

## Análise de desempenho da geração Fotovoltaica e Diesel em áreas remotas

Paulo Henrique Alves da Silva e Silva \*  
Marcelo E. de Oliveira \* Marcos A. A. de Freitas \*  
Matheus B.S. Pinto \* Josemar A. S. Junior \*

\* Instituto Federal de Goiás, GO, (e-mail: paulo.ifg21@gmail.com).

**Abstract:** Electricity supply in remote areas is one of the problems facing the energy sectors. Given this scenario, diesel generation has been the escape valve for accessing electricity to consumers, where the transmission and distribution capacity of energy is hampered by location. Lower installation costs of diversified photovoltaic generation or the current scenario of generation profile in villages and places disconnected from the National Energy System (NES), enabling advanced and / or hybrid systems. For these consumptions, power quality becomes essential due to the use of motors, irrigation systems and automation in farms or villages. Thus, this paper presents a performance analysis for display and joint operation (hybrid) features, observing the harmful distortion levels for voltage and current in each scenario.

**Resumo:** O fornecimento de energia elétrica em áreas remotas representa um dos problemas enfrentados pelos setores de energia. Diante desse cenário, a geração diesel tem sido válvula de escape para acesso a energia elétrica para consumidores localizados onde a capacidade de transmissão e distribuição de energia são dificultados pela localização. O barateamento dos preços de instalação da geração fotovoltaica diversificam o atual cenário e perfil de geração elétrica em aldeias e lugares desconectados do Sistema Interligado Nacional (SIN) de energia, possibilitando sistemas isolados e/ou híbridos. Para estes consumidores a qualidade da energia torna-se essencial devido a utilização de motores, sistemas de irrigação e automação em fazendas ou aldeias. Dessa forma, este trabalho apresenta análise de desempenho para ambas gerações e operando em conjunto (híbrida), observando os níveis de distorção harmônica para tensão e corrente em cada cenário.

*Keywords:* Diesel generation; Photovoltaic generation; Areas of difficult access.

*Palavras-chaves:* Geração Diesel; Geração fotovoltaica; Áreas de difícil acesso.

### 1. INTRODUÇÃO

A democratização ao acesso a energia elétrica tem se diversificado nas últimas décadas. O incremento de novas tecnologias modificam, gradativamente, a forma de produzir energia. Usinas solares Fotovoltaicas, termelétricas, nucleares e eólicas são exemplos da diversificação da matriz energética no contexto atual. No entanto, regiões de difícil acesso como aldeias ou fazendas experimentam a inexistência de sistemas elétricos interligados a rede nacional. O acesso, desconhecimento geográfico e fatores econômicos desfavorecem a instalação de sistemas de transmissão e distribuição nestas localidades remotas. As medidas para esta problemática são instalação de sistemas de geração isolados da rede, com apoio de combustíveis em geradores a Diesel e aproveitamento da energia solar para geração de energia elétrica. Os sistemas isolados com auxílio de banco de baterias têm crescido em escala mundial, sobretudo, sistemas de geração mista em que diferentes fontes geradoras operam em conjunto mesmo desconectados da rede interligada nacional, estes sistemas são denominados Híbridos.

Países como Mali, Senegal, Tanzânia e Rwanda recebem papel de destaque no contexto de geração Híbrida em sis-

temas isolados. Nestes países, aldeias de difícil acesso têm avanço em sistemas isolados através de incentivo econômico privado e governamental PHUANPORNPIKAK and KUMAR (2007). Apesar da recorrência a sistemas Híbridos baseados em Diesel e outras fontes renováveis como Solar e Eólica têm sido problematizada pela emissão de gases e preço médio do combustível para o primeiro tipo de geração. Além disso, as fontes renováveis mencionadas dependem de fatores naturais para operação como irradiação solar e vento.

