



Proposta de estudo das harmónicas no Sistema Industrial Sonangol – Namibe a partir de seu levantamento elétrico

Proposal of harmonics study in the Sonangol - Namibe Industrial System from its electrical survey

Propuesta de estudios de armónicos en el Sistema Industrial Sonangol -Namibe a partir de su estudio eléctrico

Maykop – Pérez Martínez.¹

Isata – Teixeira Lemba.¹

¹Universidade Mandume ya Ndemufayo. Moçâmedes, Angola.

E-mail: maykop1982@gmail.com

Recibido: julio del 2017

Aprobado: diciembre del 2017

Licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional



RESUMEN/ABSTRACT

A importância de considerar os efeitos da distorção harmônica nas instalações elétricas adquire maior relevância devido à proliferação das cargas nomeadas “não lineares”. Este fenómeno contamina a rede elétrica de uma instalação e pode afetar o funcionamento dos aparelhos ligados a ela quando ultrapassa determinados limites. Pelo que os objetivos procurados no artigo, são realizar um estudo no Sistema Industrial Sonangol – Namibe componentes de harmónicas que influem no mesmo, propor o(s) método(s) e procedimentos de eliminação como são os filtros passivos utilizados para reduzir as distorções originadas, a partir do levantamento elétrico da instalação. Também se apresenta uma revisão geral sobre os indicadores relacionados com as harmónicas e aparelhos geradores, nas redes elétricas, utilizando-se documentos de referência como: as recomendações da IEEE 519-1992, o conjunto de normas IEC-61000, NRS 048-2 e EN 50160.

Palavras chaves: cargas não lineares, filtros, harmónicas, estudo de caso, identificação de fontes.

The importance of considering the effects of harmonic distortion on electrical installations becomes more relevant because of the proliferation of so-called "non-linear" loads. This phenomenon contaminates the electrical network of an installation and can affect the operation of the devices connected to it when it exceeds certain limits. Therefore, the objectives sought in the article are to perform a study in the Sonangol - Namibe Industrial System components of harmonics that influence the same, propose the method (s) and procedures of elimination as are the passive filters used to reduce the distortions originated, From the electrical survey of the installation. A general review is also presented on the indicators related to harmonics and generators in electrical networks, using reference documents such as: IEEE 519-1992 recommendations, IEC-61000, NRS 048-2 and EN 50160.

Key Works: non-linear loads, filters, harmonics, study of case, identify of source.

La importancia de considerar los efectos de la distorsión armónica en las instalaciones eléctricas adquire mayor relevancia debido a la proliferación de las cargas denominadas “no lineales”. Este fenómeno contamina la red eléctrica de una instalación y puede afectar el funcionamiento de los aparatos conectados a ella cuando sobrepasa determinados límites. Por lo que los objetivos perseguidos en el artículo, son realizar un estudio en el Sistema Industrial Sonangol – Namibe diagnosticando las principales componentes de armónicos que influyen en el mismo, proponer el/los método(s) y procedimientos de eliminación como son los filtros armónicos pasivos utilizados para reducir las distorsiones causadas, a partir del levantamiento eléctrico de la instalación. También se presenta una revisión general sobre los indicadores relacionados con los armónicos y equipos generadores, en las redes eléctricas, utilizándose documentos de referencia como: las recomendaciones de la IEEE 519-1992, el conjunto de normas IEC-61000, NRS 048-2 y EN 50160.

Palabras clave: cargas no lineales, filtros, harmónicos, estudio de caso, identificación de fuentes

INTRODUÇÃO

O surgimento da eletrônica revolucionou os conceitos relativos à eletricidade, pois os equipamentos de medidas eletrônicos passaram a reduzir os erros a eles associados a uma fração mínima quando comparados a equipamentos eletromecânicos. Os microcomputadores passaram a apresentar processamento mais rápido, novas interfaces foram criadas, o conceito de comunicação à distância tornou-se popular, e a eletrônica permitiu reduzir substancialmente o volume físico de aparelhos elétricos, além de aumentar a eficiência dos mesmos.

Porém o desenvolvimento desses equipamentos com tecnologias extremamente econômicas trouxe problemas para o sistema elétrico, pois se baseiam em elementos não lineares em sua construção. Cargas não lineares solicitam correntes distorcidas da fonte na qual são conectadas, e uma vez conectadas à rede elétrica, podem alterar a forma de onda de tensão no ponto de acoplamento comum onde são ligadas várias cargas provenientes de vários consumidores diferentes.

A crescente utilização de equipamentos baseada na eletrônica de potência desperta a importância da relação entre esta área da engenharia elétrica e a qualidade de energia elétrica. Apesar de proporcionar um controle eficiente do fluxo de energia, estas cargas produzem tensão e/ou correntes harmônicas que acarretam aumento das perturbações originadas pela distorção harmônica em sistemas elétricos, resultando no agravamento da qualidade da energia elétrica. Sendo assim, é necessário medir o conteúdo de harmônica do sistema para que se possa determinar uma forma de se mitigar os problemas de distorção harmônica.

Muitos problemas de harmônicas podem ser facilmente resolvidos mudando os equipamentos, instalando filtros, ou limitando alguns passos da compensação do fator de potência. Mas, antes de chegar a uma solução viável se devem identificar plenamente as distorções harmônicas e suas fontes, o qual pode fazer-se com base em modelos de fluxos ou medindo [1].

Pela importância antes referida surge a necessidade de diagnosticar o conteúdo das harmônicas geradas por um grande consumidor industrial e avaliar a possibilidade de correção das distorções harmônicas geradas. Para o qual se conta com o seguinte problema de investigação: como determinar o conteúdo de harmônicas no Sistema Industrial de Sonangol- Namibe, a partir de seu levantamento elétrico? O problema levantado levou a que se formulasse o seguinte objetivo geral: executar um levantamento elétrico no Sistema Industrial de Sonangol- Namibe que contribua a identificar as principais cargas geradoras de harmônicas, as harmônicas que mais afetam ao sistema industrial e, portanto, propor os filtros de harmônicas que permitam eliminá-las. O texto foi organizado de maneira a apresentar inicialmente os principais conceitos relacionados ao assunto tratado. Procurou-se inserir o leitor ao contexto atual, no que diz respeito ao conhecimento gradual dos distúrbios de harmônicas, levando ao ponto da análise harmônica de um sistema utilizando simulação computacional.

