

Qualidade da Energia de Grupos Geradores

Isaac Vinicius dos Santos Moreno, Leonardo Klingenfus Antunes, Vinicius Henrique Buriola e Joaquim Eloir Rocha
UTFPR - Av. Sete de Setembro, 3165 - CEP 80230-901-Curitiba-PR

Resumo — Este artigo trata do uso de um sistema gerador de energia elétrica acionado por motor a combustão e a consequência para a qualidade da energia de uma instalação. É realizada uma análise da qualidade da energia quando a instalação elétrica é alimentada pela concessionária e é feita uma comparação dessa qualidade quando a alimentação é realizada através de um grupo gerador. Os indicadores avaliados são: distorção harmônica, desequilíbrio de tensão, variação a tensão em regime permanente e variação da frequência.

Palavras-chaves — Grupo gerador, qualidade de energia, continuidade do fornecimento de energia elétrica, horário de ponta.

I. INTRODUÇÃO

Se a energia elétrica oriunda da concessionária é interrompida, determinada instalação elétrica pode continuar a funcionar com o uso de sistemas de alimentação ininterrupta. Essa continuidade no fornecimento da energia elétrica pode ser instantânea ou levar alguns segundos para ser restabelecida. Isso vai depender dos sistemas ou do sistema adotado para proteger a instalação da falta de energia elétrica.

Este trabalho trata de um sistema de alimentação ininterrupta baseado em motor de combustão interna. Estes sistemas podem ser usados exclusivamente para emergência ou para o seu uso no horário de ponta. Caso o seu uso seja para o horário de ponta, a transferência pode ser em rampa ou interrompendo a energia da concessionária e transferindo para o grupo gerador. Nas duas situações o controle é automático, ou seja, existe uma programação para que a transferência ocorra no horário de ponta. Na transferência usando a rampa, o controle é mais sofisticado, pois a transferência de potência é feita sem o desligamento da energia e, portanto, as cargas não são desligadas.

As principais razões para o uso disseminado de grupo gerador devem-se à sua maturidade, capacidade para disponibilizar energia com uma elevada confiabilidade e qualidade, custos de instalação e de obtenção do kWh comparativamente baixos (para os valores de potência tradicionais) com outras tecnologias [1]. Em países onde é possível se utilizar o grupo gerador concomitantemente com a Concessionária outras aplicações são: antecipar a entrada do gerador para complementar a energia durante o pico de consumo; manutenção do nível de tensão em áreas onde o sistema elétrico é fraco; controle da potência reativa; ajuda na manutenção da frequência; etc. [2].

Outra área de aplicação de grupo gerador é na complementaridade de energia em sistemas isolados que

utilizam fontes intermitentes. Um exemplo é onde a geração eólica é significativa em relação à capacidade global do sistema [3].

A. Regulação de velocidade

Quando uma carga adicional é ligada ao gerador, considerando este funcionando com tensão e velocidade nominais, uma corrente adicional circulará pelo estator que aumentará o conjugado resistente no eixo da máquina síncrona. Este torque adicional tem sentido oposto ao do movimento do gerador, reduzindo a sua velocidade. Assim, a tendência é de que a frequência de alimentação seja reduzida até a atuação do regulador de velocidade. Como consequência dessa atuação, o conjugado do motor a combustão será aumentado para fornecer a potência adicional solicitada pela carga na velocidade correta. Os reguladores de velocidade atuam de modo a manter a velocidade do sistema praticamente constante e linear, independente da potência requerida do gerador. Nos equipamentos de controle são incorporados circuitos para limitar o conjugado do motor durante os períodos de aceleração ou de sobrecarga para obter acelerações controladas de alta inércia, para proteger o motor e o equipamento de controle de sobrecorrente e para prevenir que o sistema atinja regiões de operação instável [4]. Assim, o tempo de recuperação da velocidade de referência depende de limitações físicas e da configuração do controle adotado.

B. Regulação de tensão

Um regulador de tensão monitora a tensão de saída nos terminais do gerador e automaticamente ajusta a excitação de campo para manter a tensão constante conforme configurado. A variação de carga é a principal razão para a variação da tensão. Como todo controle, para a regulação da tensão, existe um tempo de resposta e dependendo da sintonia pode haver oscilação em torno do valor final.

