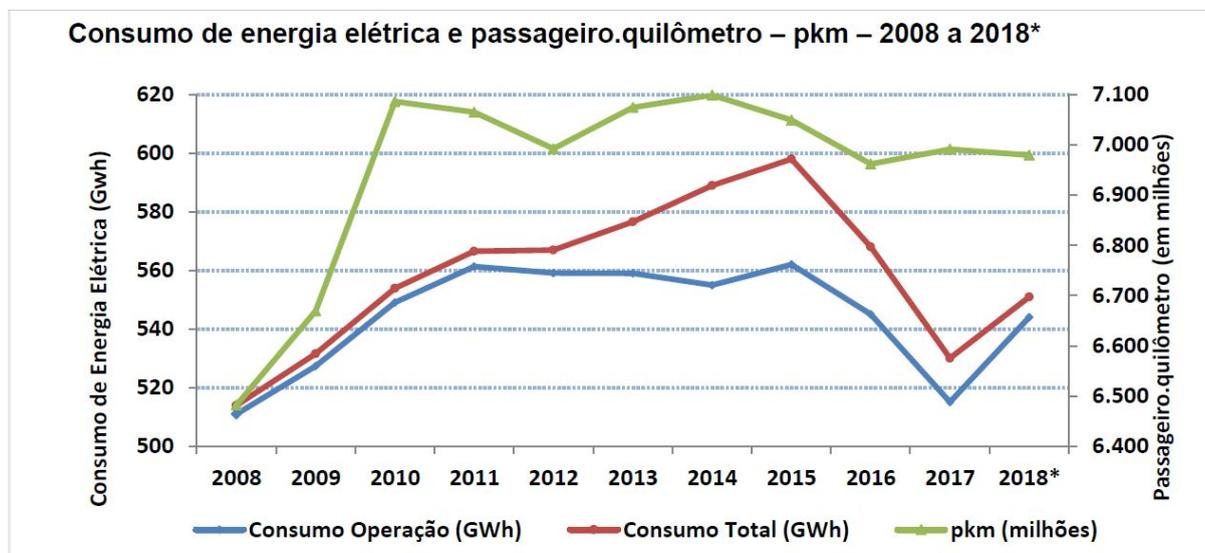
Ações	Benefícios
Fontes Renováveis Fotovoltaica	Redução do consumo /ganhos ambientais
Iluminação LED	Redução do consumo/ ganhos ambientais
Ampliação áreas envidraçadas	Redução do consumo
Escadas rolantes modernas	Redução do consumo
Trens motores c.a.	Redução do consumo/regeneração

O consumo e custo com energia elétrica para o sistema de operação metroviário são muito elevados, atingindo um consumo anual médio superior a 530 GWh pela operação dos trens e estações. Este montante representa mais de 95% do total de energia consumido pela companhia. A empresa vem tendo uma diminuição no consumo, devido principalmente ao empenho de inserir medidas de eficiência energética. Também por outro lado, o consumo de energia elétrica voltou a aumentar em aproximadamente 4%, resultado da entrega de novas estações. Também vem ocorrendo um fato muito importante, que diz respeito a diminuição da emissão de gases de efeito estufa na atmosfera, gerados em decorrência da operação e manutenção das linhas do metrô.

De acordo com a figura 5, observa-se que o consumo de energia elétrica em GWh, total e principalmente o da operação sofreu um aumento ao longo dos anos e uma queda repentina entre 2015 e 2017. Isto se deve ao fato de estar sendo implantada neste período a modernização das frotas, com o uso de motores em c.a.

controlados por inversores de frequência. Também nota-se no período a seguir um aumento referente à expansão, com abertura de novas estações.

Figura 5: Consumo de Energia Operação



Benefícios para empresa e sociedade.

O mundo está cada vez mais globalizado e preocupado com as emissões de gases na atmosfera. A atitude de empresas e pessoas que se preocupam com as causas relacionadas ao meio ambiente é de grande louvor. No ano de 2018, o metrô de São Paulo evitou a liberação de 808 mil toneladas de gás carbônico (CO_2)

Para cada tonelada de CO_2 emitida pela operação dos trens do metrô, é evitada a emissão de outras 21 toneladas por outros meios de transporte, trazendo um benefício de 2100%. Isso mostra que o uso de transporte como trens e metrô proporciona a redução das emissões de gases de efeito estufa.