MATERIAIS E MÉTODOS

Pela necessidade de conhecer o conteúdo de harmônica no Sistema Industrial de Sonangol Namibe e antes a problemática que não se conta com um analisador de rede para fazer medições reais no secundário do transformador, se realizou um levantamento elétrico do sistema industrial, com o propósito de identificar as principais cargas contaminantes de harmônicas. Se consultou um total de 13 fontes bibliográficas onde foram identificadas as formas de ondas típicas e as principais harmônicas que são geradas por cada uma das cargas geradoras de harmônicas identificadas no levantamento elétrico realizado. Desta forma, com MATLAB simular como ficaria, de modo aproximado, a forma de onda no secundário do transformador e assim identificar as harmônicas que afetam ao Sistema Industrial de Sonangol Namibe.

DISCUSSÃO E RESULTADOS

Os sistemas elétricos contam atualmente com uma grande quantidade de elementos chamados não lineares, os quais geram a partir da forma de onda sinusoidais e com a frequência da rede, outras ondas de frequências diferentes que causam o fenômeno conhecido como harmônicas.

As harmônicas são um fenômeno que produz problemas tanto para os usuários como para a entidade encarregada da prestação do serviço de energia elétrica ocasionando diversos efeitos nocivos nos aparelhos da rede.

Para definir este conceito, é importante definir primeiro a qualidade da onda de tensão a qual deve ter uma amplitude e frequência constantes ao igual que uma forma sinusoidal. A figura 1, mostra a forma da onda sem conteúdo de harmônica, com uma frequência constante de 50 Hz e uma amplitude constante de 1 pu [2].

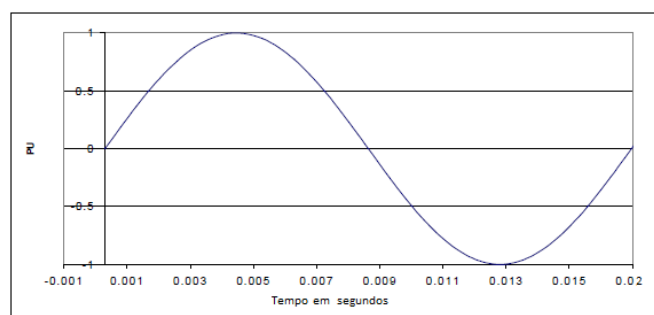


Fig. 1. Onda periódica senoidal sem conteúdo harmônica.

Quando uma onda periódica não tem esta forma senoidal é dito que tem conteúdo harmônico, o qual pode alterar seu valor pico e/ou valor RMS causando alterações na operação normal dos aparelhos que estão sujeitos a esta tensão. A frequência da onda periódica é denominada frequência fundamental e as harmônicas são sinais cuja frequência é um múltiplo inteiro desta frequência. A figura 2, mostra uma onda de tensão com um conteúdo de 30% da 5^a harmônica.

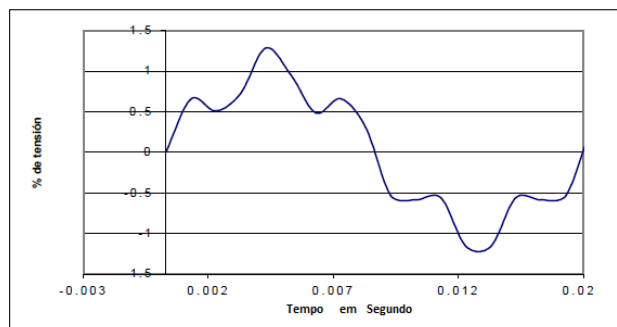


Fig. 2. Onda periódica não senoidal com conteúdo harmônica.

Então, pode ser dito que: uma função periódica não sinusoidal pode ser decomposta na soma de uma função senoidal de frequência fundamental e de outras funções senoidais cujas frequências são múltiplas inteiras da frequência fundamental. Estas funções adicionais são conhecidas como componentes harmônicas ou simplesmente como harmônicas.

As harmônicas são distorções das ondas sinusoidais de tensão e/ou corrente dos sistemas elétricos, devido ao uso de cargas com impedância não linear, a materiais ferromagnéticos, e em geral ao uso de aparelhos que precisam realizar comutações em sua operação normal [3].

FONTES DE HARMÔNICAS

As harmônicas são o resultado de cargas não lineares, as quais diante de um sinal de tipo senoidal apresentam uma resposta não senoidal. As fontes principais de harmônica são:

- **Fornos de arco elétrico:** em geral eles usam eletrodos os quais ao fazerem contacto com o aço produz um arco elétrico de tal magnitude que funde o aço. Por este motivo, os fornos de arco elétrico são cargas que não estão em estado estável.
- **Saturação de Transformadores:** A saturação de transformadores provoca a geração de harmônica, pois se trata de um elemento não linear, provocando que o transformador opere em sua região não linear. Outros modos mais comuns da geração de harmônica no transformador estão no momento da sua energização. Durante este fenómeno transitório da energização, o transformador mostra grande quantidade de harmônicas pares e ímpares e isto pode durar até alguns minutos.
- **Lâmpadas fluorescentes:** O uso de tecnologias novas que abarcam desígnios de lâmpadas fluorescentes e lâmpadas de vapor de metal constituem uns dos sistemas mais eficientes de iluminação. As lâmpadas fluorescentes são cargas não lineares por natureza, então ao aplicar-lhes uma tensão senoidal, produzem uma circulação de correntes não sinusoidais por elas.
- **Fontes controladas para aparelhos eletrônicos,** exemplo: aparelhos de computação e domésticos.
- **Retificadores baseado em díodos ou tirístores** para aparelhos de soldadura, carregadores de baterias, etc.
- **Compensadores estáticos de potência reativa:** os compensadores estáticos usam tirístores para o controle da potência reativa e também para o controle de tensão em redes de transmissão principalmente.
- **Conversores de corrente alternada para corrente contínua (inversores):** os conversores são dispositivos que injetam harmônica ao sistema de corrente alternada devido à operação dos elementos de *switcheo* (tirístores).
- **Máquina de computação:** A máquina de computação, e em geral os aparelhos de oficina trabalha baseado em uma fonte de alimentação a qual é uma ponte retificador do mesmo que possui a característica natural de gerar frequências harmônicas.
- **Fornos de indução:** Este forno consiste em um retificador e inversor, o qual controla a frequência de alimentação de uma bobina. Deste modo a bobina mediante indução faz esquentar as peças metálicas como se eles fossem o núcleo da bobina [4].

