

INFLUÊNCIA DO METROREC (METRÔ DO RECIFE) NA QUALIDADE DA TENSÃO ESTUDO SOBRE O CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO AUTOMÁTICA (1º ESTÁGIO) DE CARGA ESPECIAL

Luiz Carlos de Alcântara Fonseca
Companhia Hidroelétrica do São Francisco
Rua Delmiro Gouveia, 333 - 50761-901 - Recife (PE)
e-mail: lfonseca@elogica.com.br

Resumo - Este artigo apresenta o estudo da influência das cargas de retificação do METROREC (Metro do Recife) no sistema elétrico da concessionária. Por ser uma carga cujo valor está próximo ao nível de aceitação automático, este documento confirma os níveis de aceitação automática de consenso do setor elétrico, bem como sugere a possibilidade de incrementá-los

Palavras-chave - harmônicos, qualidade de energia, ferrovia eletrificada.

Abstract - This article presents a study of the influence in the supply system, of rectifier loads of the METROREC (Metro do Recife) which has the delivered power near the automatic acceptance level. This paper confirms the automatic acceptance level and suggests the possibility of increasing it.

Keywords - harmonic, power quality, electric railway.

1. INTRODUÇÃO

Os critérios adotados pelo setor elétrico brasileiro para a aceitação de consumidores com cargas especiais, no caso específico cargas que introduzem harmônicos, são apresentados no documento GCPS-039/96, "CRITÉRIOS E PROCEDIMENTOS PARA O ATENDIMENTO A CONSUMIDORES ESPECIAIS". Esse documento sugere o escalonamento das cargas em dois estágios, sendo que as cargas enquadradas no primeiro estágio, onde a relação entre a potência da carga em estudo e a potência de curto-circuito no ponto de acoplamento seja menor ou igual a 0,6% ou 0,3% para níveis de tensões do sistema inferiores a 69kV ou iguais ou maiores que esse nível de tensão respectivamente, poderiam ter a aceitação automática sem a necessidade da realização de estudos mais elaborados. Pode-se, no entanto, se argüir sobre a propriedade desta relação e sobre o seu valor propriamente dito, sugerindo estudos que respaldassem este critério.

Esta relação é ultrapassada pelas cinco subestações retificadoras do metrô do Recife, caso se considere realmente a potência instalada de cada uma, sendo que em condições normais de operação esta ultrapassagem é pequena. A análise desta carga é útil para contribuir com subsídios ao estabelecimento de critérios de aceitação automática (1º estágio).

Este artigo técnico se propõe a calcular as distorções harmônicas de tensão, e analisar estes valores comparando-os com o critério de aceitação automática, o que ajuda a confirmar os critérios adotados pelo setor elétrico.

2. SUPRIMENTO À FERROVIA

2.1. Sistema de Suprimento

O sistema de transporte ferroviário de passageiros que supria a região metropolitana do Recife, estava sendo aperfeiçoado principalmente com a mudança do

sistema diesel-elétrico por um sistema eletrificado (METROREC), o que demandava entre outros do estudo do impacto das distorções harmônicas.

Existem dois tipos de sistema de tração para o transporte ferroviário eletrificado: suprimento em corrente contínua ou o suprimento em corrente alternada, onde as locomotivas são alimentadas monofasicamente em corrente alternada, e a retificação é feita na própria locomotiva.

Devido às características próprias de cada um destes sistemas, normalmente, para o transporte metropolitano de passageiros se utiliza o suprimento em CC.

A ferrovia é uma carga com características diferentes das outras. O comportamento dessa carga é vista através do estudo da carga absorvida por cada trem minuto a minuto ao longo da via. Com a carga característica de um trem indo e voltando torna-se possível determinar qual a carga que cada subestação exige do sistema de suprimento minuto a minuto. Para isso é necessário um estudo composto os trens nos trechos da via de acordo com um despacho de trens pré-determinado. De posse desta carga por subestação se pode obter a fundamental e as componentes harmônicas de corrente e em cada subestação, entre outros dados.