A tabela 4 vai nos mostrar a comparação da emissão de GEE por passageiro quilômetro do metrô com o ônibus e o automóvel.

Observa-se que a emissão para geração de energia para posterior utilização no sistema de transporte, na linha 1 da tabela é bem menor que a emissão por outros meios, chamada de emissão direta (tCO_2e).

Tabela 4: Indicadores Ambientais

INDICADORES AMBIENTAIS	2016	2017	2018
Emissões de GEE total (mil t CO2)	51	53	44
Emissões diretas (tCO2e)	1874	684	932
Emissões por passageiro x km (gCO2e)	5	5	4
Energia Consumo total (GWh)	568	530	551
Consumo para tração com perdas (MWh)	339564	364328	378684

Um fato a se notar, é que o Metrô de São Paulo transportou 1,092 bilhão de passageiros em 2018 e obteve um ganho perante a sociedade gerando R\$ 12,1 bilhões em benefícios sociais, ganhos como redução do tempo em transporte, menos emissões de gases por combustíveis fósseis custo operacional dos outros modos de transporte como ônibus e demais veículos etc.

4.1 Norma ISO 50001: 2011 – Sistema de Gestão de Energia

A ISO 50001 tem como objetivo permitir que as organizações definam os sistemas e processos necessários para melhorar o desempenho energético, incluindo a eficiência energética, uso e consumo da energia. Contribuindo com uma estrutura para gerenciar a desenvoltura e abordar os custos de energia, também auxilia as empresas reduzir seu impacto ambiental para atender às metas de redução de emissões.

A primeira versão da norma foi publicada no ano de 2011, com o intuito de orientar e fornecer ferramentas estratégicas para o consumo da sua energia de maneira mais eficiente e eficaz.

No ano de 2018 a norma foi atualizada para que se torne mais eficaz e atenda cada vez mais os desafios energéticos do mundo.

4.2 Proposta para substituição da Iluminação fluorescente por LED na estações

A estação Paraíso da linha 2 Verde possui 3 plataformas, sendo uma superior da Linha 1 Azul e duas inferiores, sendo que uma delas é dupla , serve as duas linhas, de forma que pode-se considerar quatro plataformas para atender às duas linhas nos dois sentidos.

Cada plataforma, tem duas fileiras de 55 luminárias, considerando somente a área de embarque e desembarque. Cada luminária utiliza atualmente uma lâmpada fluorescente de 110W, cujo fluxo luminoso é 7600 lm nominal e a temperatura da cor é de 5000 K.

A figura 6 ilustra a plataforma de embarque da estação Paraíso da linha 1 azul do Metrô de SP, enquanto que a figura 7 indica o tipo de lâmpada fluorescente utilizada nas luminárias destas plataformas.

FIGURA 6 - Luminárias na estação Paraíso**FIGURA 7 - Lâmpada Fluorescente**

Considerando somente as quatro regiões de embarque são 440 luminárias, o que pode servir de base de cálculo para outras estações, pois as plataformas não diferem muito no comprimento. Assim, uma estação comum tem nas plataformas, em média 220, luminárias e uma estação de transferência 440 luminárias. Mas, para as outras áreas da estação, deve-se fazer um estudo detalhado de cada caso, pois as regiões são diferentes na arquitetura e no acabamento, apresentando o pé direito alto, acabamento das paredes diferentes, iluminação natural.

Só para se ter uma ideia, esta mesma estação Paraíso possui quatro acessos. Dois deles são semelhantes tem um longo corredor com 40 e 50 luminárias escadas e uma pequena área ao nível da rua com 30 e 24 luminárias. Um outro acesso é bem mais próximo da área circulação e possui apenas 9 luminárias, sobre as escadas, pois aproveita a iluminação natural e da área de circulação que tem 40 luminárias. Já o último deles tem um corredor um pouco menor que os anteriores e algumas luminárias sobre as escadas e ao nível da rua, não servem entre si, como modelo para repetição dos cálculos. Já na região dos bloqueios, há 40 luminárias, e daí em diante, há escadas e corredores assimétricos, bem com diversas salas técnicas e operacionais diferentes nas dimensões e no cálculo luminotécnico.

