

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE TRANSPORTES
PÓS-GRADUAÇÃO EM TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE CARGAS

GUILHERME JOSÉ D'APPARECIDA FILHO

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA DA
FERROVIA DO AÇO**

RIO DE JANEIRO
2012

GUILHERME JOSÉ D'APPARECIDA FILHO

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA NA
FERROVIA DO AÇO**

Monografia apresentada ao curso de Pós-
Graduação em Transporte Ferroviário de
Cargas do Instituto Militar de Engenharia.

Orientador: Manoel Ferreira Mendes

Tutor: M. Eng. Leandro Rodrigues Manso
Silva

RIO DE JANEIRO
2012

GUILHERME JOSÉ D'APPARECIDA FILHO

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA DA
FERROVIA DO AÇO**

Monografia apresentada ao curso de Pós-Graduação em Transporte Ferroviário de Cargas do Instituto Militar de Engenharia.

Aprovada em 27 de junho de 2012.

COMISSÃO EXAMINADORA

**Manoel Ferreira Mendes – Orientador
CEPEFER**

**M. Eng. Leandro Rodrigues Manso Silva – Tutor
Universidade Federal de Juiz de Fora**

Cap Renata Albergaria de Mello Bandeira, Dr.

*“é melhor tentar, ainda que em vão,
que sentar-se fazendo nada até o final.”*

(Martin Luther King)

A todos meus familiares e amigos, por tudo que representam.

Resumo

A qualidade da energia elétrica vem tendo cada vez mais espaço na análise do sistema de geração e distribuição de energia. Um dos motivos principais é o emprego de dispositivos altamente sensíveis aos fenômenos referentes aos padrões do suprimento elétrico, com a expansão do consumo aliado ao desenvolvimento tecnológico tornando necessária uma energia cada vez mais confiável. Neste trabalho foi construída uma metodologia para análise da qualidade de energia elétrica da Ferrovia do Aço, pertencente à malha ferroviária da MRS. Com essa metodologia, consegue-se utilizar dos dados disponibilizados pelo analisador de qualidade de energia elétrica e discutir junto a concessionária as responsabilidades referentes aos custos de cada uma das falhas, tendo como base para isso o procedimento PRODIST.

Sumário

1	Introdução.....	11
1.1	Objetivos do trabalho	13
1.2	Estrutura do trabalho	14
2	Distúrbios da Qualidade de Energia Elétrica	15
2.1	Introdução.....	15
2.2	Harmônicos.....	17
2.3	Afundamentos de Tensão (SAGs).....	23
2.4	Indicadores e parâmetros estabelecidos.....	27
3	Qualidade de energia na MRS Logística.....	30
3.1	Introdução.....	30
3.2	Ferrovia do Aço	31
3.3	Característica sistema de energia da Ferrovia do Aço.....	32
3.4	Estrutura do sistema de sinalização e telecomunicações da Ferrovia do Aço.....	33
3.5	Analisador de qualidade de energia elétrica	36
4	Processo de análise da QEE na Ferrovia do Aço	40
4.1	Justificativa.....	40
4.2	Análise por subestação da MRS	42
5	Conclusões.....	48
	ANEXO I.....	49
	ANEXO II	50
	Referências Bibliográficas	51

Lista de Figuras

Figura 1 - Sistema Elétrico de Potência (SEP).....	11
Figura 2- Influência harmônica na forma de onda senoidal	18
Figura 3 - Sistema de distribuição de energia da MRS	32
Figura 4 - Sistema de circuito de via	34
Figura 5 - Sistema de circuito de via de corrente alternada.....	35
Figura 6 - Topologia em anel do sistema de telecomunicações	36
Figura 7 - Fluxograma para análise da QEE da Ferrovia do Aço.....	47

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Categorias e Características dos Fenômenos Eletromagnéticos.....	16
Tabela 2 - Classificação dos harmônicos	18
Tabela 3 - Limites de distorção harmônica de tensão	19
Tabela 4 - Limite de distorção harmônica individual.....	19
Tabela 5 - Limites de distorção harmônica de corrente em % de I_L	21
Tabela 6 - Classificação das variações de tensão de curta duração.....	25
Tabela 7 - Parâmetros medidos pelo analisador Shark 100.....	37
Tabela 8 - Modo de medição dos parâmetros analisados	38
Tabela 9 - Índices de falhas por subestação da Ferrovia do Aço	40
Tabela 10 - Resumo descritivo dos fenômenos relacionados a qualidade de energia elétrica .	46

Lista de abreviatura

SEP – Sistema Elétrico de Potência

QEE – Qualidade de Energia Elétrica

AC – Corrente Alternada

THD – Distorção Harmônica Total

DIT – Distorção Harmônica Individual

PAC – Ponto de Acoplamento Comum

CTC - Controle Tráfego Centralizado

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

PRODIST - Procedimentos de Distribuição de energia elétrica

1 Introdução

Um sistema de energia elétrica está fundamentalmente baseado no fluxo mostrado na Figura 1, onde a energia é gerada em grandes centrais geradoras, que se apresentam em número relativamente pequeno, e posteriormente transmitida para subestações locais e, a partir, dessas distribuídos para as mais diversas cargas presentes no sistema elétrico local.

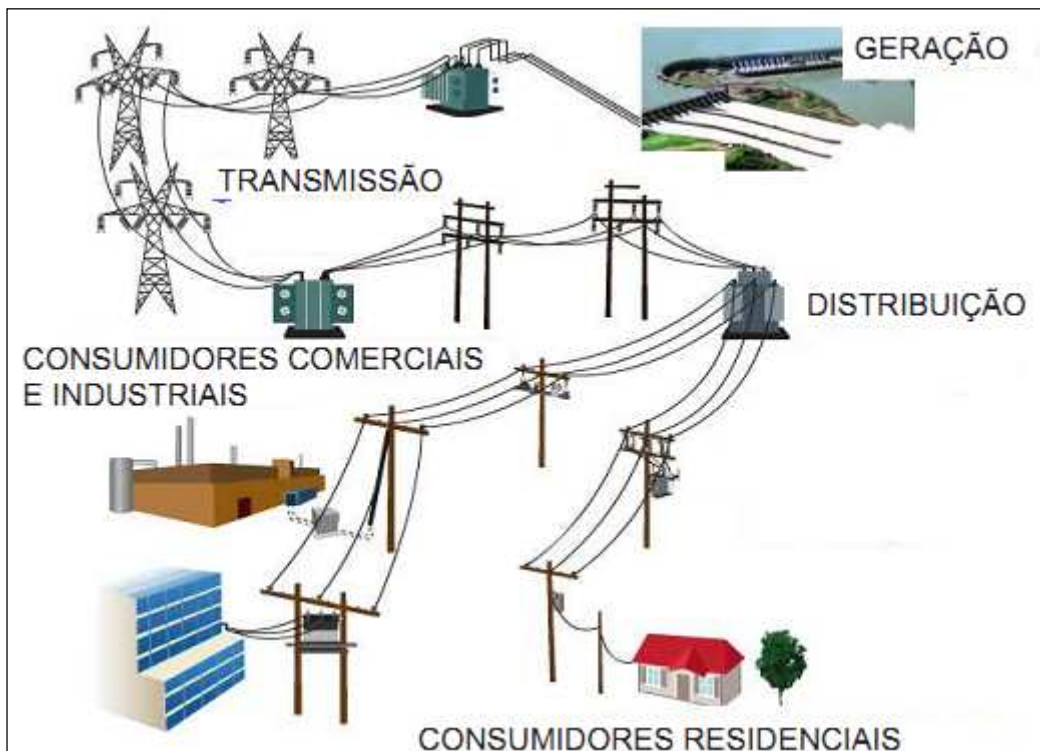


Figura 1 - Sistema Elétrico de Potência (SEP)

Nesta arquitetura de sistema elétrico, as redes de distribuição são operadas normalmente de forma radial e o transporte de energia ocorre a partir da subestação para os usuários finais. Contudo, falhas em componentes do sistema de distribuição conduzem a interrupção no fornecimento de energia para alguns consumidores finais [1]. Assim, o modelo da Figura 1 já não garante um fornecimento de energia confiável e de qualidade e novos modelos foram surgindo, ainda que tecnicamente as alterações não sejam muito grandes, como [2]:

- Transmissão e distribuição divididas em companhias distintas, econômica e eletricamente independentes, integrando um sistema de energia muito maior.

- Sistemas de geração distribuída, com pequenas unidades geradoras espalhadas no sistema de distribuição, buscando maior confiabilidade e qualidade no atendimento as demandas dos clientes individuais.

Entretanto, novos parâmetros para o sistema elétrico também surgiram com a sua modernização e novas avaliações tornaram-se necessárias, entre eles:

- A utilização de equipamentos microprocessados, com controles baseados em dispositivos eletroeletrônicos, são muito mais sensíveis a distúrbios na rede de alimentação do que os existentes anteriormente.
- Os impactos econômicos para as concessionárias, consumidores e os fabricantes de equipamentos. A energia de má qualidade diminui a vida útil de equipamentos e causa elevados prejuízos devido à parada na produção;
- Processos industriais cada vez mais integrados, onde a falha de um equipamento pode acarretar em consequências muito maiores.
- Inserção cada vez maior de cargas não lineares no sistema de distribuição, causando cada vez mais distorções na rede elétrica, pois não requerem a corrente elétrica constantemente, mas solicitam apenas picos de energia em determinados momentos.
- Geração embutida e fontes renováveis de energia criam variações de tensão, flickers, entre outros.
- E também, os equipamentos destinados a melhorar a eficiência energética são bastantes sensíveis a distúrbios na qualidade de energia elétrica.

Assim, desde o fim dos anos 80 a questão da Qualidade de Energia Elétrica (QEE), que antes era percebida somente no momento em que os consumidores constatavam as interrupções no fornecimento, tornou-se um fator importantíssimo à medida que tais consumidores tornaram-se mais sofisticados sob o ponto de vista tecnológico e mais parâmetros associados a energia elétrica passaram a ser considerados. Como para caracterizar a qualidade da energia elétrica, são analisados os sinais de tensão em sua amplitude, forma de onda e frequência, um problema de qualidade da energia elétrica pode ser definido como qualquer desvio ou alteração manifestada nestas grandezas, que resulte na falha ou operação inadequada de instalações, aparelhos ou equipamentos. Tais alterações podem ocorrer em várias partes do sistema de energia, seja nas instalações de consumidores ou no sistema supridor da concessionária [3].

Outro importante fator para análise da QEE tem haver com a qualidade do serviço, que corresponde à capacidade de fornecimento de energia para o sistema a ser alimentado e seu restabelecimento em caso de alguma falha. Essa correspondência gera um índice que nos informa todos parâmetros a serem utilizados junto a concessionária de energia para questionamento da baixa qualidade no suprimento de eletricidade.

A MRS Logística S.A., empresa com foco no transporte ferroviário, possui malha férrea de 1674 km de extensão e com circulação de trens controlada por sistemas eletroeletrônicos implantados ao longo da via férrea que integram um Controle Tráfego Centralizado (CTC). Como os equipamentos componentes desse sistema tem seu suprimento de energia elétrica originada na rede de distribuição própria da MRS, tal suprimento deve ser de alta confiabilidade para que não impacte negativamente na produção da empresa. Para isso, necessita-se da criação de uma metodologia interna, baseada nas normas e procedimentos existentes, capaz de utilizar os resultados gerados pelo analisador de QEE Shark 100 e assim determinar os problemas e soluções referentes a rede elétrica, conseguindo reduzir ao mínimo ou eliminar os efeitos nocivos para o sistema CTC da empresa.