A retificação de cargas significativas pode causar perturbações no sistema de suprimento da concessionária, nos sistemas de comunicação telefônica e nos sistemas de comunicação e sinalização da própria METROREC.

O grau de perturbação pode ser medido através de determinação de fatores tais como a distorção harmônica e a interferência telefônica.

O sistema analisado é composto de uma rede de suprimento em alta tensão, 69KV, que pertence a CHESF e CELPE, e subestações retificadoras que são do METROREC.

As subestações da CHESF são Pirapama, Bongi e Mirueira que são interligadas com as subestações da CELPE que são : Imbiribeira, Gasômetro, Jaboatão, Várzea e as seccionadoras Pau Ferro e Jussaral, através de linhas de 69KV que são chaveadas de acordo com as necessidades operativas. As subestações retificadoras são as de Ipiranga, Recife, Jaboatão Coqueiral e Lacerda (TIP), no caso de uma emergência

em uma dessas subestações sua carga seria chaveada para as subestações mais próximas. A Figura 1 mostra a configuração deste sistema de suprimento. A Figura 2 mostra o diagrama unifilar de uma subestação retificadora típica do METROREC .

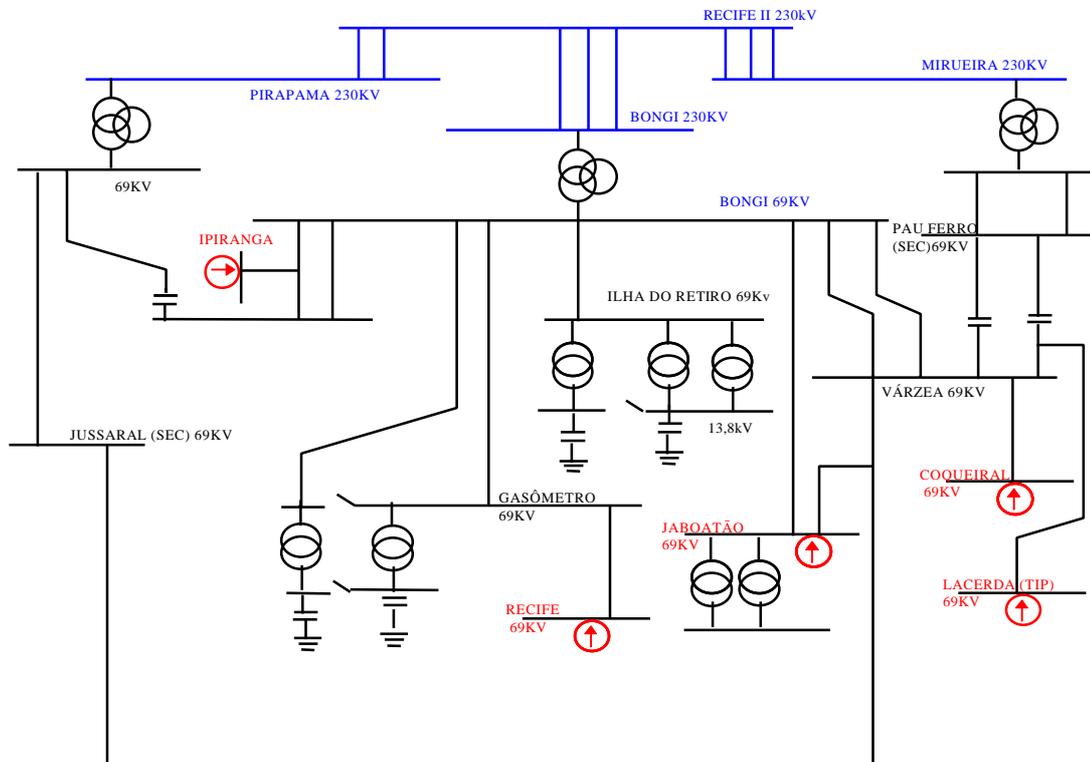


FIGURA 1

DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA CELPE PARA SUPRIMENTO DO METROREC

