CATEGORIA: 3

MONITORAMENTO ON-LINE DO CONSUMO E DA QUALIDADE DE ENERGIA CONSUMIDA PELO METRÔ DE SÃO PAULO

INTRODUÇÃO

O Metrô de São Paulo estabeleceu para o planejamento da operação, três objetivos estratégicos:

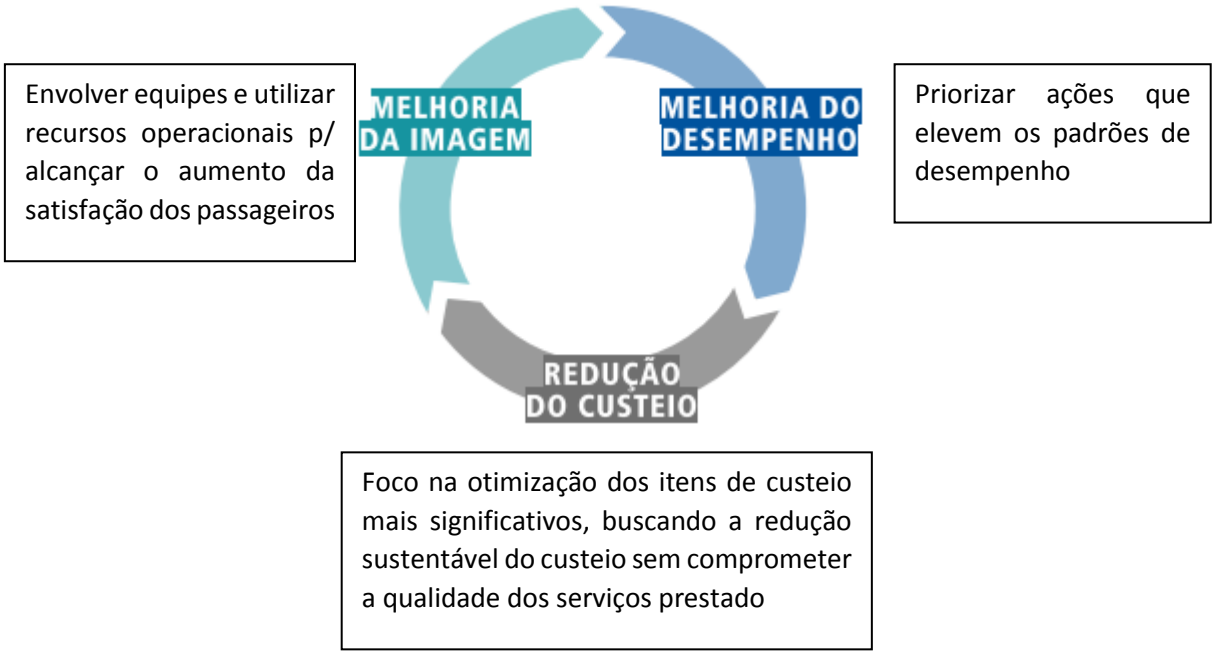

Figura 1: Objetivos do Plano de Negócios 2015-2018

Com relação ao objetivo estratégico de redução do custeio, a energia elétrica representa uma das principais despesas operacionais, seu alto consumo e os custos de aquisição merecem destaque na gestão da sustentabilidade da empresa.

O Metrô de São Paulo está em regime de Ambiente de Contratação Livre, que possibilita um custo de aquisição de acordo com o ambiente que regula o fornecimento e a distribuição da energia, seu consumo anual médio é superior a 530 GWh pela operação dos trens, pátios, prédios administrativos e estações do sistema.

Nos últimos anos os sucessivos aumentos do preço da energia elétrica e a necessidade de se adotar cada vez mais medidas que busquem a gestão e eficiência energética, geraram o desejo de automatizar as medições de consumo e qualidade de energia, para produzir conhecimento técnico necessário para identificar oportunidades e melhorar o processo de tomada de decisões.

A iniciativa desse projeto partiu do Comitê de Energia do Metrô de São Paulo, que é um grupo multidisciplinar formado por especialistas das áreas de operação, manutenção, logística e projetos, que tem por objetivo monitorar continuamente o consumo de energia, propondo e implementando ações que visam a redução desse custo.

Vale destacar que as ações implementadas pelo Comitê de Energia propiciaram R$78 milhões de redução de despesas com energia elétrica entre 2016 e 2018.

No Plano de Negócios do Metrô para 2019, no item Reestruturação de Custos a previsão é de redução em 5% o consumo de energia de tração, no total o objetivo é atingir a meta de R$24 milhões de economia. Para isso o comitê definiu as seguintes estratégias de estudos:

- Sistemas de armazenamento de energia nas subestações retificadoras;
- Inversores de alto rendimento para os equipamentos auxiliares nas estações;
- Escadas rolantes regenerativas e com melhor rendimento energético;

- Sistemas de regeneração de energia para alimentação de 22KV;

- Auto geração de energia solar e eólica;

- Bombas elétricas padronizadas e de alta eficiência;

- Viabilidade econômica nos resultados dos painéis solares no CCO;

Assim como, manter as seguintes ações em execução:

- Redução da tensão nominal na saída das subestações retificadoras;

- Redução e controle dinâmico da tensão de saída nas primárias Linha 3;

- Maximização da tensão de regeneração dos trens;

- Substituição de lâmpadas e luminárias por produtos com tecnologia LED nas estações, trens, Pátios e Edifícios;

- Implantar o Centro de Gestão do Consumo de Energia no CCO;

- Revisão dos POT's e viagens programadas por faixa horária;

- Implantar novas Estratégias de Contratação de Energia;

- Gestão de Desempenho na minimização nas batidas de ATP;

- Manobras no X01 com paradas no meio da plataforma;

Então por que medir? A resposta é: “Não se gerencia o que não se mede” (frase do consultor americano William Edwards Deming).

Figura 2: Não se gerencia o que não se mede

O acompanhamento do consumo por meio da conta de energia não é suficiente para um melhor conhecimento de como a energia elétrica é consumida nos diversos ativos instalados, pois não se sabe com precisão qual a participação de cada um no consumo total de energia e sua influência sobre o valor da conta.

Em sistemas metroferroviários as instalações apresentam maior porte e complexidade, e a análise das características de consumo é dificultada, principalmente se as medições são realizadas apenas na entrada da concessionária através da subestação primária.

Neste contexto este artigo consiste em descrever como foi o processo e as estratégias utilizadas pelo Metrô de São Paulo, para que fosse possível definir as especificações técnicas necessárias para a aquisição e instalação de medidores de consumo e análise da qualidade de energia nas subestações primárias, subestações retificadoras, subestações auxiliares e em todos os quadros de baixa tensão nas linhas metroferroviárias e pátios de manutenção, assim como, a arquitetura de rede e as características do software para implementar o monitoramento em tempo real dos dados referentes a energia consumida em todo o sistema.

DIAGNÓSTICO

O processo de medição e faturamento do consumo de energia do Metrô de São Paulo é realizado por meio dos medidores da concessionária de energia instalados nas oito subestações primárias localizadas em pontos estratégicos ao longo das Linhas 1-Azul, 2-Verde e 3-Vermelha, que recebem a tensão em 88KV, conforme a figura 3 da subestação primária de Barra Funda:

Figura 3: Medidores Concessionária de Energia Linha 1 e 2 em 88 kV- Barra Funda

Já as medições de consumo das subestações retificadoras e das entradas das subestações auxiliares são levantadas de forma manual, sendo a leitura realizada por colaboradores das estações que enviam esses dados uma vez por semana para a área responsável pela estratificação dos dados por meio de planilhas.

Esse processo pode acarretar em erros de leitura ou no processo de digitação dos dados, sem falar da falta de informações relacionadas aos consumos individuais dos principais equipamentos e sistemas que compõem o universo metroferroviário.

Na figura 4 destaca-se um painel com medidores eletromecânicos analógicos.

Figura 4- Medidores eletromecânicos instalados nas subestações

A situação é mais crítica quando observamos que nos quadros de alimentação dos equipamentos auxiliares das estações, pátios e prédios administrativos, tais como: escadas rolantes, bombas, ventilação principal, ar-condicionado, iluminação, e outros, não existem quaisquer tipos de medidores de energia instalados nos painéis, conforme podemos observar na figura 5:

Figura 5- Exemplo de painel sem medidores de energia

Atualmente, quando necessário, medimos o consumo nesses locais por meio da instrumentação individual.

De posse dos dados anotados através da leitura nos medidores analógicos, das subestações

retificadoras pode-se estratificar as informações e montar gráficos, como demonstrado nas figuras 6,7 e 8:

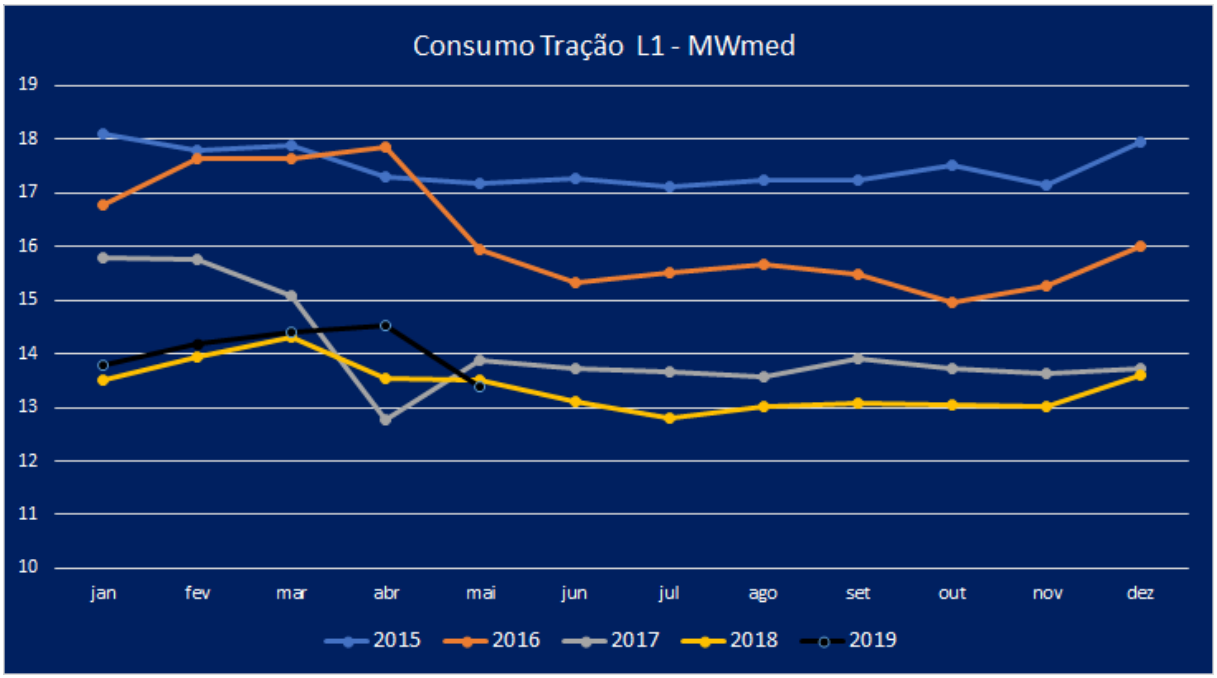

Figura 6: Gráfico do consumo mensal de energia nos últimos anos na linha 1

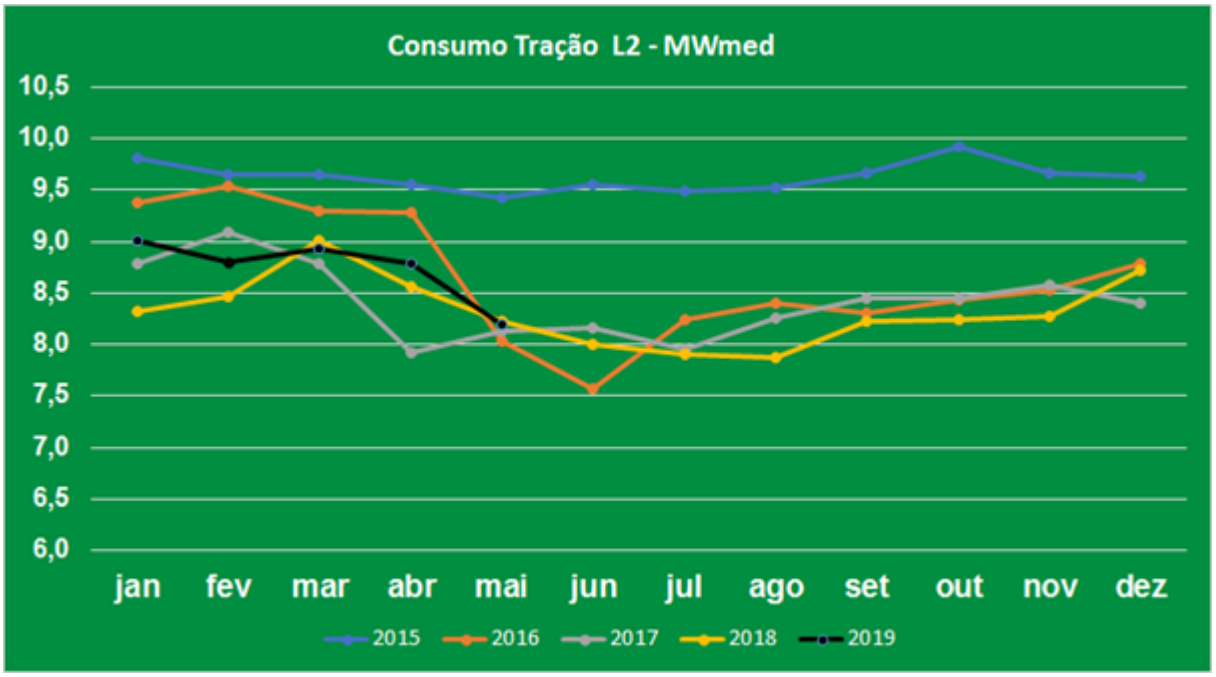

Figura 7: Gráfico do consumo mensal de energia nos últimos anos na linha 2

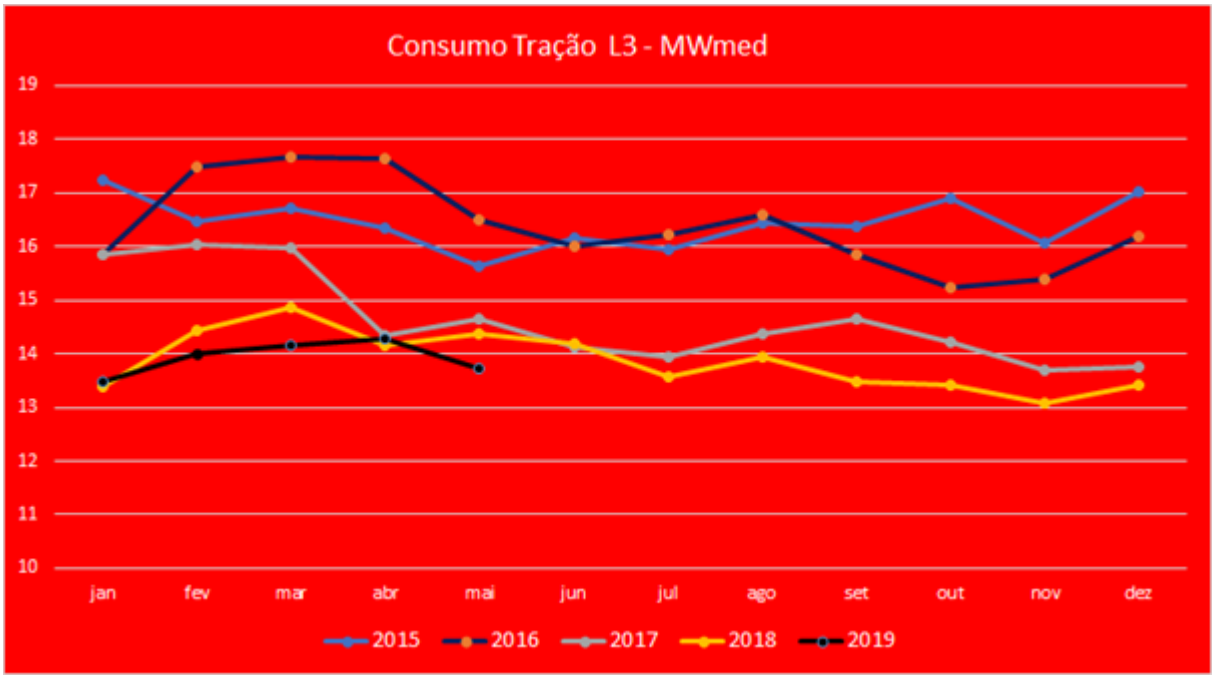

Figura 8: Gráfico do consumo mensal de energia nos últimos anos na linha 3

Como podemos observar tínhamos um longo caminho a percorrer, pois existia uma enorme lacuna entre o cenário atual e aquele possível e desejável em termos de aquisição e tratamento de informações relativas ao consumo e qualidade de energia consumida pelo sistema.

Para não gastar mais horas na frente de planilhas cruzando dados e montando relatórios, foi necessário idealizar um sistema que permitisse:

- Identificar oportunidades de melhoria e benchmark por localização

- Corrigir sistemas ineficientes (melhor performance)

- Reduzir os custos de manutenção e melhorar o desempenho dos equipamentos (monitorar a condição e realizar manutenção preditiva)

- Melhorar a imagem por meio da mudança de comportamento e a cultura de apoio a gestão de energia

- Possibilitar o início do processo de acreditação com relação a NBR ISO 50001.

Com as limitações e possibilidades de medição de energia descritas no cenário atual, coube a engenharia da Gerência de Manutenção do Metrô de São Paulo, definir quais as alternativas possíveis perante o desafio de elaborar as especificações técnicas necessárias para a aquisição e instalação dos medidores de consumo e qualidade de energia, assim como, as configurações de arquitetura da rede e do software que atendessem as expectativas do projeto.

Como empresa pública o Metrô de São Paulo deve seguir todas as legislações pertinentes aos processos licitatórios em vigor, portanto as alternativas possíveis se restringiam em:

1- Elaborar a Especificação Técnica com o conhecimento técnico disponível

2- Homologar fornecedores com potencial para atender as necessidades do projeto

3- Adquirir pequena quantidade de produtos com qualidade reconhecida pelo mercado

Todas essas alternativas foram consideradas inviáveis, pois no mercado do seguimento de medidores de consumo e qualidade de energia existem muitas alternativas de produtos e valores muito discrepantes, que são decorrentes das especificações exigidas no momento da aquisição.

Como tratava-se de um projeto de grande complexidade e nunca realizado por outra empresa do setor metroferroviário, avaliamos que não tínhamos condições técnicas de partir

diretamente para as alternativas 1 e 2. Já para a alternativa 3 não tínhamos como garantir a aquisição dos produtos que de certa forma atenderiam nossa expectativa.

Diante desse impasse, consultamos o departamento jurídico no sentido de verificar quais alternativas as empresas públicas teriam para resolver essas questões de consulta ao mercado para análise e teste de tecnologias disruptivas e soluções inovadoras.

Com o retorno dessa consulta foi possível constatar que a Lei 13.019 traz um instrumento denominado Chamamento Público, assim definido no inciso XII do art. 2° da Lei 13.019, de 31 de julho de 2014:

“Procedimento destinado a selecionar organização da sociedade civil para firmar parceria por meio de termo de colaboração ou de fomento, no qual se garanta a observância dos princípios da isonomia, da legalidade, da impessoalidade, da moralidade, da igualdade, da publicidade, da probidade administrativa, da vinculação ao instrumento convocatório, do julgamento objetivo e dos que lhes são correlatos”.

Dessa forma o Chamamento Público não cria obrigações ao Metrô de São Paulo, bem como não gera qualquer direito indenizatório e/ou expectativa de direito aos participantes, pois o Chamamento Público não é uma modalidade de licitação, como aquelas estabelecidas na Lei 8.666/1993, ou na Lei 10.520/2002, o pregão, ou seja, apesar de o chamamento público parecer uma licitação, ter jeito de licitação, ter cheiro de licitação, ter gosto de licitação, juridicamente não é uma licitação, mas sim outro procedimento de seleção da melhor proposta a ser adotado pela Administração Pública, quando o objetivo for firmar parcerias com organizações da sociedade civil.

Até aquele momento não tínhamos realizado nenhum processo de Chamamento Público, mas avaliamos que essa alternativa atenderia nossa necessidade sem infligir qualquer questão legal.

O Chamamento Público foi realizado com sucesso e por meio desse instrumento conseguimos:

- Aproximação com o mercado, ampliando significativamente o conhecimento técnico da equipe.
- Analisar e testar tecnologias disruptivas e soluções inovadoras;
- Verificar a viabilidade técnica-econômica de cada solução proposta;
- Trocar experiências quanto às melhores soluções de engenharia e tecnologias de ponta disponíveis;
- Assertividade na elaboração das especificações técnicas;
- Possibilidade de homologação de fornecedores;
- Garantia de aquisição de produtos superiores e mais adequados aos objetivos do projeto.
- Constatar o aumento do desempenho dos sistemas com redução dos custos operacional e de manutenção.

Para um melhor o entendimento das questões ligadas ao consumo e qualidade de energia é necessário estabelecer alguns conceitos fundamentais relacionados ao assunto, tais como:

O que é eficiência energética?

Eficiência Energética significa fazer mais com menos energia.

Quando proporcionamos a máxima transparência dos fluxos de energia da empresa, criamos a oportunidade de identificar onde há um elevado consumo de energia, podendo avaliar de forma mais objetiva os potenciais de economia e implementar medidas para eliminar desperdícios. Tendo os fluxos de energia documentados, eles terão condições de otimizar o contrato de fornecimento de energia.

O que é gestão de energia?

A gestão energética é um conjunto de práticas com o objetivo de otimizar o uso de energia. Essas práticas são consolidadas e exercitadas no Sistemas de Gestão Energética que não se materializa necessariamente em um sistema virtual como softwares ou planilhas. Na verdade, o sistema de gestão é caracterizado pela consolidação de informações dos fluxos energéticos que embasam a tomada de decisão.

Já o desempenho energético são os resultados mensuráveis relativos à energia (figura 9):

Figura 9- Definição de desempenho energético (guia de implantação da NBR ISO 50001)

Quando procuramos um melhor desempenho energético precisamos refletir e obter respostas para as seguintes questões:

Quanta energia é consumida na empresa?

Qual a tendência de consumo?

Onde a energia está sendo utilizada e quais fatores condicionam o consumo?

Quais ativos possuem impactos relevantes no desempenho energético?

Quais indicadores podem ser utilizados para medir o desempenho energético?

Quais oportunidades existem para se melhorar o desempenho energético?

Qual será o desempenho energético a ser alcançado no futuro?

O que será feito para se alcançar os objetivos estabelecidos?

Quais aspectos com relação a qualidade de energia (figura 10) queremos observar?