1.1 *Objetivos do trabalho*

O presente trabalho visa apresentar uma metodologia para análise da qualidade de energia elétrica da MRS Logística com foco na Ferrovia do Aço. Essa metodologia fundamenta-se estudos recentes sobre qualidade de energia e nos resultados que serão disponibilizados através do analisador Shark 100 para que seja possível analisar a QEE conforme o procedimento PRODIST.

Objetiva-se também, descrever como tais fenômenos interagem com a rede de distribuição de energia da MRS e quais os custos envolvidos nas falhas a eles associadas. Por fim, explicita-se soluções a serem implantadas em cada subestação, para que evitem ou minimizem as influências da qualidade de energia do sistema e como empregar a ferramenta de análise de QEE periodicamente.

1.2 Estrutura do trabalho

Esse trabalho foi dividido em cinco capítulos e organizado da seguinte forma: no Capítulo 1 é apresentado o conceito de qualidade de energia elétrica, bem como um breve histórico para justificar a ampliação do seu uso. Ainda nesse capítulo, são apresentados os objetivos relacionados a esse trabalho e suas utilizações futuras.

No Capítulo 2 apresenta-se os distúrbios de QEE, como classificá-los e diferenciá-los, além da fundamentação teórica referente aos principais eventos que ocorrem na MRS. Apresenta também os indicadores e quais os valores base de cada um e por último mostra quais os cálculos que devem ser realizados para que possa ser feita a reivindicação junto a concessionária.

No Capítulo 3 tem-se um breve histórico da formação da MRS Logística S.A., com apresentação do Sistema de Energia Elétrica da empresa, com foco na Ferrovia do Aço. Explicita-se sua topologia da rede de distribuição e sua filosofia de funcionamento para atendimento as cargas conectadas a mesma, terminando com a descrição do analisador de qualidade de energia utilizado.

O Capítulo 4 expõe os custos referentes a atrasos de trens quando em falha de energia e propõe uma metodologia de análise dos parâmetros obtidos e como tratá-los internamente e com a concessionária de energia. Indica também as soluções para cada um dos possíveis defeitos relacionados a QEE que podem ocorrer na rede da MRS.

O Capítulo 5 encerra o trabalho e trata das conclusões extraídas das investigações realizadas e sugere como dar continuidade a questão de qualidade de energia dentro da MRS.

2 Distúrbios da Qualidade de Energia Elétrica

2.1 Introdução

Tecnicamente, em termos de engenharia, energia é a taxa de potência entregue a uma determinada carga e proporcional ao produto da tensão pela corrente fornecidas. Logo, o termo qualidade de energia se refere a uma ampla variedade de fenômenos eletromagnéticos, que caracterizam a tensão e a corrente em um determinado momento e local de um sistema de energia [4]. Para sistemas de energia de corrente alternada (AC), os mesmos são projetados para operar com uma tensão senoidal de determinada frequência, tipicamente, 50 Hz ou 60 Hz, e amplitude e por isso, qualquer distúrbio nessas duas grandezas é um potencial problema de qualidade de energia.

Como discutido no Capítulo 1, a crescente utilização de equipamentos eletrônicos que causam distúrbios eletromagnéticos, ou que são sensíveis a estes fenômenos tem aumentado o interesse na qualidade de energia nos últimos anos. Por conseguinte, é importante que os agentes do setor elétrico (agências reguladoras, concessionárias, consumidores e fabricantes de equipamentos) conheçam bem e sejam capazes de descrever os fenômenos que afetam a qualidade de energia elétrica, classificados em diferentes categorias, dependendo da intensidade, duração ou frequência envolvida no evento. Dessa maneira, além das resoluções ANEEL No. 024 [1], que trata da continuidade do fornecimento, e ANEEL No. 505 [2] que trata da conformidade do nível da tensão de energia elétrica em regime permanente, recentemente a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aprovou os Procedimentos de Distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST [3], [4].

No módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica, desse procedimento, a Agência aborda os procedimentos relativos à qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado, onde para o primeiro define a terminologia, caracteriza os fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão, tais como distorções harmônicas, desequilíbrios de tensão, flutuação de tensão e variações de tensão de curta duração, estabelecendo mecanismos que possibilitem à ANEEL fixar padrões para os indicadores de QEE. Para a qualidade dos serviços prestados, este módulo estabelece a metodologia para apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades. O

objetivo é implementar um programa de acompanhamento e controle dos novos indicadores relativos a perturbações no sistema de energia elétrica.

A Tabela 1 apresenta as categorias e características dos principais distúrbios eletromagnéticos relacionados à análise de QEE [4].

Tabela 1 - Categorias e Características dos Fenômenos Eletromagnéticos

Categorias	Espectro	Duração	Tensão
1.1 Transitórios Impulsivos			
1.1.1 Nanossegundos	5 ns pico	< 50 ns	
1.1.2 Microssegundos	1µs pico	50 ns – 1 ms	
1.1.3 Milissegundos	0,1 ms pico	> 1 ms	
1.2 Transitórios Oscilatórios			
1.2.1 Baixa Frequência	< 5 kHz	0,3 – 50 ms	0 – 4 pu
1.2.2 Média Frequência	5 – 500 kHz	20 µs	0 – 8 pu
1.2.3 Alta Frequência	0,5 – 5 MHz	5 µs	0 – 4 pu
2. Variações de Curta Duração			
2.1 Instantâneo			
2.1.1 Afundamento (Sag)		0,5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9 pu
2.1.2 Elevação (Swell)		0,5 – 30 ciclos	1,1 – 1,8 pu
2.2 Momentâneo			
2.2.1 Interrupção		0,5 ciclos – 3s	< 0,1 pu
2.2.2 Afundamento (Sag)		30 ciclos – 3s	0,1 – 0,9 pu
2.2.3 Elevação (Swell)		30 ciclos – 3s	1,1 – 1,4 pu
2.3 Temporário			
2.3.1 Interrupção		3s – 1 min	< 0,1 pu
2.3.2 Afundamento (Sag)		3s – 1 min	0,1 – 0,9 pu
2.3.3 Elevação (Swell)		3s – 1 min	1,1 – 1,2 pu
3. Variações de Longa Duração			
3.1 Interrupções Permanentes		> 1 min	0,0 pu
3.2 Subtensão		> 1 min	0,8 – 0,9 pu
3.3 Sobretensão		> 1 min	1,1 – 1,2 pu

4. Desequilíbrio de Tensão		Est. Permanente	0,5 – 2 %
5. Distorção da Forma de Onda			
5.1 Compensações CC (DC Offset)		Est. Permanente	0 – 0,1 %
5.2 Harmônicos	0 – 100 thH	Est. Permanente	0 – 20 %
5.3 Inter-harmônicos	0 – 6 kHz	Est. Permanente	0 – 2 %
5.4 Recortes de Comutação (Notching)		Est. Permanente	
5.5 Ruído	Banda larga	Est. permanente	0 – 1 %
6. Flutuação de Tensão	< 25 Hz	Intermitente	0,1 – 7 %
7. Variação de Frequência da rede		< 10 s	

Daremos maior enfoque na conceituação dos fenômenos relativos aos harmônicos e aos afundamentos de tensão (SAG), por serem os com as maiores probabilidades de ocorrência no sistema de sinalização e telecomunicações da MRS, como será apresentado no Capítulo 3.

2.2 Harmônicos

Primeiramente, predominavam no sistema elétrico as cargas lineares, com valores de impedância fixo, como iluminação incandescente, cargas de aquecimento, motores sem controle de velocidade, entre outros. Contudo, surgiram cargas não lineares que, ao serem conectadas na rede elétrica, drenam uma corrente não puramente senoidal, fazendo com que ocorram quedas de tensão também não senoidais nas impedâncias ao longo do sistema e com isso, interfere na forma de onda de tensão entregue a outras cargas conectadas a esse sistema, conforme Figura 2.

Essas formas de onda não senoidais de tensão e corrente podem ser decompostas, através da transformada de Fourier, por exemplo, em componentes senoidais de frequência fixas e múltiplas da frequência fundamental do sistema (50 ou 60 Hz), esses componentes são os chamados componentes harmônicos que juntos dão origem a distorção harmônica do sistema.

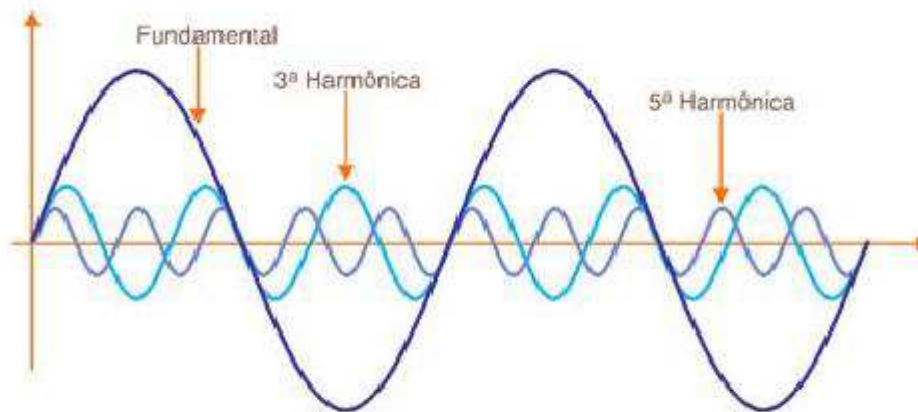


Figura 2- Influência harmônica na forma de onda senoidal

Os componentes harmônicos são classificados quanto à sua ordem (pares ou ímpares) e sequência (positiva, negativa ou zero), conforme mostrado pela **Tabela 2**, na qual está representada até a nona harmônica para fins de exemplificação.

Tabela 2 - Classificação dos harmônicos

Ordem	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°
Frequência (Hz)	60	120	180	240	300	360	420	480	540
Sequência	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Os componentes harmônicos de ordem ímpar são frequentes nas instalações elétricas em geral, enquanto os de ordem par são mais comuns nos casos de assimetrias do sinal, devido à presença de componente contínua. Quanto à sequência dos harmônicos, importantes conclusões podem ser obtidas: de um modo geral, os de sequência positiva causam aquecimentos, vibrações e perdas adicionais; os de sequência negativa geram esses mesmos efeitos, além de reduzir o torque médio útil das máquinas; já os harmônicos de sequência zero indicam que pode haver significativa corrente circulando pelo neutro, no caso de conexão Y a 4 fios, ou pela malha no triângulo, na conexão Δ . Esses últimos são considerados os harmônicos mais preocupantes, trazendo vários problemas para a instalação e os equipamentos a ela ligados [5][6].

A distorção harmônica tem-se tornado cada vez mais uma preocupação para muitos consumidores e para o sistema elétrico de energia no geral, devido ao controle do sistema estar cada vez mais direcionado para aplicação de equipamentos da eletrônica de potência e

também pelo fato dos dispositivos geradores de harmônicas estarem presentes em todos os setores industriais, comerciais e domésticos.

Os níveis de distorção harmônica podem ser caracterizados pela análise do espectro de harmônicas considerando as amplitudes e ângulos de fase de cada componente harmônico individualmente. Também é comum utilizar uma medida global, a distorção harmônica total (THD ou DHT, do inglês *Total Harmonic Distortion*), medida que considera a magnitude de toda a distorção harmônica apresentada, conforme equação abaixo. Os valores de referência para as THD de acordo com o PRODIST estão indicados na Tabela 3 a seguir e servem para referência do planejamento elétrico em termos de QEE.

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

Onde V_h é a amplitude dos componentes harmônicos individuais, h é a ordem das harmônicas e V_1 é o valor eficaz da tensão fundamental.