SEQUÊNCIA DAS HARMÔNICAS

A sequência seguida pelas harmônicas é importante para analisar seus efeitos, sendo obtidas as conclusões seguintes, em sistemas trifásicos as harmônicas de ordem $3n$ de corrente só podem propagar-se quando é possível um retorno por neutro, já que estão em fase entre si, e, por conseguinte, as harmônicas de ordem $3n$ são de sequência zero.

As harmônicas, de sequência positiva, de ordem $(3n + 1)$ em tensão geram nos motores um campo giratório no mesmo sentido da componente fundamental. As harmônicas, de sequência negativa, de ordem $(3n - 1)$ em tensão geram nos motores um campo giratório em sentido contrário ao gerado pela componente fundamental [5].

Para as harmônicas de ordem k sua defasagem respeito à fundamental é igual para as três fases, isto é indispensável para que as formas de ondas sejam iguais. Um período da componente fundamental é igual a k períodos da harmônica de ordem k , o qual permite expressar em graus da harmônica k as defasagens em função dos graus da componente fundamental utilizando a equação (1), onde φ_k : ângulo de defasagem em graus da harmônica k , \varnothing : ângulo de defasagem em graus da componente fundamental [6].

$$\varphi_k = k\varnothing \quad (1)$$

EFEITOS DAS HARMÔNICAS

O efeito de distorção da tensão pode ser dividido de modo geral em três categorias: esforços no isolamento devido aos efeitos da tensão, esforços térmicos devido ao fluxo de corrente e transtornos na carga.

Efeitos nos cabos. Em corrente alternada, a medida que aumenta a frequência, a não uniformidade da distribuição de corrente é mais marcada. Em condutores circulares a densidade de corrente aumenta do centro à superfície. As capas externas são menos envolvidas pelo fluxo magnético que as internas, isto significa que com corrente alternada é induzido mais tensão longitudinalmente no interior do condutor que na superfície, então a densidade de corrente vai em aumento do interior para as capas externas do condutor, este fenômeno é denominado efeito *skin* (pele).

Efeitos nos cabos de neutro. Em sistemas trifásicos equilibrados sem conteúdo harmônica, as correntes pelas linhas são defasadas 120°, sendo canceladas umas com outras resultando tudo em uma corrente muito pequena. Não obstante quando há distorção em qualquer das fases, as harmônicas das correntes aumentam e o efeito de cancelamento é reduzido. O resultado é uma corrente de neutro que é significativamente maior que o planeado. As harmônicas múltiplos de três são somados no neutro e podem causar um sobreaquecimento perigoso. Também um valor de corrente de neutro maior ao normal causará quedas de tensão entre neutro e terra.

Efeitos nos transformadores. A maioria dos transformadores são desenhados para operar com corrente alternada a uma frequência fundamental (50 ou 60 Hz), o que implica que operando em condições de carga nominal e com uma temperatura não maior à temperatura ambiente especificada, o transformador deve ser capaz de dissipar o calor produzido por suas perdas sem sobreaquecer-se nem se deteriorar seu período de vida. As perdas nos transformadores consistem em perdas sem carga ou de núcleo e perdas com carga, que incluem as perdas I^2R , perdas por correntes de Foucault e perdas adicionais no tanque ou outras partes de ferro. De um modo individual, o efeito da harmônica em estas perdas é explicado a continuação:

- **Perdas sem carga ou de núcleo:** produzidas por a tensão de excitação no núcleo. A forma de onda de tensão no primário é considerada sinusoidal independentemente da corrente de carga, pelo que não é considerado que aumentam para correntes de carga não sinusoidais. Apesar de que a corrente de magnetização consiste de harmônicas, estas são muito pequenas comparados com as da corrente de carga, pelo que seus efeitos nas perdas totais são mínimos.
- **Perdas I^2R :** se a corrente de carga contém harmônica, então estas perdas também aumentarão por efeito *skin*
- **Perdas por correntes de Foucault:** estas perdas á frequência fundamental são proporcionais ao quadrado da corrente de carga e ao quadrado da frequência, razão pela qual possa ter um aumento excessivo destas nos enrolados que conduzem correntes de carga não sinusoidal e então também em sua temperatura.
- **Perdas adicionais:** estas perdas aumentam a temperatura nas partes estruturais do transformador, e dependendo do tipo de transformador contribuirá ou não na temperatura mais quente do bobinado. São consideradas que variam com o quadrado da corrente e a frequência.

Efeitos nos motores. Os efeitos maiores que tem as harmônicas de tensão nas máquinas rotativas síncronas e nos motores de indução são o incremento de calor devido às perdas no ferro e no cobre a altas frequências, por tanto, as harmônicas afetarão a eficiência da máquina como o torque desenvolvido.

As harmônicas de corrente em motores podem aumentar a emissão de barulhos audíveis comparado com a excitação sinusoidal. Também podem produzir distribuições de fluxo resultante na abertura (*gap*) de ar o qual pode causar ou aumentar o fenômeno chamado *cogging* (a negativa ao arranque suave) ou a chamada *crawling* (alto deslizamento) nos motores de indução. Devido que as correntes harmônicas se combinam e afetam o fluxo giratório da máquina é necessária mais corrente para produzir o mesmo trabalho, então diminui a eficiência.

Também a natureza sequencial (correntes harmônicas de sequência negativa) de algumas correntes harmônicas nos sistemas trifásicos produz pares antagônicos no rotor. Quando se trabalha com motores alimentados com tensões não sinusoidais, deve ter-se em conta que não podem operar à capacidade nominal.

Efeitos em outros aparelhos. Os aparelhos eletrônicos sensíveis são suscetíveis a operação incorreta por causa das harmônicas. Em alguns casos estes aparelhos dependem da determinação precisa da intersecção por zero da tensão ou outros aspetos da forma de onda do mesmo, pelo que em condições de distorção pode afetar sua operação apropriada. A distorção da fonte de alimentação pode perturbar a operação de aparelhos sensíveis como: dispositivos de regulação de temperatura, material de computador, dispositivos de controle e monitorização (relés de proteção).

