

# Análise da Qualidade da Energia Elétrica no Barramento que alimenta os Equipamentos de “Auxílios à Navegação Aérea por Instrumentos” do Aeroporto Marechal Rondon

A. B. de Vasconcellos, Dr; R. Apolônio, Dr, M. S. M. Alves, Acad.  
Universidade Federal de Mato Grosso, Av. Fernando Correa da Costa, s/n – Coxipó – Cuiabá – MT

J. Moreira, Oficial da Aeronáutica Esp. em Comunicações e Eng Eletricista  
Destacamento de Controle do Espaço Aéreo de Cuiabá – DTCEACY, órgão do Comando da Aeronáutica

T. I. R. de C. Malheiro, *PhD*.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso, Rua Prof. Zulmira Canavarros, nº 95 – Centro – Cuiabá – MT.

**Resumo - O progresso tecnológico, como a eletrônica digital, a informática e o desenvolvimento da propulsão a jato, tornou o transporte aéreo a modalidade mais segura, eficiente e econômica de transportes. Isto proporcionou um crescente uso de cargas não lineares em todos os setores, principalmente, nos sistemas de navegação aérea. Este artigo apresenta medições em cargas não lineares comuns em barramento dos Auxílios Instrumentos à Navegação Aérea de instalações de um Destacamento de Controle do Espaço Aéreo e analisa se as distorções individuais e totais de tensão estão de acordo com os níveis de referência dos órgãos reguladores.**

**Palavras-chave – Harmônicos, Distorção, Cargas não lineares, Navegação Aérea.**<sup>1</sup>

## I. INTRODUÇÃO

A qualidade da energia elétrica entregue pelas empresas distribuidoras aos consumidores sempre foi objeto de interesse. Porém, até algum tempo atrás, a qualidade de energia elétrica tinha a ver, sobretudo, com a continuidade dos serviços. A principal preocupação era que não houvesse interrupções de energia, e que as tensões e frequência fossem mantidas dentro de determinados limites considerados aceitáveis. Durante dezenas de anos a grande maioria dos receptores ligados às redes de energia elétrica era constituída de cargas lineares. Por essa razão, e uma vez que as tensões da alimentação são

senoidais, as correntes consumidas eram também senoidais e de mesma frequência, podendo apenas encontrar-se defasadas relativamente à tensão. Entretanto, as cargas ligadas nos sistemas elétricos evoluíram, melhorando em rendimento, controlabilidade e custo, permitindo ainda a execução de tarefas não possíveis anteriormente no controle do sistema de navegação aérea. Contudo, esses equipamentos têm a desvantagem de não funcionarem como cargas lineares, consumindo correntes não senoidais, e dessa forma “poluindo” a rede elétrica com harmônicos.

A presença de harmônicos nos sistemas de potência resulta em um aumento das perdas relacionadas com o transporte e distribuição de energia elétrica, criando problemas de interferências com sistemas de comunicação e na degradação do funcionamento da maior parte dos equipamentos ligados à rede, sobretudo daqueles (cada vez em maior número) que são mais sensíveis por incluírem sistemas de controle microeletrônicos mais sensíveis a forma de onda da tensão. Normas internacionais relativas ao consumo de energia elétrica, tais como IEEE 519, IEC 61000 e EN 50160, limitam o nível de distorção harmônica nas tensões com os quais os sistemas elétricos podem operar, e impõem que os novos equipamentos não introduzam na rede harmônicos de corrente de amplitude superior a determinados valores. É dessa forma evidenciada a importância em resolver os problemas dos harmônicos, tanto para os novos equipamentos a serem produzidos quanto para os equipamentos já instalados [1]-[2]-[3]-[4].

No Brasil a preocupação com a qualidade da energia vem crescendo cada vez mais, tanto para os órgãos reguladores (ANEEL, ONS) quanto para as concessionárias e para os consumidores.

A ANEEL, através dos procedimentos de distribuição (Prodist) publicado em Dezembro/2008 em seu módulo 8, trata da qualidade de energia no que tange ao serviço e produto em âmbito nacional.