Tabela 3 - Limites de distorção harmônica de tensão

Barra de Tensão	Distorção Harmônica Total de Tensão THD (%)
$V_n \leq 1\text{kV}$	10
$1\text{kV} < V_n \leq 13,8\text{kV}$	8
$13,8\text{kV} < V_n \leq 69\text{kV}$	6
$69\text{kV} < V_n < 230\text{kV}$	3

Devem ser obedecidos também os valores das distorções harmônicas individuais indicadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Limite de distorção harmônica individual

Ordem Harmônica	Distorção harmônica individual de tensão [%]				
	$V_n < 1\text{kV}$		$1\text{kV} < V_n \leq 13,8\text{kV}$	$13,8\text{kV} < V_n \leq 69\text{kV}$	$69\text{kV} < V_n < 230\text{kV}$
<i>Ímpares não múltiplas de 3</i>	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2

	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	>25	1,5	1	1	0,5
<i>Ímpares múltiplas de 3</i>	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
<i>Pares</i>	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

Os valores referentes a Distorção Harmônica Individual de tensão ($DIT_h\%$), obtida através da seguinte expressão:

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \times 100$$

Onde V_h é a Tensão harmônica de ordem h e V_1 a Tensão fundamental medida

Devido aos diferentes tipos de equipamentos baseados em cargas não lineares, podem ocorrer equívocos ao se obter os níveis de distorção de corrente através da THD%. Assim, para caracterizar as harmônicas de corrente de forma consistente, o IEEE definiu a distorção de demanda total (DDT), mostrado abaixo.

$$DDT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100\%$$

Onde I_h é a amplitude dos componentes harmônicos individuais, h é a ordem dos harmônicos e I_L é o valor eficaz da corrente de carga na demanda máxima.

Logo, tem-se que a DDT trata-se da razão da raiz quadrada da média da corrente harmônica com o valor rms da corrente de carga na demanda máxima da fundamental, expressa como uma porcentagem.

Em seguida a Tabela 5 apresenta os limites de distorção harmônica de corrente segundo IEEE Std. 519-1992 [7], no qual I_{SC} é a corrente de curto-circuito no ponto de acoplamento comum (PAC), sendo este o ponto de ligação entre a concessionária e os vários consumidores.

Tabela 5 - Limites de distorção harmônica de corrente em % de I_L

Vn ≤ 69 kV						
I_{SC}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	DDT
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20-50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50-100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100-1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Como discutido anteriormente, uma distorção de tensão é dada em função tanto da impedância do sistema quanto da distorção da corrente que percorre o circuito. Sendo assim, o fato de haver cargas injetoras de correntes harmônicas no sistema não garante que haja expressiva distorção na onda de tensão, pois se a impedância do sistema for pequena, e não houver problemas de ressonância, a distorção de tensão é normalmente desprezível. No entanto, caso haja ressonância no sistema, os harmônicos podem causar diversos problemas como: interferência em controles computadorizados, aquecimento de máquinas rotativas, falha em banco de capacitores, dentre outros.

Equipamentos com dispositivos saturáveis incluem transformadores, motores e outros dispositivos com núcleo de ferro, os quais existem uma grande preocupação com o sobreaquecimento devido a combinação de conteúdo harmônico da corrente, fluxo de dispersão, e elevada corrente no neutro [8]. Os transformadores de potência são fontes de harmônicos uma vez que, por razões econômicas, os transformadores são construídos com dimensões tais que sempre ocorre saturação magnética do material ferromagnético que constitui o seu núcleo, quando este opera próximo das condições nominais. Isso resulta em correntes harmônicas, principalmente de 3º ordem. Quando operados em condição de carga leve, serão conduzidos para as regiões saturadas de seu núcleo ferromagnético resultando em uma corrente de excitação com amplitude maior que o normal e significativamente distorcida [8].

Transformadores não são tão preocupantes como conversores eletrônicos de potência ou dispositivos a arco, os quais produzem correntes harmônicas da ordem de 20% ou mais, referida às suas capacidades nominais. Entretanto, o seu efeito é importante, particularmente em sistemas de distribuição de empresas de energia elétrica que possuem centenas de transformadores [9].

O grau com que os harmônicos podem ser tolerados por um sistema depende da suscetibilidade da carga, onde as mais sensíveis são aqueles que assumem em seu projeto uma tensão senoidal pura, como por exemplo, os equipamentos de comunicação e processamento de dados. Assim, a análise dos efeitos causados pela geração de harmônicos é relevante na quantificação dos transtornos causados aos demais consumidores ligados ao PAC da concessionária de energia ou até mesmo dentro do seu próprio sistema elétrico. A presença de harmônicos contribui para a redução da vida útil do sistema e dos equipamentos a ele ligados e alguns dos principais efeitos harmônicos relacionados a esses equipamentos são: [10][11]

Motores e geradores: aumento das vibrações e sobreaquecimento devido ao aumento das perdas no ferro e cobre, afetando o torque e a eficiência da máquina, reduzindo a sua vida útil.

Transformadores: aumento das perdas no ferro e cobre e aumento da frequência, podendo ampliar o efeito das reatâncias de dispersão e maior influência das capacitâncias parasitas, que podem realizar acoplamentos indesejados e mesmo produzir ressonâncias no próprio dispositivo.

Cabos de alimentação: os aquecimentos devido ao aumento de perdas ocorrem por dois motivos: o efeito pelicular e o efeito de proximidade. O primeiro é responsável pela redução da área efetivamente condutora em função do aumento da frequência das correntes. O segundo relaciona um aumento da resistência do condutor em função dos efeitos dos campos magnéticos produzidos pelos condutores adjacentes.

Equipamentos eletrônicos: aparelhos que utilizam o ponto de cruzamento com o zero (ou outros aspectos da onda de tensão) para realizar alguma ação são afetados pela distorção harmônica.

Relés de proteção e fusíveis: um aumento da corrente eficaz devida a harmônicas sempre provocará um maior aquecimento dos dispositivos pelos quais circula a corrente, podendo ocasionar uma redução em sua vida útil e, eventualmente, sua operação inadequada.

Sistemas de Comunicação: a presença de correntes e tensões harmônicas no sistema de potência, devido ao acoplamento existente entre este e os sistemas de comunicação através dos campos magnético e elétrico existentes, resultam em ruídos, o qual é o tipo de interferência mais comum nas comunicações telefônicas.

2.3 Afundamentos de Tensão (SAGs)

Afundamentos de tensão são reduções de curta duração da amplitude da forma de onda de tensão, um tipo específico de distúrbio e um dos mais utilizados para descrever qualidade de energia. Isso, por ser responsável pelas maiores perdas na produção, representando cerca de 70% dos eventos de qualidade de energia registrados na indústria e os maiores prejuízos financeiros. Pois, os processos utilizam-se de modernas máquinas para integrarem sua produção cada vez mais, através de microprocessadores, ou eletrônica de potência e um afundamento pode levar um equipamento ao funcionamento inadequado de forma que a

produção perca a validade por supostos defeitos surgidos nos produtos, ou em algumas partes do processo [4].

Os afundamentos de tensão são usualmente associados com faltas no sistema, mas também podem ser causadas pelo chaveamento de cargas pesadas ou partidas de grandes motores. Uma falta em um circuito alimentador paralelo também poderá resultar em uma queda no barramento da subestação que afetará todos os outros alimentadores até que esta falta seja corrigida. Essas faltas são classificadas em momentâneas e temporárias, e de acordo com o PRODIST, denominam-se da seguinte forma:

Tabela 6 - Classificação das variações de tensão de curta duração

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

Inicialmente, a duração dos eventos de afundamentos não era bem definida, devido a uma ausência de padronização. Em algumas publicações a duração de um afundamento típico ficava na faixa entre 2ms e dois minutos. Subtensões com tempos abaixo de meio ciclo de rede não eram consideradas como sendo uma mudança no valor eficaz da tensão na frequência fundamental, logo estes eventos não eram considerados transitórios. Subtensões que duram mais do que um minuto normalmente são controladas por reguladores de tensão e poder estar associadas a uma variedade de causas além de faltas no sistema.

Para determinar os reais impactos dos afundamentos em uma carga sensível é essencial estimar o número de ocorrências e suas características (duração, amplitude) em um determinado período de tempo. O interesse no estudo deste fenômeno reside principalmente nos problemas que podem causar nos equipamentos instalados no parque industrial, tais como: sobreaquecimento das máquinas rotativas, funcionamento inadequado no sistema de proteção e controle, falhas em retificadores controlados, perda de informações de microprocessadores em controlador lógico programável, travamento de computadores, distorção em tela de monitores, desligamentos de lâmpadas de descarga e problemas nos contadores. Tais distúrbios geralmente são causados por curtos circuitos, manobras na rede, atuação inadequada de proteção, acionamentos de grandes cargas que requerem altas correntes de partidas, energização de transformadores e falhas na conexões dos cabos do sistema[12][13].

O curto-circuito provoca uma grande elevação da corrente, e esta, por sua vez, ocasiona grandes quedas de tensão nas impedâncias do sistema. Curtos-circuitos são ocorrências inevitáveis nos sistemas elétricos e possuem causas diversas, mas basicamente envolvem um rompimento do dielétrico entre dois pontos que deveriam ser isolados entre si e que, em condições normais, estão em potenciais diferentes [4].

Muitos curtos-circuitos são causados por sobretensões que solicitam a isolação além de sua capacidade. Uma das causas dessas sobretensões são as descargas atmosféricas, mas a isolação pode também ser danificada ou simplesmente anulada por outros agentes climáticos, como o vento, produtos químicos, névoa salina. Também pelo impacto ou contato de animais, de veículos, de equipamentos de escavação, dentre outros, ou mesmo como resultado do envelhecimento do material [12].

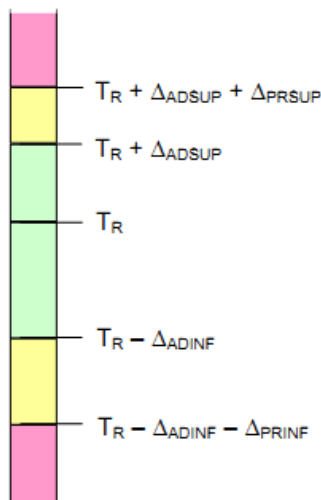
Os equipamentos com dispositivos de proteção desconectam o ponto de curto-circuito da fonte de energia no sistema elétrico. A tensão é imediatamente recuperada, para aproximadamente seu valor anterior, em todos os pontos exceto nos desconectados pela proteção. A redução repentina da tensão de fornecimento, seguida por sua recuperação, representa o fenômeno de afundamento de tensão. Também a atuação indevida dos dispositivos de proteção causam os afundamentos, interrupções e em alguns casos elevação de tensão [4] [13].

As manobras de rede, sejam elas automáticas ou manuais, também são responsáveis por afundamentos de tensão. Ainda que a manobra seja realizada de forma programada e correta, podem ocorrer distúrbios momentâneos. Já uma manobra mal executada pode causar interrupção e curto circuito. Os distúrbios relativos às variações de pequena duração são inerentes ao sistema, no entanto deve-se procurar minimizá-los a fim de melhorar a qualidade de energia e desempenho da rede elétrica. Alguns exemplos de manobra são: comutação para transferência de linha, manobras para manutenção de manobras de carga [13].

O chaveamento de grandes cargas, tais como grandes motores, ou as fortes flutuações características de algumas cargas podem causar grandes variações de corrente. O efeito disso nas correntes é semelhante a um curto-circuito. Embora geralmente os chaveamentos de cargas tenham consequências menos severas nos pontos em que ocorrem, as alterações de tensão que provocam em locais distantes podem ser indistinguíveis daquelas causadas por curtos-circuitos e são avaliadas como afundamentos de tensão [3].