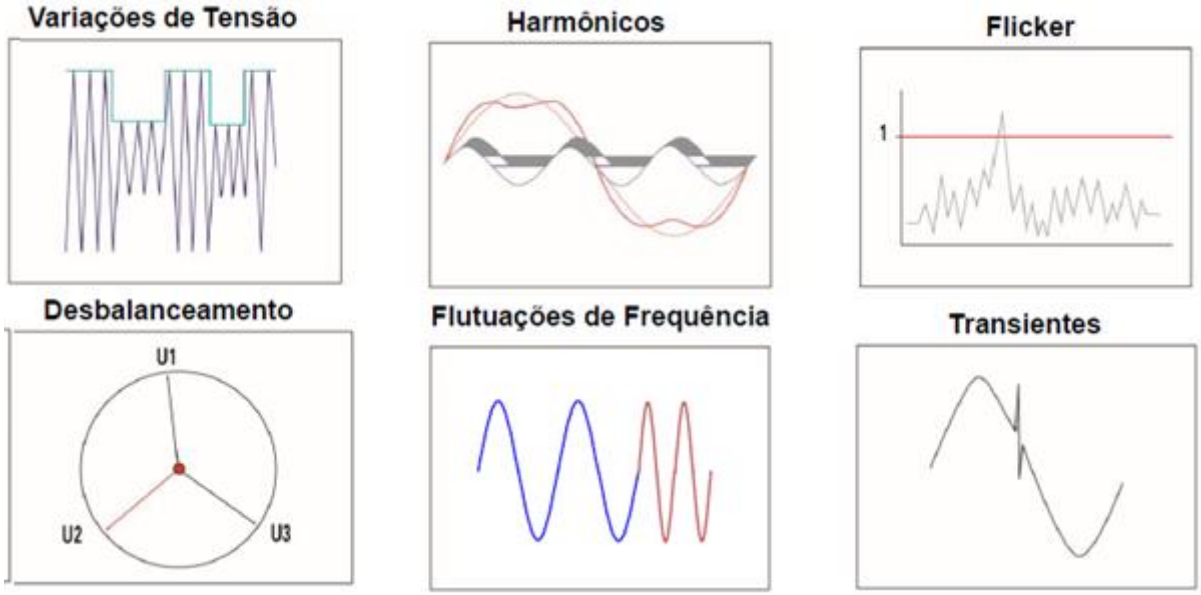

Figura 10- Principais aspectos de qualidade de energia

Quais são os problemas causados por uma péssima qualidade de energia?

- CLP´s e controladores falham

- Computadores podem desligar

- Redução na vida útil dos equipamentos

- Custos mais elevados de energia e manutenção

- Aquecimento de transformadores, motores e condensadores

- Paradas de ativos não previstas nos planos de manutenção

Mas por que é necessário utilizar diferentes tipos de medidores?

O uso de medidores com tecnologia e boa relação custo benefício são extremamente necessários quando se requer ações de melhorias e adequações relacionadas à eficiência energética no sistema.

Tomada de decisão sem claras evidências podem incorrer no mínimo em investimentos mal aplicados. Não são toleradas ocorrências sem causas, sem explicações e principalmente que se possa evitar a recorrência. Nesta linha de raciocínio os instrumentos de medição de variáveis elétricas têm se viabilizado e trazem a possibilidade do usuário em campo conhecer em pouco tempo as causas de má operação de parte da instalação, por exemplo. O campo das suposições deixa de existir e as causas são normalmente descobertas com equipes de engenharia de campo treinadas; relatórios de medição sem clara exposição das ocorrências não tem fundamento.

As entradas de alimentação elétrica da planta requerem medições com um maior nível de detalhamento e precisão, normalmente onde se é medido também faturamento de energia

da concessionária e por isso são necessários equipamentos mais robustos, com mais recursos tecnológicos e consequentemente de maior custo.

Nas subestações retificadoras e auxiliares recomenda-se medidores com menos recursos em relação aos usados nas subestações primárias, porém uma boa memória de massa é fundamental para garantir que não perderemos dados por eventual falha na rede de comunicação.

A medida que a distribuição de energia vai se aproximando da carga, equipamentos de medição mais simples e com menor precisão podem ser utilizados, conforme podemos observar na figura 11:

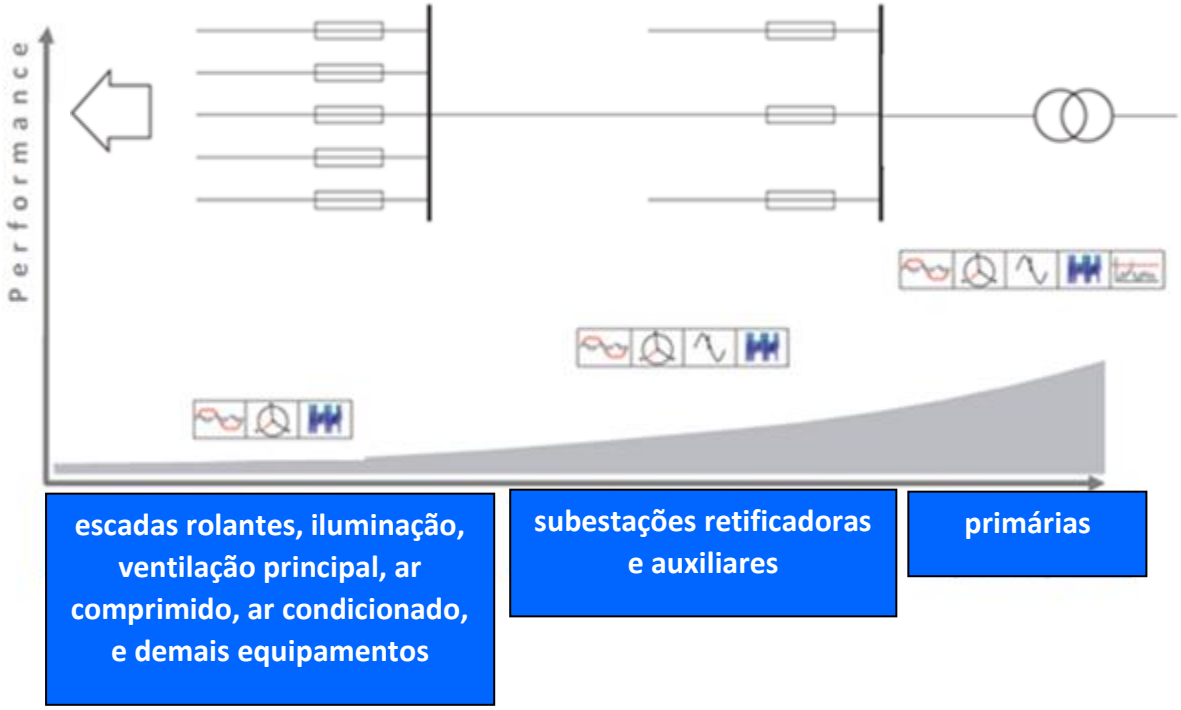

Figura 11- Necessidade de diferentes tipos de medidores na planta.

Para todos os sistemas passíveis de monitoração é possível implementar adequações de uso ou modernização que acarretará em redução do consumo de energia e melhoria do desempenho.

A figura 12 dá uma ideia geral de exemplos de ativos que apresentam consumo significativo no setor metroferroviário.

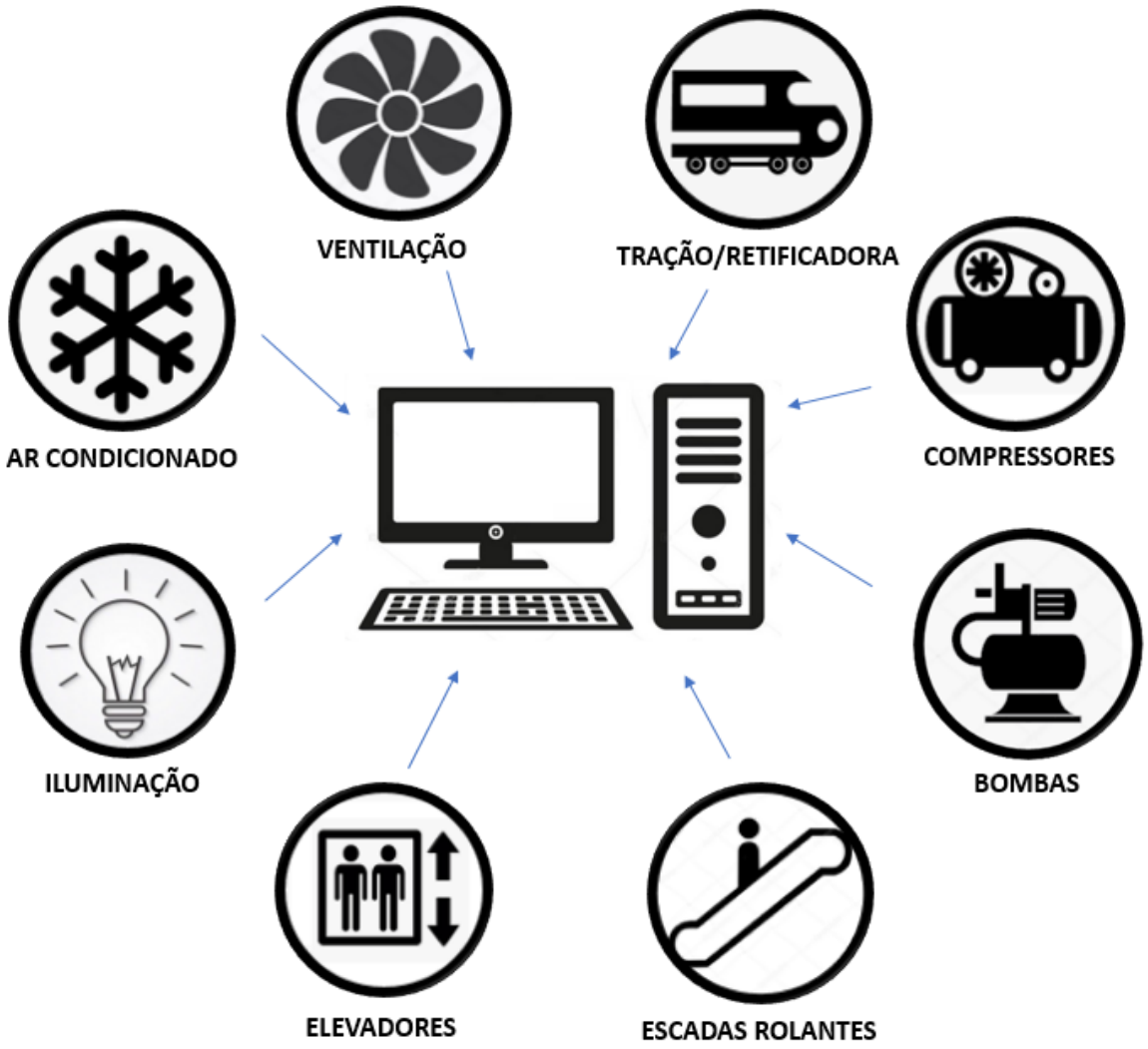

Figura 12- Ativos com consumo significativo de energia elétrica

O Metrô de São Paulo tem projetos para todos esses sistemas, conforme descrito abaixo:

- Iluminação: todas os mais de 200 tipos de lâmpadas e luminárias atualmente utilizadas foram padronizados em 11 modelos e estão em processo de substituição por de iluminação com tecnologia led, em muitos locais com automação e dimerização do sistema;

- Ar Condicionado central do CCO e Pátio Jabaquara: em processo de modernização;

- Ventilação Principal: em processo de modernização dos sistemas das linhas 1 e 3;

- Tração: modernização dos trens e Implantação do sistema de sinalização CBTC nas linhas 1 e 3, linha 2 já implantada e comprovada a redução do consumo de energia;

- Compressores: modernização do sistema de suprimento de ar comprimido com descentralização dos compressores dos pátios de manutenção, ou seja, compressores menores mais próximos dos locais de consumo evitando-se perdas na tubulação;

- Bombas: modernização com padronização de tipos e modelos;

- Escadas Rolantes: modernização do sistema elétrico com implantação do conceito de escadas regenerativas;

- Elevadores: substituição de elevadores hidráulicos por elétricos.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

O resultado do chamamento público foi a instalação de várias soluções propostas pelo mercado em diferentes estações. As soluções adotadas são mais bem descritas e ilustradas abaixo. De um modo geral, foram instalados medidores e analisadores de energia de bom desempenho para medição dos seguintes pontos:

- Entradas da subestação Retificadora em 22kV;

- Entradas 1 e 2 da subestação auxiliar- Quadro Principal de Distribuição- QPD em 460 Vac;
- Quadro de alimentação de escadas rolantes e ou/ ventilação principal -QDER/CCM-VP em 460 Vac;
- Entradas 1 e 2 do quadro geral de distribuição- QGD em 220 Vac;
- Painéis de luz das plataformas 1 e 2 em 220/127 Vac;