O sistema de excitação é fundamental para assegurar uma tensão corretamente regulada e, por isso, é um componente essencial do gerador. Um método de excitação utilizado é o chamado “brushless”. Neste sistema, a armadura da excitatriz está no eixo do gerador síncrono. A tensão gerada por essa armadura é retificada através de diodos e alimenta os polos do gerador síncrono. Visto que essa armadura e o rotor do gerador estão no mesmo eixo, elimina-se a necessidade de anéis e escovas de carvão. Portanto, reduz-se a necessidade de manutenção, aumentando-se a confiabilidade do grupo gerador.

O maior inconveniente do grupo gerador é o seu tempo de resposta para a mudança de grandes cargas. Nessa situação,

podem-se levar vários segundos para que a tensão retorne ao valor parametrizado, tornando o grupo gerador muito lento para a regulação de tensão para certas cargas, especialmente para cargas de variação rápida [5].

C. Curva de capacidade

A capacidade de um gerador é definida através de uma curva que define valores máximos para a potência ativa e reativa de saída. É um método gráfico representado pelos eixos cartesianos em que a potência ativa costuma estar no eixo das ordenadas e a potência reativa no eixo das abscissas. Esse gráfico define os limites operacionais do gerador, sendo que a potência reativa tem valores positivos e negativos dependendo do gerador estar sobre-excitado ou subexcitado. A excitação da máquina vai depender da necessidade de reativos das cargas, ou seja, do fator de potência.

A Fig. 1 mostra uma curva típica de capacidade de um gerador síncrono. Essa figura foi obtida de [6].

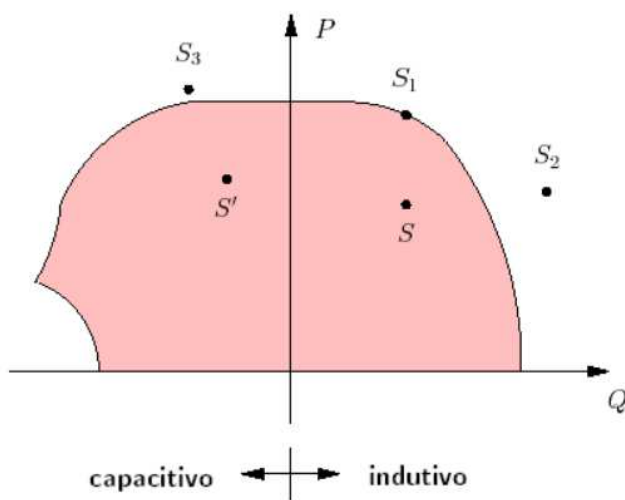


Figura 1 – Curva típica de capacidade de um gerador

Essa curva oferece uma visão dos limites de operação adequados para um gerador. Os pontos S e S' são pontos permitidos para operação, porém o gerador não está funcionando em plena carga. Já no ponto S1 o gerador está operando em plena carga, para o fator de potência nominal. Os pontos S2 e S3 são pontos em que os limites foram ultrapassados.

O gerador tem vários fatores que limitam a sua capacidade, como: limite de corrente de armadura, limite de corrente de campo e limite térmico do estator e rotor. A máquina deve operar dentro de um envelope, como mostrado no gráfico da Fig. 1, limitado pela potência ativa e reativa. Uma das fronteiras desse envelope é definida pelo limite de estabilidade. A estabilidade do gerador é dependente do ângulo de potência, também chamado de ângulo de carga. Esse ângulo pode se tornar muito alto, quando se exige uma potência maior que a máxima. Em consequência, a máquina se torna instável e ocorre a perda de sincronismo.

Outras características poderiam ser discutidas com relação à curva de capacidade, mas fogem ao escopo deste trabalho.

II. OBJETO DE ESTUDO

Para uma análise completa do comportamento da rede da concessionária, do gerador, e dos parâmetros a serem analisados, foi preciso considerar toda a instalação elétrica que está ligada ao grupo motor gerador (GMG), bem como todos os tipos de cargas ligados a ele.

Com o intuito de observar os parâmetros de frequência, distorção harmônica, desequilíbrio de tensão e variações de tensão de longa duração, foi realizada uma análise de energia em uma unidade de supermercado, a qual compreende medições efetuadas no quadro de transferência automático (QTA) do mesmo. Este gerador fornece energia no horário de ponta da concessionária.