No que respeitam aos aparelhos de medição e instrumentação, estes são afetados pelas componentes harmônicas, principalmente se são tidas condições de ressonância que causem altas tensões harmônicas nos circuitos. Para o caso de medições podem haver erros positivos ou negativos, dependendo do tipo de medidor elétrico e das harmônicas envolvidas [7].

IMPACTO ECONÓMICO

Perdas de energia. O efeito Joule, induzido pelas correntes harmónicas nos condutores e aparelhos, causas perdas de energia adicionais.

Custos adicionais de potência contratada. A presença de correntes harmónicas provoca que seja incrementado o nível de potência contratada e, por conseguinte, o custo da subscrição.

Sobre dimensionado dos aparelhos. Ao ser exposto às harmónicas as fontes de energia (geradores e transformadores principalmente) implica o seu sobre dimensionado. Os condutores devem ser dimensionados tendo em conta a circulação das correntes harmónicas. Devido ao facto que as frequências das harmónicas são maiores que a da fundamental, as impedâncias que se surgem para estas correntes são maiores. Para evitar perdas excessivas devidas ao efeito Joule, é necessário sobre dimensionar os condutores. Também aumentam muito significativamente as perdas no ferro isto faz que devam sobre dimensionarem-se os kVA nominais de forma notável. É considerado que o aquecimento dos transformadores devido às harmónicas é diretamente proporcional ao quadrado da harmónica multiplicado pelas perdas que esta produz.

Erro de medição. A presença de harmónicas afeta severamente a leitura dos instrumentos, tais como instrumentos de agulha de tipo electro dinamómetro, instrumentos digitais com retificadores à entrada e instrumentos de verdadeiro valor efetivo, o que implica tomar em conta diversas precauções ao realizar uma leitura [8].

ÍNDICES PARA A MEDIÇÃO DE HARMÓNICAS

Para analisar os efeitos acontecidos pelas harmónicas são geralmente usados alguns índices que quantificam o nível de contaminação harmónica das ondas. Para a análise os índices são comparados com limites de valores dados pelas normas ou com valores que podem suportar os aparelhos. A CEI (Comissão Eletrotécnica Internacional) e CENELEC (Comité Europeu de Normalização Eletrotécnica) hão estabelecido normas que limitam perturbações de baixa frequência em redes industriais e domésticas como as normas IEC 61000 e EM 61000. Os parâmetros manejados pela norma para estabelecer os limites da perturbação por harmónica são [9]:

- **Ordem de uma harmónica (n):** Relação entre a frequência do harmónico (f_n) e a frequência fundamental (f_1), equação (2).

$$n = \frac{f_n}{f_1} \quad (2)$$

- **Taxa de distorção individual (% U_n ou % I_n):** Relação entre o valor eficaz da tensão ou corrente harmónica (U_n ou I_n) e o valor eficaz da correspondente componente fundamental, equação (3).

$$\%U_n = \frac{U_n}{U_1} \cdot 100 \quad \text{ou} \quad \%I_n = \frac{I_n}{I_1} \cdot 100 \quad (3)$$

- **Distorção harmónica total (DHT_U ou DHT_I):** Relação entre o valor eficaz das componentes harmónicas de tensão ou corrente e o correspondente valor fundamental, equação (4).

$$DHT_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} \cdot 100 \quad \text{ou} \quad DHT_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \cdot 100 \quad (4)$$

NORMATIVAS

O principal objetivo das normas é prover uma guia comum a todas as partes envolvidas para trabalhar juntas com o propósito de assegurar a compatibilidade entre os aparelhos de uso final e os sistemas de distribuição de energia eléctrica. As principais normas que governam os limites de harmónicas são:

- **IEEE 519-1992:** (*Recommended Practices for Harmonics Control in Electrical Power Systems*), consiste numa aproximação combinada entre a companhia eléctrica e o cliente para limitar o impacto das cargas não lineares. Esta recomendação é um compromisso entre ambas partes para a limitação das harmónicas. Esta norma representa um consentimento geral de regras e práticas recomendado pelos distribuidores e os clientes num esforço por minimizar e controlar o impacto de harmónicas geradas por cargas não lineares.
- **IEC 61000:** A Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC), atualmente com escritório central em Genebra, Suíça, definiu uma categoria de normas de compatibilidade eletromagnética que trata problemas da qualidade da energia eléctrica.
 - **IEC 61000-2-2:** define níveis de compatibilidade para perturbações conduzidas de baixa frequência e sinalizando em redes de fornecimento eléctrico de baixa tensão como sistemas monofásicos e trifásicos para 50 ou 60 Hz com tensões nominais de até 240 e 415 V, respetivamente.
 - **IEC 61000-3-2 e IEC 61000-3-4:** definem limites de emissão de correntes harmónicas para aparelhos de visualização de correntes de entrada de até 16 A e maior a 16 A por fase, respetivamente.

- **IEC 61000-3-6:** especifica limites de emissão de corrente harmônica para aparelhos conectados a sistemas de Meia Tensão (MT) e Alta Tensão (AT). No conteúdo da norma MT e AT é referido a tensões entre 1 e 35 kV e entre 35 e 230 kV, respetivamente.
- **NRS 048-2:** é a norma Sul africana para distribuição com qualidade da energia elétrica e foi implementada no dia 1 de julho de 1997. Esta norma exige aos provedores de eletricidade medir e informar sua qualidade de fornecimento ao Regulador Nacional de Eletricidade.
- **EN50160:** é uma norma europeia que trata os requerimentos de qualidade do fornecimento para provedores daquele continente. A norma define os níveis específicos das tensões características que devem ser entregues pelos distribuidores de energia elétrica e métodos para avaliar a conformidade do fornecimento. Os limites de tensão harmônica são determinados em percentagem da tensão fundamental.