---

Este trabalho visa analisar a qualidade de energia no Destacamento de Controle do Espaço Aéreo do aeroporto Marechal Rondon e conta com a participação dos professores doutores da UFMT e IFMT.

A. B. de Vasconcellos e R. Apolônio trabalham na Universidade Federal de Mato Grosso (e-mail: [arnulfo@ufmt.br](mailto:arnulfo@ufmt.br), [apolonio@ufmt.br](mailto:apolonio@ufmt.br)).

M.S.M. Alves acadêmico de Engenharia Elétrica e bolsista em projeto de pesquisa da UFMT (email: [sollyvan@hotmail.com](mailto:sollyvan@hotmail.com)).

T. I. R. de C. Malheiro trabalha no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso. (e-mail: [teresa.malheiro@terra.com.br](mailto:teresa.malheiro@terra.com.br)).

José Moreira, Oficial da Aeronáutica Esp. em Comunicações e Eng Eletricista, trabalha no Destacamento de Controle do Espaço Aéreo de Cuiabá – DTCEACY– MT (e-mail [josoe.moreira@ibest.com.br](mailto:josoe.moreira@ibest.com.br))

Focando o estudo da qualidade da energia em um centro de controle de navegação aérea, este artigo apresenta os resultados das medições realizadas nos sistemas de auxílios à navegação por instrumentos do aeroporto Marechal Rondon, no município de Várzea Grande-MT, onde o Destacamento de Controle do Espaço Aéreo de Cuiabá – DTCEACY, órgão da Aeronáutica, mantém estes equipamentos compostos de um radar terminal de área, usado para o controle do tráfego aéreo, um VOR, que é um emissor de radiais eletromagnéticas para guiar as aeronaves nos procedimentos de pouso e decolagem, um DME, que marca a distância da aeronave até o equipamento, uma estação meteorológica eletrônica que fornece as informações meteorológicas do aeródromo, etc. Sendo que, todos os equipamentos de gerenciamento e os visualizadores são cargas não lineares, com retificadores para corrente contínua e fontes chaveadas para computadores e servidores.

Para o monitoramento completo de cargas não lineares sabe-se que os instrumentos tradicionais de medição de grandezas elétricas não trazem informações de valores eficazes verdadeiros de tensões e correntes, distorções harmônicas totais de tensão e corrente, fator de potência verdadeiro, etc. Estas grandezas são as novas componentes do sistema elétrico na presença de cargas não lineares.

Para obtenção de todas as grandezas elétricas tanto em 60Hz, como em frequências múltiplas de 60Hz, geradas pelas cargas não lineares, foi utilizado o analisador de energia VIP-System 3, fabricante Elcontrol, juntamente com o software HARMO de modo a obter informações necessárias para análise da qualidade de energia no barramento que alimenta os equipamentos de auxílios à Navegação do Destacamento de Controle do Espaço Aéreo de Cuiabá - DTCEACY, no Aeroporto Marechal Rondon em Cuiabá, Mato Grosso. O termo “auxílios à navegação por instrumentos” refere-se ao conjunto de sistemas e equipamentos no solo que balizam a aeronave, independente de estar visualizando o aeródromo ou não, nos procedimentos de pouso e decolagem, assim como na navegação no espaço aéreo controlado. Difere dos “auxílios visuais” que são basicamente as luzes de aproximação e das pistas, onde a aeronave tem que ter contato visual com os equipamentos no solo.

## II. VALORES DE REFERÊNCIA DOS NÍVEIS DE DISTORÇÃO HARMÔNICA PRESENTES NO SISTEMA ELÉTRICO

As distorções harmônicas são fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental. A tabela I sintetiza a terminologia aplicável às formulações do cálculo de valores de referência para as distorções harmônicas usadas para caracterização das novas grandezas elétricas que aparecem no sistema elétrico na presença de cargas não lineares, regulamentada pela ANEEL através da Resolução 345/2008 que no seu módulo 8 trata dos níveis de harmônicos permitidos no sistema de distribuição elétrica nacional.