Sendo o número de pessoas que entram no sistema pelas catracas, compreendido entre dez e quinze mil por dia e que 200 mil passageiros fazem transferência neste mesmo intervalo, justifica-se o investimento, tanto pelo número de pessoas beneficiadas pelo conforto e segurança, como pela visibilidade da modernização.

A boa iluminação além de ser importante fator de segurança operacional e

segurança pública , traz conforto e bem estar.

A alimentação das luminárias das plataformas está dividida em 51 circuitos , provenientes de 04 PL, chamados de Painéis de Luz, que poderiam ser chamados de QDFL Quadro de Distribuição de Força para Iluminação, o que permite que uma falha em uma região não ocasione um desligamento em outra.

A tabela 5 indica a quantidade de circuitos por quadro de distribuição.

Tabela 5 Distribuição dos circuitos

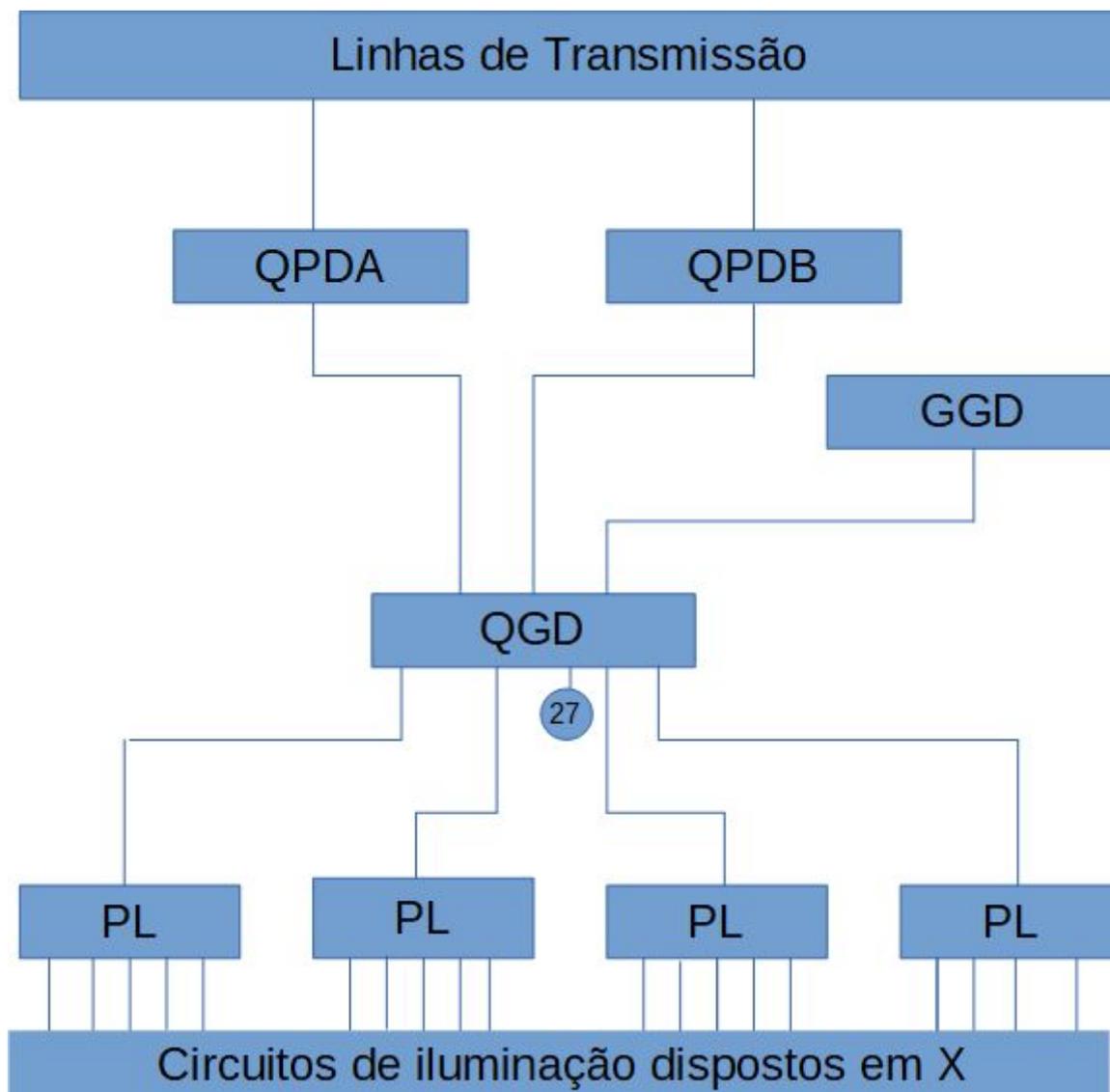
Quadro	Iluminação
PL 1 C	16 circuitos
PL1 D	19 circuitos
PL 2 C	5 circuitos
PL 2 D	11 circuitos
Total	51 circuitos