Nestas áreas remotas as cargas são predominantemente indutivas como maquinários agrícolas, bombas industriais e circuitos de iluminação. O fornecimento da energia demandada passa por sistemas de controle e circuitos de potência como inversores de frequência. Estes são responsáveis pela inserção de componentes harmônicas no sinal produzido, tornando as cargas suscetíveis a surtos, sobreaquecimento e aumento de perdas elétricas em conversores de potência ?. Dessa forma, este trabalho apresenta um estudo sobre a geração de energia Diesel e Fotovoltaica operando individualmente e em conjunto. O desempenho na produção de potência e qualidade do sinal fornecido são analisados. Este trabalho, portanto, está organizado como segue: Sessão 2 formula o problema envolvido no

sistema elétrico de potência e a relação com fornecimento de energia em áreas de difícil acesso; Sessão 3 apresenta as fontes geradoras, estrutura de simulação e desempenho; Sessão 4 apresenta a questão de qualidade energética e a taxa de distorção harmônica envolvida nestes sistemas de geração; Sessão 5 aborda e discute os resultados obtido e Sessão 6 tira conclusões sobre o trabalho e considerações são realizadas.

## 2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A transmissão e distribuição de energia elétrica em áreas rurais de difícil acesso é tema debate aos setores de energia. Habitantes destas áreas remotas sofrem com o desabastecimento energético, pois a implantação de estruturas de distribuição e conversão de energia são inviáveis financeiramente, tornando sistemas agrícolas e criação de animais menos eficientes devido a impossibilidade da automatização de processos. Nestas regiões remotas outras questões ligadas as dificuldades de instalação de linhas de transmissão são tipos de relevo, condições climáticas e desconhecimento geográfico da região. A Figura 1 apresenta o perfil de interconexão energética do Brasil e as áreas desconectadas ao SIN.

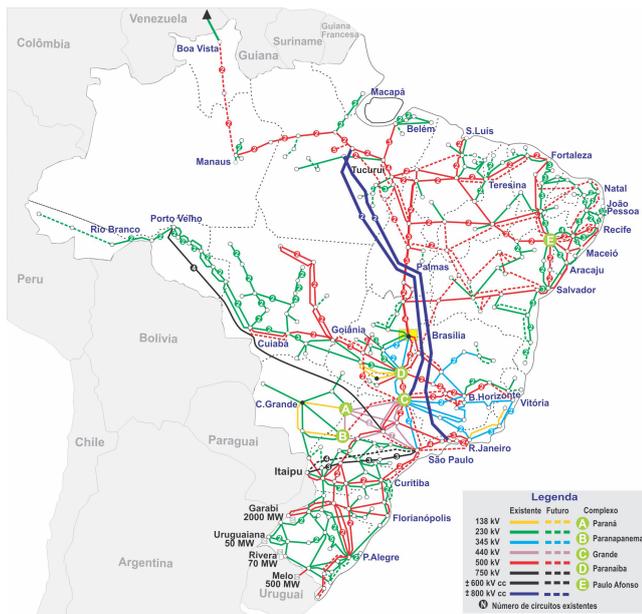


Figura 1. Sistema Interligado Nacional (ONS, 2017).

Regiões como Manaus, Pará e parte do Mato Grosso do Sul são regiões que experimentam a ausência de energia elétrica por parte das concessionárias de energia. Nessas regiões, a geração a Diesel é predominante em aldeias e fazenda a medida que usinas de geração fotovoltaica crescem em ritmo acelerado. Requer-se, nestas aplicações, qualidade de energia ofertada as cargas, a fim de evitar sobreaquecimentos em máquinas agrícolas ou sistemas automatizados, aumento de perdas elétricas e redução da vida útil das cargas que são causadas pela presença de componentes harmônicas. Dessa forma, o estudo da qualidade energética para estes perfis de geração são justificados pela durabilidade e operação das cargas.

## 3. DESCRIÇÃO DAS FONTES GERADORAS

A geração de energia em localizações remotas são integralmente desconectadas da rede, estes sistemas isolados do SIN são denominados *off-grid*. Em virtude disso, as usinas geradoras de energia recorrem a utilização de banco de baterias para armazenamento de energia e conversores de potência para adequação a demanda da carga. Nesta sessão, os grupos geradores presentes em áreas remotas de difícil acesso são apresentadas em três cenários.