2.4 Indicadores e parâmetros estabelecidos

Como pode ser visto abaixo, segundo o PRODIST, a tensão fornecida pela concessionária deve ser classificada pelos valores obtidos na sua medição em relação à tensão de referência (TR):



Onde TR é a Tensão de Referência, as expressões $T_R - \Delta_{ADINF}$ e $T_R + \Delta_{ADSUP}$ são as Faixas Adequadas de Tensão e as expressões $T_R + \Delta_{ADSUP}$, $T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP}$ ou $T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}$, $T_R - \Delta_{ADINF}$ são as Faixas Precárias de Tensão;

Paralelo a essa classificação, deve-se obter os indicadores individuais e coletivos, onde para os primeiros, deve-se realizar, através do analisador de qualidade, um conjunto de 1008 leituras válidas em intervalos consecutivos de 10 minutos, e calcular dois índices: o de Duração Relativa da transgressão para tensão Precária (DRP) e o para tensão Crítica (DRC), de acordo com as seguintes expressões:

$$DRP = \frac{nlp}{1008} \cdot 100[\%]$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} \cdot 100[\%]$$

Onde *nlp* e *nlc* representam o maior valor entre as fases do número de leituras situadas nas faixas precárias e crítica, respectivamente.

Para obtenção dos indicadores coletivos, para cada uma das unidades consumidoras pertencentes a cada amostra, dentro do trimestre correspondente, devem ser realizadas medições dos valores eficazes da tensão, com período de observação mínimo de 168 horas consecutivas, totalizando 1008 leituras válidas. Assim, com base nessas medidas, será

calculado o Índice de Unidades Consumidoras com Tensão Crítica (ICC), utilizando a seguinte fórmula:

$$ICC = \frac{N_C}{N_L} \cdot 100[\%]$$

Onde, N_C é o total de unidades consumidoras com DRC não nulo e N_L é o total trimestral de unidades consumidoras objeto de medição.

Para a determinação de Índices Equivalentes por Consumidor, devem ser calculados o índice de duração relativa da transgressão para tensão precária equivalente (DRPE) e o índice de duração relativa da transgressão para tensão crítica equivalente (DRCE), de acordo com as seguintes expressões:

$$DRPE = \sum \frac{DRPi}{N_L} [\%]$$

$$DRCE = \sum \frac{DRCi}{N_L} [\%]$$

Sendo $DRPi$ a duração relativa de transgressão de tensão precária individual da unidade consumidora (i), $DRCi$ a duração relativa de transgressão de tensão crítica individual da unidade consumidora (i), $DRPE$ a duração relativa de transgressão de tensão precária equivalente, $DRCE$ a duração relativa de transgressão de tensão crítica equivalente e N_L o número total de unidades consumidoras da amostra.

O valor da Duração Relativa da Transgressão Máxima de Tensão Precária – DRPM fica estabelecido em 3% (três por cento) e da Duração Relativa da Transgressão Máxima de Tensão Crítica – DRCM fica estabelecido em 0,5% (cinco décimos por cento).

Tendo posse das medições das unidades consumidoras e dos indicadores individuais e coletivas referentes a cada um, pode-se realizar o processo de reivindicação de fornecimento de energia junto à concessionária, conforme fluxograma abaixo.

No caso das medições de tensão indicarem valor de DRP superior ao DRPM ou DRC superior ao DRCM, a distribuidora deverá adotar providências para regularizar a tensão de atendimento, no prazo máximo de 90 (noventa) dias e 15 (quinze) dias, respectivamente, a contar da data da comunicação do resultado da medição ao consumidor, nos casos de medições oriundas de reclamação e, a partir do término da leitura, nos casos de medições amostrais.

A regularização do nível de tensão por parte da concessionária deverá ser comprovada por nova medição, e o resultado final comunicado, por escrito, no prazo de até 30 (trinta) dias após o término da nova medição.

Transcorridos os prazos normais para a regularização da não conformidade, e não havido regularização dos níveis de tensão, a distribuidora deve compensar as unidades consumidoras que estiveram submetidas a tensões de atendimento com transgressão dos indicadores e aquelas atendidas pelo mesmo ponto de conexão. Para o cálculo da compensação deve ser utilizada a seguinte fórmula:

$$\text{Valor} = \left[\left(\frac{\text{DRP} - \text{DRP}_M}{100} \right) \cdot k_1 + \left(\frac{\text{DRC} - \text{DRC}_M}{100} \right) \cdot k_2 \right] \cdot k_3$$

Sendo $k_1 = 0$, se $\text{DRP} \leq \text{DRPM}$; $k_1 = 3$, se $\text{DRP} > \text{DRPM}$; $k_2 = 0$, se $\text{DRC} \leq \text{DRCM}$; $k_2 = 7$, para unidades consumidoras atendidas em Baixa Tensão, se $\text{DRC} > \text{DRCM}$; $k_2 = 5$, para unidades consumidoras atendidas em Média Tensão, $\text{DRC} > \text{DRCM}$; $k_2 = 3$, para unidades consumidoras atendidas em Alta Tensão, $\text{DRC} > \text{DRCM}$; DRP = valor do DRP expresso em %, apurado na última medição; $\text{DRPM} = 3$ %; DRC = valor do DRC expresso em %, apurado na última medição; $\text{DRCM} = 0,5$ %; k_3 = valor do encargo de uso do sistema de distribuição, considerando também as demandas e energias reativas excedentes, referente ao mês de apuração.

O valor da compensação deverá ser creditado na fatura de energia elétrica do consumidor referente ao mês subsequente ao término dos prazos de regularização dos níveis de tensão. Nos casos onde o valor integral ou o crédito remanescente ultrapasse o valor da fatura mensal, o valor da compensação a ser creditado na fatura do consumidor poderá ser parcelado, limitado às 2 (duas) faturas subsequentes, ou pago em moeda corrente. A compensação devida não isenta a distribuidora de responder por outras perdas e danos causados pelo serviço inadequado de energia elétrica.

3 Qualidade de energia na MRS Logística

3.1 Introdução

A MRS Logística S. A. iniciou suas operações em primeiro de dezembro de 1996, assumindo a chamada Malha Sudeste da Rede Ferroviária Federal S.A. (RFFSA), constituída da fusão da Superintendência Regional 3 (SR-3), com sede em Juiz de Fora e formada pelas linhas da antiga estrada de Ferro Central do Brasil (EFCB), com a Superintendência Regional 4 (SR-4), com sede em São Paulo e formada pelas linhas da Estrada de Ferro Santos a Jundiá (EFSJ). Dessa maneira, a malha ferroviária da MRS integrou uma extensão de 1674 km entre os estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo, completamente com o perfil de bitola larga (1,60m), e com os mais variados raios de curvas e geografias de relevo, responsáveis por uma vasta quantia de viadutos, túneis e interferência com municípios.

No processo de estatização que gerou a MRS Logística S.A., as empresas que se tornaram acionistas majoritárias foram Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), atualmente com 27,83% das ações, Minerações Brasileiras Reunidas S.A. (MBR), atualmente com 20,00% das ações e controlada integralmente pela Vale S.A., Usiminas Participações e Logística S.A. (UPL), com 19,92%, Vale S.A., com 19,26%, e Gerdau S.A., com 2,37%. Os 10,62% restantes das ações foram leiloadas aos colaboradores da extinta RFFSA na época da concessão.

Como se pode observar, a estrutura acionária da empresa impulsionou e impulsiona o minério de ferro, carvão e coque a formarem o grupo *heavy haul* da empresa, que totalizaram somente em 2011, 74,6% do volume total transportado. Em seu mix de produção desse mesmo ano, o minério de ferro chegou a representar 72,25% do volume total transportado pela MRS, atingindo produção de 110,144 milhões de toneladas, sendo mais de 80% transportado pela Ferrovia do Aço.

Somando-se a esses fatores, existe o aumento na demanda por minério, que apresenta a cada novo ano uma tendência de crescimento, impulsionada tanto pelo mercado interno quanto pelo mercado externo. Assim, as atividades envolvidas nesse serviço apresentam impacto estratégico para a empresa ferroviária, merecendo atenção especial, principalmente no que se trata do transporte através de seu principal corredor de minério, a Ferrovia do Aço.

3.2 Ferrovia do Aço

As linhas entre Rio de Janeiro/São Paulo/Belo Horizonte sempre tiveram grande movimento de passageiros e cargas, onde as abundantes jazidas de minério de ferro de Minas Gerais motivaram a construção das usinas siderúrgicas da Companhia Siderúrgica Nacional - CSN (1946) e Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA (1963), bem como a exportação de minério de ferro em larga escala. Isso gerou enorme aumento do volume de carga transportado na chamada Linha do Centro, entre Barra do Piraí e Belo Horizonte, que acabou recebendo inúmeros melhoramentos em sua via permanente, locomotivas e materiais rodantes.

O aumento na produção e a necessidade de escoá-la de forma mais rápida e eficaz, devido ao período em que se encontrava o país, o chamado “Milagre Econômico”, culminaram com a construção da chamada Ferrovia do Aço, entre as décadas de 1970 e 1980. O projeto era extremamente ambicioso e buscava fazer a ligação ferroviária das cidades de Belo Horizonte, Rio de Janeiro e São Paulo através de 834 km de linhas duplas, eletrificadas e com raio mínimo de 900 metros com inclinação máxima de 1%, por onde seriam transportados cargas e passageiros. Nesse contexto, a ferrovia começaria em Belo Horizonte a uma altitude de 800 m acima do nível do mar, cortaria a Serra do Espinhaço e subiria até sua cota máxima de 1.124 m em Bom Jardim de Minas e a partir daí, faria a descida do desnível de 700m da Serra do Mantiqueira. Para isso, era necessária a construção de 197 túneis, com extensão total de 97,4 Km, e ainda 129 pontes e viadutos que se estenderiam por 41,97 Km da ferrovia. A previsão para o término da obra, informada pelo governo da época, era de 1000 (mil) dias, que logo foi descartada devido a várias crises econômicas durante o período. Finalmente, em 30 de maio de 1989, 14 anos após início da obra, o então presidente da república José Sarney, inaugura a Ferrovia do Aço, com 320 km de extensão, 70 Túneis e 92 Viadutos. Em seu discurso de inauguração o Presidente afirma que as obras consumiram um total de US\$ 9 milhões/Km de ferrovia o que totalizou US\$ 2,88 bilhões, sem contar com vários dos recursos originalmente previstos, como a sua eletrificação, que deixou abandonados milhões de dólares em equipamentos elétricos e obrigando a utilizar locomotivas diesel-elétricas, inadequadas para o relevo acidentado dessa região.

Hoje, a Ferrovia do Aço é operada pela MRS Logística e estende suas linhas por 353 km, tendo seu trecho compreendido entre o pátio de Saudade, no município de Barra Mansa –

RJ, e o pátio de Otávio Dalpieve, também denominado P1-03 no município de Itabirito – MG. Esse trecho é responsável pelo principal fluxo de transporte do grupo *heavy haul* da MRS.

3.3 Característica sistema de energia da Ferrovia do Aço

O sistema de energia elétrica da Ferrovia do Aço, apresentado na Figura 3, é formado basicamente pela rede de distribuição própria da MRS, com extensão de 353 km e praticamente toda em região rural, pelas subestações de energia trifásica, em média tensão, rural e de baixa confiabilidade das concessionárias CEMIG (13,8 kV), e Light (25 kV). Em paralelo, apresentam-se Grupos Motores-Geradores (GMG) trifásicos, de capacidades variando de 100 KVA a 140 KVA, destinados ao suprimento de energia em caso de falta de alimentação pela concessionária. Em série com a concessionária e o GMG, estão os disjuntores que interligam esses sistemas com a rede de distribuição da MRS e localizadas entre as subestações, as chaves seccionadoras motorizadas e passíveis de serem remotamente controlada.