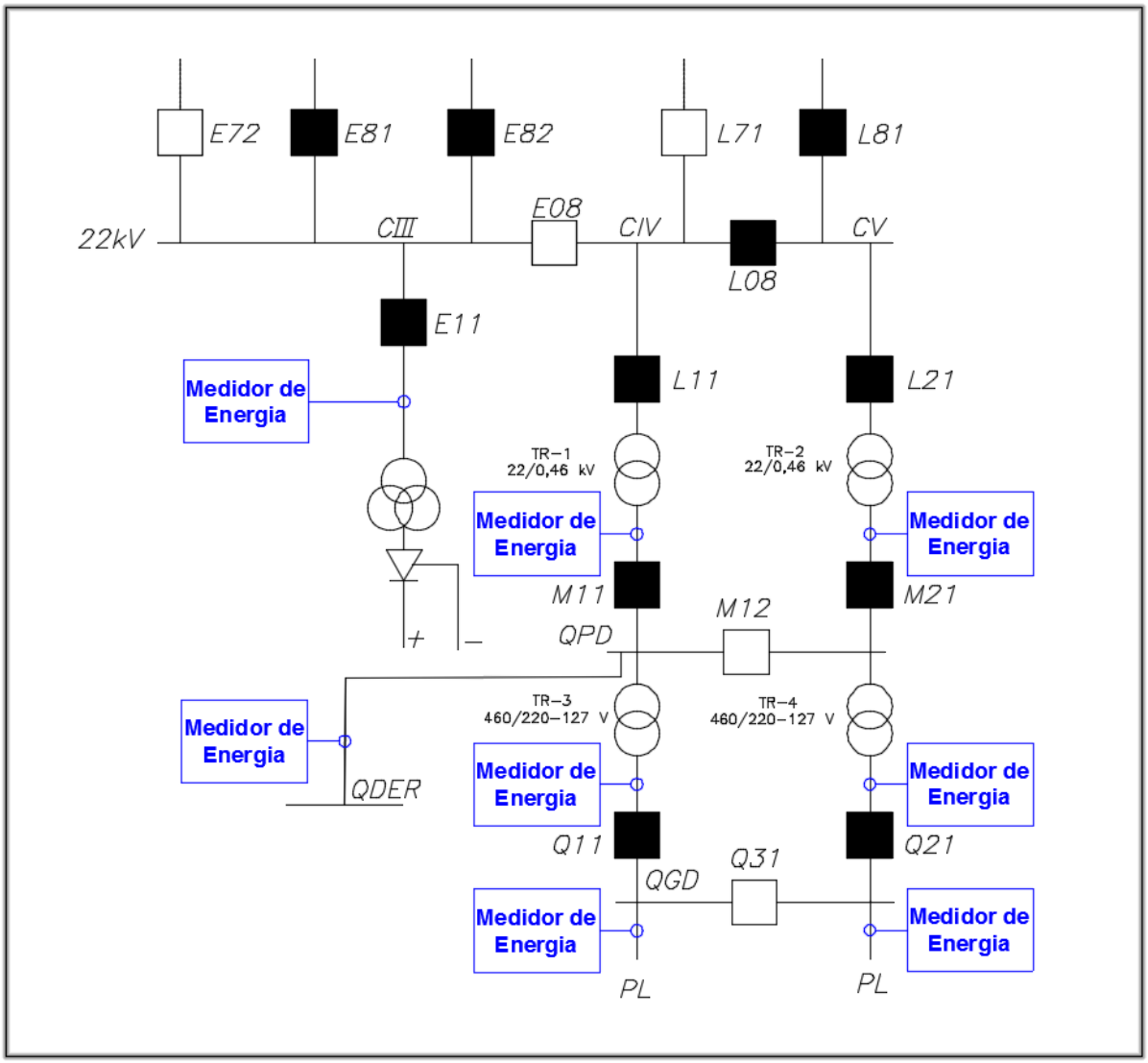

Figura 13- Esquema típico da instalação dos medidores nas estações

A seguir, é demonstrado ilustrações do sistema de medição analógico utilizado atualmente nas subestações retificadoras e auxiliares do Metrô e também os novos medidores e analisadores de energia propostos pelas empresas que participaram do chamamento público.

Figura 14- a) Medidores de energia analógicos para medição do consumo de energia na Retificador São Judas- WJU antes da substituição. b) Novos medidores instalados. c) Detalhe das instalações internas no painel

Figura 15- a) Quadro principal de distribuição- QPD em 460 Vac da estação Tucuruvi; b) Novo medidor instalado quadro; c) Detalhe das instalações internas no painel

Figura 16- a) Instalações nas entradas 1 e 2 do quadro geral de distribuição- QGD em 220 Vac na subestação auxiliar de São Judas. b) Detalhes das fiações internas no painel. c) Detalhes dos blocos de conexão instalados

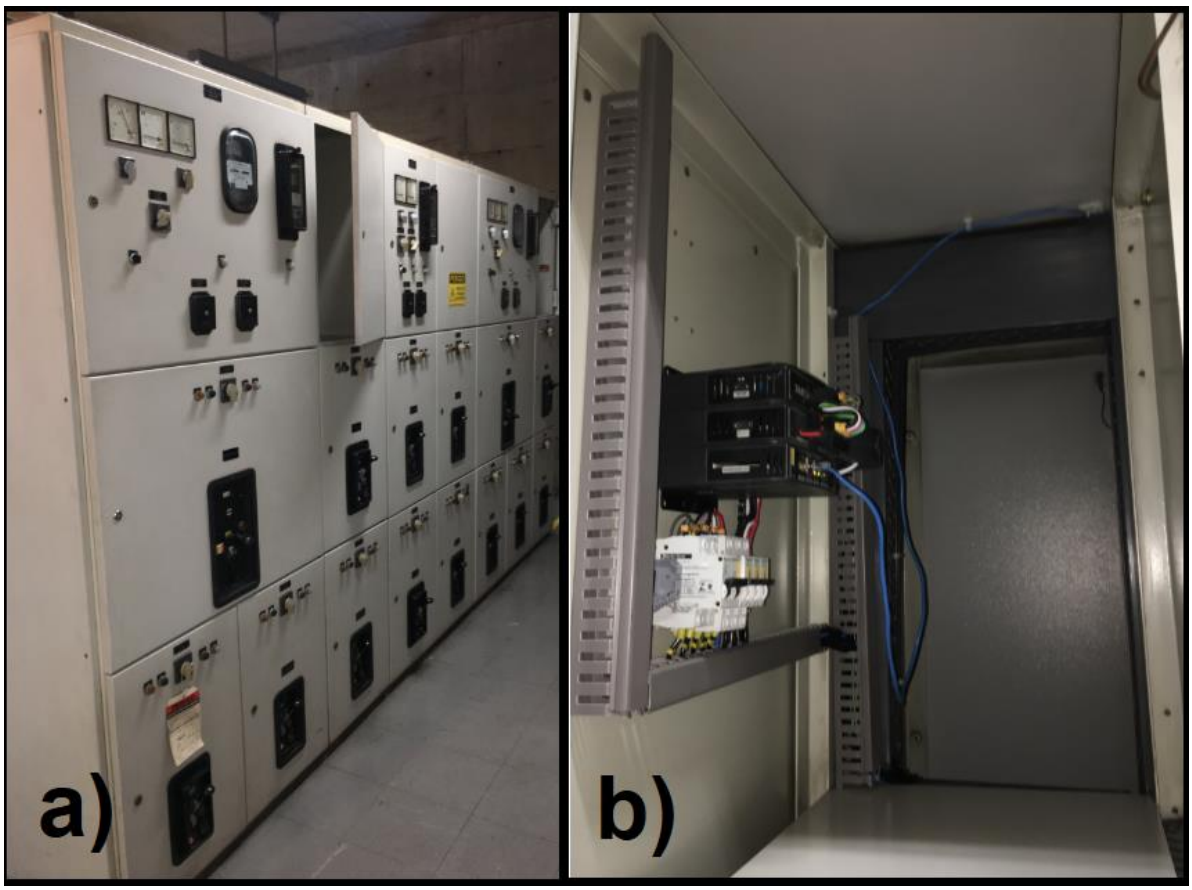

Figura 17- a) Quadro principal de distribuição- QPD em 460 Vac- Subestação auxiliar de Santa Cecília. b) Solução de instalação do medidor dentro do painel sem display

Para demonstrar alguns resultados com os equipamentos instalados, foram utilizados como referência o PRODIST Módulo 8 da ANEEL, que estabelece procedimentos relativos à qualidade da energia, definindo limites e valores de referência, metodologia de medição, terminologia e indicadores para se avaliar perturbações e estudos específicos relativos à conformidade de tensão de regime permanente e as perturbações na forma de onda de tensão.

Os seguintes fenômenos relacionados à qualidade do produto são tratadas no PRODIST:

1. Em regime permanente

- tensão em regime permanente;
- fator de potência;
- harmônicos;
- desequilíbrio de tensão;
- flutuação de tensão;
- variação de frequência.

2. Transitório

- variações de tensão de curta duração - VTCD;

As demonstrações das possibilidades de análise dos medidores e analisadores de energia e seus softwares a seguir não objetivam detalhar a fundo os fenômenos da qualidade de energia em si. Os parâmetros e limites estabelicidos pelo PRODIST módulo 8 da ANEEL são tomados apenas como uma referência nas demonstrações.

Partindo dessas premissas, as seguintes avaliações e resultados foram obtidos nos equipamentos instalados:

TENSÃO EM REGIME PERMANENTE

O PRODIST estabelece os limite adequados, precários e críticos para os níveis de tensão em regime permanente e também estabelece os indicadores individuais e coletivos de conformidade de tensão elétrica.

A tensão de atendimento deve ser associado ao limite de referência conforme figura 18 a seguir:

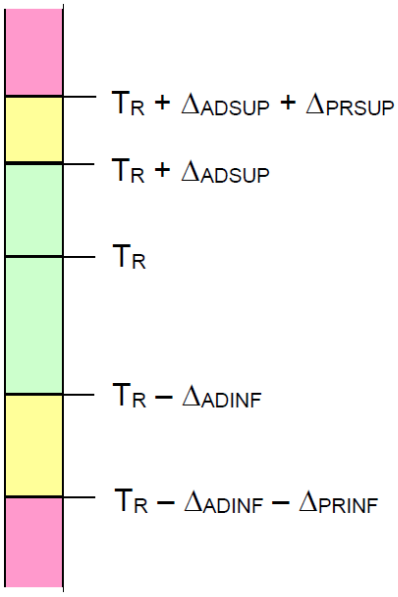

Figura 18- Limites de referência a tensão de atendimento (Fonte PRODIST)

sendo:

a) Tensão de Referência (TR);

b) Faixa Adequada de Tensão ($T_R - \Delta_{ADINF}$, $T_R + \Delta_{ADSUP}$);

c) Faixas Precárias de Tensão ($T_R + \Delta_{ADSUP}$, $T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta PRSUP$ ou $T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}$, $T_R - \Delta_{ADINF}$);

d) Faixas Críticas de Tensão ($>T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP}$ ou $<T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}$).