- (1) Geração Diesel;
- (2) Geração Fotovoltaica;
- (3) Geração Híbrida - Geradores Diesel e Fotovoltaicos operando em conjunto.

### 3.1 Geração a Diesel

O domínio sobre construção, princípio de funcionamento e operação dos geradores a Diesel são conhecidas desde o final do século XIX. Conectados a rede (sistemas *on-grid*) os geradores a Diesel são utilizados em sistemas de fornecimento de energia em hospitais e usinas hidrelétricas para recuperação de energia em quedas de rede.

Paralelo a isto, essa geração ascendeu vertiginosamente devido avanço dos sistemas agrícolas nos meios rurais e, sobretudo, aldeias de difícil acesso, impulsionados pela inexistência de fornecimento energético nestas regiões. Os geradores a Diesel são compostos por grupo motor e alternador/gerador síncrono KNUDSEN (2017). O motor é responsável pela combustão do óleo Diesel em energia mecânica e o gerador síncrono, acoplado ao eixo do motor, converte a energia de rotação em elétrica. A Figura 2 apresenta o modelo de gerador a Diesel.



Figura 2. Gerador Diesel com potência de 40 kVA KNUDSEN (2017).

Embora este tipo de geração possuam simples operação e manutenção, a ascensão de grupos geradores a Diesel tenha sido freada pelo custo de instalação por kWh e quantidade de emissão de poluentes como CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e PM SAWLE et al. (2018).

### Validação da estratégia para simulação do Gerador Diesel

Neste primeiro cenário, o gerador a Diesel é avaliado como fonte única de energia. A estrutura de conexão entre gerador e carga consiste na modulação do sinal e controle de potência a carga. A Figura 3 apresenta a metodologia para

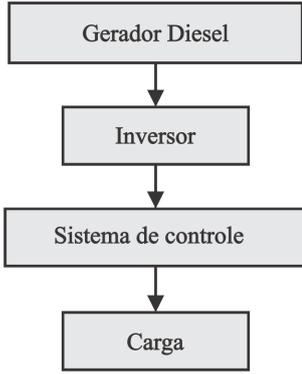


Figura 3. Estrutura de simulação para o gerador a Diesel. abordagem do gerador Diesel.

Os dados utilizados para simulação do gerador são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parametros Gerador Diesel.

Parâmetros	Valores
Tensão fase-fase	220 V
Potência nominal	24 kVA
Frequência	60 Hz
Resistência estator	2,5
Coefficiente de inércia	1.07
Pares de Polos	2

A estrutura de controle de velocidade torna-se essencial para manipulação da potência fornecida a carga e os níveis do fator de potência. A metodologia do controle de velocidade do gerador é apresentada na Figura 4.

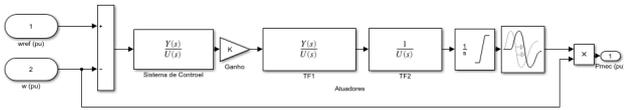


Figura 4. Estrutura do controle de velocidade para o gerador a Diesel.

Para simulação, duas cargas são adotadas. A primeira carga resistiva com potência de 1 MW, a segunda carga, por sua vez, RL com resistência e indutância  $0,5 \Omega$  e  $200 \mu \Omega$ , respectivamente.

Dessa forma, o sistema completo (Gerador Diesel, inversor, sistema de controle e carga) apresentou o perfil de potência apresentado na Figura 5.

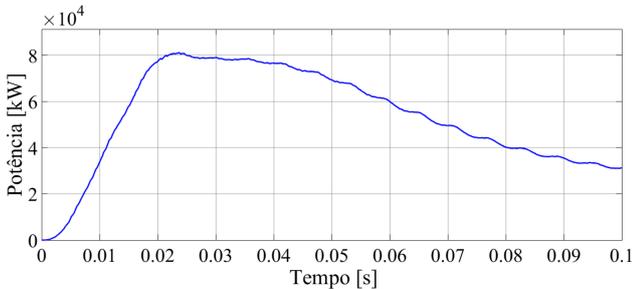


Figura 5. Potência do Gerador Diesel.