Estes quadros possuem chaves para redução da iluminação, que podem se usadas para reduzir o consumo nos horários de maior iluminação pela luz do dia, quando for o caso, ou para redução do consumo fora da operação comercial. Esta redução não é feita por dimerização e sim por desligamento de 50% dos circuitos. Assim, se uma equipe de manutenção ou limpeza precisa manter a iluminação em certos locais, nestes casos é possível fazê-lo só para região solicitada. Contam também com automatismos e telecomando. Recebem a energia por duas entradas, uma que vem do QGD, denominado Quadro Geral de Distribuição, que poderia ser

chamado de quadro Geral de Luz e outra do GGD, Grupo Gerador Diesel. O QGD é responsável, além de distribuir as cargas em 220 V, pela comutação entre as duas entradas principais H01 / H02 que também poderiam ser chamadas de QPDA/QPDB, que vem dos Quadros Principais de Distribuição, e é responsável também por acionar os Geradores Diesel, pois é nele que está o relé 27 de subtensão, de forma que os PLs estarão sempre alimentados em caso de falta de energia.

A figura 8 apresenta o diagrama de blocos da instalação elétrica da estação.

Figura 8 Quadros de Distribuição



Cada PL abriga em média de 5 a 20 circuitos de iluminação, protegidos com disjuntores do tipo termomagnético, quick-lags, além de outras cargas, o que permite uma adequada divisão das cargas para manobras e correto dimensionamento das proteções e condutores. Foi adotada a disposição em X de duas luminárias consecutivas, para que os desligamentos ocorram em pares alternados, em relação a fileira lateral.

Um levantamento sem rigor técnico, com um luxímetro de aplicativo para celular, permitiu constatar que na fileira mais externa, próxima a faixa amarela obtém-se em média 150 Lux e na fileira mais recuada entre 250 e 300 Lux em média, podendo estes valores sofrerem variações. Por exemplo, quando há trem parado na plataforma, a reflexão e talvez até mesmo a iluminação interna do carro, faz com que este valor, próximo à faixa amarela, suba para em torno de 300 Lux . Já na outra fileira, que está mais recuada, próxima a paredes ou pilares, os valores tendem a aumentar ou se manterem constantes numa plataforma estreita. Porém, se é uma área mais ampla, os valores podem diminuir por não haver reflexão ou até aumentar por influência das luminárias de outras regiões.

Para se ter uma ideia do total que se pode economizar, considere-se que nas quatro linhas operadas pelo Metrô há 20 estações na Linha 1 Azul, 13 na Linha 2 Verde, 18 na linha 3 Vermelha e 6 na Linha 15 Prata, Monotrilho. Porém é necessário acrescentar 2 plataformas a estação Sé, pela interligação com a Linha 3 Vermelha. O mesmo ocorre com as estações Paraíso e Ana Rosa, em relação às plataformas da Linha 2 Verde.

Já nas estações Luz, da Linha 1 Azul, República da Linha 3 Vermelha e Consolação da Linha 2 Verde, que também são de interligação a iluminação é separada das empresas contratadas para operar o sistema.

4.3 Quanto pode ser economizado de energia.

Tomando-se como base para os cálculos 75 estações e com as de transferência acrescentam-se mais 6 plataformas.

75 estações x 2 plataformas + 6 plataformas = 156 plataformas.

156 plataformas x 2 fileiras x 55 luminárias = 17160 luminárias.

Tempo estimado em 100 % 21 horas por dia tempo estimado em 50 % 3 horas por dia.

Considerando-se a potência nominal de 110W e o fator de potência de 0,85, estima-se o consumo em:

$17.160 \times 110 / 0,85 = 2.220.706 \text{ Wh}$.