A metodologia de medição adotada foi pré-determinada através do aparelho de medição utilizado da AEMC Instruments, modelo 8336. Realizou-se a integralização das grandezas elétricas num intervalo de um segundo, assim foi possível verificar o transitório de variação da tensão e da frequência do gerador quando da mudança do valor da carga elétrica. O instrumento foi programado para realizar a coleta dos dados durante a alimentação pela concessionária, no período compreendido entre 10 h 37 min 59 s e 17 h 37 min 44 s do dia 14/10/2016. Posteriormente, a coleta de dados foi efetuada quando o gerador era responsável pela alimentação no período entre 17 h 48 min 26 s e 20 h 50 min 49 s do mesmo dia. A Fig. 2 mostra a ligação do analisador ao quadro.



Figura 2 – AEMC 8336 ligado ao quadro de transferência

Outro ponto a ser destacado é o fato de o QTA ser aberto, sendo o gerador então acionado por um controlador microprocessado e a transferência ser realizada com uma interrupção momentânea do fornecimento de energia.

O supermercado analisado possui um transformador com potência de 225 kVA, tensão primária de operação em 13,2 kV e tensão secundária de 220 V/ 127 V com neutro aterrado.

O tap utilizado no transformador é de 13,2 kV e apresenta uma impedância de 3,41 %.

Para o horário de ponta é utilizado um gerador trifásico para alimentação do comércio. O gerador possui potência nominal de 360 kVA, frequência de operação de 60 Hz, tensão nominal de 220/127 V, velocidade de rotação igual a 1800 rpm, fator de potência igual a 0,8, corrente nominal igual a 945 A, reatância subtransitória igual a 11,49%, excitação *brushless* com bobina auxiliar e opera em regime funcional *prime*. Este regime permite que o grupo gerador esteja disponível por um número ilimitado de horas de operação, ao ano, em aplicações com carga variável.

O gerador utiliza um regulador de tensão modelo GRT7, que possui como base de funcionamento o uso de tiristores e potenciômetros. O regulador de tensão possui tempo de resposta de 8 a 500 ms.

Na Tabela I estão relacionadas as cargas presentes no supermercado analisado.

TABELA I - LEVANTAMENTO DE CARGA.

Quant.	Descrição da Carga	S (VA) un.
2	Compressores (refrigeração)	5047
3	Compressores (refrigeração)	6788
6	Forno (Padaria e Salgaderia)	18700
1	Forno (Confeitaria)	31650
2	Fritadeiras	4500
1	Batedeiras	2500
1	Batedeiras	2000
2	Batedeiras	3100
4	Ar condicionado (18000 BTU)	6222
6	Freezers	444
8	Geladeiras (Bebidas)	344
3	Geladeiras (Bebidas)	778
3	Expositor Açougue	1024
1	Expositor	1067
1	Expositor	1222
2	Expositor	1667
2	Chuveiros	5500
60	Lâmpadas tubulares LED	36
10	Lâmpadas Bulbo LED	20
48	Lâmpadas tubulares LED	9
160	Lâmpadas fluorescentes T5	57
Potência Total		250.320 VA

As principais cargas não lineares dessa instalação são os inversores de frequência, responsáveis pelo controle dos compressores do sistema de refrigeração. Essa carga é a principal responsável pelas correntes harmônicas de 5ª e 7ª ordem. Existem também os reatores eletrônicos utilizados na iluminação que são responsáveis pelas correntes harmônicas de 3ª ordem. Os fornos elétricos, que constituem a maior parcela da carga total da instalação, podem ser considerados como cargas puramente resistivas. A instalação não apresenta

banco de capacitores para correção de fator de potência.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. Parâmetro – Frequência.

A medição da frequência encontra-se em conformidade com os parâmetros estabelecidos pelo PRODIST (módulo 8) da ANEEL [7], sendo que o intervalo da frequência em regime permanente é $59,9 \text{ Hz} \leq \text{valor medido} \leq 60,1 \text{ Hz}$. Os registros dessas frequências podem ser observados nas Fig. 3 e Fig. 4.