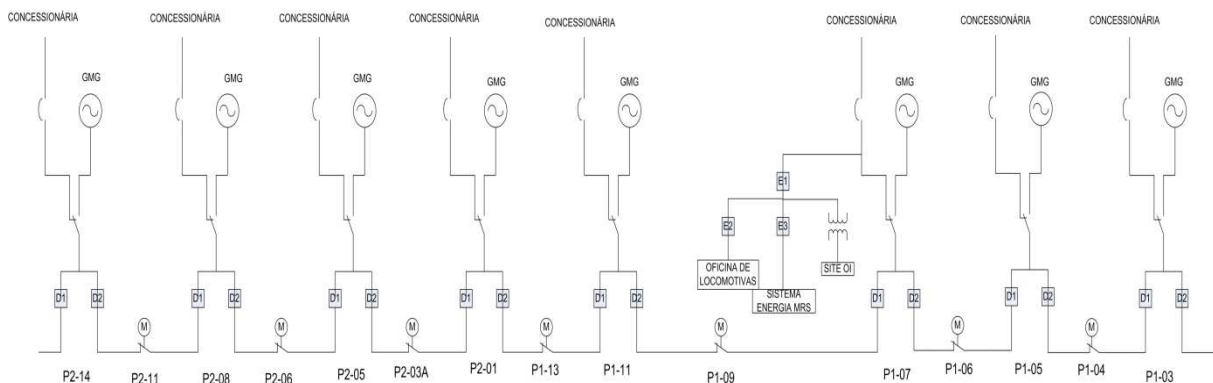


Figura 3 - Sistema de distribuição de energia da MRS

A rede de distribuição da Ferrovia do Aço, assim como todas as demais redes de distribuição da malha da MRS, são redes bifásicas sem neutro e derivadas diretamente de uma rede trifásica, tendo como critério apenas a utilização de uma das três fases como “referência”. Em sistemas de alimentação bifásicos derivados da rede trifásica, as tensões das fases estão defasadas de 120° , fornecendo 127 Vac entre qualquer uma das fases e o neutro ou 220 Vac entre fases. No entanto, mesmo com cargas idênticas entre neutro e fases, haverá corrente circulando por esse último, onde a sua impedância irá gerar uma tensão residual entre o mesmo e o terra, que podem causar instabilidade na rede e geração de harmônicos, influenciando diretamente os componentes eletroeletrônicos do circuito. Somando a esta condição, está o fato da divisão das cargas por fase da subestação não ser realizada de modo a

compensar a falta ou excesso de elementos ligadas a outra fase, construindo dessa maneira um sistema de energia bastante desequilibrado para o sistema de fornecimento.

Com relação aos elementos integrantes das cargas, têm-se basicamente transformadores bifásico de potência, de capacidade variando entre 1 kVA, 3 kVA e 5 kVA, destinados a alimentarem os outros elementos integrantes das cargas, que são os componentes eletroeletrônicos dos sistemas de sinalização, telecomunicações e equipamentos de via (como máquinas de chave). São mais de 210 transformadores instalados na Ferrovia do Aço, para atender mais de 220 caixas de locação para o sistema de sinalização e telecomunicações.

3.4 Estrutura do sistema de sinalização e telecomunicações da Ferrovia do Aço

O sistema de sinalização é composto por um conjunto de sistemas, equipamentos e dispositivos que permitem controlar o processo de licenciamento de trens, de forma segura, flexível e econômica. O modelo utilizado na Ferrovia do Aço é o Controle de Tráfego Centralizado (CTC), que atua como um sistema integrado de controle da circulação e da segurança dos trens, composto por circuitos de via, relés elétricos e sinais indicativos de tráfego, ligados a um centro de controle de onde são comandados os sinais e máquinas de chave.

No campo, os circuitos de via, sinais e máquinas de chave são controlados por relés e equipamentos eletrônicos instalados ao longo da malha ferroviária, onde correntes de baixa tensão aplicadas nos trilhos causam o sinal, por meio de uma série de relés (relés de via) ou circuitos eletrônicos a licenciar o movimento da composição (sinal verde). Quando um trem ocupa o trecho de via, a corrente elétrica transmitida pela fonte retorna pelos seus rodeiros, cessando a corrente na bobina do relé de via e fazendo com que esta seja desenergizada. Conseqüentemente, os contatos da lâmpada verde se abrem e os da lâmpada vermelha (pare) se fecham, indicando ocupação do circuito de via para o próximo trem. O estado do circuito de via, portanto, é indicado em função do estado da bobina do relé de via, de forma que se esta estiver energizada, o circuito de via estará livre; caso contrário, estará ocupado, como informa a Figura 4.

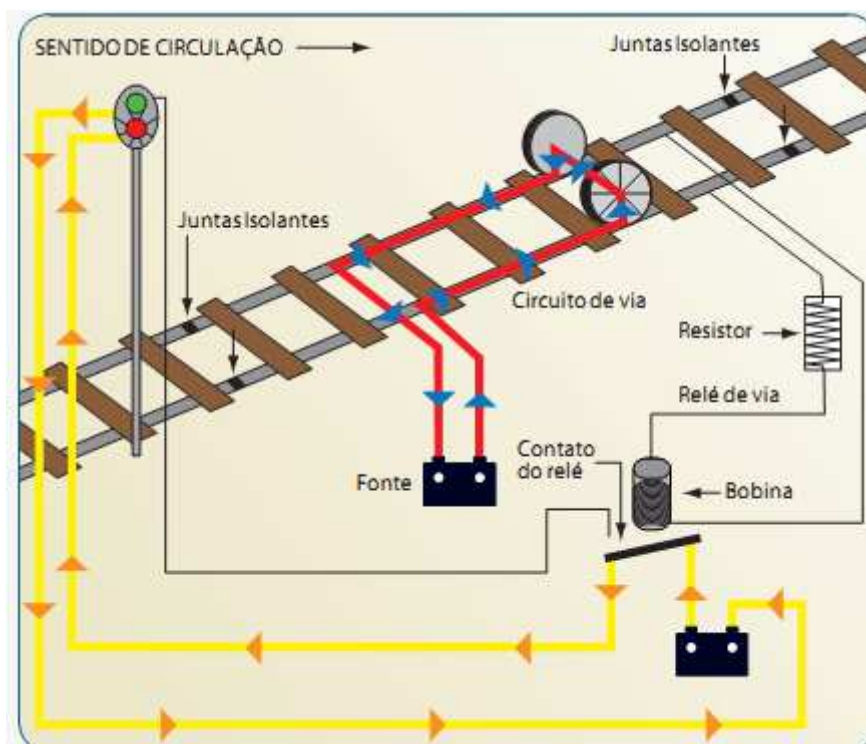


Figura 4 - Sistema de circuito de via

Em circuitos de via de corrente alternada, o relé de via (Rv) é energizado apenas por corrente alternada e deve ser imune a correntes contínuas, onde a corrente alternada ao atingir o nível para energizar sua bobina, seus contatos se fecham. No caso da Ferrovia do Aço, a tensão de rede da concessionária fornece a amplitude e frequência base para modular os sinais utilizados no sistema de circuito de via de corrente alternada. Esses sinais passam então a estar centrados nas portadoras com frequências distintas das múltiplas da frequência fundamental da rede, no caso 60 Hz. Dessa forma, uma amplitude e fase correta por parte da concessionária tornam-se necessárias para a integridade desse sistema. A Figura 5 mostra o funcionamento do circuito de via de corrente alternada.

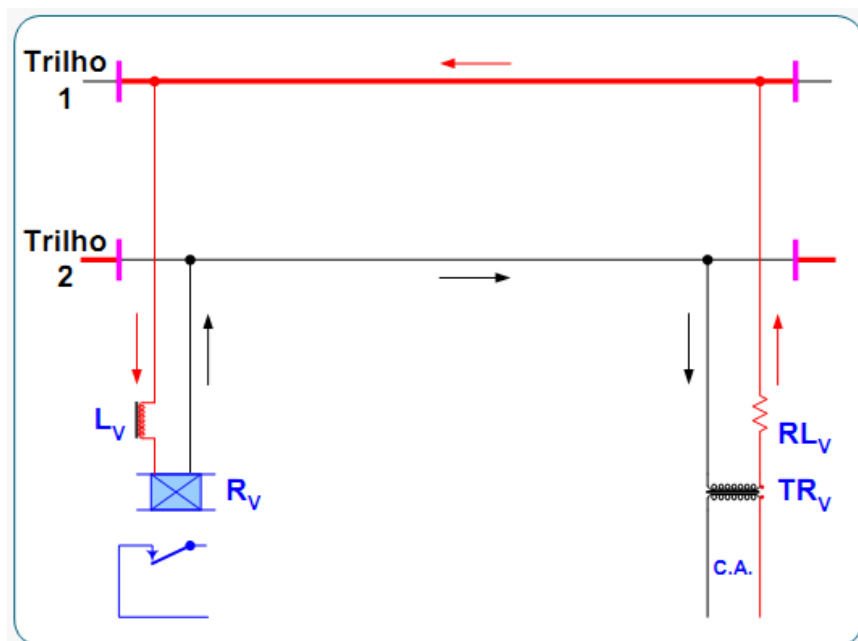


Figura 5 - Sistema de circuito de via de corrente alternada

Outros equipamentos como detector de descarrilamento, detector de roda/caixa quente e máquinas de chave, também utilizam de relés da mesma maneira que o circuito de via para informar seu estado.

O sistema de telecomunicações da MRS se divide em duas funcionalidades principais: comunicação por voz e *backbone* de dados. No sistema de comunicação por voz, Estações Rádio-Base (ERB) são implantadas ao longo da Ferrovia do Aço, localizadas em locais estratégicos de forma a atingir a maior cobertura possível e possibilitar a comunicação dos controladores de tráfego com as locomotivas, veículos de linha, estações, manobra e manutenção.

O sistema de comunicação por voz utiliza do sistema de *backbone* de dados para transmitir de forma mais veloz e eficaz as informações recebidas nas ERB's. Para isso, utiliza o meio físico de transmissão que é a fibra óptica, que é um filamento de tamanhos variado, que pode chegar a micrometros constituído de material reflexivo, geralmente vidro ou materiais poliméricos, com capacidade de transmitir dados em forma de feixes luminosos. Na MRS, a fibra óptica está presente ao longo de toda a sua malha, transmitindo informações não só das ERB's como também formando a rede interna de tráfego de dados da empresa. Essa rede possui pontos de abertura da fibra óptica para conexão com os equipamentos de sinalização e voz, gerenciados por equipamentos de rede eletronicamente gerenciados e alimentados pela rede de distribuição de energia elétrica da própria ferrovia. Para o sistema de

backbone, a arquitetura de rede empregada é a topologia em Anel, que permiti transmitir e receber dados em qualquer direção, coforme esquema da Figura 6.

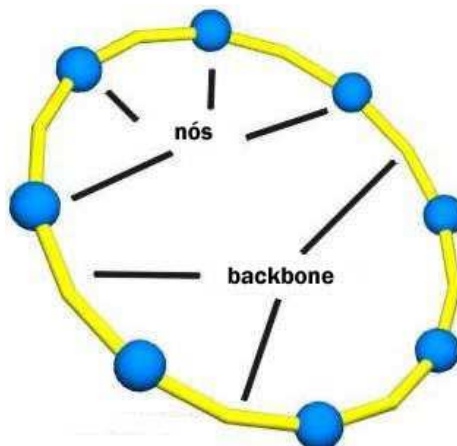


Figura 6 - Topologia em anel do sistema de telecomunicações

Quando uma mensagem é enviada por um modo, ela entra no anel e circula até ser retirada pelo nó destino, ou então até voltar ao nó fonte, dependendo do protocolo empregado. Outra vantagem é a de permitir a determinadas estações receber pacotes enviados por qualquer outra estação da rede, independentemente de qual seja o nó destino.