A tabela 6 apresenta uma estimativa do consumo antes da implantação das lâmpadas LED.

Tabela 6 Estimativa do Consumo Anterior (W)

Consumo estimado 1h	Consumo 21 h 100% ligado	Consumo 3h 50% ligado	Consumo Diário
2.220.706	46.634.824	3.33.1059	49.965.883

São quase 50 MW diários. Há que se considerar que nem todos os circuitos ligam, às vezes por falhas. Mas, por outro lado, por razões técnicas ou operacionais não são também reduzidos no horário previsto. Então é coerente a estimativa arredondada para 50 MW, que pode ser estendida para um mês 1.5 GW e um ano 18 GW.

Já com o uso de lâmpadas LED, os números ficam assim:

Potência nominal 18W, Fator de Potência 0,9 , Fluxo Luminoso 4000 lm e

Temperatura da cor 5000k.

$$17.160 \times 18/0,95 = 343.200 \text{ Wh.}$$

A tabela 7 representa uma estimativa do consumo com a utilização de lâmpadas LED.

Tabela 7 Estimativa do Consumo Atual (W)

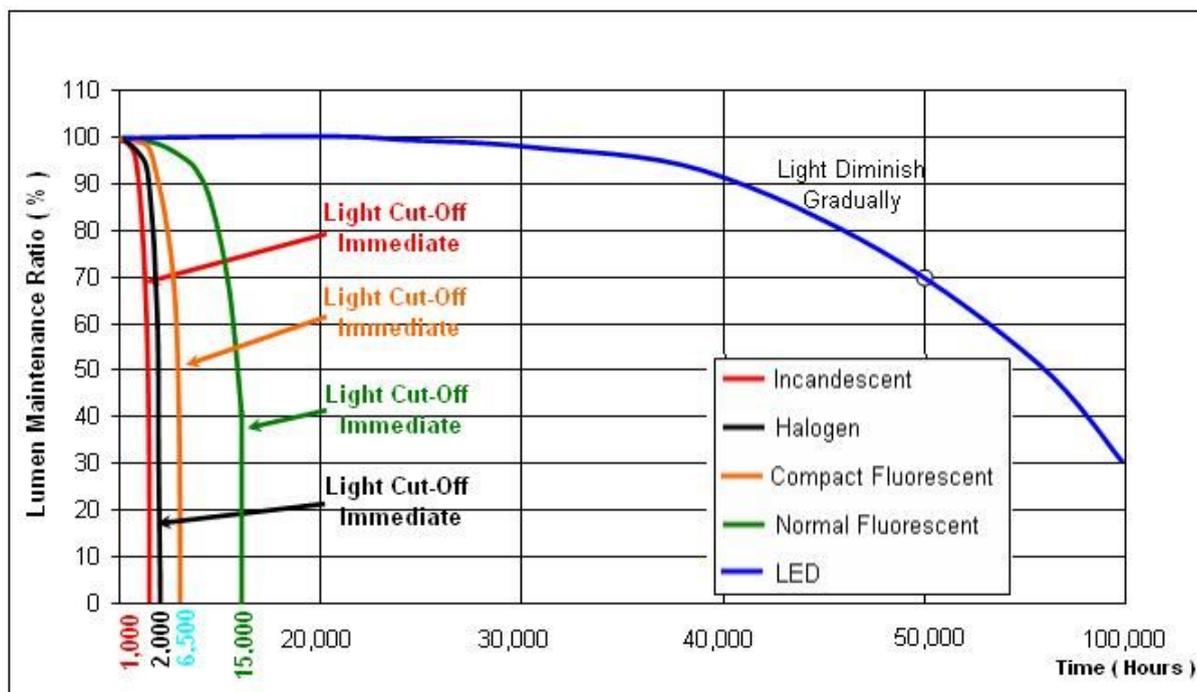
Consumo estimado 1h	Consumo 21 h 100% ligado	Consumo 3h 50% ligado	Consumo Diário
343.200	7.207.200	514.800	7.722.000

64,7 quase 65% de economia.

Outro fator relevante que deve ser explicitado é com relação a durabilidade, sendo que a lâmpada LED apresenta valores bem superiores quando comparados aos demais tipos de lâmpadas.