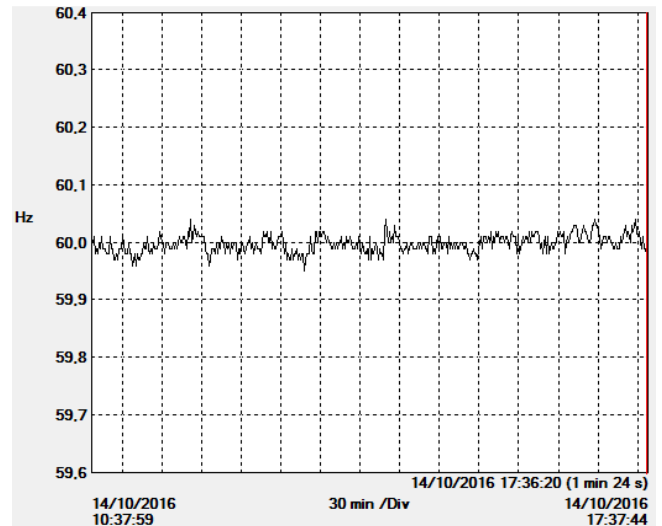


Figura 3 – Gráfico da frequência (concessionária)

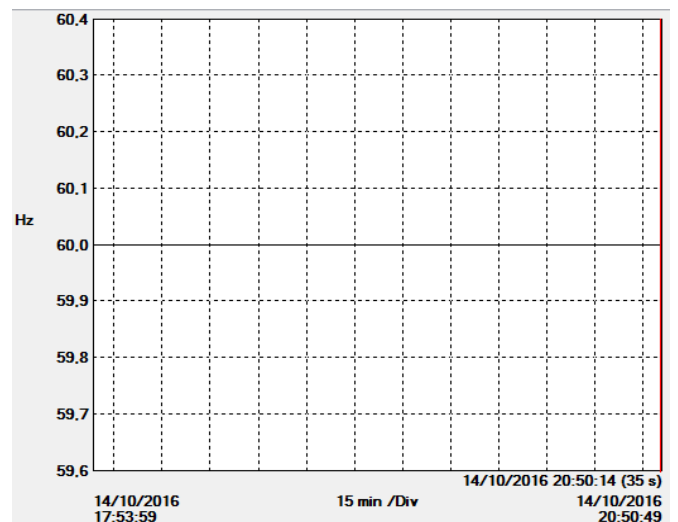


Figura 4 – Gráfico da frequência (gerador)

Percebeu-se uma diferença na variação da frequência entre a concessionária e o gerador, sendo que na concessionária a variação é maior, pois a frequência é a mesma do sistema nacional, sendo controlada pelo regulador de velocidade nas centrais geradoras e afetada por todas as cargas conectadas ao sistema. A variação de frequência observada na Fig. 3 foi de

59,96 Hz até 60,04 Hz. No gerador, conforme a Fig. 4, observa-se que durante o regime permanente a frequência é de 60 Hz. A frequência só irá variar com o variar da carga conectada ao gerador, que por possuir um regulador de velocidade, atua com um controle mais adequado, considerando o regime permanente.

Com o objetivo de mostrar uma situação em que houve uma variação de frequência capturada pelo registrador, foi analisado o período de tempo entre 19h 23min 30s e 19 h 24 min 41 s, como pode ser visto na Fig. 5.

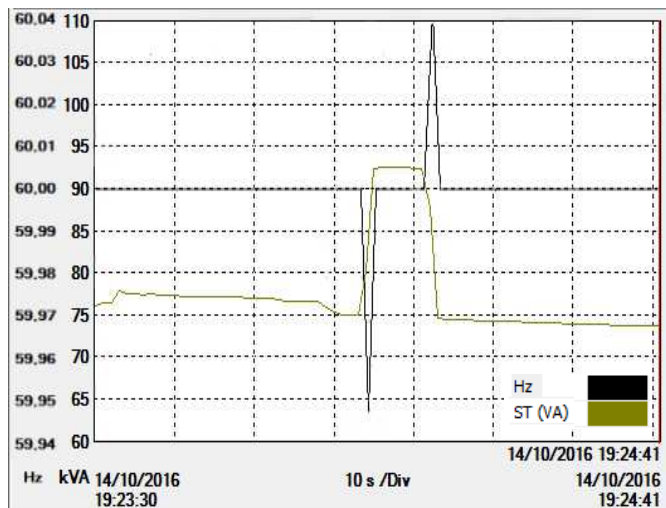


Figura 5 – Variação de frequência (gerador)

A linha de cor preta, no gráfico da Fig. 5, representa a frequência enquanto a linha de cor esverdeada representa a potência. Observa-se que a frequência é reduzida transitoriamente quando existe uma elevação de carga, percebido pelo aumento da potência, e, em seguida, com a diminuição da potência, a frequência retorna ao valor nominal de operação.