A produção de kW é proporcional a quantidade de combustível utilizado. Este fator é crítico a este tipo de geração

devido os elevados custos de combustível e pela emissão de gases poluentes. O perfil de emissão desses gases por geração de kW é apresentado na Figura 6.

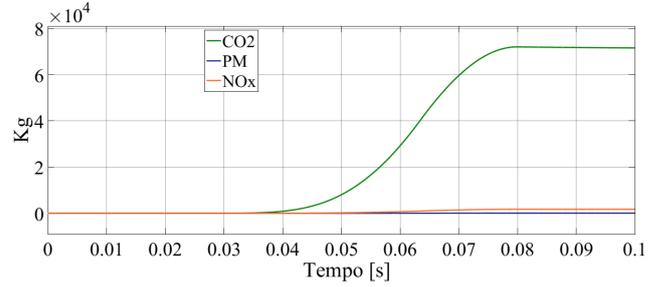


Figura 6. Estrutura do controle de velocidade para o gerador a Diesel.

As curvas para emissão de poluentes estão relacionadas ao consumo de combustível utilizado durante a geração. Os ganhos proporcionais de cada poluente são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Ganhos proporcionais de poluentes em função do combustível consumido.

Gás poluente	Ganho
CO2	3.1184
PM	0.0087
NOx	0.2164

### 3.2 Geração Fotovoltaica

Os sistemas de energia solar Fotovoltaica convertem energia luminosa em eletricidade. A energia Fotovoltaica é limpa, sustentável e renovável. A popularização destes sistemas foi impulsionada pela ausência de partes móveis, fluidas, emissões de poluentes e fácil de instalação BAURZHAN and JEKINS (2017). Os baixos custos dos módulos solares tem popularizado este segmento energético e se tornado alternativa em sistemas isolados, presentes em fazendas e aldeias com difícil acesso. Embora a energia solar não atenda a demanda das cargas durante todo ano, por fatores climáticos e capacidade de armazenamento de energia em baterias por períodos prolongados de tempo, esta geração é solução aos elevados custos de implantação e manutenção de geradores a Diesel.

A produção de energia Fotovoltaica produzida pode ser analisada a partir da eq. 1.

$$E_s = P_k \cdot PR \cdot G, \quad (1)$$

em que  $P_k$  é a potência instalada em kW<sub>p</sub>, PR o fator de desempenho do sistema e G a soma da irradiância durante o período desejado para análise. Em sistemas de eletrificação rural e isolados do SIN, os sistemas de armazenamento de energia estão preparados para suprir as cargas durante os períodos de pouca ou nenhuma geração, em períodos noturnos e começo da manhã. Além disso, estas devem suportar variações de temperatura do meio com o mínimo possível de interferência na capacidade de armazenamento. Nestes cenários, são aplicados, comumente, as seguintes baterias:

- Bateria Estacionária: Baterias de ciclo profundo, devido a estrutura das placas internas. Nesses modelos,

a capacidade de descarga são superiores aos outros tipos de bateria.

- Bateria OPzS: Baterias com ventilação líquida (ácido sulfúrico).
- Bateria VLRA: São baterias reguladas por válvula e por reorganização dos gases internos.
- Bateria AGM: As baterias AGM resistência a níveis elevados de temperaturas, ciclos de descarga, vibrações e choques mecânicos. Além disso, possuem facilidade para carregamento dinâmico.
- Bateria de Gel: Baterias compostas por eletrólito em formato de gel. Estes modelos apresentam elevada segurança e estabilidade.

Aliado a utilização adequada das baterias estão compreendidos os inversores de frequência. Estes atuam na conversão CC/CA para demanda de carga e CA/CC para armazenamento de energia em situações que não existem demanda energética por parte das cargas.