A figura 9 ilustra a durabilidade de alguns tipos de lâmpadas, onde observa-se que a lâmpada LED possui uma durabilidade de 50 mil horas e uma fluorescente normal 15 mil horas para a mesma relação percentual lúmen manutenção.

Figura 9 Iluminância LED



- 4.4 Resultados encontrados

Segundo o fabricante, a lâmpada LED não emite infravermelho nem ultravioleta. Além disso, o descarte não prejudica o meio ambiente e não produz calor, sendo mais adequada inclusive em ambientes onde haja o uso de ar condicionado, proporcionando economia de energia, maior vida útil e menos manutenção.

Apresenta-se na tabela 8 com as substituições já realizadas, pelo Metrô de São Paulo

Tabela 8 Substituições Realizadas

PRODUTO	TEMPO DIÁRIO CONSIDERADO ENERGIZADO	QTD (DOADA)	POTÊNCIA ORIGINAL (KW)	POTÊNCIA ATUAL (KW)	POTÊNCIA ECONOMIZADA INSTANTÂNEA (KW)	POTÊNCIA ECONOMIZADA EM 5 ANOS (KW)
LÂMPADA TUBOLED 18W (ESTAÇÕES)	24	1.895	125,07	34,14	90,93	3.982.554
LÂMPADA TUBOLED 18W (TRENS)	24	2.360	94,40	42,48	51,92	2.274.096
LUMINÁRIA PÚBLICA (12 horas)	12	80	38,40	14,40	24,00	525.600
LUMINÁRIA HIGH BAY	24	145	69,60	26,10	43,50	1.905.300
LUMINÁRIA VALA	24	130	5,20	4,29	0,91	39.858
LUMINÁRIA LINEAR	24	212	55,97	14,83	41,14	1.801.778

TOTAL		4.822	389	136	252	10.530 MW
--------------	--	--------------	------------	------------	------------	------------------

Considere-se que os cálculos feitos anteriormente, eram estimativas a partir da demanda das plataformas. Aqui apresenta-se o trabalho já realizado em alguns pontos da companhia. Porém, a abrangência é muito maior e pode ser resumida na tabela 9 obtida no chamamento público realizado pelo Metrô para estas substituições.

Tabela 9 Abrangência do Projeto, Chamamento Público.

LOCAL	FLUORESCENTE						HIGH BAY		PÚBLICA			VALA		REFLETOR				MISTA	INCANDESCENTE
	HO 110W	T8 / T10 40W	T8 / T10 20W	T5 28W	T5 14W	COMPACTA 20W	400W	500W	150W	250W	400W	40W	20W	150W	250W	400W	1.000W	160W	60W
L1 - ESTAÇÕES	5.061	15.626	531	0	0	139	194	0	0	0	222	0	0	0	0	15	0	0	478
L2 - ESTAÇÕES	1.474	6.037	112	1.768	0	2.589	36	0	0	0	108	0	0	0	544	0	0	11	685
L3 - ESTAÇÕES	8.213	9.218	806	6.835	0	402	361	0	0	0	151	0	0	0	228	0	0	196	1.290
PAT	1.285	6.219	176	962	0	114	367	0	0	39	273	600	20	44	135	0	0	73	22
PIT	314	5.254	1.218	0	0	550	741	188	0	0	224	0	1.054	0	0	0	0	0	0
PTI	0	942	592	0	0	0	0	0	280	0	183	10	624	0	107	0	76	0	0
EPB	350	338	0	0	0	0	0	0	0	0	87	380	0	4	0	8	0	0	0
CCO	79	1.950	172	10	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	2	0	25	264
GRI	54	6.894	198	2.244	414	1.264	6	0	0	3	0	0	0	173	0	59	0	0	89
TRENS	0	32.336	624	3.196	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL DE LÂMPADAS	16.830	52.478	3.805	11.819	414	5.058	1.705	188	280	42	1.258	990	1.698	221	1.014	84	76	305	2.828
POTÊNCIA TOTAL INSTALADA (MW)	2,222	2,519	0,091	0,397	0,007	0,121	0,818	0,113	0,050	0,013	0,604	0,048	0,041	0,040	0,304	0,040	0,091	0,059	0,170

Pode-se concluir pelos dados apresentados que a utilização de lâmpadas LED trouxe e trará significativos ganhos econômicos não somente no pagamento da conta como na diminuição das despesas de manutenção.