O regulador de velocidade atua ao perceber a variação da frequência, uma vez que a frequência é diretamente proporcional a velocidade. Através da regulação da velocidade, controla-se a potência mecânica fornecida, ajustando a frequência ao seu valor nominal.

B. Parâmetro – Tensão.

Os valores obtidos pela medição das tensões de linha encontram-se adequados, tanto para a concessionária quanto para o gerador. Os registros dessas tensões podem ser observados nas Fig. 6 e Fig. 7. A adequação das tensões pode ser verificada pela análise da tabela 4, do Anexo I, do PRODIST (módulo 8), da ANEEL [7], na qual verifica-se a faixa de valores adequados para a tensão nominal de 220 V. Essa faixa fica entre 202 V e 231 V.

Analisando a Fig. 7, verifica-se uma queda de tensão nas fases 1-2 e 3-1. Observando as fases individualmente, percebe-se que essas quedas foram provocadas pela queda de tensão da fase 1. Uma suposição para este fato é que existe uma carga significativa ligada na fase 1, que quando ligada,

requer uma corrente tal que provoca as quedas de tensão observadas.

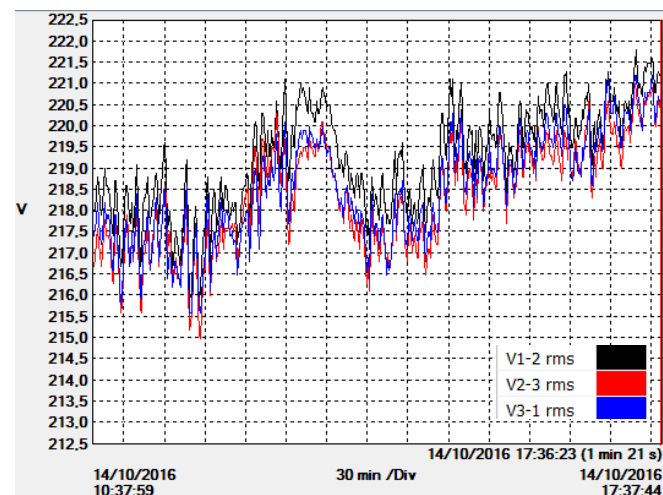


Figura 6 – Gráfico das tensões de linha (concessionária)

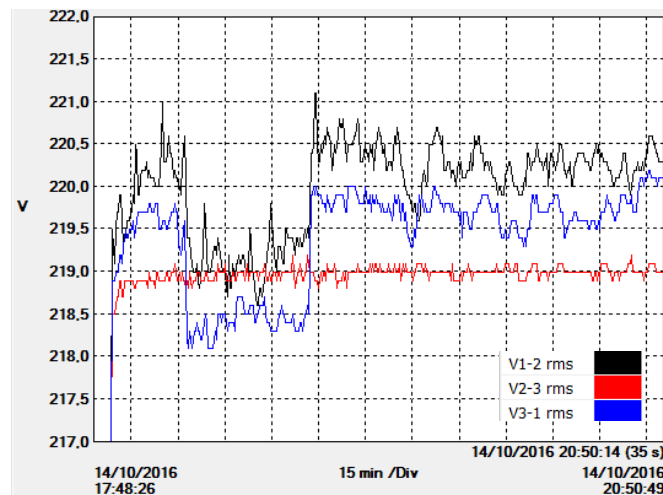


Figura 7 – Gráfico das tensões de linha (gerador)

Na Fig. 8, nas primeiras três linhas do gráfico, mostram-se as tensões de fase do gerador, no período entre as 19 h 33 min 50 s e 19 h 34 min 13 s. Durante este intervalo, pode-se observar uma variação nos valores das tensões de fase. A variação ocorreu de forma transitória, excursionando de um valor médio trifásico de 127 V para um valor médio trifásico de, aproximadamente, 128 V. Em seguida, as três tensões retornam aos valores originais.