#### Validação da estratégia para simulação do Gerador Fotovoltaico

A estratégia de simulação para geração Fotovoltaica consiste em representar os módulos solares com fonte de energia, acompanhado de conversores de potência para tratamento do sinal para as cargas. A metodologia utilizada é apresentada na Figura 7.

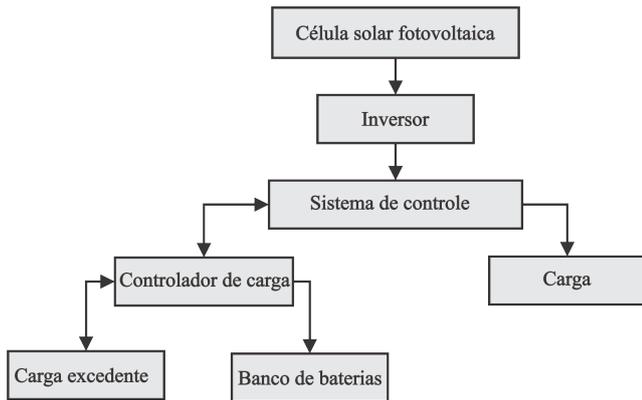


Figura 7. Estrutura da geração Fotovoltaica.

Para este cenário de geração foram adotadas duas cargas. A primeira puramente indutiva com reatância indutiva de  $20m\ \Omega$  e a segunda carga, por sua vez,  $0,5\ \Omega$  e  $200\mu\ \Omega$ . Com base na estrutura de funcionamento e simulação, os perfis de potência da geração Fotovoltaica para o processo de conversão CC/CA pelo inversor de frequência é apresentado nas Figuras 8 e 9.

#### 3.3 Geração Híbrida - Geradores Diesel e Fotovoltaicos em paralelo

Sistemas híbridos de geração consistem na combinação de duas ou mais fontes de energia. A utilização de Geração Fotovoltaica/Diesel em conjunto é justificada pela necessidade de suprimento de energia a cargas pesadas, períodos de custos elevados de combustível e condições climáticas para geração energia elétrica por meio do sol MANDELLI

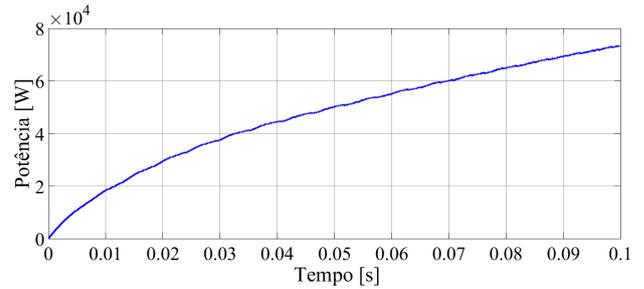


Figura 8. Perfil de potência CC dos módulos solares.

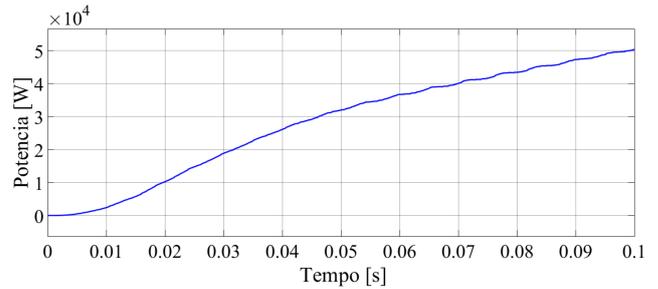


Figura 9. Perfil de potência após conversão CC/CA.

et al. (2016). Em regiões rurais que as condições climáticas comprometem a geração solar Fotovoltaica as baterias são recursos para atendimento das cargas por período de dias, no entanto com fornecimento reduzido. Para esta situação, os Geradores a Diesel colaboram para fornecimento de energia em pontos críticos do sistema elétrico de aldeias desprovidas de fornecimento energético pelos setores de energia.