TABELA I - TERMINOLOGIA

Identificação da Grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	DIT <sub>h</sub> %
Distorção harmônica total de tensão	DTT %

Tensão harmônica de ordem h	V <sub>h</sub>
Ordem harmônica	H
Ordem harmônica máxima	H <sub>máx</sub>
Ordem harmônica mínima	H <sub>min</sub>
Tensão fundamental medida	V <sub>1</sub>

A mesma resolução estabelece que as expressões para o cálculo das grandezas DIT<sub>h</sub>% e DTT % são modeladas por (1) e (2).

$$DIT_h \% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (1)$$

$$DTT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{H_{máx}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2)$$

Os sinais a serem monitorados devem utilizar sistemas de medição cujas informações coletadas possam ser processadas por meio de recurso computacional, sendo que a capacidade do sistema de medição deve atender os requisitos de banco de dados do protocolo de medição a ser definido pela ANEEL. Para os sistemas elétricos trifásicos, as medições de distorção harmônica devem ser feitas através das tensões fase-neutro para sistemas estrela aterrada e fase-fase para as demais configurações. O espectro harmônico a ser considerado para fins de cálculo da distorção total deve compreender uma faixa de frequências que considere desde a frequência fundamental, até no mínimo, a 25ª ordem harmônica (h<sub>min</sub>=25). A mesma resolução estabelece também os valores de referência para as distorções harmônicas totais que estão ilustrados na tabela II. Estes valores servem para referência do planejamento elétrico em termos de qualidade de energia elétrica e que, regulatoriamente, serão estabelecidos em resolução específica após período experimental de coletas de dados.

TABELA II - VALORES DE REFERÊNCIA GLOBAL DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS TOTAIS (EM PORCENTAGEM DA TENSÃO FUNDAMENTAL)

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]
V <sub>n</sub> ≤ 1kV	10
1kV < V <sub>n</sub> ≤ 13,8kV	8
13,8kV < V <sub>n</sub> ≤ 69kV	6
69kV < V <sub>n</sub> < 230kV	3

Devem ser obedecidos também os valores das distorções harmônicas individuais indicados na tabela III, constando apenas os índices de distribuição que serão usados como referência para este artigo.

TABELA III - NÍVEIS DE REFERÊNCIA PARA DISTORÇÕES HARMÔNICAS INDIVIDUAIS DE TENSÃO (EM PORCENTAGEM DA TENSÃO FUNDAMENTAL)

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão (%)		
	V <sub>n</sub> ≤ 1kV	1kV < V <sub>n</sub> ≤ 13,8kV	
Ímpares não	5	7,5	6
	7	6,5	5

múltiplas de 3	11	4,5	3,5
	13	4	3
	17	2,5	2
	19	2	1,5
	23	2	1,5
	25	2	1,5
	>25	1,5	1
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5
	9	2	1,5
	15	1	0,5
	21	1	0,5
	>21	1	0,5

### III. MEDIÇÕES EM CAMPO

O equipamento empregado para o registro das grandezas elétricas no centro de controle de navegação aérea do aeroporto Marechal Rondon em Cuiabá corresponde ao analisador de energia VIP-System 3, fabricante Elcontrol, mostrado na figura 1 que é um instrumento capaz de mensurar grandezas elétricas em sistemas de baixa tensão (até 600 Volts entre fase e neutro) com corrente de fase até 1000 A; na função de analisador de energia, as medidas mostradas (atualizadas a cada segundo) são: tensão, corrente, fator de potência e potência trifásica total e individualmente para as três fases; corrente de neutro, frequência, rotação de fase; potência ativa instantânea, média e máxima das três fases e trifásica; potência aparente instantânea, média e máxima das três fases e trifásica; potência reativa instantânea, média e máxima das três fases e trifásica; distorção harmônica percentual das três fases e trifásica; consumo de energia ativa e reativa,  $\text{tg}\phi$  média e  $\text{cos}\phi$  médio das três fases e trifásica, fator deslocamento, etc..

Na função de analisador de harmônicos (uso do Black Box de Harmônicos) as medidas mostradas (atualizadas a cada segundo) são: tensão, corrente, fator de potência e potência trifásica total e individualmente para as três fases para diversas ordens harmônicas; formas de onda de tensão e corrente individualmente para cada fase; distorção harmônica de tensão e corrente.



Fig. 1. Analisador de energia utilizado na medição.