A razão para a variação da tensão observada na Fig. 8 é a saída de uma carga trifásica do sistema. Isso é comprovado pela análise das correntes que estão representadas nas últimas 3 linhas do gráfico da Fig. 8. Nesse gráfico, observa-se que uma das correntes de linha é de 196 A e as outras duas correntes de, aproximadamente, 175 A. Em seguida, as correntes diminuem para 176 A e 155 A, respectivamente.

Assim, fica caracterizado que o regulador de tensão monitora a tensão de saída nos terminais do gerador e

automaticamente ajusta a excitação de campo para manter a tensão constante.

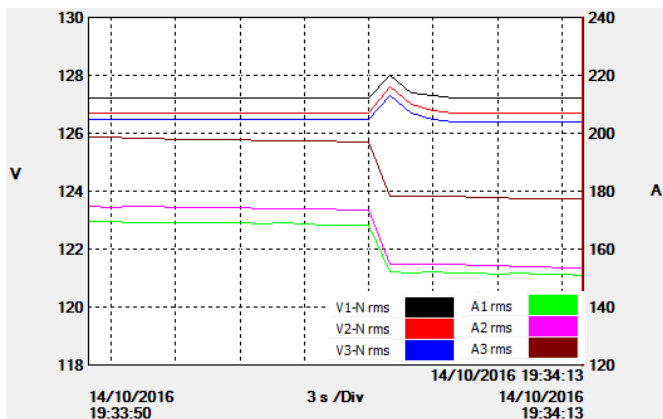


Figura 8 – Elevação das tensões de fase (gerador).

C. Parâmetro – Desequilíbrio de Tensão.

Na Fig. 9, mostra-se o desequilíbrio das tensões de linha no gerador. Para realizar a avaliação sobre os dados de desequilíbrio de tensão, no caso do grupo gerador, foi utilizada a recomendação IEEE 112 [8]. Nessa recomendação, o desequilíbrio de tensão é quantificado por uma relação que expressa a maior diferença entre as tensões de linhas medidas e o somatório das mesmas. O analisador de energia utilizado (PowerPad III, AEMC), usa como referência, para os seus registros, a recomendação IEEE 112.

O PRODIST estabelece o limite de 3% para o desequilíbrio em baixa tensão, mas utiliza o método das componentes simétricas.

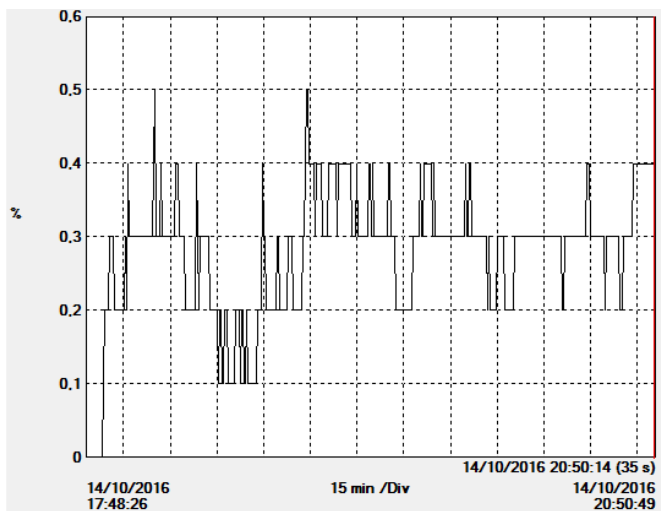


Figura 9 – Gráfico do desequilíbrio de tensão de linha (gerador).

Os valores de desequilíbrios registrados no gerador não superam 0,5 %, valor recomendado pelo IEEE. Comparando com os registros de medição feitos quando a concessionária era a fonte de alimentação, pode-se perceber que os valores também não ultrapassam os 0,5 %.

D. Parâmetro – Taxa de distorção harmônica.

A distorção harmônica total da tensão é um indicador de qualidade de energia que se encontra em conformidade com os parâmetros estabelecidos pela IEEE-519 [9], estando abaixo dos 8% exigidos, no caso da concessionária. O PRODIST [7] é mais tolerante e estabelece o limite de 10%.

A Fig. 10 apresenta as THD's das tensões de linha quando a concessionária alimenta a instalação enquanto a Fig. 11 mostra as THD's quando o gerador é a fonte.