ANÁLISE DAS DISTORÇÕES HARMÓNICAS NO SISTEMA INDUSTRIAL DE SONANGOL- NAMIBE

A planta industrial em análise, está localizada na província do Namibe, cidade do Namibe bairro Sacomar, Zona Industrial. A empresa tem como missão de prestar serviço logístico de derivados do petróleo e associados, visando satisfazer com eficiência as necessidades do mercado, com uma visão competitiva, infraestrutura adequada e uma manutenção da reserva estratégica. Presta serviço de armazenamento e transporte de derivados de petróleo bruto (gasóleo gasolina e jet) e gás natural. A empresa Sonangol-Namibe está subdividida em Sonangol-logística e Sonangol-gás. A Sonangol-Logística presta serviço de armazenamento e transporte de derivados de petróleo bruto (gasóleo gasolina e jet). A Sonangol-gás presta serviço de armazenamento e transporte do gás natural.

A figura 3, apresenta o diagrama unifilar geral simplificado do sistema elétrico da empresa, mostrando as cargas de interesse para a análise de harmônicas e as principais características do complexo elétrico analisado. A alimentação é feita por uma linha de transmissão em 15 kV. O fornecimento da energia elétrica é de responsabilidade da Empresa Nacional de Distribuição de Eletricidade.

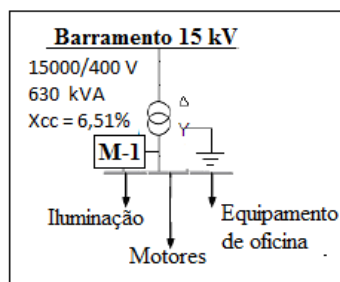


Fig. 3. Diagrama unifilar geral simplificado.

Como já foi dito, para fazer o estudo não se contou com um analisador de rede, contudo foi feito um levantamento elétrico para determinar, a partir da caracterização das cargas, as harmônicas que afetam no sistema industrial. As principais cargas encontradas na instalação são: lâmpadas fluorescentes, lâmpadas de vapor de mercúrio, lâmpadas de vapor de sódio, carga motora (motores assíncronos em sua maioria) e equipamento de oficina principalmente computadores. Podendo-se obter as seguintes informações:

- Fator de potência (fp): 0,75
- Potência total (kW): 243 kW
- Corrente total nominal: 491,4 A
- Tensão: 220 V

É importante destacar que todos os resultados mostrados são calculados a partir dos dados de chapa dos equipamentos. Como é conhecido, todas as cargas não operam simultaneamente, pelo que é necessário empregar o fator de demanda, que indica o grau á qual a carga total instalada opera simultaneamente. O fator de demanda é igual á relação que existe entre a carga máxima e a carga instalada, equação (5):

$$F_D = \frac{\text{Carga máxima}}{\text{Carga instalada}} \leq 1 \quad (5)$$

Pelas características do sistema industrial o F_D é igual a 0,72 [6].

Em entrevista realizada com os técnicos do sistema industrial foi obtido que nos circuitos a 220 V o fio utilizado é de cobre 10 AWG, e de acordo com [10], a resistência a corrente alternada e a reactância indutiva são 3,94 Ω/km e 0,164 Ω/km respetivamente, valores que serão utilizados para a simulação.

Análise das cargas contaminantes de harmônicas no Sistema Industrial em estudo

Do levantamento elétrico feito foram consideradas as seguintes cargas que mais contribuem à contaminação de harmônicas na rede de distribuição:

- Lâmpadas fluorescentes com balastro eletrônico.
- Lâmpadas de vapor de mercúrio.
- Lâmpadas de vapor de sódio.
- Computadores.

A tabela 1, mostra as cargas que contribuem á contaminação de harmônicas no sistema industrial, tem que ser esclarecido que o fator de potência foi obtido pondo a tensão na referência.

Tabela 1. Exemplo do levantamento elétrico do Sistema Industrial de Sonangol.								
Aparelho	Quantidade	Potência Nominal	Potência Total (W)	Tensão (V)	Fator de potência	Corrente Total (A)	Fator de demanda	Corrente (A)
Lâmpadas Fluorescentes	340	40 W	13600	220∠0°	0,6	103∠53,13°	0,72	74,2∠53,13°
Lâmpadas de vapor de mercúrio	6	80 W	480	220∠0°	0,9	2,42∠25,84°	0,72	1,74∠25,84°
Lâmpadas de vapor de sódio	53	70 W	3710	220∠0°	0,9	18,73∠25,84°	0,72	13,5∠25,84°
Computador	14	300 W	4 200	220∠0°	0,7	27,27∠45,57°	0,72	19,6∠45,57°

Então é necessário fazer uma caracterização de cada uma destas cargas em quanto a espectro de harmônicas e forma de onda, para detetar qual/quais, é/são, a/as harmônica(s) que mais afeita(m) a rede de distribuição do sistema industrial.

Lâmpadas Fluorescentes com balastro eletrônico

Os reatores eletrônicos posem a função de elevar a tensão durante a ignição e reduzir a corrente durante o funcionamento da lâmpada. No entanto, consistem em um circuito de retificação e um inversor oscilante. A figura 4 a), mostra a forma de onda de uma lâmpada fluorescente com balastro eletrônico e a figura 4 b), mostra seu espectro de harmônica [11].

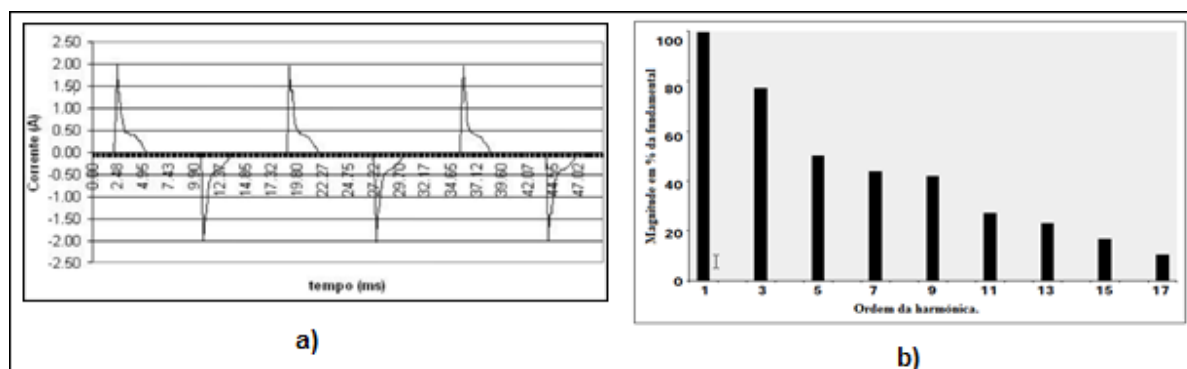


Fig. 4. Forma de onda de corrente de lâmpada fluorescente com reator eletrônico e espectro harmônica de uma lâmpada fluorescente com reator eletrônico.