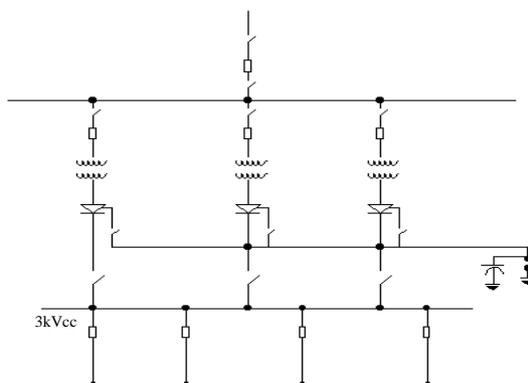


FIGURA 2

DIAGRAMA UNIFILAR DE UMA SUBESTAÇÃO RETIFICADORA TÍPICA DO METROREC

2.2. Cálculo da Demanda

Para se calcular as correntes absorvidas em cada uma das subestações retificadoras e em consequência a demanda, é necessário se fazer simulações de marcha, que analisa o movimento de um trem ao longo de todo o trecho em estudo.

Na análise se observa, os esforços que agem sobre o trem ao longo do percurso. De posse desses esforços se determina a posição e a velocidade do trem em função do tempo. Como resultado dessa simulação se obtém, para cada trecho, o instante, posição, velocidade e aceleração do trem, o esforço de tração ou frenagem, a potência no aro ($F \cdot V$) e a energia durante a viagem.

Combinando-se os resultados das simulações de marcha com as hipóteses operacionais, tais como: o intervalo entre trens em cada via e os instantes de partida por vias distintas, se obtém as correntes em cada uma das subestações retificadoras e os potenciais.

2.3. Subestação Retificadora

Como resultado das simulações em condições normais e emergências se obteve as potências e demanda requerida de cada subestação retificadora.

O sistema de retificação é composto de retificadores de silício, montados em dupla ponte de Graetz, o que dá 12 pulsos, e a tensão contínua é de 3KV. Ver Figura 2

Cada subestação retificadora terá três grupos retificadores de 3KV cada um, sendo a potência nominal admissível de 9,0MW. Esta potência só é utilizada em 71%, no caso da pior emergência, com hipótese operacional de trens com quatro a oito carros, com frequência máxima correspondendo a intervalos de 6 minutos.

Em condições de pior emergência, e trens operando em intervalos de 6 minutos, a potência máxima, por subestação, é apresentada na Tabela 1, a seguir:

Tabela 1

Potência Máxima por Subestação do METRÔ Em Condições de Emergência

SUBEST. TAÇÃO	P. MÁX. (KW)	SUBEST. TAÇÃO	P. MÁX. (KW)
RECIFE	4893	COQUEIRAL	6427
IPIRANGA	6152	JABOATÃO	3596
		TIP (LACERDA)	5488

3. CÁLCULO DAS CORRENTES HARMÔNICAS

De posse dos potenciais e das correntes nas subestações retificadoras pode-se calcular a potência e a demanda.

Considerando-se o rendimento e o fator de potência típico deste tipo de equipamento é possível se obter o valor de corrente fundamental.

Como a retificação é de 12 pulsos, desprezando-se os desequilíbrios, só haverá harmônicos dados pela expressão 1:

$$n = 12.n \pm 1, n=1,2,3 \dots (1)$$

e que a amplitude destes harmônicos seria da ordem de:

$$I_n = \frac{I_1}{n} (2)$$

Onde I_1 , é a corrente fundamental.

Considerou-se o efeito da comutação, que atenua a amplitude dos harmônicos, utilizando-se uma fórmula empírica que se ajusta bem nos casos de retificadores de potência elevada, no caso foi a fórmula de C Moeller:

$$I_n = \frac{I_1}{\left(n - \frac{5}{n}\right)^{1,2}} (3)$$

As correntes harmônicas foram calculadas para o regime normal de operação e para as emergências nas subestações. A Tabela 2 mostra as correntes harmônicas, por barra, máximas em ampère, injetadas em cada barra considerando a pior emergência para aquela barra.