As medições são armazenadas na memória do instrumento podendo, na seqüência, serem transferidas ao computador através de um dispositivo de comunicação próprio do equipamento e ligado a saída da porta paralela. O programa de gerenciamento do Vip System 3 permite a visualização no monitor de vídeo do computador as medições realizadas em campo, ou convertê-las no formato apropriado para uso no MATLAB e posteriormente no Word. Deste modo, as medições podem ser transformadas em gráficos em função do tempo dentro do programa MATLAB, podendo ser inseridas como figuras em relatórios utilizando-se o Word. As formas de onda de tensão e corrente gerada pelo Black Box de harmônicos podem ser capturadas e trabalhadas dentro de um

software de edição de imagens e posteriormente inseridas no texto como figuras.

#### A. Medições das tensões e correntes no barramento de auxílios à navegação do Destacamento de Controle do Espaço Aéreo de Cuiabá, no Aeroporto Marechal Rondon - Cuiabá MT

Inicialmente foi monitorado o perfil das tensões e correntes no barramento geral que alimenta os auxílios à navegação do Destacamento de Controle do Espaço Aéreo de Cuiabá, conforme formas de ondas das tensões e correntes ilustradas nas figuras 2 e 3.

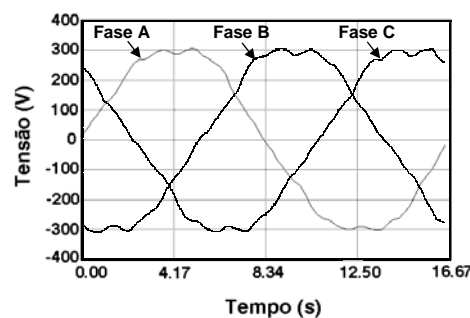


Fig. 2. Tensões nas fases A, B e C no barramento de Auxílios do Destacamento de Controle do Espaço Aéreo de Cuiabá.

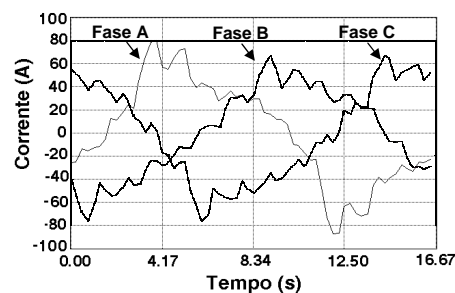
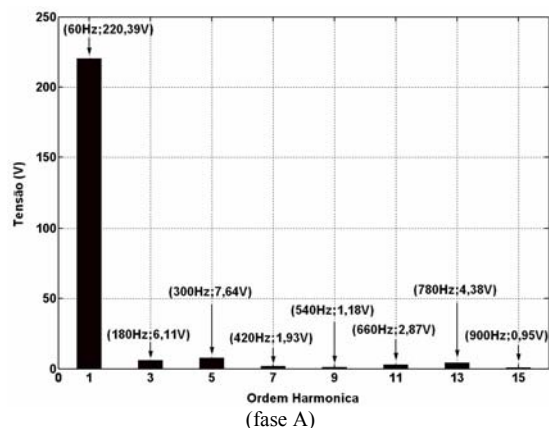


Fig. 3. Correntes nas fases A, B e C no barramento de Auxílios do Destacamento de Controle do Espaço Aéreo de Cuiabá.

Na figura 3 observa-se que além da distorção da forma de onda das correntes, que estão mais acentuadas que as das tensões mostradas na figura 2, mostra também um desequilíbrio de cargas ligadas no barramento de auxílios a navegação aérea.

A figura 4 apresenta os espectros harmônicos das tensões no barramento geral de auxílios a navegação, na casa de força.