Lâmpadas a Vapor de Mercúrio e de Vapor de Sódio

As lâmpadas de vapor de mercúrio são compostas por um tubo de descarga feito de quartzo para suportar altas temperaturas. Em cada extremidade há um eléctrodo principal, de tungsténio recoberto com material emissor de electrões. As lâmpadas de vapor de sódio possuem um tubo de descarga de óxido de alumínio, encapsulado por um bolbo oval de vidro. O tubo de descarga é preenchido por uma amálgama de sódio-mercúrio, e uma mistura gasosa de neónio e agónio. A figura 5 a), mostra a forma de onda da lâmpada de mercúrio, a figura 5 b), mostra a forma de onda da lâmpada de sódio e a figura 6, mostra o espectro harmônica de duas lâmpadas [12].

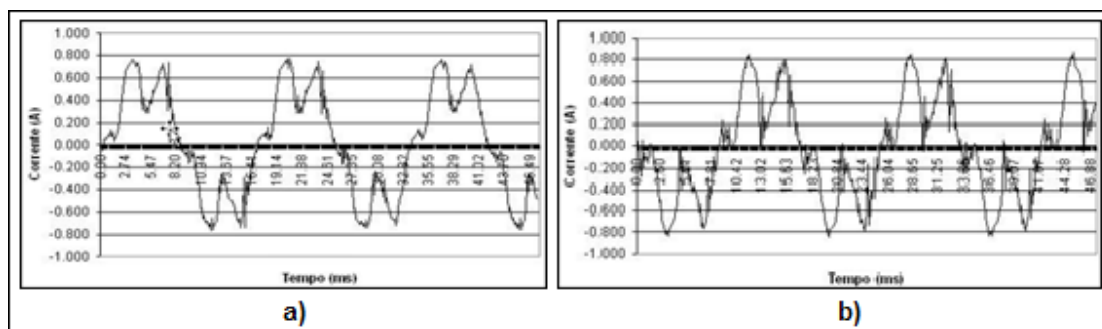


Fig. 5. Forma de onda de corrente de lâmpada a vapor de mercúrio e forma de onda de corrente de lâmpada a vapor de sódio.

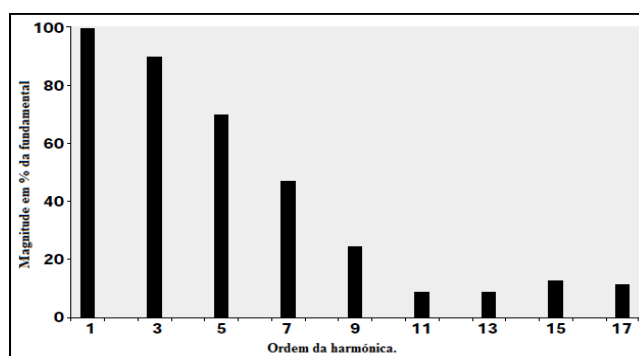


Fig. 6. Espectro harmônica de uma lâmpada a vapor de sódio e a vapor de mercúrio. Computadores.

Na figura 7, mostra a forma de onda e o espectro harmônica da fonte de um computador [13].

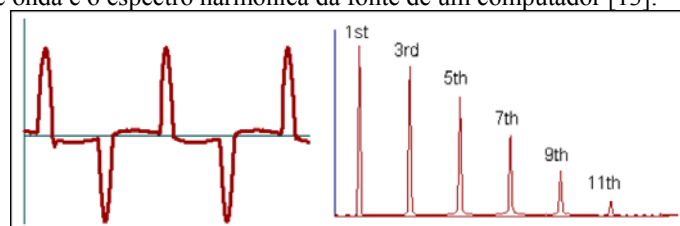


Fig. 7. Forma de onda e o espectro harmônica da fonte dum computador.

Simulação do Sistema Industrial

Utilizando as técnicas de superposição e as potencialidades do software MATLAB se pretende simular, de forma aproximada, como ficaria a forma de onda de corrente e tensão no secundário do transformador (ponto M-1 da figura 3) do sistema industrial, mostradas na figura 8. Antes da simulação é necessário identificar quais são as principais harmônicas que afetam ao sistema industrial, as quais podem ser obtidas analisando as figuras 4,5,6 e 7. O resultado das análises se mostra na tabela 2.

Tabela 2. Valores de distorção harmônica.					
Aparelho	Correntes de harmônicas (A)				
	componente fundamental	ordem 3	ordem 5	ordem 7	ordem 9
Lâmpadas Fluorescentes	74,2 \angle 53,13°	59,4 \angle 159,4°	36,1 \angle 265,7°	33,4 \angle 372°	29 \angle 478,2°
Lâmpadas de vapor de mercúrio	1,74 \angle 25,84°	1,57 \angle 77,52°	1,22 \angle 129,2°	0,87 \angle 181°	0,44 \angle 233°
Lâmpadas de vapor de sódio	13,5 \angle 25,84°	12,2 \angle 77,52°	9,45 \angle 129,2°	6,75 \angle 181°	3,4 \angle 233°
Computadores	19,6 \angle 45,57°	17,81 \angle 137°	9,8 \angle 228°	8,9 \angle 319°	5,3 \angle 410°
Total		80,44\angle145°	38,5\angle-114,6°	31,78\angle1,75°	29,4\angle115,4°

De acordo com os valores das harmônicas mostradas na tabela 2, se podem obter as seguintes conclusões:

- A harmônica que mais afeta ao sistema industrial é harmônica de ordem 3.