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	0,95TR≤TL≤1,05TR
Precária	0,90TR≤TL<0,95TR ou 1,05TR<TL≤1,07TR
Crítica	TL<0,90TR ou TL>1,07TR

Tabela 1 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 69 kV e inferior a 230 kV (Fonte PRODIST)

Na figura 19 é demonstrado uma medição realizada para avaliação do parâmetro de tensão em regime permanente:

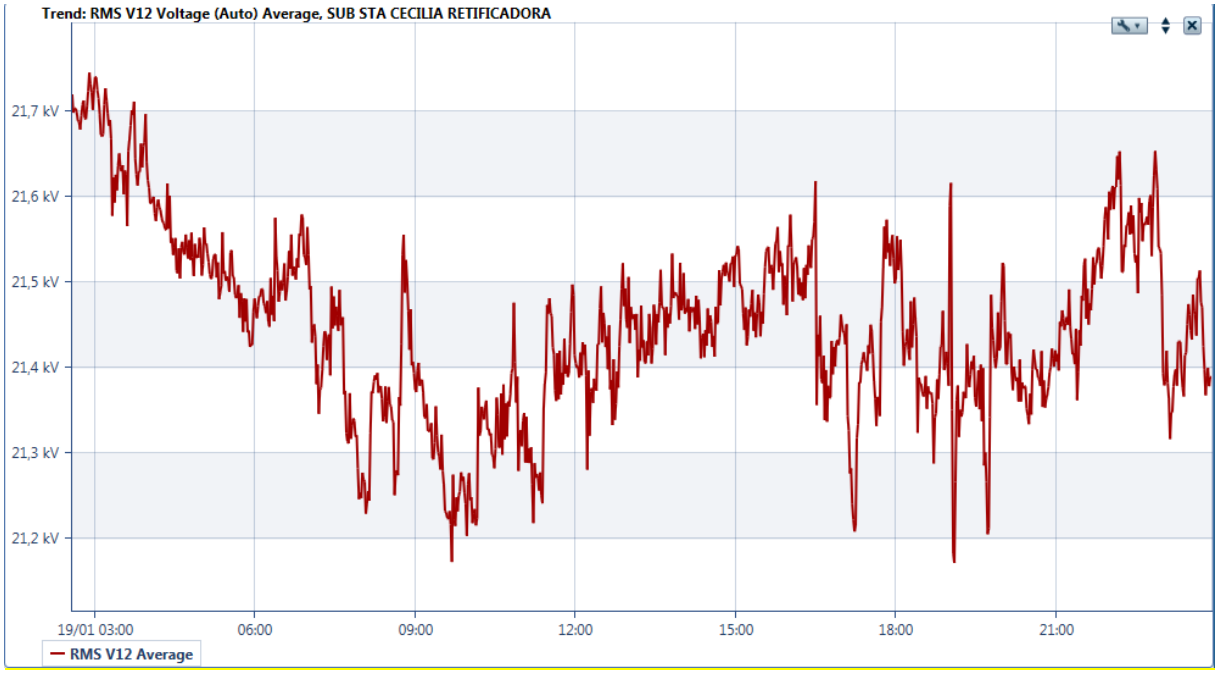

Figura 19- Gráfico de medição de tensão subestação Santa Cecília

FATOR DE POTÊNCIA

O valor do fator de potência deve ser calculado a partir dos valores registrados das potências ativa e reativa (P,Q) ou das respectivas energias (EA,ER), sendo calculado através da fórmula:

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad ou \quad \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}}$$

Para unidade consumidora com tensão inferior a 230 kV, o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 e 1,00 indutivo ou 1,00 e 0,92 capacitivo, de acordo com a regulamentação vigente. Abaixo é demonstrado gráficos de medição das potências ativas e reativas na subestação retificadora de Santa Cecília na Linha 3- Vermelha, e também o fator de potência associada à essa medição (figura 20):

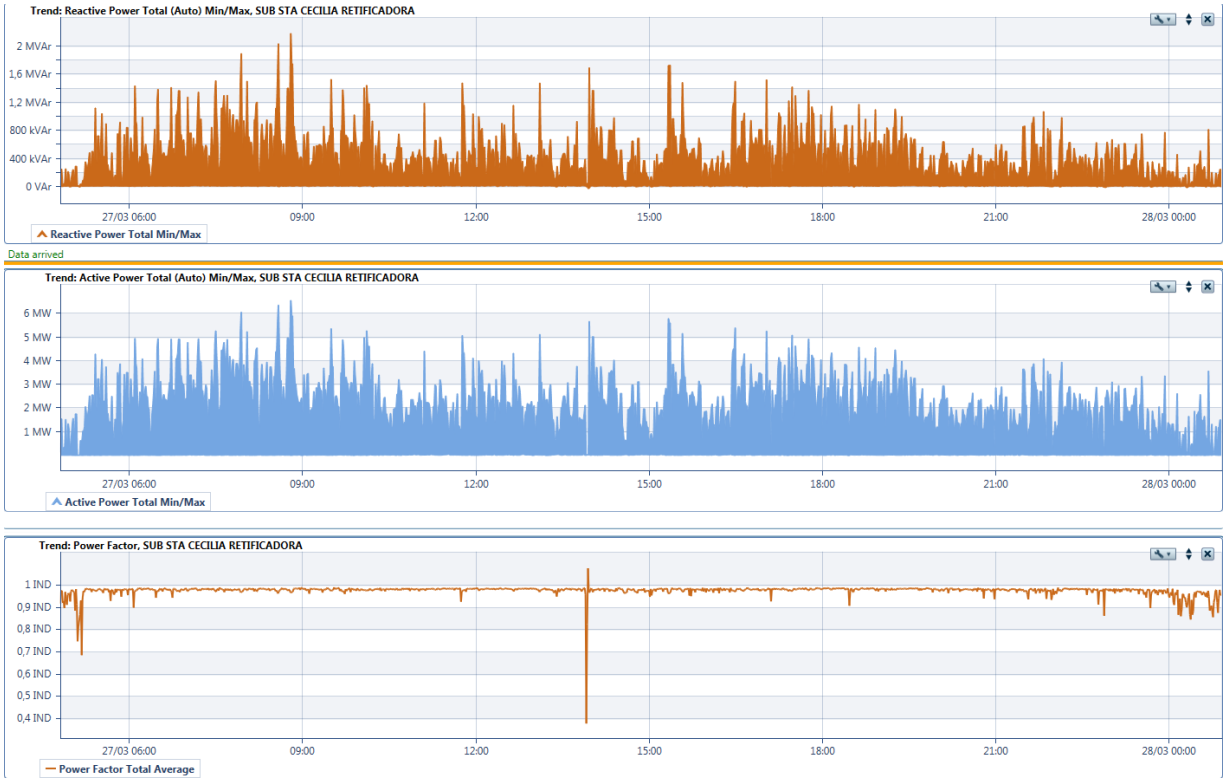

Figura 20- Gráficos de potência ativa, reativa e fator de potência subestação retificadora Santa Cecília

DISTORÇÕES HARMÔNICAS

A avaliação da deformação da forma de onda em relação à frequência fundamental é conhecida como distorção harmônica, que é causada frequentemente na rede de alimentação

elétrica devido a uma grande quantidade de cargas não lineares, que absorvem corrente elétrica não senoidal da rede causando ruídos na onda senoidal fundamental em frequências múltiplas da frequência fundamental. Sua quantificação é um importante parâmetro para avaliação da qualidade de energia porque um alto percentual de distorção harmônica pode ocasionar danos em equipamentos, aquecimento de condutores, mal funcionamento de equipamentos e outros problemas à rede elétrica.

A terminologia aplicável ao cálculo das distorções harmônicas segundo o PRODIST são:

IDENTIFICAÇÃO DA GRANDEZA	SÍMBOLO
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	DIT_h%
Distorção harmônica total de tensão	DTT%
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não multiplas de 3	DTT_p%
Distorção harmônica total de tensão para as componentes impares não multiplas de 3	DTT_i%
Distorção harmônica total de tensão para as componentes multiplas de 3	DTT_3%
Tensão harmônica de ordem h	V_h
Ordem harmônica	h
Ordem harmônica máxima	hmáx
Ordem harmônica miníma	hmin
Tensão fundamental medida	V1
Valor do indicador DTT% que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	DTT95%
Valor do indicador DTT_p% que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	DTT_p95%
Valor do indicador DTTi% que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	DTT_i95%
Valor do indicador DTT_3% que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	$DTT_3$95%

Tabela 2 – Terminologia aplicável ao cálculo das distorções harmônicas (fonte PRODIST)

A avaliação da distorção total de tensão DTT% é o índice mais comum para indicar o conteúdo harmônico de um sinal não senoidal, através dele é possível uma medida do valor efetivo dos componentes harmônicos de uma forma de onde distorcida em relação ao componente fundamental. A expressão para o cálculo da distorção harmônica de tensão é:

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h\max} V_h^2}}{V_1} \times 100$$

Onde:

h = todas as ordens harmônicas de 2 até hmáx.

hmáx = conforme norma IEC 61000-4-30 classe A ou S.

O limite estabelecido para as distorções harmônicas totais estabelecidos no PRODIST da ANEEL é demonstrado na tabela abaixo.

Indicador	Tensão nominal		
	Vn ≤ 1,0 kV	1,0 kV < Vn < 69 kV	69 kV ≤ Vn < 230kV
DTT95%	10,0%	8,0%	5,0%

Tabela 3 – Limites de distorção harmônica total (fonte PRODIST)

Na figura 21 é demonstrado a funcionalidade dos analisadores de energia para avaliação da distorção harmônica total na alimentação de uma subestação retificadora de Santa Cecília na Linha 3- Vermelha:

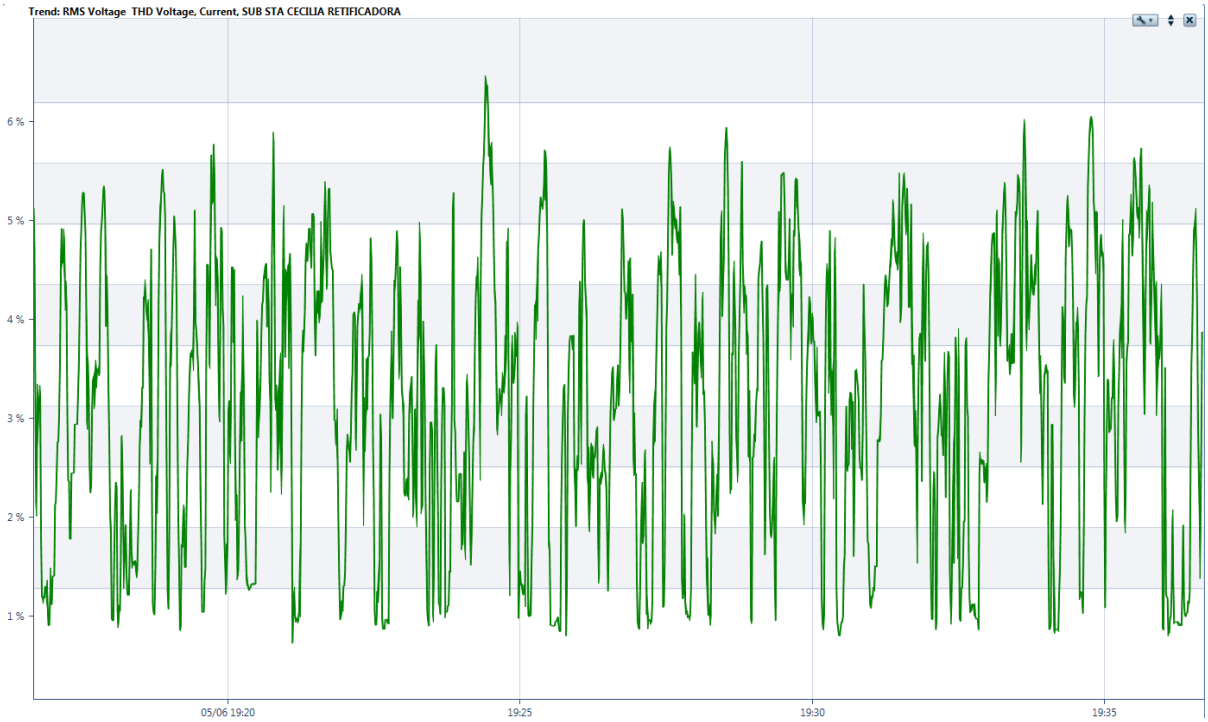

Figura 21- Distorção Harmônica Total Subestação Retificadora Santa Cecília Linha 3- Vermelha

Para conseguir perceber com melhor clareza o efeito da distorção harmônica na forma de onda fundamental da fonte, nas figuras 22 e 23 é demonstrada uma comparação entre uma forma de onda em uma das fases do sistema com distoração harmônica total de de 0,99% e uma segunda forma de onda na mesma fase com uma distorção de 5,8%, assim como o detalhe da distorção na senóide em cada caso:

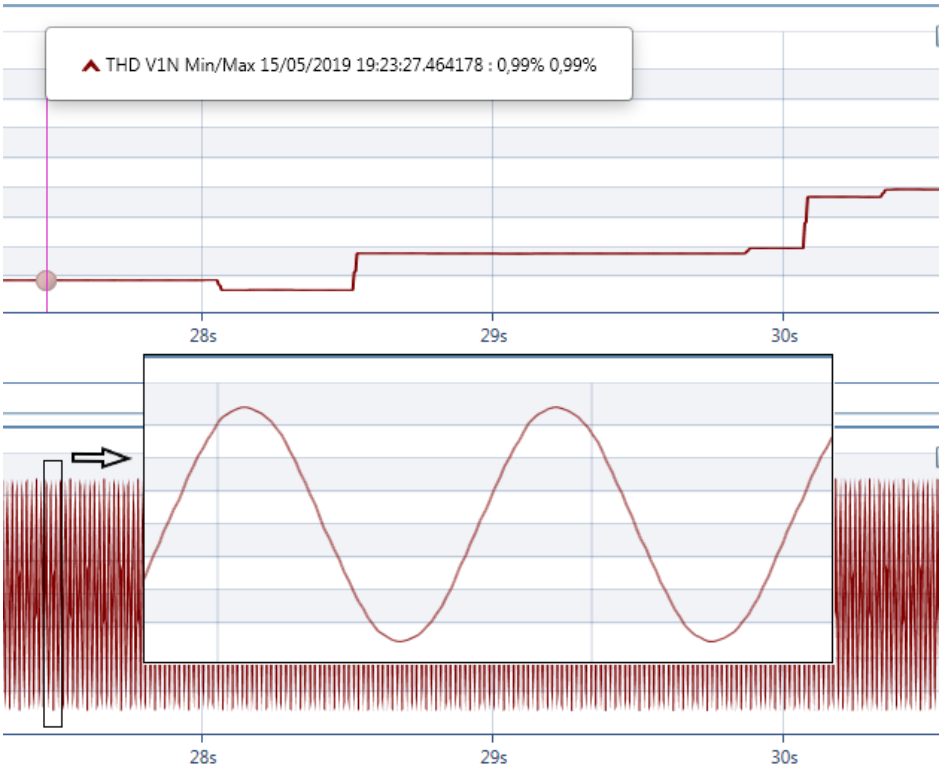

Figura 22- Forma de onda com DTT de 0,99%

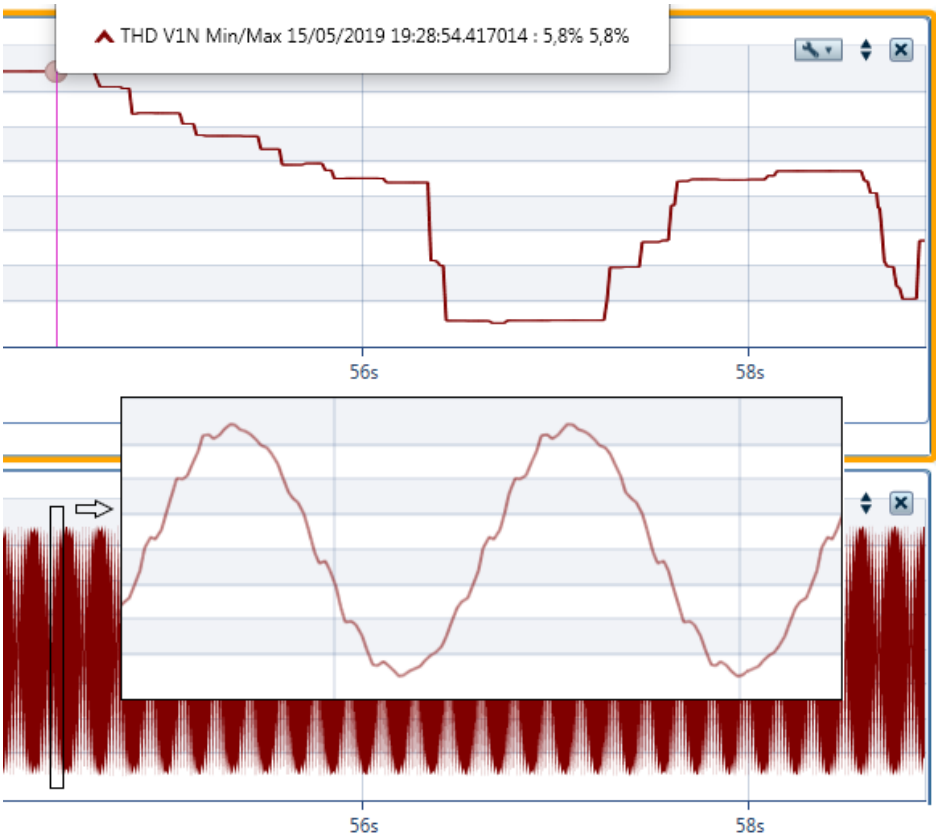

Figura 23- Forma de onda com DTT de 5,8%

E ainda é possível avaliar a distorção harmônica da tensão trifásica através do espectro harmônico, conforme figura 24 da subestação retificadora de Tucuruvi na Linha 1- Azul, onde se pode observar valores de distorção harmônica na 11ª ordem e 13ª oredem em torno de 3,5% nas três fases:

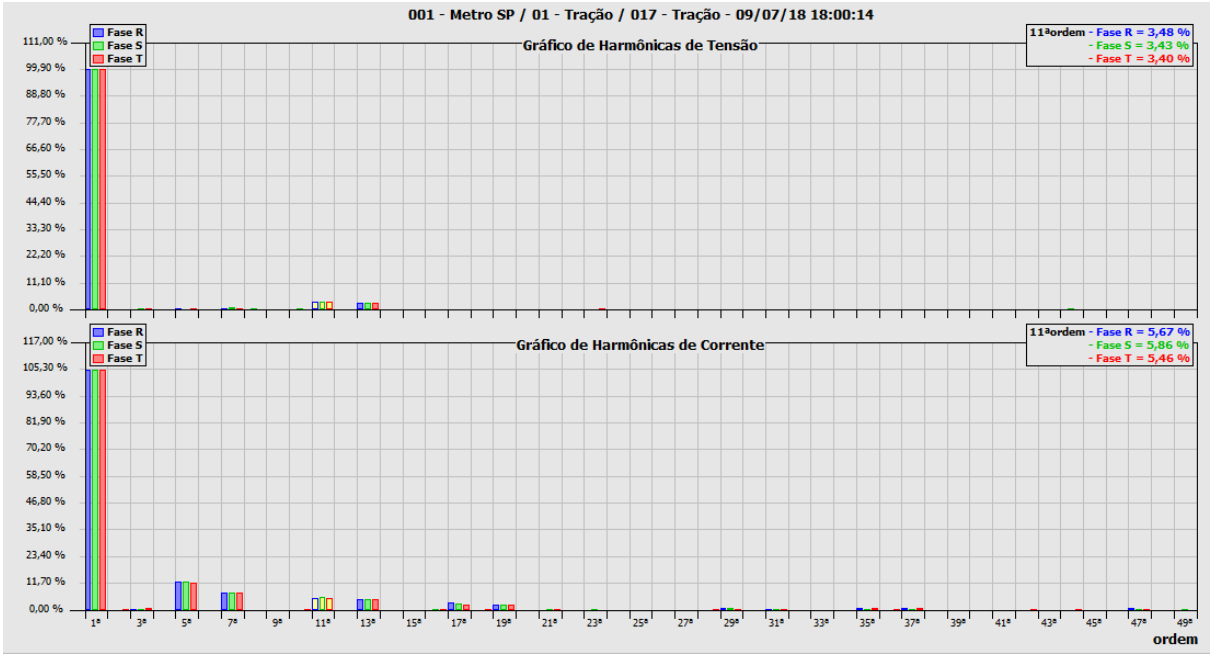

Figura 24- Espectro harmõnico subestação retificadora Tucuruvi

DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

O desequilíbrio de tensão é o fenômeno caracterizado por qualquer diferença verificada nas amplitudes entre as tensões de fase de um determinado sistema trifásico, e/ou defasagem elétrica de 120° entre as tensões da mesma fase do mesmo sistema.

A terminologia aplicável ao cálculo do desequilíbrio de tensão segundo o PRODIST são:

IDENTIFICAÇÃO DA GRANDEZA	SÍMBOLO
Fator de desequilíbrio de tensão	**FD**
Magnitude da tensão eficaz de sequência negativa – frequência fundamental	**V-**
Magnitude da tensão eficaz de sequência positiva – frequência fundamental	**V+**
Magnitudes das tensões eficazes de linha – frequência fundamental	**V_{ab}, V_{bc} e V_{ca}**

Tabela 4- Terminologia Desequilíbrio de Tensão (fonte PRODIST)

A expressão para o cálculo do desequilíbrio de tensão é:

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} 100$$

Alternativamente, as expressões a seguir conduzem a resultados em consonância com a expressão anterior:

$$\mathrm{FD}\% = 100\sqrt{\frac{1-\sqrt{3-6\beta}}{1+\sqrt{3-6\beta}}}$$

Sendo:

$$\beta = \frac{V_{ab}{}^4 + V_{bc}{}^4 + V_{ca}{}^4}{\left(V_{ab}{}^2 + V_{bc}{}^2 + V_{ca}{}^2\right)^2}$$

No gráfico abaixo é demonstrado o desequilíbrio de tensão medido no grupo retificador da subestação retificadora São Judas na Linha 1- Azul onde se pode observar valores menores que 0,6 %. O PRODIST estabelece que para tensões nominais de 1kV a 230kV os valores sejam menores que 2,0%:

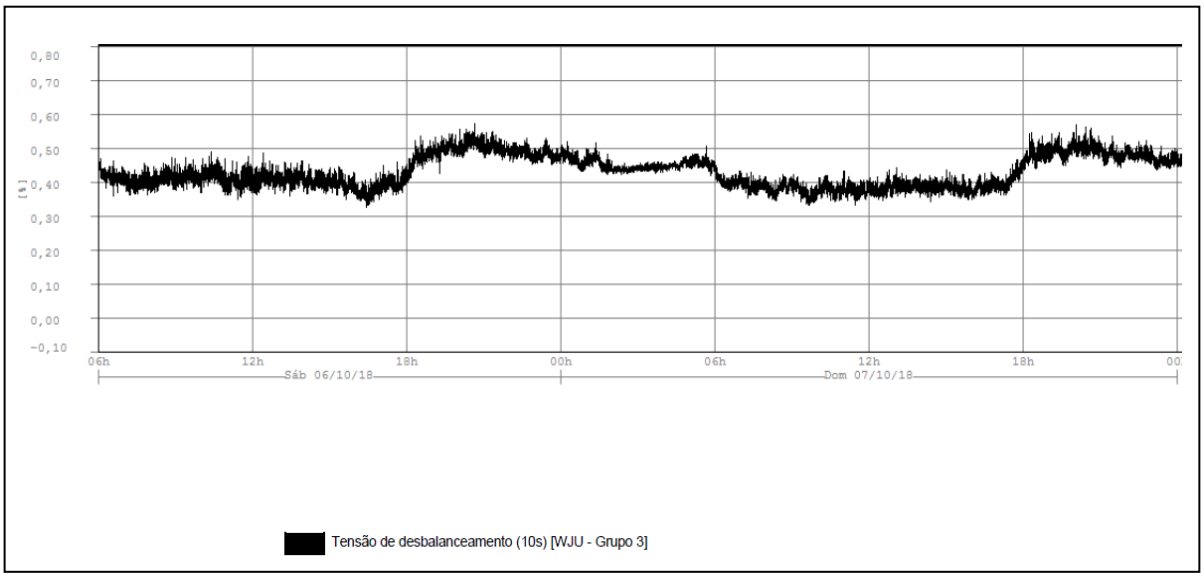

Figura 25- Desequilíbrio de tensão- Subestação Retificadora São Judas

FLUTUAÇÃO DE TENSÃO

A flutuação de tensão também conhecido como “flicker”, é um fenômeno que pode ser definido como variações de tensão do valor eficaz da tensão. No módulo 8 do PRODIST é definido como “uma variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz da tensão” e tem por objetivo avaliar o incômodo pelo efeito da cintilação luminosa no consumidor, que tenha em sua unidade consumidora pontos de iluminação alimentados em baixa tensão.

A terminologia e quantificação são definidos como:

• Pst (severidade de flutuação de tensão de curta duração): 10 minutos

• Plt (severidade de flutuação de tensão de longa duração): 2 horas

O modelo para o cálculo destes indicadores são expressos na IEC 61000-4-15 e seguem um modelo estatísticco de ocorrência de tensões que são processados e traduzidos em níveis de sensação de cintilação luminosa e taxas de probabilidade de ocorrência.