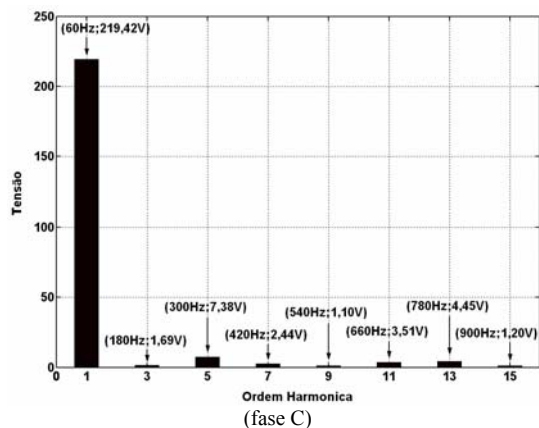
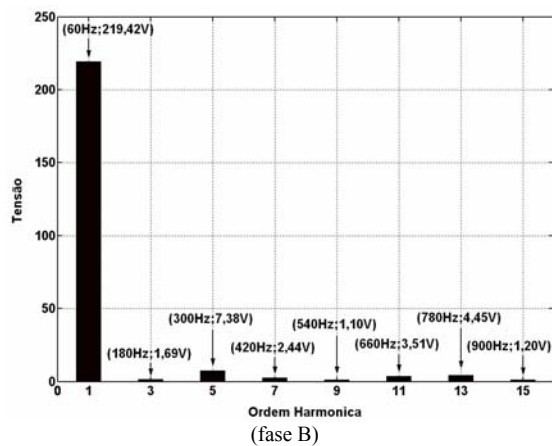


Fig. 4. Espectro harmônico das tensões nas fases A, B e C no barramento de Auxílios do Destacamento de Controle do Espaço Aéreo de Cuiabá.

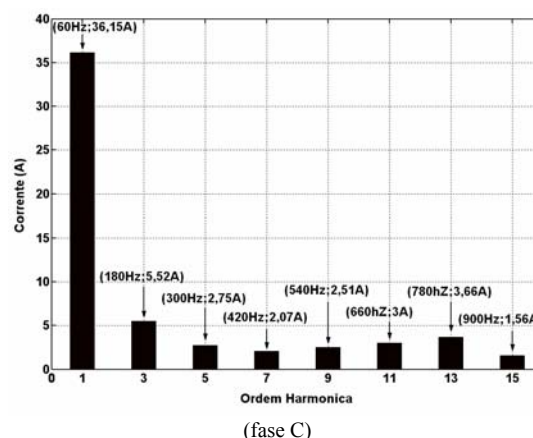
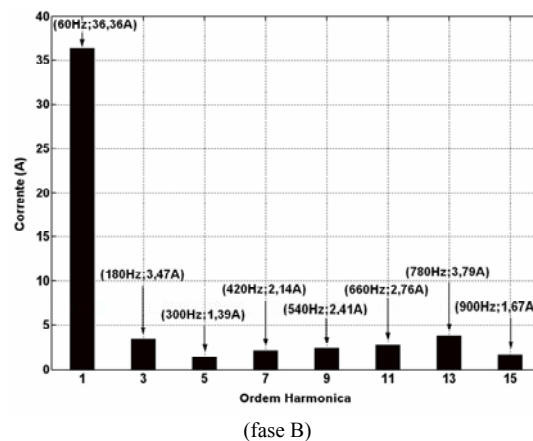
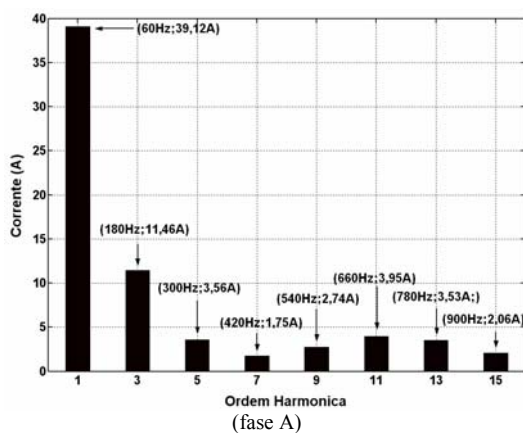


Fig. 5. Espectro harmônico das correntes nas fases A, B e C no barramento de auxílios do destacamento de controle do espaço aéreo.