- O DHT pode ser calculado como é mostrado na equação (6):

$$DHT = \frac{\sqrt{80,44^2 + 38,5^2 + 31,78^2 + 29,4^2}}{353,8} \cdot 100 = 28 \% \quad (6)$$

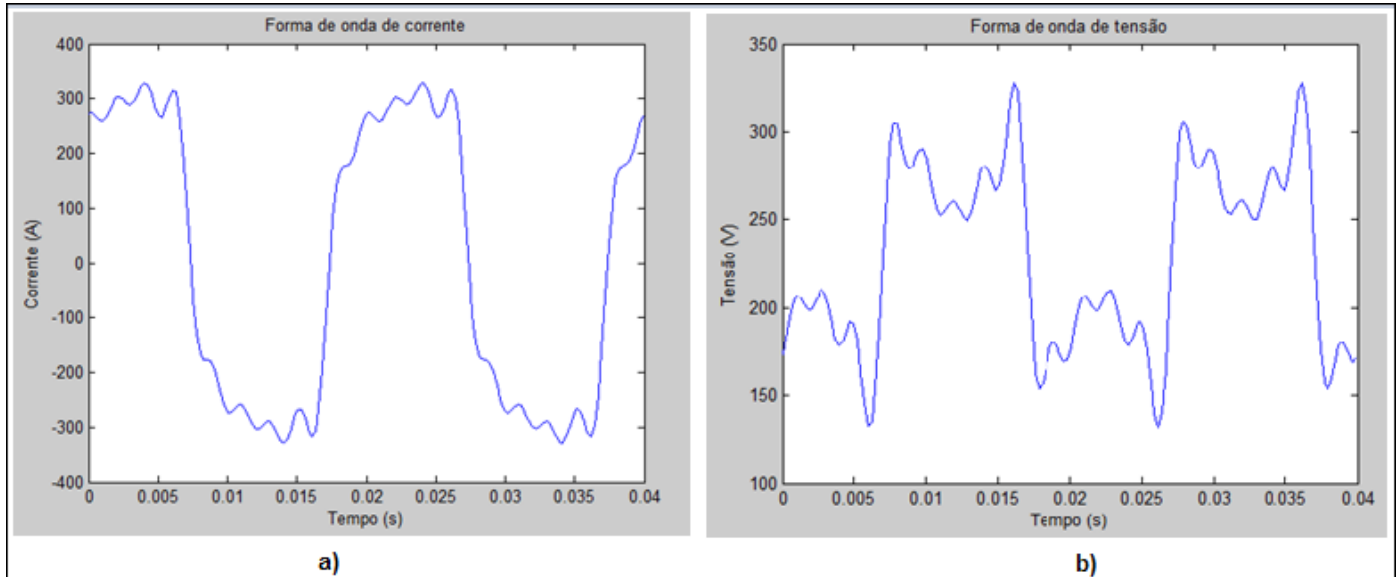


Fig. 8. Forma de onda de corrente e tensão que tenderia de forma geral o secundário do transformador do sistema industrial de Sonangol.

CÁLCULO DO FILTRO PROPOSTO

Para calcular o filtro foi tido em conta na análise de melhorar o fator de potência e desta forma utilizar este valor de capacitância para o cálculo do filtro passivo. O procedimento é descrito a seguir:

Passos:

Análise do fator de potência da instalação:

A figura 9, mostra o procedimento para melhorar o fator de potência do sistema industrial a 0,95, nota-se que a potência reativa do banco de condensadores a conectar é igual a 97 kVAr.

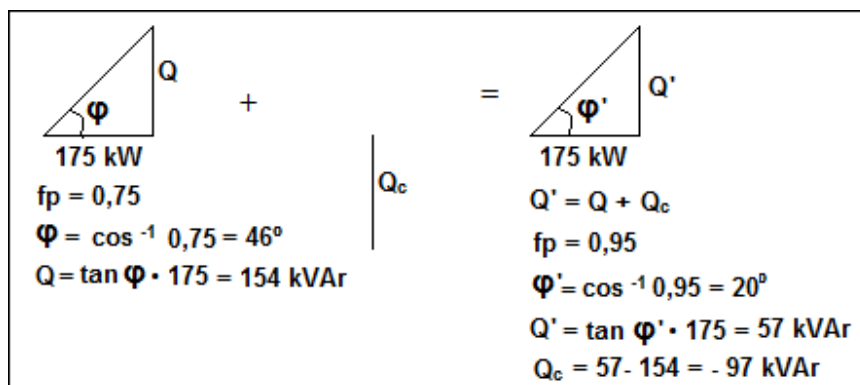


Fig. 9. Triângulo de potência para melhorar o fator de potência da instalação.
Cálculo da reactância capacitiva.

Para calcular o valor da reactância capacitiva que será utilizada no cálculo do filtro, se partirá do valor da potência reativa necessária a instalar na indústria para melhorar o fator de potência como:

$$Q_c = \frac{U^2}{X_c} \text{ isolando } X_c, \quad X_c = \frac{U^2}{Q_c} = \frac{(230)^2}{97000} = 0,55\Omega \text{ então } C = \frac{1}{X_c \cdot \omega} = \frac{1}{0,55 \cdot 314} = 6 \text{ mF}$$

Seleção da harmónica que se deseja eliminar e da frequência de ressonância

Para seleccionar a harmónica que se deseja eliminar foi tido em conta o valor da amplitude da harmónica, sendo a harmónica de ordem 3 a de maior amplitude, um 23 % da componente fundamental. Como identificação desta harmónica se pode obter a frequência ao qual o filtro entrará em ressonância e será filtrada esta componente. A frequência desta harmónica é: $\omega_0 = 942 \text{ rad/s}$.

Cálculo do filtro

A frequência de ressonância é: $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ se é isolada a indutância é obtida como $L = \frac{1}{\omega_0^2 C} = 0,2 \text{ mH}$

O objetivo de um filtro RLC série é criar um caminho de baixa impedância para a harmónica que se deseja eliminar, já foi calculada L e C, então é preciso seleccionar uma resistência suficientemente pequena que garante o caminho de baixa impedância, foi seleccionada $R = 10 \text{ m}\Omega$. A figura 10, mostra os filtros série e paralelo resultante da metodologia aplicada.

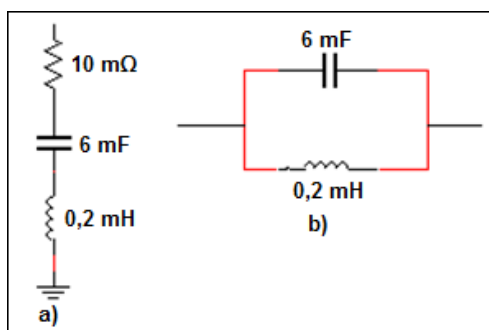


Fig. 10. Filtro série a) e paralelo b) para eliminar harmónica de ordem 3.