Os maiores problemas desta topologia são relativos à sua pouca tolerância a falhas, pois qualquer que seja o controle de acesso empregado, ele pode ser perdido por problemas de falha e pode ser difícil determinar com certeza se este controle foi perdido ou decidir qual nó deve recriá-lo. Erro de transmissão e processamento pode fazer com que uma mensagem continue eternamente a circular no anel.

3.5 Analisador de qualidade de energia elétrica

Os analisadores de qualidade de energia são equipamentos inseridos em paralelo com a rede a ser analisada de modo a registrar todas as informações necessárias para o diagnóstico correto do sistema de distribuição de energia. Esses dispositivos oferecem ferramentas para solução de problemas, manutenção preventiva e registro de dados e eventos da rede elétrica em questão, tornando possível a análise e tratamento matemático dos resultados, no intuito de identificar os pontos de melhoria.

O analisador de qualidade implantado na Ferrovia do Aço é o Shark 100, da fabricante Electro Industries/GaugeTech [14], projetado para medições de energia em subestações

elétricas, painéis de controle e indústrias diversas, capaz de medir todos os parâmetros elétricos da rede e até a 41^o componente harmônica. Esse equipamento é desenvolvido para ter alto desempenho, com classe de exatidão de 0,2% e possibilidade de acesso remoto através de protocolos de comunicação Modbus, RS-485 e DNP, o que possibilita seu gerenciamento remoto com obtenção dos resultados em tempo real e armazenamento em banco de dados, para tratamento através de algoritmo específico. Na Tabela 7, temos os parâmetros, precisão e escala analisadas pelo Shark 100 e na Tabela 8, os modos de visualização de cada um desses parâmetros.

Tabela 7 - Parâmetros medidos pelo analisador Shark 100

Medição Parâmetros	Precisão % de leitura	Variedade de visualização
Tensão L-N	0.1%	0-9999 V escalável ou kV
Tensão L-L	0.1%	0-9999 V ou kV escalável
Corrente	0.1%	0-9999 Amps ou kAmps
+/- Watts	0.2%	0-9999 Watts, kWatts, MWatts
+/-Wh	0.2%	5 ou 8 dígitos programáveis
+/-VARs	0.2%	0-9999 VARs, kVARs, MVARs
+/-VARh	0.2%	5 ou 8 dígitos programáveis
VA	0.2%	0-9999 VA, kVA, MVA
VAh	0.2%	5 ou 8 dígitos programáveis
PF	0.2%	+/- 0.5 a 1.0
Frequência	0.01 Hz	45 a 65 Hz
%THD	5.0%	0 a 100% 10 dígitos resolução
% Barra de carga	1-120%	escalável

Tabela 8 - Modo de medição dos parâmetros analisados

Valores medidos	Tempo real	Avg	Máx	Mín
Tensão L-N	•		•	•
Tensão L-L	•		•	•
Corrente por fase	•	•	•	
Watts	•	•	•	•
VAR	•	•	•	•
VA	•	•	•	•
PF	•	•	•	•
+Watt-hr	•			
-Watt-hr	•			
Watt-hr net	•			
+VAR-hr	•			
-VAR-hr	•			
VAR-hr net	•			
VA-hr	•			
Frequência	•		•	•
%THD	•		•	•
Ângulos de tensão	•			
Ângulos de corrente	•			
% Barra de carga	•			

De acordo com o Módulo 8 do PRODIST, os equipamentos de análise de qualidade devem atender os seguintes requisitos mínimos:

- Taxa amostral: 16 amostras/ciclo;
- Conversor A/D (analógico/digital) de sinal de tensão: 12 bits;
- Precisão: até 1% da leitura.

Os equipamentos de medição devem permitir a apuração das seguintes informações:

- Valores calculados dos indicadores individuais;
- Tabela de medição;
- Histograma de tensão.

As medições devem ser efetuadas no ponto de conexão da unidade consumidora e corresponder ao tipo de ligação da unidade consumidora, abrangendo medições entre todas as fases ou entre todas as fases e o neutro, quando este for disponível.

Percebe-se, portanto que o analisador de qualidade de energia Shark 100 atende as exigências estabelecidas pelo documento regulatório, bem como seu arranjo de conexão com a rede elétrica.

4 Processo de análise da QEE na Ferrovia do Aço

4.1 Justificativa

O fornecimento de energia elétrica na Ferrovia do Aço, como indicado no Capítulo 3, é realizado por rede elétrica rural, e distribuída pelas subestações próprias. Essa configuração corresponde ao modelo apresentado na Figura 1, e conforme indicado na Tabela 9, possui alta suscetibilidade as falhas por falta de energia.

Tabela 9 - Índices de falhas por subestação da Ferrovia do Aço

Pátio	Quantidade de Falhas*	Média Km isolado	Média de Hora x Km de sinalização isolada
Pátio Lagoa Porcos - P1-05	6	7,16	57,8
Pátio Cel. Guedes - P1-07	66	87,39	4,0
Pátio Xavier Chaves -P1-11	61	74,02	2,96
Pátio Rio Santana - P2-01	65	84,17	3,91
Pátio Pitangueiras - P2-05	87	72,29	5,69
Pátio Samora Machel - P2-08	106	84,72	7,91
Pátio Eng.Taulois - P2-14	40	69,10	5,84
Total	431	68,41	5,05**

*Início dos registros de eventos data de 07/08/2008;

**Exceto P1-05 por estar a menos de 6 meses integrado no sistema de energia elétrica da MRS;

Analisando a tabela acima, percebe-se uma média de cinco horas por cada quilometro da malha da Ferrovia do Aço que foi afetado pela falta de energia. Esse resultado se relaciona com o programa de produção da MRS de maneira que cada uma das 431 falhas gerou um atraso de 5,05 h no fluxo de trens, o que equivale a 2176,55 h totais, equivalente a 91 dias. Ou seja, para a empresa, esse último seria o total de dias sem fluxo produtivo na Ferrovia do Aço. Em termos de unidades monetárias, considerando um período de 45 meses, que equivale a 33120 h, têm-se a indicação de 6,57% de perda devido a atraso de trens. Percebe-se, portanto, um elevado desperdício devido apenas a falhas relacionadas à interrupção de energia.

Contudo, não há detalhes suficientes para determinar a real causa da falha que gerou a interrupção no fornecimento de energia da subestação. Por isso, projetou-se um sistema remoto de supervisão da rede de distribuição de energia elétrica da Ferrovia do Aço, localizado na sede da MRS em Juiz de Fora – MG. Capaz de controlar os equipamentos da subestação e diagnosticar qualquer falha/evento relacionado às mesmas, bem como dar comandos nas chaves seccionadoras motorizadas instaladas ao longo da Ferrovia. Esse sistema, através dos dados obtidos pelo analisador de QEE Shark 100, consegue criar

históricos das falhas e ter registro de todos os eventos relacionados ao fornecimento de energia da concessionária, disponibilizando-os diretamente em estações de trabalho para análise dos engenheiros e técnicos responsáveis. Com isso, pode-se avaliar as falhas de energia do ponto de vista de sistema de proteção e também pelos critérios de QEE apresentados no PRODIST em qualquer período desde a implantação do analisador de qualidade de energia nas subestações.

No intuito de diminuir os efeitos causados pelas interrupções e desvio de tensão, podem ser adotados os mais variados equipamentos, como:

- **Compensador ativo:** é um dispositivo que pode ser utilizado tanto para baixa como média tensão, dedicado a injetar tensão nos barramento de alimentação durante uma interrupção.
- **Fonte de alimentação ininterrupta (UPS):** são equipamentos empregados de forma on line, off line ou ambos, no sistema de energia, e responsáveis por suprir qualquer falta e não repassar ao sistema de distribuição os efeitos dos transitórios durante o mesmo. São formados por inversores, retificadores e bancos de baterias.
- **Grupo motor-gerador:** equipamento conectado em paralelo com a rede de distribuição, de modo que em caso de falta de energia pela concessionária durante alguns segundos, o equipamento automaticamente entra em funcionamento e passa a suprir toda a carga do sistema.

Novamente, como mostrado no Capítulo 2, a rede de distribuição da MRS, mantém conectados tanto equipamentos dedicados a sinalização ferroviária, quanto equipamentos dedicados a oficinas, prédios e salas de equipamentos, além da atual inserção de UPS's de grande porte, constituída de elementos não lineares, geradores de componentes harmônicas, nas subestações. Dessa forma, a medição da influência harmônica no sistema de energia elétrica, bem como a análise do fator de potência, torna-se extremamente necessária, para que seja realizada uma investigação de causa/efeito e seu tratamento junto a concessionária, quando aplicável.

Algumas possíveis meios de minimizar os impactos das componentes seria:

- **Reatores de linha:** Os reatores são equipamentos conectados em série com a carga geradora de harmônicos e ao aumentarem a impedância da fonte, reduz-se a magnitude da distorção harmônica de corrente total gerada a partir do reator. No entanto, os

valores mais baixos de THD normalmente atingidos utilizando reatores de linha são de cerca de 25% a 45% do THD-i original dependendo da impedância total do circuito de entrada. Os reatores de linha são bastante recomendados para os sistemas de comando, pois reduzem as harmônicas logo na entrada da carga, ajudando a reduzir o custo de qualquer filtragem harmônica a montante que deva existir.

- **Filtro de harmônicos:** são ligados em série entre a rede e a carga (apenas cargas não lineares) e criam um filtro que atua apenas nas componentes harmônicas geradas. São selecionados de acordo com a potência da carga não linear ou com a corrente máxima da carga total.

O relatório mensal das componentes harmônica do sistema de distribuição também irá gerar uma visão sazonal das mesmas, sendo capaz de apresentar os efeitos causados por equipamentos e soluções empregadas na empresa de acordo com a época do ano.

Para o fator de potência, o mesmo terá medições permanentes e deverá estar sempre compreendido entre 0,92 e 1,0 indutivos ou 0,92 e 1,0 capacitivos, de modo que esteja de acordo com a norma PRODIST, que o estabelece para unidades consumidoras atendidas em média e alta tensão. O cálculo do excedente reativo deve constar e ser apresentado a concessionária de acordo com os critérios constantes da Resolução 456 de 29/11/2000 da ANEEL. Essa resolução estabelece que se não forem instalados os equipamentos destinados à medição das perdas de transformação, deverão ser feitos acréscimos de 2,5% (dois e meio por cento) nos fornecimentos em tensão igual ou inferior a 44 kV, aos valores medidos de demandas de potência e consumos de energia elétrica ativas e reativas excedentes.