Já a figura 5 apresenta os espectros harmônicos das correntes no barramento geral do centro de controle de navegação aérea. Observa-se que como existem cargas não lineares ligadas no barramento geral a corrente que circula nas linhas contém várias distorções harmônicas, como pode ser visto através do espectro de linha das correntes mostrada na figura 5, e as quedas de tensões provocadas pelas harmônicas de corrente nas impedâncias do sistema fazem com que as tensões do barramento também fiquem levemente distorcidas, como mostrado nos espectros das tensões ilustrados na figura 4. Nos espectros das correntes de linha mostradas na figura 5 observa-se um valor significativo dos harmônicos de corrente múltiplos de 3 que são conhecidos como harmônicos de seqüência zero, estes somam-se no neutro podendo alcançar elevadas correntes que podem ocasionar aquecimento do cabo, abertura do disjuntor, etc.



*B. Análise dos Resultados proporcionados pelas distorções harmônicas presentes nas tensões e correntes obtidos nas medições no Barramento Geral.*

A tabela IV ilustra os valores das distorções harmônicas individuais e da distorção total das tensões do barramento geral que alimenta os auxílios a navegação do destacamento de controle do espaço aéreo e mostra que seus valores estão dentro dos níveis de referência recomendados pela resolução 345/2008 da ANEEL.

TABELA IV - DISTORÇÕES HARMÔNICAS INDIVIDUAIS E TOTAIS DAS TENSÕES - MEDIÇÃO

Ordem Harmônica (Tensões)	Distorção Harmônica		
	DITh (%)	DTT (%)	
A	3	2,77	
	5	3,47	
	7	0,88	
	9	0,54	5,16
	11	1,3	
	13	1,99	
B	15	0,43	
	3	1,71	5,23
	5	4,06	
	7	1,03	
	9	0,37	
11	1,25		

13	2,21	
15	0,54	
<hr/>		
3	0,77	
5	3,36	
7	1,11	
C	9	0,5
	11	1,6
	13	2,03
	15	0,55
<hr/>		
		4,51

A tabela V ilustra os valores das distorções harmônicas individuais e da distorção total das correntes do barramento que alimentam os auxílios à navegação do Destacamento de Controle do Espaço Aéreo de Cuiabá-DTCEACY, do Aeroporto Marechal Rondon e mostra que seus valores estão significativos, principalmente para os harmônicos de seqüência zero que circularão pelo neutro do sistema.

TABELA V - DISTORÇÕES HARMÔNICAS INDIVIDUAIS E TOTAIS DAS CORRENTES-MEDIÇÃO

Ordem Harmônica (Correntes)	Distorção Harmônica	
	DITh (%)	DTT (%)
3	29,29	
5	9,1	
7	4,47	
A	9	7
	11	10,1
	13	9,02
	15	5,27
<hr/>		
3	9,54	
5	3,82	
7	5,89	
B	9	6,63
	11	7,59
	13	10,42
	15	4,59
<hr/>		
3	15,27	
5	7,61	
7	5,73	
C	9	6,94
	11	8,3
	13	10,12
	15	4,32
<hr/>		

*C. Impactos provocados pelas distorções harmônicas de tensão e corrente: na potência aparente, potência reativa, potência ativa e no fator de potência no barramento de auxílios do Destacamento de Controle do Espaço Aéreo-DTCEA-CY - do Aeroporto Marechal Rondon em Cuiabá MT.*

A figura 6 apresenta a potência aparente solicitada pelas cargas não lineares do barramento que alimentam os equipamentos auxílios à navegação do Destacamento de Controle do Espaço Aéreo de Cuiabá-DTCEACY, do

Aeroporto Marechal Rondon. Observando o gráfico, constata-se um aumento da potência aparente solicitada do sistema, quando consideradas as freqüências presentes devido às cargas não lineares.

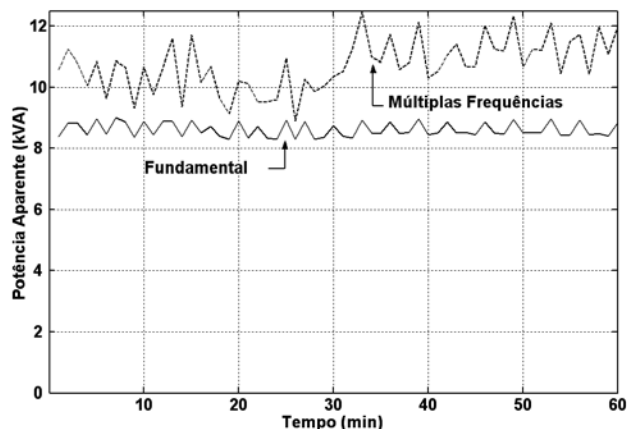


Fig. 6. Potência aparente no barramento de Auxílios do Destacamento de Controle do Espaço Aéreo de Cuiabá.