TABELA 2

Correntes Harmônicas Máximas Considerando Emergência que as Maximiza

SUBESTAÇÃO	CONDIÇÃO	ORDEM				
		11	13	23	25	35
RECIFE	E/IPIRANGA	2,75	2,22	1,09	0,98	0,65
IPIRANGA	E/RECIFE	3,46	2,79	1,37	1,24	0,82
COQUEIRAL	E/TIP	3,61	2,91	1,43	1,29	0,86
JABOATÃO	E/COQUEIRAL	2,02	1,63	0,8	0,72	0,48
TIP (LACERDA)	E/COQUEIRAL	3,08	2,49	1,22	1,1	0,73

4. SIMULAÇÕES

Para o cálculo das distorções harmônicas de tensão foi simulado todo o sistema CHESF interligado ao sistema METROREC com a configuração mostrada na Figura 1. Foi utilizado nesta simulação o programa TEE08D da THEMAG.

Para as simulações se partiu de uma configuração básica de sistema, onde na sub-transmissão as linhas estava chaveadas de modo mostrado na Figura 1, ou

seja, as linhas que interligam Pirapama a Imbiribeira e Pau Ferro a Várzea estavam desconectadas, este é o caso 1

Para estes casos foram injetadas as correntes da Tabela 2 (pior emergência para barra).

A Tabela 3, a seguir, apresenta os valores das maiores tensões harmônicas nas subestações da CHESF, e a Tabela 4 os maiores valores encontrados nos barramentos da CELPE.

TABELA 3
TENSÕES HARMÔNICAS NAS BARRAS DA CHESF
(%) da Fundamental

HARM. / BARRAS		11	13	23	25	35	TOTAL
PIRAPAMA	230KV	0,039	0,049	0,020	0,020	0,006	0,069
	69KV	0,182	0,175	0,005	0,004	0,006	0,253

TABELA 4
TENSÕES HARMÔNICAS NAS BARRAS DA CELPE
(%) da Fundamental

HARM. / BARRAS		11	13	23	25	35	TOTAL
COQUEIRAL	69KV	0,655	0,907	0,092	0,130	0,216	1,151
GASÔMETRO II	69KV	0,323	0,569	0,176	0,135	0,055	0,693
	13,8KV	0,185	0,190	0,009	0,005	0,000	0,265
	13,8KV	0,128	0,145	0,012	0,008	0,002	0,194

5. CRITÉRIOS.

Os limites de tensão harmônica são os apresentados no documento de consenso do setor elétrico:

Em relação à aceitação automática este documento permite desde que a carga se enquadre no 1º estágio mostrado a seguir:

1º Estágio

Nesse estágio são definidos limites para a potência dos equipamentos causadores de distorções como porcentagem da potência de curto-circuito da barra que se caracteriza como ponto de entrega do consumidor. Deve-se considerar a potência mínima de curto-circuito no horizonte de planejamento.

Tabela 6

Limites Para A Potência Das Cargas Especiais (Pc) Expressos Em Porcentagem Da Potência Mínima De Curto-Circuito.

Tensão do sistema	V<69KV	V≥69KV
$\frac{P_c}{S_{cc}}$	0,6%	0,3%

As cargas de potência inferior aos limites apresentados na Tabela 7 podem ser instaladas, na maioria dos casos

sem a necessidade de realização de estudos mais elaborados.