Para correção do fator de potência, o método mais comum e utilizado é a instalação de banco de capacitores, contudo deve-se tomar cuidado devido aos bancos de capacitores aumentarem consideravelmente a influência das componentes harmônicas no sistema. Para isso, a utilização do fluxograma abaixo se faz necessário:

4.2 *Análise por subestação da MRS*

Conforme mostrado na Figura 3, o sistema elétrico da Ferrovia do Aço recebe energia elétrica, padrão rural, da concessionária através de 8 (oito) subestações distintas, alocadas ao longo da malha férrea, que alimentam tanto os equipamentos do CTC quanto estações,

oficinas e prédio operacionais/administrativos. Dessa forma, além de não haver uma distribuição igualitária do trecho a ser atendido por cada ramal da subestação, ainda existe a presença das mais diversas cargas conectadas a eles, inserindo distintas influências em cada local. Visto isso, o tratamento de QEE para cada entrada da concessionária deve ser orientado pela configuração em que se encontra seu sistema de distribuição, como será definido abaixo:

- **P1-03:** primeira subestação da Ferrovia do Aço, sendo seu ramal de entrada da concessionária o último do sistema de interligação, com mata cerrada incidindo sobre as linhas de distribuição desse ramal. Energia de baixa qualidade, com grande probabilidade de curtos-circuitos devido a raios ou rompimento de cabos por ventos e galhos de árvore, sendo lento o retorno da eletricidade em caso de falhas, devido ao difícil acesso. Esse ramal alimenta também a estação de operação do principal terminal de minério atendido pela MRS e de propriedade da Vale, o Terminal Ferroviário do Andaime (TFA), responsável pelo cadastro dos trens que partem desse terminal e que circularão pela Ferrovia do Aço. Dessa maneira, como pontos de possíveis problemas têm-se a flutuação de tensão, gerando incomodo aos colaboradores que atuam na estação devido a cintilação luminosa. Outro, fator de grande importância seria os curtos circuitos, interrupções e afundamentos de tensão, devido exclusivamente a característica da rede de distribuição. Assim, como solução para o pátio, seria interessante a inserção de no-breaks de baixa potência nos equipamentos destinados a manutenção do fluxo ferroviário, realocação de equipamentos em diferentes circuitos, de modo que em caso de falhas não afete nem todo o sistema de sinalização bem com nem toda estação, e instalação de compensador ativo para minimizar o efeito da flutuação de tensão.
- **P1-05:** instalação mais recente da rede de distribuição da MRS, localizada em área urbanizada, contendo equipamentos de proteção e contingência, parametrizados para uma rápida atuação e com elevada autonomia, proporcionando grande confiabilidade ao sistema de energia elétrica da MRS. As falhas mais prováveis a essa subestação seriam a interrupção do fornecimento de energia, afundamento de tensão e atuação indevida do sistema de proteção devido a manobras mal realizadas. As ações a serem tomadas seriam o monitoramento do fornecimento de energia, afim de gerar um histórico, visto que a rede não possui dados suficientes para o seu devido tratamento e utilização de grupo motor-gerador, que no caso já se encontram instalados.

- **P1-07:** subestação localizada em zona rural, com maior número de interação entre equipamentos, que alimenta o sistema CTC, a oficina de locomotiva local, uma das principais da MRS, o posto de abastecimento de locomotivas, a estação de operações do pátio e equipamentos de via permanente. Essa subestação conta ainda com um no-break* de grande capacidade, destinado a suprimir qualquer surto que ocorra na entrada da concessionária, afim de eliminar efeitos nocivos do mesmo. Como o no-break possui retificador, inversor, entre outros elementos não lineares, e a oficina possui máquinas de sola, ponte rolantes, compressores e etc, além dos equipamentos do posto de abastecimento, tem-se nesse pátio a alta probabilidade de influências harmônicas. Dessa maneira, as ações seriam a análise da QEE com foco na identificação das fontes e principais componentes harmônicas e posterior direcionamento de onde instalar filtro de harmônicos e reatores de linha. É importante também que os circuito tornem-se independentes e que não se afetem e medidas para diminuir as cintilações devem ser tomadas, como realizado no P1-03.
- **P1-11:** instalação situada ao redor de centro urbano, com no-break* idêntico ao do P1-07 para atender as falhas de fornecimento da concessionária. Essa subestação atende apenas ao sistema de CTC, de modo que os maiores pontos de atenção são em caso de curto-circuito, afundamentos de tensão e harmônicos, por isso, como já há no break e gerador para solucionar o problema da entrada da concessionária, a nova ação seria verificar a influência harmônica e empregar a solução junto ao equipamento específico, provavelmente o próprio no-break.
- **P2-01:** instalação com as mesmas características do P1-11.
- **P2-05:** instalação com fornecimento de energia classificada como rural, sem no-break e gerador, com alto índice de falha da concessionária e atende, juntamente com o P2-08, o sistema CTC de um dos principais pátios da MRS, o P2-06 em Bom Jardim de Minas – MG. Dessa maneira, torna-se extremamente interessante a instalação de grupo-motor gerador, verificação e criação de histórico do nível de tensão, para entendimento dos eventos mais frequentes na subestação, a fim de diminuir as causas de interrupção e ajuste do sistema de proteção de forma mais adequada.
- **P2-08:** Situação idêntica ao do P2-05, exceto por já constar de GMG e no-break, o que torna a análise da influência harmônica relevante.

- **P2-14:** situada em próximo a centro urbano, com presença de no break e GMG, contudo ambos permanecem a maior parte do tempo em modo by-pass e mesmo em caso de falha estão impedidos de entrar no sistema. A entrada da concessionária, diferente de todas subestações da Ferrovia do Aço, ocorre à tensão de 25 kV. Nesse pátio, torna-se extremamente relevante a questão do balanceamento de carga, visto que não utiliza um dos seus ramais, e a análise dos eventos relacionados a falha da concessionária indicará a maior influência sobre o local e como os harmônicos atuam com sistema de 25 kV interligado em um sistema no break designado para 13,8 kV. Para esse pátio, uma solução seria utilizar um autotransformador para transferir a tensão de 25 kV para 13,8 kV de modo correto e passar a empregar o aterramento do obtido através desse equipamento, afim de evitar qualquer distorção de tensão decorrente disso.

A relação dos distúrbios enfrentados pelo sistema de distribuição de energia da MRS é revisada na Tabela 10, indicando causa, efeito e solução para cada item tratado e avaliado em quesitos de qualidade de energia elétrica. Na Figura 7 tem-se o fluxograma a ser adotado para análise da qualidade de energia elétrica na MRS.

Tabela 10 - Resumo descritivo dos fenômenos relacionados a qualidade de energia elétrica

Distúrbio	Descrição	Causas	Efeitos	Soluções
Interrupções	Interrupção total da alimentação elétrica	Curtos-circuitos, descargas atmosféricas, e outros acidentes que exijam manobras precisas de fusíveis, disjuntores, etc.	Queda do sistema Danificação de componentes Perda de produção	UPS Geradores de emergência (interrupções de longa duração)
Transientes	Distúrbio na curva senoidal, resultando em rápido e agudo aumento de tensão	Descargas atmosféricas Manobras da concessionária Manobras de grandes cargas e bancos de capacitores	Travamento, perda de memória e erros de processamento Queima de placas eletrônicas, danificação de materiais de isolamento e de equipamentos	Supressores de transientes UPS com supressores de transientes Transformadores de isolamento
Sag/Swell	Subtensões (sags) ou sobretensões (swells) curtas (meio ciclo até 3 segundos) Sags respondem por cerca de 90% de todos os distúrbios elétricos	Queda/Partida de grandes equipamentos Curtos-circuitos Falha em equipamentos ou manobras da concessionária	Perda de dados e erros de processamento Desligamento de equipamentos Oscilações em motores com redução de vida útil	UPS Reguladores de tensão
Ruídos	Sinal indesejado de alta frequência que altera o padrão normal de tensão (onda senoidal)	Interferência de estações de rádio e TV Operação de equipamentos eletrônicos	Travamentos, perda de dados e erros de processamento Recepções distorcidas (áudio e vídeo)	UPS Transformadores de isolamento Filtros de linha
Harmônicos	Alteração do padrão normal de tensão (onda senoidal), causada por frequências múltiplas da fundamental (50-60 Hz)	UPS, Reatores eletrônicos, inversores de frequência, retificadores e outras cargas não lineares.	Sobreaquecimento de cabos e equipamentos Diminuição da performance de motores Operação errônea de disjuntores, relés e fusíveis	Filtros de harmônicas Reatores de linha Melhorias na fiação e no aterramento Transformadores de isolamento
Variações de Tensão de Longa Duração	Variações de tensão com duração acima de 1 minuto	Equipamentos e fiação sobrecarregados Utilização imprópria de transformadores Fiação subdimensionada ou conexões mal feitas	Desligamento de equipamentos Sobreaquecimento de motores e lâmpadas Redução de vida útil ou de eficiência dos equipamentos	UPS Verificar conexões e fiações elétricas Transferência de equipamentos para outros circuitos

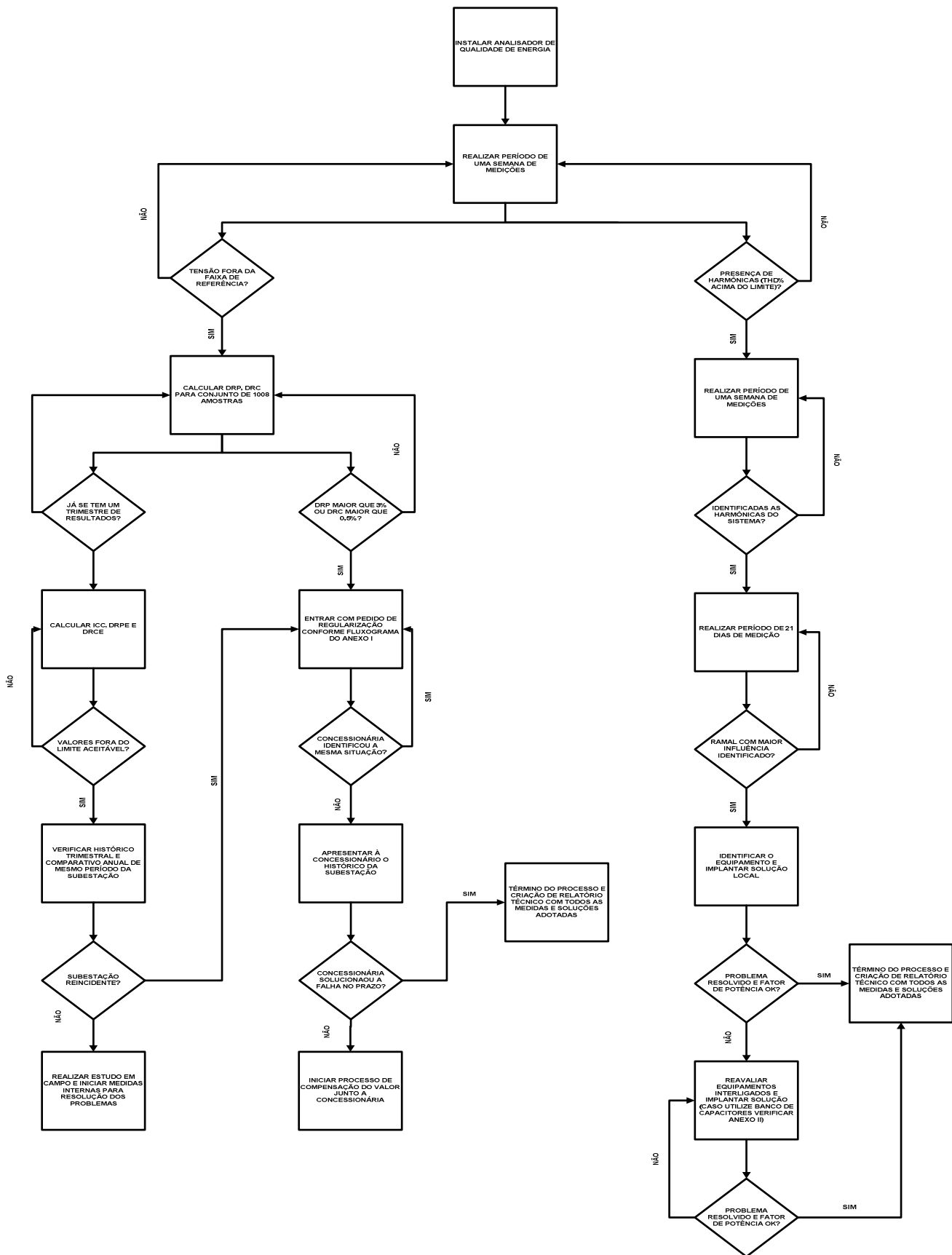


Figura 7 - Fluxograma para análise da QEE da Ferrovia do Aço

5 Conclusões

O estudo apresentou um panorama geral da rede de distribuição de energia da MRS, como se relaciona com os equipamentos de sinalização e telecomunicações. Indicou a necessidade de avaliar a topologia da rede de distribuição da MRS e como a mesma pode gerar componentes que implicam em baixa qualidade da energia.