CONCLUSÕES

Neste artigo foram apresentados os principais indicadores utilizados para estudos sobre distorções harmónicas. Também foram expostas as características harmónicas dos principais equipamentos geradores de harmónicas presentes no sistema eléctrico e seus efeitos. São identificadas algumas referências sobre o estudo de harmónicas destacando-se a norma IEEE 519-1992 o conjunto de normas IEC série 61000, NRS 048-2 e EN50160.

As informações apresentadas neste trabalho possibilitam que seja avaliada de forma criteriosa a injeção de harmónicas pela rede eléctrica deste consumidor.

Também se apresentou uma avaliação completa da situação atual de um grande consumidor industrial como é Sonangol- Namibe com relação às Distorções Harmónicas Total de Corrente para o qual se realizou um levantamento eléctrico do sistema e a partir do qual:

- Se calculou a potência total instalada, a corrente total que circula pela instalação e o fator de potência supondo a tensão na referencia.
- Se calculou o DHT do sistema industrial que resultou igual á 28 %, o qual se desconhecia até o momento, sendo superior ao estabelecido pelas normas.
- Propõe- se a melhoria do fator de potência.
- Propõe-se a metodologia para o cálculo de um filtro passivo, eliminando-se a harmónica de ordem 3 o qual melhora o DHT a 16,4 % o qual é aceite pelas normas.

Além de todo o mencionado, há que destacar que tudo o trabalho foi realizado a partir do levantamento eléctrico do sistema industrial, pois não se conta com um analisador de rede, e utilizando o software MATLAB foram modeladas as formas de ondas de corrente e tensão, de forma aproximada, que teria o sistema industrial com o qual não se perde na generalidade. Também o artigo serve de guia para os técnicos da indústria, recomendando-se que antes de pôr em prática o filtro e a melhoria do fator de potência aqui proposto, deve-se fazer algumas medições para assim avaliar a metodologia proposta.

REFERÊNCIAS

- [1] **Arcila, Daniel José.** Armónicos en sistemas eléctricos. [Online] 2010. [Citação: 3 de Março de 2017.] <http://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/1/349/352/354/1891.pdf> ISSN: 0122-1701 13.
- [2] **Carvalho, Ricardo Silva.** Análise harmónica em redes de distribuição de energia elétrica. *Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Elétrica e Computação.* [Online] 2013. [Citação: 23 de Outubro de 2016.] http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce-22012014-103159/publico/Carvalho_Ricardo_Silva.pdf CEP 13566-590.
- [3] **FLUKE.** Troubleshooting power harmonics. *www.fluke.com/library.* [Online] 2012. [Citação: 23 de Outubro de 2016.] http://support.fluke.com/find-sales/Download/Asset/1260362_6001_ENG_K_W.PDF. CEP 06400.
- [4] **Freitas, Sara Catarina Pinto.** Analisador de qualidade de energia eléctrica embebido na instalação eléctrica. *Instituto Superior de Engenharia do Porto.* [Online] 2013. [Citação: 23 de Outubro de 2016.] <http://hdl.handle.net/10400.22/6575>. ISSN: 1647-5496.
- [5] **Pereira, José Rodrigo e Carvalho, José António Beleza.** Poluição harmónica em instalações eléctricas industriais. [Online] 2014. [Citação: 23 de Outubro de 2016.] <http://hdl.handle.net/10400.22/6489>. ISSN: 1647-5496.
- [6] **Castaño, Samuel Ramirez.** Redes de Distribución de Energía, Universidad Nacional de Colombia,. [Online] 2004. [Citação: 1 de Março de 2017.] http://www.bdigital.unal.edu.co/3393/1/958-9322-86-7_Parte1.pdf. Tercera Edición, ISBN: 958-9322-86-7.
- [7] **Frigo, Murilo Miceno.** Impacto da microgeração da energia elétrica em sistemas de distribuição de baixa tensão. *Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Faculdade de Engenharia, Brasil.* [Online] 2013. [Citação: 24 de Outubro de 2016.] <http://repositorio.cbc.ufms.br:8080/jspui/bitstream/123456789/1931/1/FRIGO.pdf> CEP 79070-900.
- [8] **Bagheri, Pooya.** Methods to Mitigate Harmonics in Residential Power Distribution Systems. *University of Alberta, Department of Electrical & Computer Engineering, Edmonton.* [Online] 2013. [Citação: 24 de Outubro de 2016.] https://era.library.ualberta.ca/files/hq37vp93p/Bagheri_Pooya_Spring2013.pdf. ISSN: 1925-8356.
- [9] **Wang, Hui.** Harmonic impact of modern residential loads on distribution power system and mitigation solutions. *University of Alberta, Department of Electrical and Computer Engineering, Edmonton.* [Online] 2011. [Citação: 24 de Outubro de 2016.] <https://era.library.ualberta.ca/files/kk91fk90r#.WA6Gr6LYHIU>. ISSN: 1925-8356.
- [10] **CENTELSA.** Cables de Energía y Telecomunicaciones S.A. *Boletín técnico: Regulación de Tensión en Instalaciones Eléctricas.* [Online] Março de 2005. [Citação: 1 de Março de 2016.] <http://www.centelsa.com.co/archivos/3d6c0e37.pdf>. ISSN: 0212-033X.
- [11] **Pires, Igor Amariz.** Caracterização de harmônicos causados por equipamentos eletro-eletrônicos residenciais e comerciais no sistema de distribuição de energia elétrica. *Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.* [Online] 2006. [Citação: 25 de Outubro de 2016.] <http://www.ppgee.ufmg.br/documentos/Defesas/606/versaoFinalIgor.pdf>. ISSN 1982-6621.
- [12] —. Conceitos iniciais: qualidade de energia e harmônicos. [Online] Janeiro de 2010. [Citação: 25 de Outubro de 2016.] http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce-22012014-103159/publico/Carvalho_Ricardo_Silva.pdf. ISSN 1678-3867..
- [13] **Barbosa, Marcelo A.** Efeito de harmônicas nos sistemas elétricos industriais: casos documentados. [Online] 2007. [Citação: 25 de Outubro de 2016.] <http://www.mfap.com.br/pesquisa/arquivos/20090331165111-GCQ%20-%2027.pdf> CEP 35400-000.