A figura 7 ilustra a potência reativa absorvida pela carga não linear, como pode ser visto no gráfico, ao se considerar as múltiplas freqüências devido à característica não linear da carga, há um aumento significativo da demanda reativa proporcionando aumento de perdas no sistema e alteração das características do fator de potência.

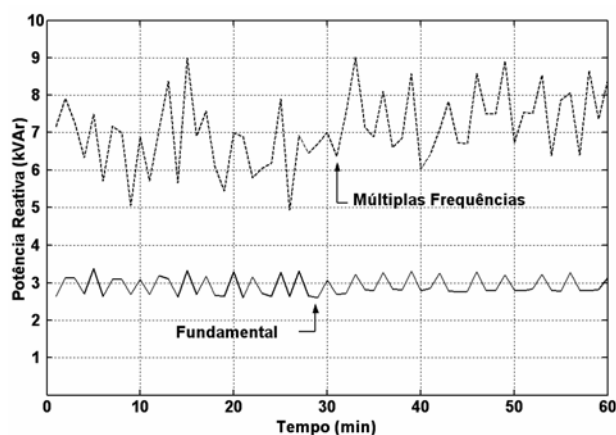


Fig. 7. Potência reativa absorvida no barramento de Auxílios do Destacamento de Controle do Espaço Aéreo de Cuiabá.

Na figura 8 pode ser observado o comportamento da potência ativa solicitada pela carga ao barramento que alimenta o centro de controle de navegação aérea, como pode se notar no gráfico a diferença entre a potência ativa fundamental e a potência ativa considerando as múltiplas freqüências já não é tão significativa como no caso da potência reativa, isto porque a característica das múltiplas freqüências é sobrecarregar o sistema na absorção de potência reativa.

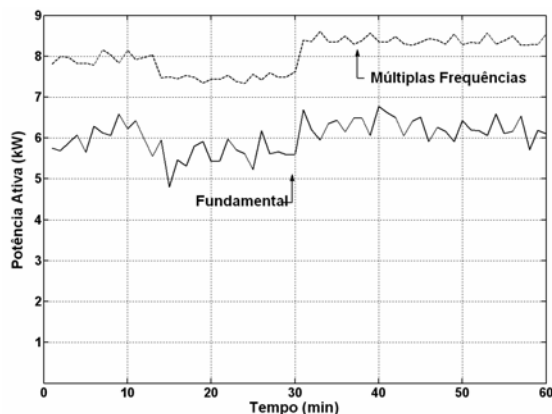


Fig. 8. Potência ativa absorvida no barramento de Auxílios do Destacamento de Controle do Espaço Aéreo de Cuiabá.

A figura 9 mostra o fator de potência da carga na frequência fundamental que é mais conhecido como fator de deslocamento oriundo de sistemas que possui apenas tensões e correntes alternadas cossenoidais. Estas são características de cargas lineares, pois o efeito do fator cresce somente com a diferença de fases e são calculados de acordo com (3).

$$FD = \frac{P_F}{S_F} = \frac{V_1 I_1 \cos \theta_1}{V_1 I_1} \quad (3)$$

$$FP = \frac{P_F}{S_T} = \frac{V_1 I_1 \cos \theta_1}{V_1 I_1 + V_3 I_3 + V_5 I_5 + \dots} \quad (4)$$

A figura 9 mostra ainda, que quando se considera o fator de potência para a situação em que as componentes de frequências geradas pelas cargas não lineares são consideradas, ocorre uma significativa redução no seu valor. Para esta última condição, a expressão utilizada para determinar seu valor é dada por (4), que inclui nos cálculos as potências aparentes devidas às componentes harmônicas. É importante destacar, que este fato pode induzir a um erro em projetos de correção do fator de potência em sistemas onde existam cargas não lineares, pois, se considerar apenas a frequência fundamental, o dimensionamento do banco de capacitores será insuficiente para atingir os valores esperados com a correção.