As figuras 26 e 27 demonstram a medição da flutuação de tensão por um período de três dias consecutivos no quadro principal de distribuição da subestação auxiliar da estação Santa Cecília da Linha 3-Vermelha:

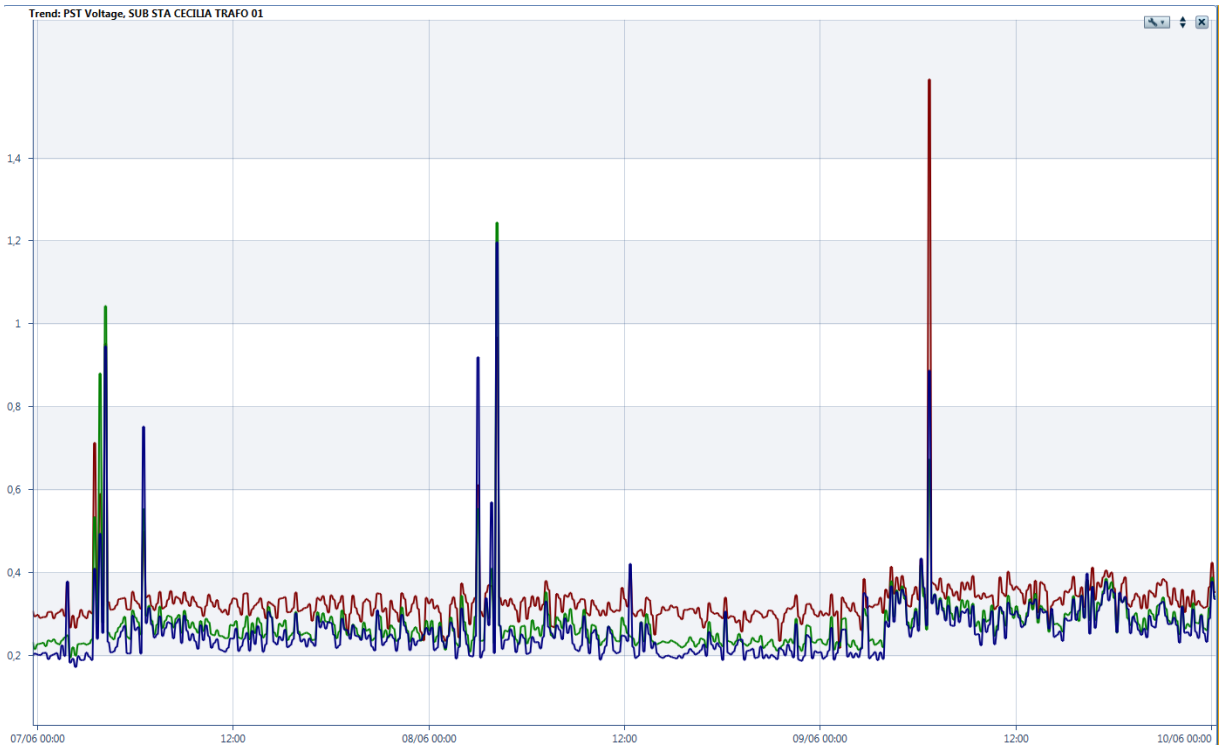

Figura 26- Pst -Quadro Principal de distribuição QPD Santa Cecília

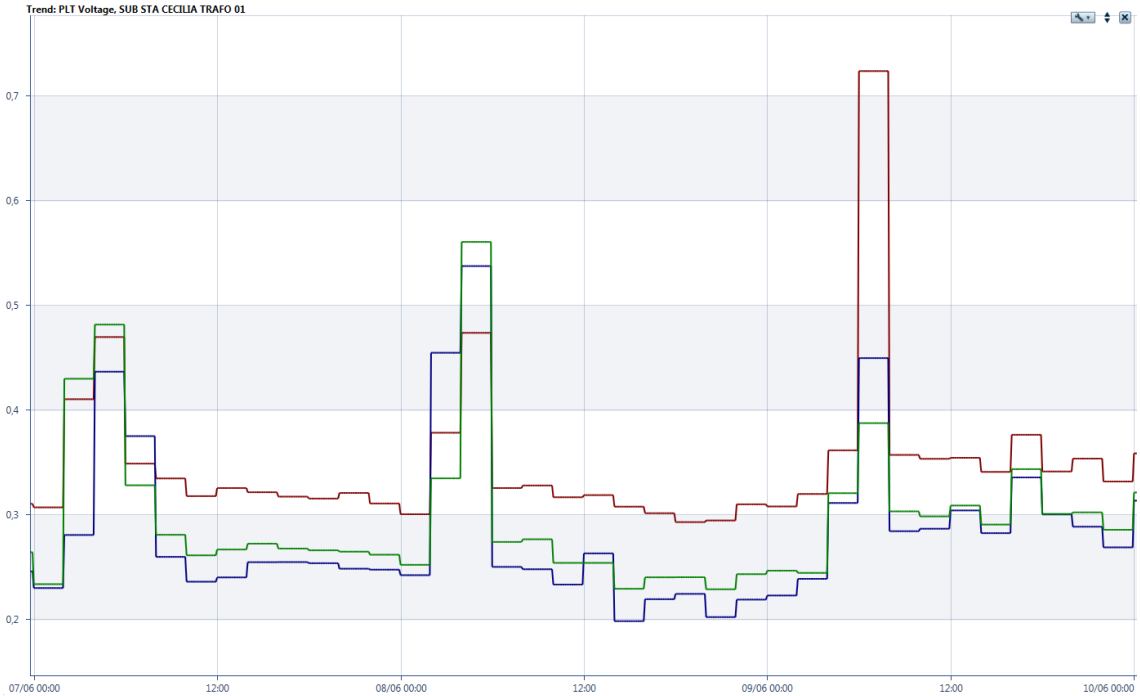

Figura 27- Plt - Quadro Principal de distribuição QPD Santa Cecília

Os limite estabelecido para a flutuação de tensão é o indicador Pst95% que corresponde ao valor do indicador Pst que foi superado em 5% das leituras no intervalo de 10 minutos, e o mesmo é fixado em 1,0 pu para tensões nominais menores que 1,0 kV.

VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA

Em regime permanente e situação normal de operação, o módulo 8 do PRODIST estabelece limites da frequência da rede em 60 Hz para valores situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz.

Na figura 28 é demonstrado a medição de frequência da alimentação da subestação retificadora de Santa Cecília na Linha 3- Vermelha

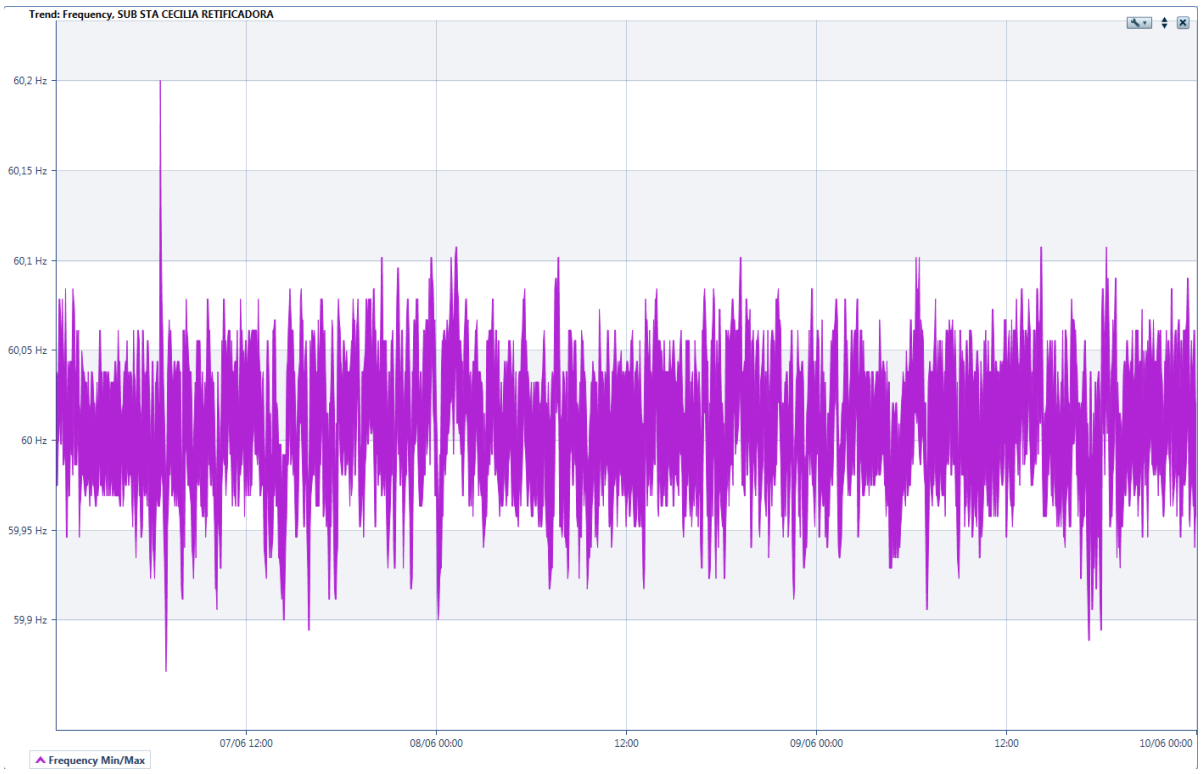

Figura 28- Frequência subestação retificadora Santa Cecília

VARIAÇÃO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

As figuras 29, 30 e 31 demonstram variações de tensão de curta duração que são definidos como um desvio significativo da amplitude da tensão por um curto intervalo de tempo e engloba os fenômenos como elevação de tensão, afundamento e interrupção.

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u

Tabela 5- Terminologia Desequilíbrio de Tensão (fonte PRODIST)

Figura 29- Interrupção momentânea- subestação retificadora Santa Cecília

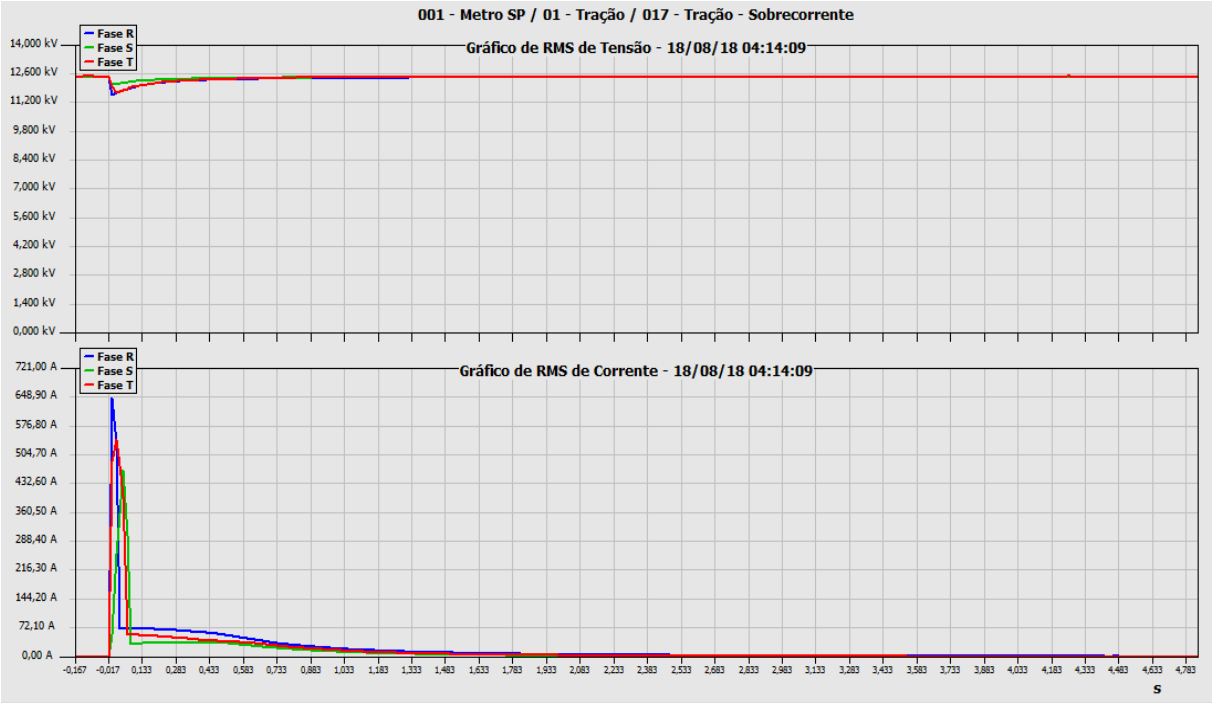

Figura 30- Pico de Corrente na energização do sistema- subestação retificadora Tucuruvi