No caso específico as potências de curto-circuito nos barramentos do METROREC são:

TABELA 7
Potência de Curto-Circuito nos Barramentos

Subestação	S _{cc} (MVA)
RECIFE	1055,8
COQUEIRAL	818,7
LACERDA (TIP)	852
JABOATÃO	634
IPIRANGA	898,9

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Caso se considere a potência instalada por subestação retificadora (9MW) a relação entre a potência da carga e a potência de curto-circuito no ponto de acoplamento seria como a mostrada na Tabela abaixo:

TABELA 8

Relação Potência da Carga (9MVA) / Potência de Curto

Subestação	S_{cc} (MVA)	P_{CC}/S_{CC} (%)
RECIFE	1055,8	0,85
COQUEIRAL	818,7	1,10
LACERDA (TIP)	852	1,06
JABOATÃO	634	1,42
IPIRANGA	898,9	1,00

ou seja, bem superior ao critério de aceitação automática, exigindo portanto estudo desta carga. Entretanto, só em condições de emergência de uma destas subestações retificadoras, as restantes assumem a carga total que poderá chegar a, como foi dito anteriormente 71% desta potência instalada, o que pode ser visto na Tabela 9 que se segue:

TABELA 9
Relação Potência da Carga / Potência de Curto

Subestação	S_{cc} (MVA)	P_{CC} (KW)	P_{CC}/S_{CC} (%)
RECIFE	1055,8	4893	0,46
COQUEIRAL	818,7	6427	0,79
LACERDA (TIP)	852	5488	0,64
JABOATÃO	634	3596	0,57
IPIRANGA	898,9	6152	0,68

valores que também não se enquadram no conceito de aceitação automática.

As simulações de penetração harmônica foram feitas com a consideração da condição de emergência que causasse a maior corrente harmônica, por exemplo, as maiores correntes harmônicas em Recife ocorreram na emergência em Ipiranga conforme foi visto na Tabela 6, um caso portanto hipotético, pois estas correntes foram injetadas simultaneamente.

Os valores das tensões harmônicas mostradas nas tabelas 3 e 4 estão bem abaixo dos limites adotados. Nas barras da CHESF os maiores valores encontrados

foram de 0,430%, 0,737%, 0,218%, 0,167%, e 0,067%, todas na barra de Bonji 69KV, para o 11^o, 13^o, 23^o, 25^o e 35^o harmônicos de tensão respectivamente o que representa 28,6%, 49%, 22%, 17% e 13% respectivamente dos limites adotados, ou seja no máximo próximo à metade do permitido. Nas barras da CELPE os maiores valores de tensão harmônica foram da ordem de 0,655, 0,907 para o 11^o e 13^o ordens respectivamente na barra de Coqueiral 69KV, e 0,176, 0,135 e 0,216 para a 23^a, 25^a e 35^a ordens respectivamente e foram encontradas no barramento de Gasômetro 69KV. Estes valores representam 43%, 60% 18% 14% e 43% respectivamente dos limites, o que estão bem abaixo dos limites.

7. CONCLUSÕES

Os limites de tensão harmônica apresentados no documento GCPS-039/96, "CRITÉRIOS E PROCEDIMENTOS PARA O ATENDIMENTO A CONSUMIDORES ESPECIAIS". foram atendidos pela carga do METROREC, mesmo na condição hipotética da injeção da máxima corrente harmônica de cada subestação retificadora.

Apesar do critério de aceitação automática ter sido ultrapassado, os valores das tensões harmônicas estão bem inferiores aos limites adotados o que confirma a validade do valor de 0,3% para a relação entre a potência da carga em estudo e a potência de curto-circuito no ponto de para níveis de tensões do sistema inferiores a 69kV.

Outra confirmação vem da experiência prática pois ao longo de mais de dez anos de operação não houve reclamação de nenhum efeito danoso, que seja de interferência que seja de diminuição de vida útil de equipamentos, na área de influência dessa carga.

8. REFERÊNCIAS

- [1] Figueiredo Ferraz, Consultoria e Engenharia de Projeto LTDA, "Harmônicos e Potência Demandada pelo Trem Metropolitano de Recife" RE-SER-3361 02/09/83.
- [2] Fonseca, L.C.A. "Estudo da Distorção Harmônica Devido ao METROREC" RT-13.03.12/85