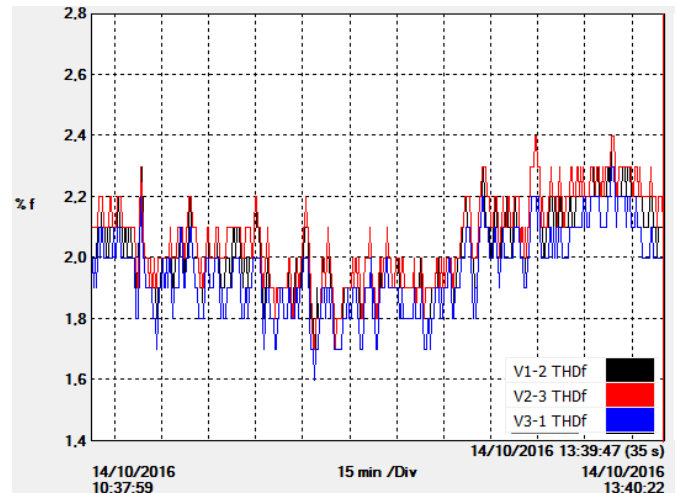


Figura 10 – Gráfico da THD da tensão de linha (concessionária).

Como pode ser observado, analisando as Fig. 10 e 11, a distorção harmônica total de tensão é menor no período em que a concessionária está alimentando o supermercado. O valor médio para esse período é igual a 2,2%, enquanto que no período em que o gerador alimenta o supermercado, o valor médio é igual a 3,4%.

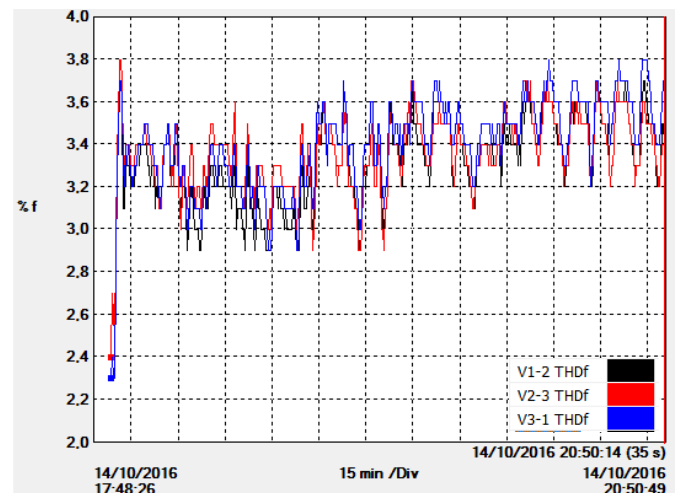


Figura 11 – Gráfico da THD da tensão de linha (gerador).

Equipamentos como máquinas síncronas são dotadas de representações complexas para a análise dinâmica, no entanto, neste trabalho, a análise da propagação harmônica será simplificada. A distorção harmônica no supermercado é resultado também da excitação das cargas não lineares em

contraponto com as ressonâncias da rede interna e externa. Ainda assim, a análise comparativa entre a impedância do transformador e a reatância subtransitória do gerador será utilizada para justificar a diferença entre os THD's de tensão encontrados. A impedância percentual do transformador é de 3,41% enquanto a reatância subtransitória do gerador é igual a 11,49%.

E. Parâmetro – Taxa de distorção da demanda.

A taxa de distorção da demanda (TDD) foi outro parâmetro analisado. Este indicador é utilizado para quantificar a distorção harmônica de corrente em relação à demanda de corrente da carga e é definido pela recomendação IEEE-519 [9]. Essa recomendação só pode ser utilizada para o caso da alimentação pela Concessionária. Na medição realizada, constatou-se um valor de TDD igual a 5,7% quando o supermercado é alimentado pela Concessionária. Para se avaliar se esse valor está de acordo com o recomendado, foi necessário calcular a corrente de curto-circuito no ponto de acoplamento comum. Levando isso em consideração, o valor máximo recomendado é de 8%. Assim, verifica-se que o sistema elétrico analisado atende a recomendação IEEE-519.