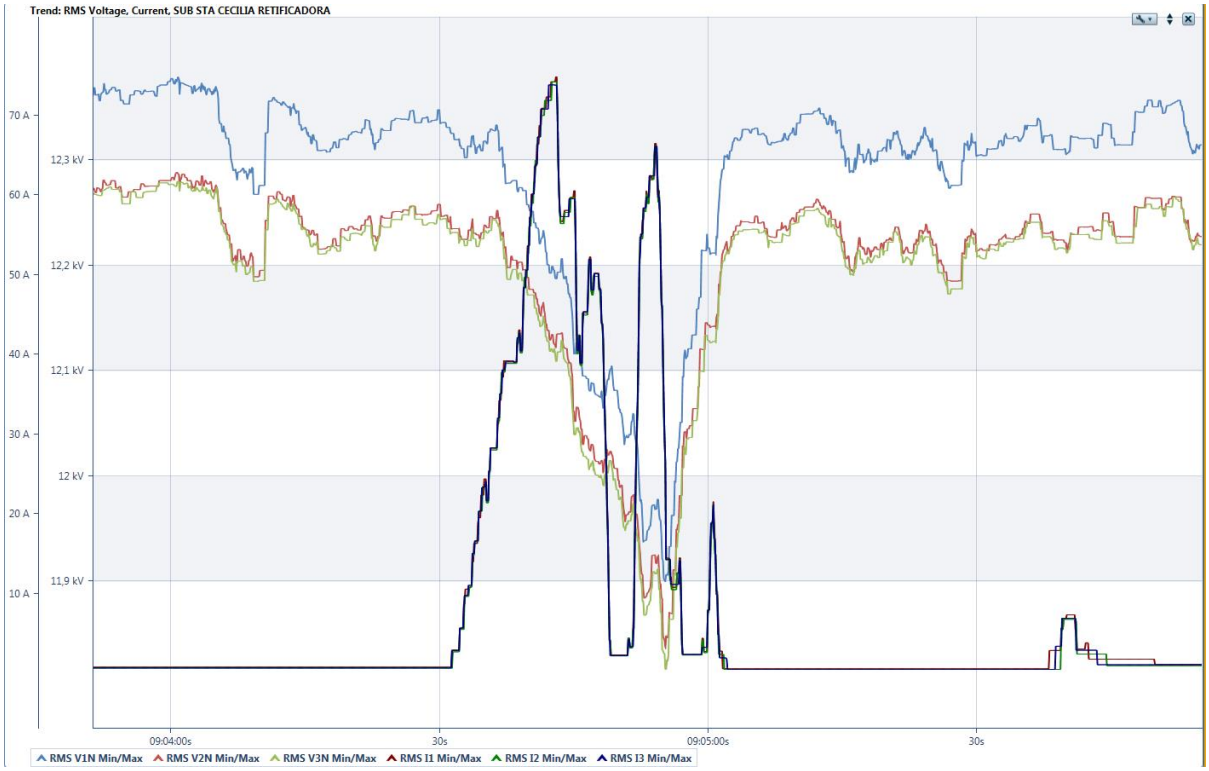

Figura 31- Afundamento de tensão- subestação retificadora Santa Cecília

EXEMPLO DE MEDIÇÃO DE CONSUMO DE ENERGIA

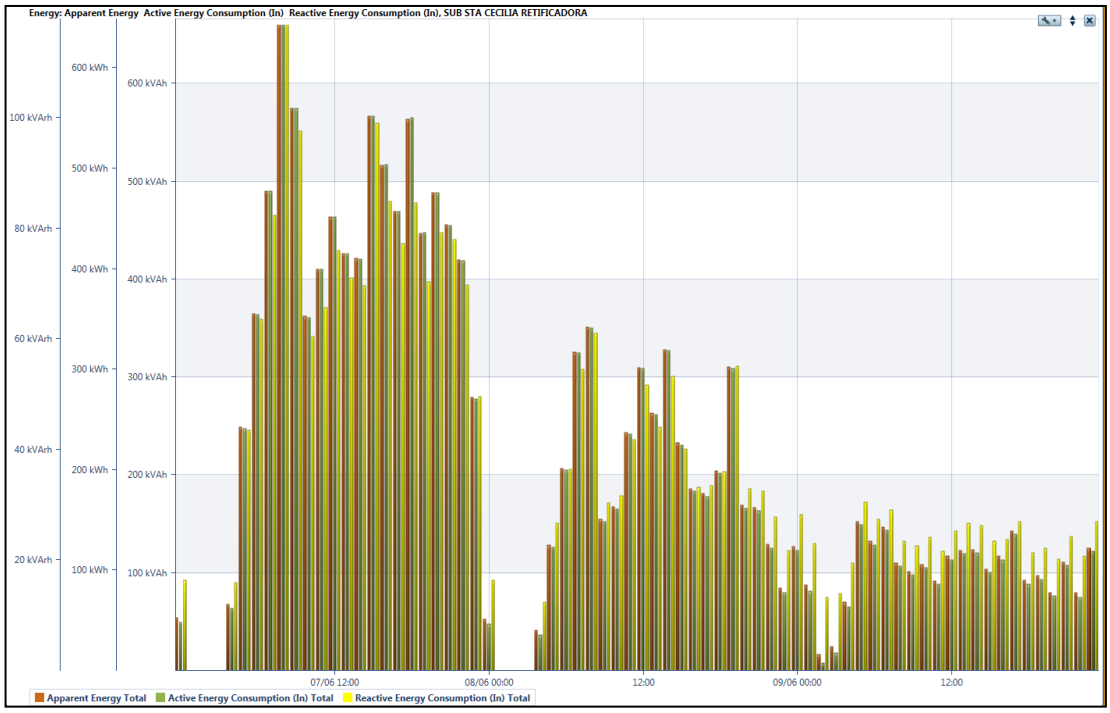

Figura 32- Energia Aparente, Ativa e Reativa consumida subestação retificadora Santa Cecília- intervalos de 1 hora- Comparação conumo Sexta-feira/Sábado e Domingo

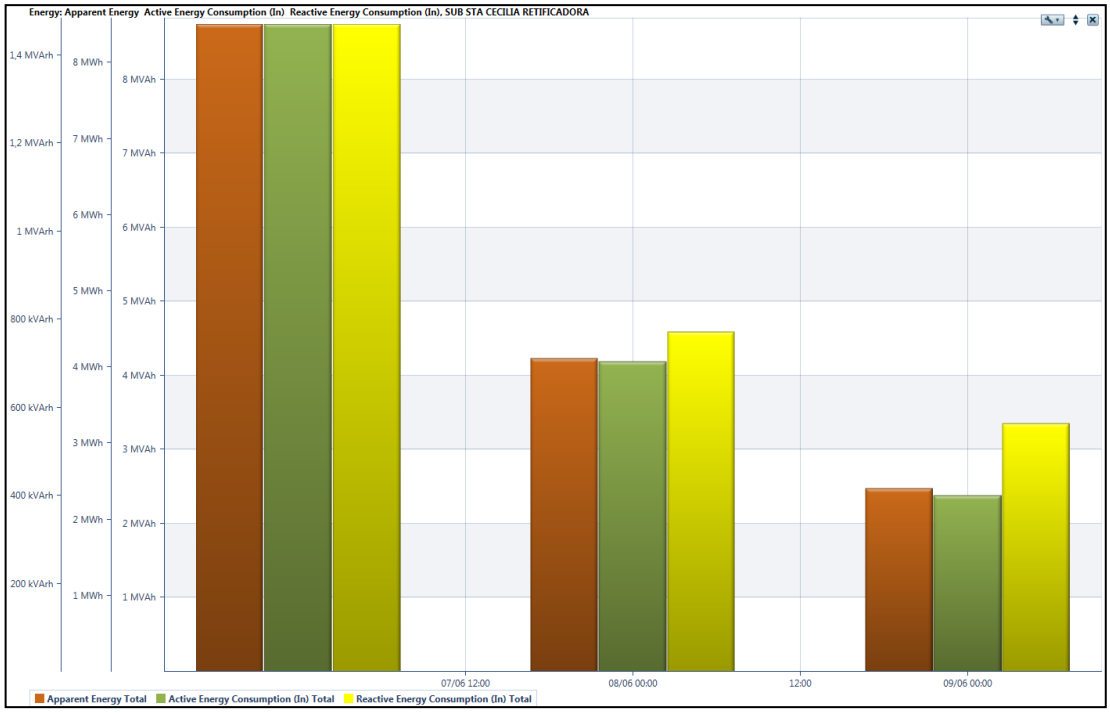

Figura 33- Energia Aparente, Ativa e Reativa consumida subestação retificadora Santa Cecília- intervalo diário- Comparação consumo Sexta-feira/Sábado e Domingo

CONCLUSÕES

Um dos principais problemas que ocorrem no setor metroferroviário com relação a consumo de energia elétrica, em geral é a falta de informações atualizadas pela medição de dados em tempo real (alta disponibilidade de dados) que nos permite coletar informações detalhadas instantaneamente (alta disponibilidade de recursos de análise de dados) e, assim, nos ajudar a discernir se uma determinada oportunidade de melhoria de processos é conveniente ou não.

Por meio do Chamamento Público a engenharia do Metrô de São Paulo agregou conhecimento técnico necessário para elaborar as especificações técnicas, para aquisição de produtos com qualidade superior com uma melhor relação custo benefício.

Com as demonstrações obtidas pelos diferentes medidores instalados, conclui-se pela viabilidade do monitoramento remoto que permite estudar com um grande nível de precisão diferentes parâmetros relacionados à qualidade de energia em sistemas metroferroviários, onde uma análise do consumo mais estratificada, permite avaliar e acompanhar com maior efetividade ações de eficiência energética.

Vale destacar que a instalação de bons medidores é fundamental para sucesso do projeto, pois possibilitará a otimização dos serviços de manutenção, planejamento de diversos cenários de operação, redução de deslocamento (através do monitoramento remoto de qualquer equipamento do sistema), definição de modelos de consumo e demanda de cada equipamento, estação, linha e pátios, onde será possível conhecer os verdadeiros custos de energia para cada centro de custo (rateio). Neste contexto o Metrô-SP está em processo de

implantação do Sistema de Gestão NBR ISO 50.001- Gestão de Energia. Já foram definidos passos importantes como: a composição dos integrantes do comitê de implantação o representante da direção, o escopo e realizada a primeira auditoria de adequação.

Listar todos os padrões e especificações em relação ao projeto iria além do propósito deste artigo, nossa maior contribuição dá-se no sentido de fomentar a reflexão e discussão sobre a necessidade e importância de implementar-se um sistema de monitoramento do consumo e da qualidade de energia no setor metroferroviário, pois dado o alto consumo e o custo deste insumo, os impactos na sustentabilidade da empresa sempre serão significativos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Guia para Aplicação da Norma ABNT NBR ISO 50001 – Gestão de Energia - https://www.leonardo-energy.org.br/wp-content/uploads/2018/02/MOT_Guia_Gestao_de_Energia.pdf

[2] Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 Qualidade da Energia Elétrica – ANEEL

[3] IEC 61000-4-30 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods

[4] IEC 61000-4-15 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-15: Testing and measurement techniques – Flickermeter – Functional and design specifications

[5] Relatório de Gestão 2015-2018 (http://www.metro.sp.gov.br/metro/institucional/pdf/RG%2015-18.pdf)