#### Validação da estratégia para simulação do Gerador Híbrido-Fotovoltaico/Diesel.

A simulação do sistema híbrido consiste em combinar a potência de ambas gerações. A operação destes sistemas pode ser realizada individualmente por cada geração, conforme a demanda de carga, estado atual das baterias ou condições climáticas SAWLE et al. (2016). A estrutura de funcionamento e simulação da geração híbrida é apresentada na Figura 10.

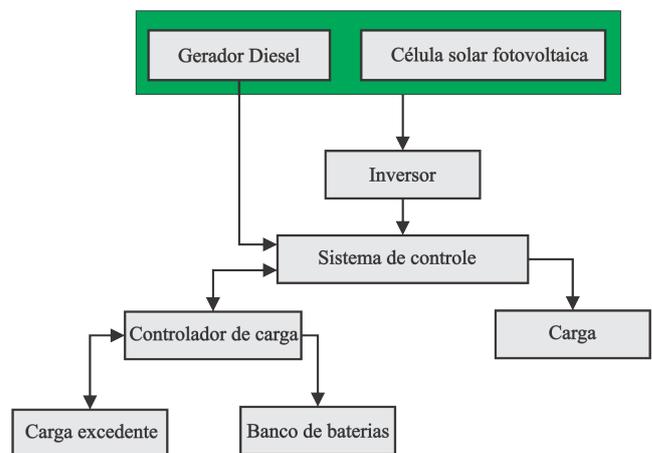


Figura 10. Estrutura da geração Híbrida.

O sistema Híbrido foi simulado considerando a potência

combinada de ambas gerações. Nesse cenário, manteve-se a mesma carga utilizada na simulação do sistema Fotovoltaico.

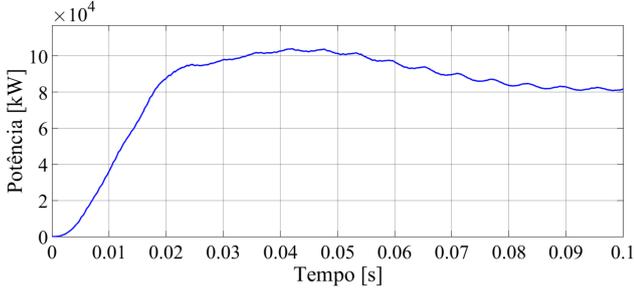


Figura 11. Potência combinada da geração Híbrida.

#### 4. TAXA DE DISTORÇÃO HARMÔNICA

O desenvolvimento de sistemas de geração deve garantir a qualidade de energia para as cargas. Os cenários de geração, considerados neste trabalho, Diesel, Fotovoltaico e Híbrida foram consideradas a presença do inversor de frequência. A utilização destes conversores de potência que utilizam chaveamento em alta frequência acrescentam a energia elétrica componentes harmônicas na rede de energia. Estas harmônicas são componentes senoidais e múltiplos da frequência fundamental do sistema. A presença destas harmônicas distorcem a magnitude da tensão e corrente afetando, a qualidade da energia elétrica fornecida as cargas SAKAR et al. (2018). As perturbações causadas por estes harmônicos são sobreaquecimento, incremento de perdas elétricas em transformadores e redução da vida útil das cargas. Cabe ressaltar, ainda, que a medida que geradores alcançam potência nominal a é reduzida pela metade, aproximadamente. Os níveis de taxa de distorção harmônicas podem ser calculados a partir da eq. 2.

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{A_h}{A_1}\right)^2}, \quad (2)$$

onde:

$A_h$  são os valores eficazes das componentes harmônicas.  $A_1$  são os valores eficazes das componentes fundamental. Como parte do trabalho os níveis de distorção harmônica para corrente e tensão, considerando três cenários de geração.

##### 4.1 Cenário 1- Geração a Diesel

Os níveis de distorção harmônica de corrente e tensão obtidos na geração Diesel são apresentados nas Figuras 12 e 13, respectivamente.

##### 4.2 Cenário 2- Geração Fotovoltaica

Os níveis de distorção harmônica de corrente e tensão obtidos na geração Fotovoltaica são apresentados nas Figuras 14 e 15, respectivamente.