Como o valor da TDD é uma indicação mais precisa do que a DHT de corrente, uma vez que sempre é calculada em relação à corrente máxima, realizou-se a medição do TDD para o gerador utilizado. O valor medido foi 6,7% para o gerador, demonstrando que o equipamento está com folga no dimensionado, considerando a NBR 14664 [10]. A distorção máxima para a corrente estabelecida nessa norma é de 30%. Essa norma é específica para geração própria em telecomunicações, mas serve de referência para este estudo. Assim, o grupo gerador utilizado atende os requisitos mínimos esperados com relação aos harmônicos.

IV. CONCLUSÕES

Neste artigo, observaram-se e compararam-se as principais grandezas elétricas em uma instalação de um supermercado, que no horário de ponta utiliza um grupo motor gerador para produzir a própria energia elétrica. Pode-se concluir que todos os parâmetros avaliados neste estudo se encontravam dentro dos limites estabelecidos por norma ou regulamentação.

O desequilíbrio de tensão durante o funcionamento do gerador se encontra dentro dos limites recomendados pela IEEE-112. Essa recomendação é mais rigorosa do que o valor limite estabelecido pelo PRODIST. Mesmo considerando que o IEEE e o PRODIST utilizam métodos diferentes para o cálculo desse indicador, ainda assim, pode-se afirmar que a regulamentação brasileira é atendida.

Nota-se que a regulação de tensão, quando o gerador é quem alimenta o supermercado, apresenta melhores resultados. O perfil de tensão ao longo do tempo apresentou menos variações nesse cenário. Este resultado mostra que a regulação de tensão realizada nas subestações da concessionária não apresenta uma resposta com a mesma qualidade de um regulador de tensão que está próximo da carga.

Outro parâmetro para o qual o gerador apresenta melhores resultados é a regulação de frequência. O perfil de frequência ao longo do tempo também apresentou menos variações quando o gerador estava alimentando o supermercado. Novamente, percebe-se que a regulação quando feita próxima a carga, apresenta melhores resultados.

Também foi possível observar a diferença nos valores de distorção harmônica de tensão nos dois cenários avaliados. Confirmou-se que os valores de DHT eram maiores quando o gerador estava alimentando o supermercado. Esse fato é largamente observado em campo quando se analisa o DHT de tensão nos dois cenários estudados neste trabalho.

Por fim, conclui-se que a qualidade da energia elétrica fornecida pelo grupo motor gerador é diferente da fornecida pela concessionária. Em alguns aspectos como regulação de tensão e frequência, o grupo motor gerador apresentou resultados melhores na situação de regime permanente. Quando havia variação de carga, portanto no regime dinâmico, a variação momentânea foi maior, mas rapidamente controlada.

Conclui-se que um grupo gerador a diesel é uma alternativa que pode fornecer energia elétrica com boa qualidade, desde que o projeto de instalação do gerador seja feito de forma satisfatória. Na especificação do gerador, deve-se considerar a carga que o gerador alimentará, a presença de cargas não lineares significativas e também a presença ou não de bancos de capacitores.

V. REFERÊNCIAS

- [1] J. D. B. Delgado, "Gestão da Qualidade Total Aplicada ao Sector do Fornecimento da Energia Eléctrica", Tese de Doutorado, Coimbra, setembro de 2002.
- [2] K. Pandiaraj et al., "Centralised control of diesel gen-sets for peak shaving and system support", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib. Vol. 149, No. 2, March 2002.
- [3] R. Billinton and R. Karki, "Maintaining supply reliability of small isolated power systems using renewable energy", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol 148, No. 6, November 2001.
- [4] R.W.da Silva Barros, "Implantação, Operação e Instrumentação de Sistema Híbrido Eólico/Diesel / no Território de Fernando de Noronha", Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2002.
- [5] R. C. Dugan et al., "Electrical Power Systems Quality", Second Edition, Ed. McGraw-Hill, 2004.
- [6] C. A. J. CASTRO, "Geradores Síncronos", Campinas: 2005. Disponível em: <<http://www.dsee.fee.unicamp.br/%7Eccastro/cursos/et720/et720.html>>.
- [7] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Prodinst. Módulo 8 – Qualidade da energia elétrica", Resolução Normativa N° 664 de 1 de janeiro de 2016.
- [8] IEEE std 112-2004, "Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators", New York, USA, 2004.
- [9] IEEE std 519-2014, "Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", New York, USA, 2014.
- [10] Associação Brasileira de Normas Técnicas, "Grupos Geradores – Requisitos Gerais para Telecomunicações", NBR 14664, 2001.