

PROTÓTIPO PARA ANÁLISE DA QUALIDADE E CONTROLE DA DEMANDA PELO LADO DO CONSUMIDOR EM SMART GRID

HIGOR A. F. CAMPOREZ, DANIEL J. C. COURA*, WANDERLEY C. CELESTE*, HELDER R. DE O. ROCHA*, SILVIA DAS D. RISSINO*, LUIZ O. R. JÚNIOR*

**Departamento de Computação e Eletrônica, Universidade Federal do Espírito Santo
Rodovia BR 101 Norte, Km 60, Bairro Litoranêo, 29932-540, São Mateus, ES, BRASIL*

*E-mails: higorcamporez@gmail.com, daniel.coura@ufes.br, cawander@gmail.com,
helder.rocha@ufes.br, silvia.rissino@ufes.br, luis.rigo@ufes.br*

Abstract— This article describes a prototype for quality analysis and demand side management in a Smart Grid. The prototype should measure voltage data and electric current data and act directly on the electric power bus. With these collected data the algorithm of demand side management based on a metaheuristic, it provides users with cost reduction opportunities for the reorganization of the loads, in a scenario where the concessionaire of the tariff is different in time.

Keywords— *Smart Grid*, Demand Management, Quality of Electrical Energy.

Resumo— Este artigo descreve um protótipo para análise da qualidade e controle da demanda pelo lado do consumidor em uma Smart Grid. O protótipo deverá coletar dados de tensão, de corrente e atuar diretamente no barramento de energia. Com estes dados coletados o algoritmo de gerenciamento pelo lado da demanda baseado em um algoritmo metaheurístico, proporciona aos usuários possibilidades de redução do custo pela reorganização das cargas, em um cenário onde a que a tarifa da concessionária é diferente no tempo.

Palavras-chave— *Smart Grid*, Gerenciamento de Demanda, Medidores de Energia Elétrica, Metaheurística, Qualidade de Energia.

1 Introdução

O sistema elétrico existe há pouco mais de 120 anos. Desde sua criação, este já enfrenta questões como o desenvolvimento distribuído ou centralizado (Falcão, 2009).

O atual modelo de geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica tem se mostrado insustentável, pois a geração é feita de forma centralizada, onde geradoras produzem grandes quantidades de energia que deve ser transportada e posteriormente distribuídas às unidades consumidoras muito distantes de suas fontes, gastando-se muitos recursos na construção e manutenção de tais sistemas (Santos and Santos, 2008). Além disso, em geral, a geração em grande escala resulta em impactos ambientais (Inatomi and Udaeta, 2007).

O preço da energia elétrica tem se tornado cada vez mais caro. Com isso, a geração distribuída traduz-se em um novo paradigma de geração e consumo. De acordo com (Ackermann, Andersson and Söder, 2001) a geração distribuída compõe fontes geradoras, de baixa potência, conectadas diretamente na rede distribuidora ou fontes consumidoras. Esta geração de energia pode ser proveniente de fontes renováveis como, por exemplo, a energia solar e eólica.

Neste novo paradigma introduziu o conceito de redes elétricas inteligentes (*Smart Grids*), o qual unifica sistemas de comunicação, medição e controle nas redes elétricas. Permitindo que se tenham informações corretas, no instante correto, para tomada de decisões sensatas (Falcão, 2009).

Assim, conhecer o consumo e a qualidade da energia elétrica é essencial para operação de uma *Smart Grid*. Outro conceito importante aplicado a *Smart Grids* é o Gerenciamento pelo Lado da Demanda (GLD) - *Demand Side Management* (DSM). Este é definido como planejamento, implementação e monitoramento de ações para influenciar o uso eficiente de energia elétrica pelo cliente, produzindo alterações na curva de demanda (Gellings, 1985).