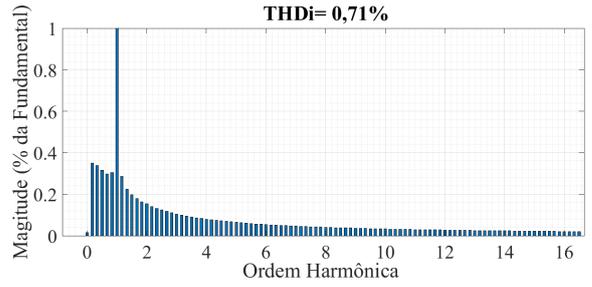


Figura 12. Taxa de distorção harmônica da corrente no sistema de geração a Diesel.

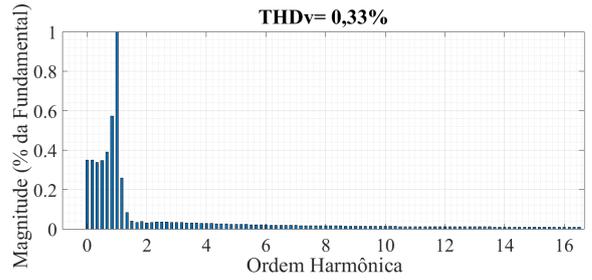


Figura 13. Taxa de distorção harmônica da tensão no sistema de geração a Diesel.

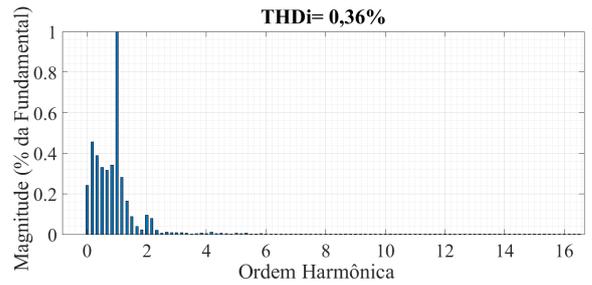


Figura 14. Taxa de distorção harmônica da corrente no sistema de geração Fotovoltaica.

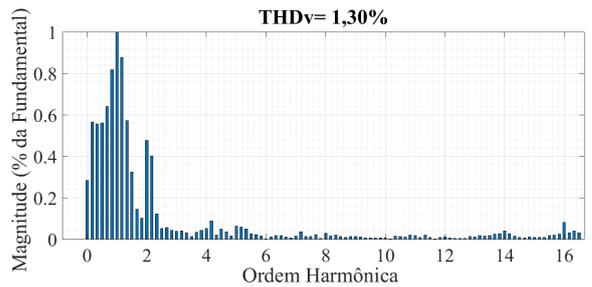


Figura 15. Taxa de distorção harmônica da tensão no sistema de geração Fotovoltaica.

##### 4.3 Cenário 3- Geração Híbrida

Os níveis de distorção harmônica de corrente e tensão obtidos na geração Híbrida são apresentados nas Figuras 16 e 17, respectivamente.

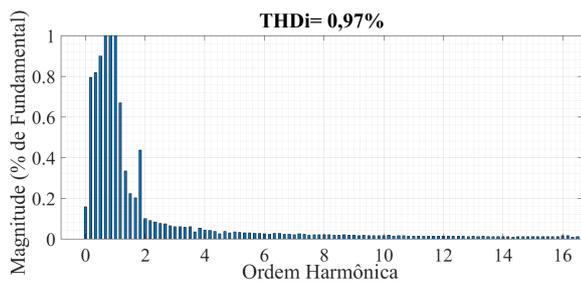


Figura 16. Taxa de distorção harmônica da corrente no sistema de geração Híbrida.