Foi possível também, montar uma metodologia de avaliação da qualidade de energia, baseada em normas e procedimentos de sistemas de energia que permitirão através das medições, prever falhas, identificar possíveis fontes de defeitos e minimizar ou impedir os impactos relacionados a estes.

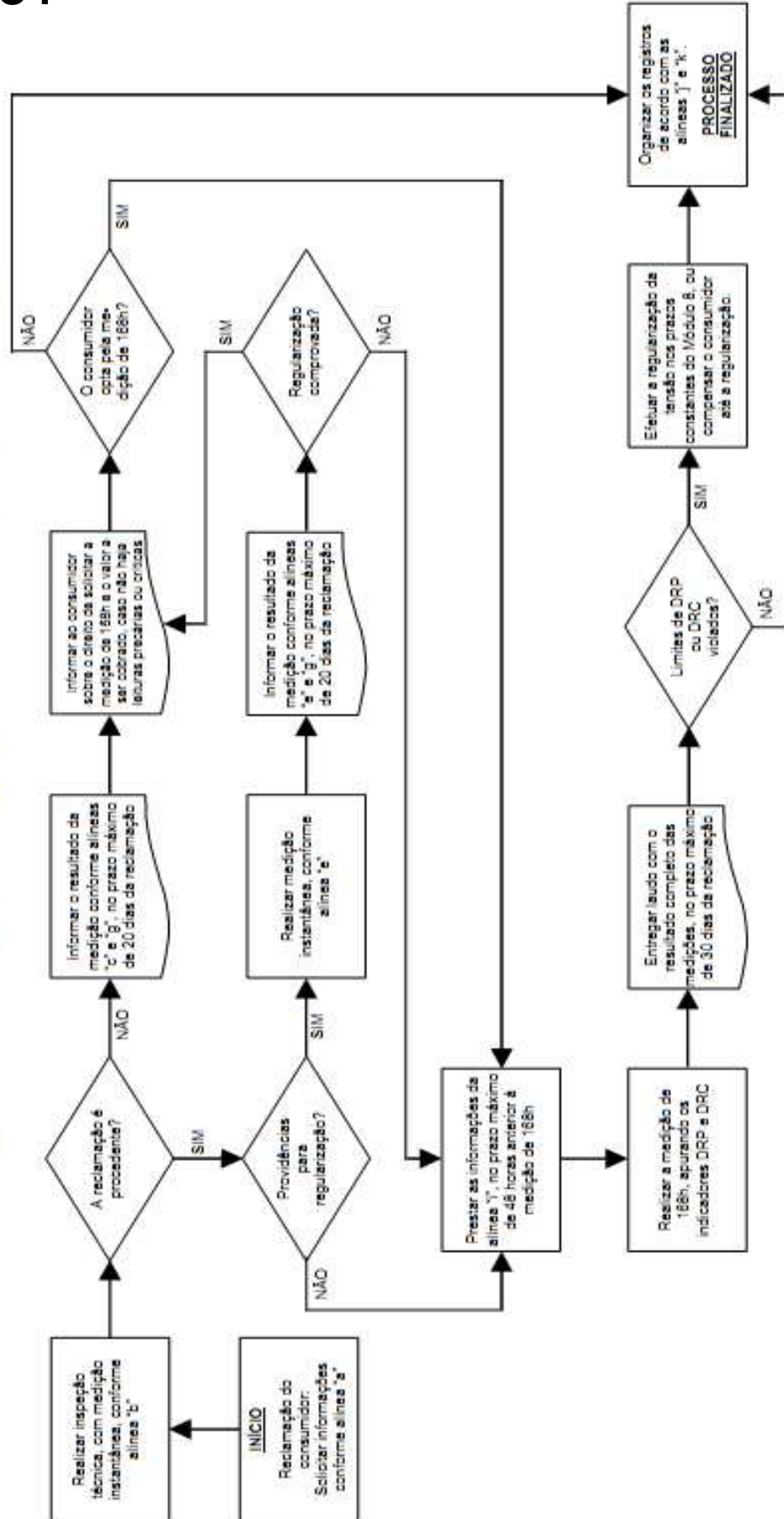
A metodologia proposta apresenta também uma forma de questionar junto à concessionária, os custos para a MRS da indisponibilidade de energia elétrica devido a falhas de equipamentos ou interrupção de energia. Assim, através das medições realizadas e causas identificadas consegue-se mensurar junto a fornecedora de energia, a parcela destinada a esta dos impactos relacionados ao atraso de tens.

Com este trabalho, foi possível expor a necessidade de um estudo de qualidade de energia em uma malha ferroviária, indicando os impactos referentes a cada distúrbio no sistema da MRS e como analisar e solucionar essa questão tanto junto a concessionária quanto dentro da própria empresa, uma vez que realizou-se um estudo por pátio.

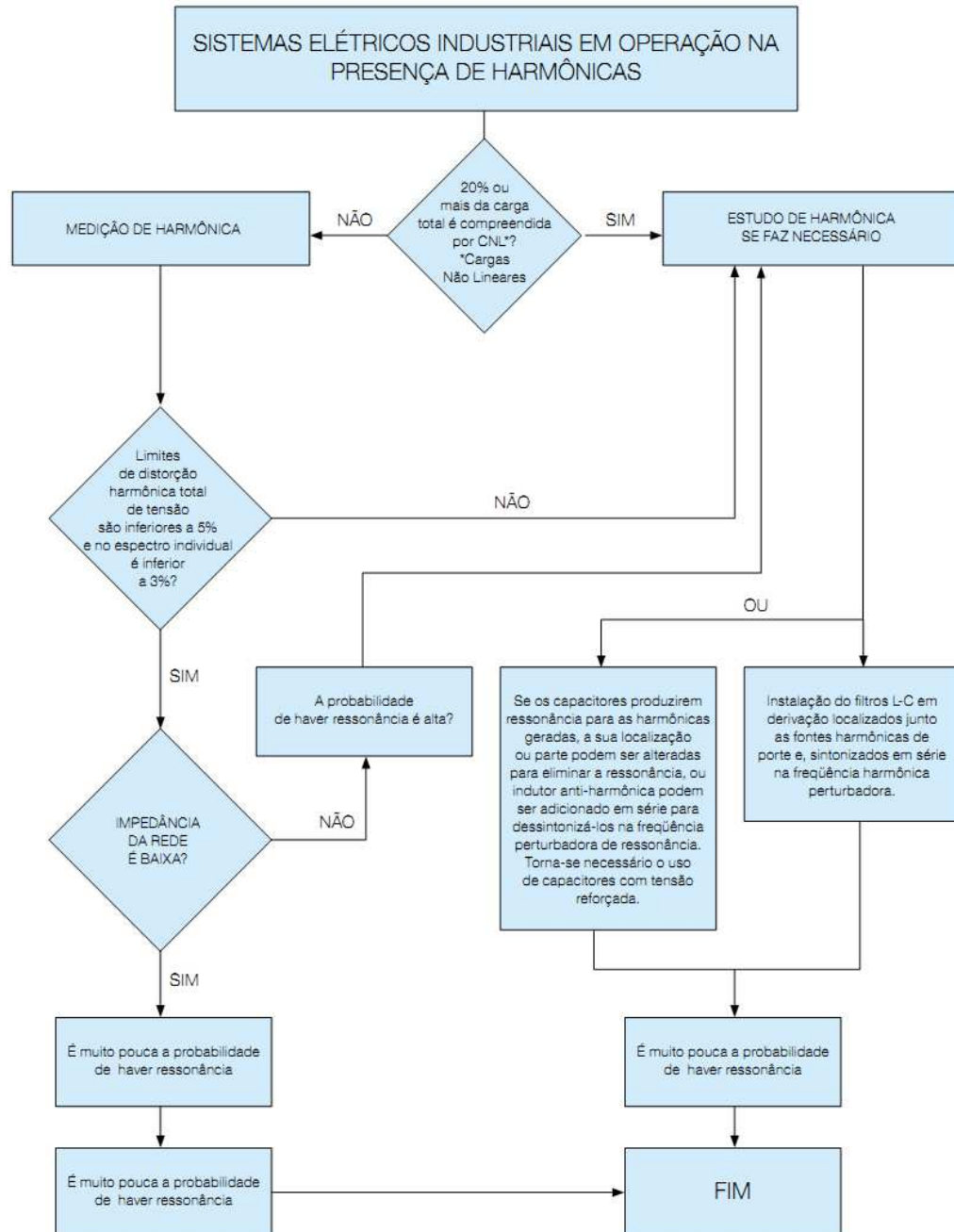
Para trabalhos futuros, serão realizadas as análises dos dados obtidos nas medições do sistema de energia, identificando os parâmetros de qualidade de energia mais influentes em cada uma das subestações da MRS e definindo a melhor localidade para um projeto piloto de solução qualidade de energia.

ANEXO I

FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE MEDIÇÃO DE TENSÃO POR RECLAMAÇÃO DO CONSUMIDOR



ANEXO II



Referências Bibliográficas

- [1] SILVA, LEANDRO RODRIGUES MANSO, Inteligência computacional aplicada à modelagem de cargas não lineares e estimação de contribuição harmônica, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2012.
- [2] DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W. Electrical Power Systems Quality - McGraw-Hill, Second Edition, New York, 2002, page 1.
- [3] FRANCO, E. Qualidade de Energia - Causas, Efeitos e Soluções. Disponível em: <iecom.dee.ufcg.edu.br/~mylene/potencia/artigo2.doc>
- [4] IEEE STD 1159-1995. IEEE Recommended practice for monitoring electric power quality, page.
- [5] CORREIA, P. F. O impacto dos problemas de qualidade de energia nas instalações elétricas- O caso particular das perturbações harmônicas. FCTUC, Coimbra, 2007.
- [6] DECKMANN, S. M.; POMILIO J. A. Distorção harmônica: causas, efeitos e soluções. Curso avaliação da qualidade da energia elétrica.
- [7] IEEE STD 519-1992. IEEE Recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems (ANSI) of IEEE Standards Board. New York, USA, 1992.
- [8] LEAO, R. P. S. Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência. Universidade Federal do Ceará, 2010.
- [9] DIAS, G. A. D. Harmônicas em Sistemas Industriais. 2ª edição, Porto Alegre, editora Edipucrs, 2002.
- [10] RIBEIRO, C. Influência dos harmônicos na qualidade da energia elétrica. UFOP, 2007

[11] Efeitos e causas de harmônicas nos sistemas de energia elétrica..Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/htmlfile/harmo/fpcap4/cap4.html>. Acesso: 20 de outubro de 2011

[12] LOURENÇO, T. C.; PEREIRA, G. M. V.; SAMESINA, M. I. Afundamentos de tensão (voltage sags) e seus efeitos nos componentes do sistema elétrico. FEELT, UFU.

[13] DARDENGO, V. P. Análise de variações de tensão de curta duração em uma planta industrial. UFV, 2011.

[14] ELECTRO INDUSTRIES/GAUGETECH Shark100-S - Installation and Operation Manual, Revision 1.11. Westbury, New York, 2009.