Por outro lado, observa-se uma melhoria no ganho luminotécnico.

5. Conclusão

A partir dos dados de cálculos será possível fazer um levantamento e o estudo da implantação e manutenção da proposta da instalação de lâmpadas de led em todas as estações do Metrô de São Paulo, buscando um projeto adequado e que satisfaça a Norma NBR ISO/CIE 8995 - 1 e NBR 5413.

Verificou-se a possibilidade de atingir uma economia percentual de 65%, nos gastos com iluminação. Com oferta de uma iluminação mais eficiente, principalmente nos locais onde a segurança é fator primordial.

Embora, já demonstrou-se que em termos percentuais seja uma economia considerável, o metrô é um mega ou porque não dizer assim, até giga consumidor. Então, esta parcela parece pequena perante os demais gastos da empresa, que representam 3,5% do consumo das estações. Porém, se valor monetário ao que se gastava antes e depois com iluminação, os valores tem outro significado e tomam proporções que permitem uma folga no orçamento da operação ou o remanejamento para outras áreas de interesse de investimentos na companhia.

Tomando como base o preço de negociação do MWh no ACL, de acordo com dados atuais da ABRACEL e CCEE, que é de R\$ 423,00 pode-se estimar uma economia de até R\$ 7.614.000 por ano.

Para desenvolvimento de trabalho futuros, sugere-se, por exemplo, utilizar este modelo para qualquer instalação que tenha áreas onde se repetem, com características semelhantes, nas diversas salas, andares corredores e etc.

Também pode ser continuado por substituições nas outras áreas que possuem iluminação específica, por exemplo, obras de arte com refletores,

iluminação externa, com vapor de sódio ou mercúrio, uso de fotocélulas, dimerização e programação de cenários além de outros automatismos.

Além disto, baseado nos dados apresentados será possível expandir este trabalho com futuras melhorias com novas tecnologias, uso de software de gerenciamento de consumo, contadores por RF, e uso de IHM.

Outra forma de continuidade é a implantação da Norma ISO 50.0001 como sistema de gestão de energia, tendo a implantação das lâmpadas LED, como base para determinar os requisitos, aspectos e impactos e outras exigências do sistema de gestão.

Por fim, pode-se ainda, continuar este trabalho, com a gestão do projeto executivo de substituição e manutenção das lâmpadas, com cronogramas, demandas e valores.

Bibliografia REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Nery, Eduardo. **Mercados e Regulação de Energia Elétrica**, Interciência, Rio de Janeiro, 1ª Edição, ISBN 978-85-7193-279-1. 2012.

Nery, Norberto . **Instalações Elétricas**, Érica, São Paulo, 2ª Edição, ISBN 978-85-365-0302-8. 2012.

ANEEL, Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 1 Características gerais 3ª Edição, ISBN: 978-85-87491-10-7. 2008.

Clímaco, Fernando. **Gestão de Consumidores Livres de Energia Elétrica**. São Paulo, USP, Dissertação, Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Energia, 2010.

Pires, Cassiano Lobo. **Engenharia Elétrica Ferroviária e Metroviária - Do Trólebus ao Trem de Alta Velocidade**, LTC, Rio de Janeiro, 1ª Edição, ISBN 978-85-216-2166-9. 2013.

Fossa, Alberto J. e outros. **Guia Para Aplicação da Norma ABNT NBR ISO 50001 Gestão de Energia**, International Copper Association Brazil.

Santos, Afonso H. M. S. e outros. **Conservação de Energia - Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos**, EFEF, Minas Gerais, 2ª Edição, ISBN 85-902-115-1-7.

ABNT <http://www.abnt.org.br/noticias/6037-iso-50001-acaba-de-ser-atualizada>

ABRACEL

http://www.abraceel.com.br/zpublisher/secoes/mercado_livre.asp?m_id=0

ANEEL <http://www.aneel.gov.br/> 30/03/2018, 9:32.

COPEL <https://www.copel.com>.

Metrô

<https://transparencia.metrosp.com.br/sites/default/files/relatorio-sustentabilidade-2014.pdf> 11/06/19, 13:20

<http://www.metro.sp.gov.br/metro/institucional/pdf/rel-integrado.pdf>

ONS

http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/curva_carga_horaria.aspx

Philips <http://www.lighting.philips.com.br/home>