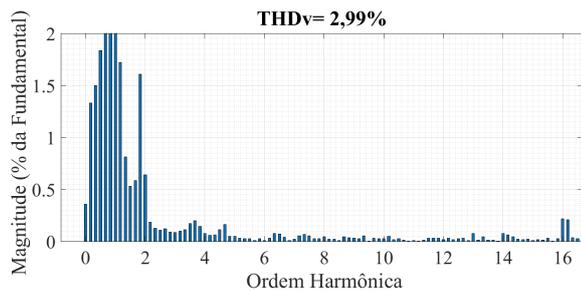


Figura 17. Taxa de distorção harmônica da corrente no sistema de geração Híbrida.

## 5. DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A geração a Diesel apresentou níveis de densidade de potência maiores que a geração solar Fotovoltaica e uma alternativa para geração de energia em períodos do ano com irradiação desfavorável aos sistemas solares. No entanto, a emissão de gases poluentes e preço do combustível tornam os sistemas Fotovoltaicos viáveis e econômicos, devido aos preços de instalação e manutenção deste segmento de energia elétrica. O sistema Híbrido, por sua vez, resultou potência combinada elevada e possível cenário de fornecimento de energia para elevadas demandas de potência. Quanto a THD de corrente o sistema Híbrido apresentou níveis elevados em relação aos sistemas operando isoladamente, enquanto o sistema Fotovoltaico apresentou níveis mínimos de distorção do sinal. A THD da tensão para o sistema combinado é inferior na geração Diesel.

## 6. CONCLUSÃO

Este trabalho tratou sobre a presença de sistemas de geração de energia elétrica que operam isolados do SIN, localizados em áreas remotas de difícil acesso. Estas regiões apresentam inviabilidade econômica para os setores de energia implantarem sistemas de transmissão e distribuição. Por isso, os grupos geradores Diesel e Fotovoltaico foram abordados quanto ao desempenho de fornecimento de potência e qualidade do sinal. O gerador Diesel apresentou vantagens quanto a densidade de potência gerada e por operar com alto desempenho durante todo dia. Além disso, apresentou níveis moderados de distorção harmônica para corrente e tensão, garantindo vida útil das cargas. O sistema Fotovoltaico apresentou-se como solução aos

sistemas a Diesel por ser renovável, não depender de combustível (óleo diesel) no processo de geração e pode operar em conjunto ao gerador Diesel em demandas elevadas de carga com níveis maiores de THD. Os sistemas Híbridos, portanto, são medidas como solução ao abastecimento energético em vilarejos e aldeias que demandem níveis elevados de potência durante todo o ano.

## AGRADECIMENTOS

Aos integrantes do Núcleo de Pesquisas de Sistemas de Energia (NuPSE) pela colaboração no desenvolvimento deste trabalho bem como ao Instituto Federal de Goiás - *Campus Itumbiara*.

## REFERÊNCIAS

- BAURZHAN, S. and JEKINS, G. (2017). On-grid solar pv versus diesel electricity generation in sub-saharan africa: Economics and ghg emissions. *Sustainability*, 9(3), 372.
- KNUDSEN, J.V. (2017). *Modeling, Control, and Optimization for Diesel-Driven Generator Sets*. Ph.D. thesis, Aalborg Universitetsforlag.
- MANDELLI, S., BARBIERI, J., MEREU, R., and COLOMBO, E. (2016). Off-grid systems for rural electrification in developing countries: Definitions, classification and a comprehensive literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1621–1646.
- PHUANPORNPIITAK, N. and KUMAR, S. (2007). Pv hybrid systems for rural electrification in thailand. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(7), 1530–1543.
- SAKAR, S., BALCI, M.E., ALEEM, S.H.A., and ZOBAA, A.F. (2018). Integration of large-scale PV plants in non-sinusoidal environments: Considerations on hosting capacity and harmonic distortion limits. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 176–186.
- SAWLE, Y., GUPTA, S., and BOHRE, A.K. (2016). Pv-wind hybrid system: A review with case study. *Cogent Engineering*, 3(1), 1189305.
- SAWLE, Y., GUPTA, S., and BOHRE, A.K. (2018). Review of hybrid renewable energy systems with comparative analysis of off-grid hybrid system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2217–2235.