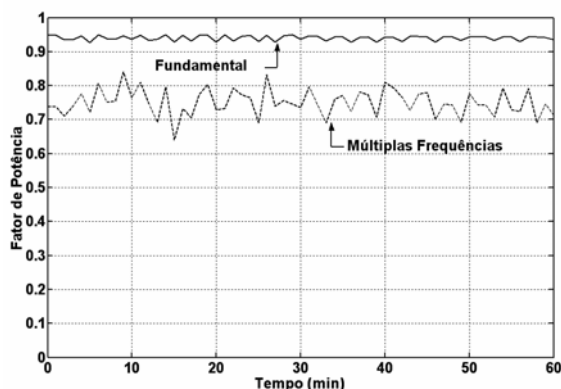


Fig. 9. Potência reativa absorvida no barramento de Auxílios do Destacamento de Controle do Espaço Aéreo de Cuiabá.

#### IV. CONCLUSÕES

Este artigo apresenta os resultados de um diagnóstico de qualidade de energia elétrica no barramento que alimenta os equipamentos eletrônicos que apoiam a navegação das aeronaves e que são chamados de Auxílios à Navegação Aérea. Neste caso as grandezas elétricas nessas unidades consumidoras devem ser constantemente monitoradas para se evitar possíveis distúrbios que podem afetar as suas próprias instalações e outras unidades consumidoras. Uma vez que, a disponibilidade da energia, a qualidade das instalações elétricas, do aterramento e possíveis fontes de interferência são fatores determinantes para o correto funcionamento da rede como um todo. Quanto às distorções harmônicas presentes no Destacamento de Controle do Espaço Aéreo de Cuiabá - DTCEACY, no Aeroporto Marechal Rondon em Cuiabá MT, em princípio, têm-se três formas principais de mitigar o problema: utilizando filtros de harmônicas, utilizando transformadores de separação ou dimensionando os componentes para suportar os efeitos. No primeiro caso, método mais utilizado, pode-se instalar junto às fontes poluidoras (ou internamente a elas), os chamados "filtros de harmônicas", que podem ser de dois tipos: filtros passivos ou filtros ativos. Quando se utilizam esses filtros, o objetivo é acondicionar as correntes harmônicas entre a fonte poluidora e o filtro, impedindo que o restante da instalação sofra os efeitos indesejados da circulação das harmônicas. No segundo caso, podem-se utilizar transformadores de separação, cuja função é manter determinadas ordens de harmônicas no secundário do transformador, não permitindo que elas se propaguem para o restante do sistema elétrico da instalação. No terceiro caso, quando a instalação elétrica não apresenta nenhuma filtragem ou confinamento das harmônicas, só nos resta dimensionar os componentes para que suportem os efeitos produzidos pelas correntes harmônicas. Os condutores elétricos e os transformadores devem ser especialmente escolhidos e dimensionados considerando o aquecimento produzido pelas harmônicas. Esse fato resulta normalmente em condutores de fase e neutro com maiores seções (o condutor neutro pode ter sua seção até dobrada em relação à seção do condutor fase, com o objetivo de compensar o aquecimento adicional provocado pelas harmônicas de seqüência zero), assim como a instalação de transformadores de alimentação de maior potência ou com componentes internos mais reforçados. Portanto, o conhecimento das prováveis perturbações presentes no sistema elétrico obtidas através de medições e das medidas que devem ser tomadas para corrigi-las permite projetar um ambiente seguro, evitando situações perigosas para usuários e equipamentos.

#### V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE Standard 519-1992, "Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", 1992O.
- [2] IEEE Task Force, "The Effects of Power System Harmonics on Power System Equipment and Loads", IEEE Trans. Power App. and Systems, vol. 104, no. 9, Set. 1985, pp. 2555-2563.
- [3] Resolução 345/2008 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).
- [4] R. D. Henderson e P. J. Rose, "Harmonics: The Effects on Power Quality and Transformers," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 30, 1994, pp. 528-532.