O GLD pode ser otimizado por intermédio de algoritmos genéticos com base em um algoritmo metaheurístico, por exemplo, um algoritmo para agendamento de consumo considerando tarifas diferentes no tempo (*Time-Of-Use*) (Siebert, Yamakawa and Toledo, 2012). Estes programas podem ser subdivididos entre: GLD direto, onde a concessionária tem controle sobre as cargas com certo acordo contratual; e GLD indireto onde o cliente determina a demanda com base nos valores monetários impostos pela concessionária (Gellings and Chamberlin, 1993). Metaheurística é um algoritmo que resolve problemas de otimização, necessitando de pequenas modificações para adaptá-las à solução de problemas específicos (Blum and Roli, 2003).

Neste artigo é tratada a modelagem de uma *Smart Grid*, onde é implementado um algoritmo de GLD indireto, com base em um algoritmo metaheurístico, que considera a variação de tarifa no tempo e conforto/prioridade do usuário em relação ao uso de equipamentos. Porém o foco deste trabalho está na construção de circuitos atuadores e medidores de corrente e tensão, para fim de obter potência e qualidade e-

nergética que é a base para construção da curva de demanda e, por intermédio dos atuadores, modelar a curva de demanda.

2 Qualidade da Energia Elétrica

A Agência Nacional de Energia Elétrica (2008) define os parâmetros relativos à qualidade da energia elétrica através do módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, de um conjunto de documentos denominados Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, o PRODIST. Os parâmetros são: Tensão em regime permanente; fator de potência; harmônico; desequilíbrio de tensão; variação de tensão de curta duração e variação de frequência. Alguns destes parâmetros serão descritos a seguir.

2.1 Tensão em Regime Permanente

Tensão em regime permanente é o valor da tensão entregue em um local por um tempo determinado. De acordo com a norma, devem-se analisar janelas de 10 minutos de tempo. Considerando a tensão nominal de 127 V_{RMS}, a faixa de 116 a 133 V_{RMS} é aceitável, as faixas de 133 a 140 V_{RMS} e 109 a 116 V_{RMS} são denominadas precária, acima de 140 V_{RMS} e abaixo de 109 V_{RMS} é considerado crítica.

2.2 Harmônicos

Os harmônicos são causados por cargas não lineares como: retificadores, motores, fontes chaveadas e etc. Neste caso, ocorre a presença de tensão em frequências múltiplas da frequência fundamental, porém de menor potência (Franco, 2005).

A norma determina a computação até o 25ª harmônico, e para sistemas com tensão abaixo de 1 KV uma distorção harmônica total menor do que 10%.

2.3 Flutuação de Tensão (*flicker*)

A norma define esse fenômeno como “uma variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz da tensão”. Este também é conhecido internacionalmente como *flicker* (Mehl, 2012).

2.4 Variação da Frequência

Representa quanto à frequência varia de um valor pré-definido. O valor é definido em 60 Hz e segundo a norma o sistema em condições normais deve operar entre 59,9 e 60,1 Hz.

3 Modelagem do Sistema

O diagrama da Fig 1 apresenta o trabalho desenvolvido pelo grupo de pesquisa para desenvolvimento de tecnologias voltadas para *Smart Grids* da Uni-

versidade Federal do Espírito Santo. Nele podem-se observar dois blocos fundamentais: Unidade de Gerenciamento e Controle (UGC); Unidade Consumidora (UC).

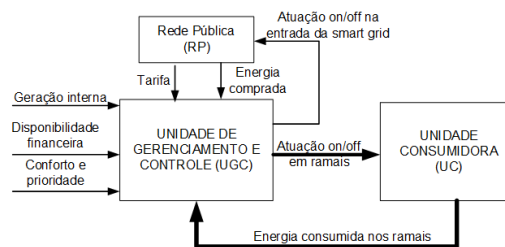


Fig 1. Sistema de gerenciamento e controle de curva de demanda.

A UGC recebe as seguintes informações:

- Geração interna, que é a quantidade de energia gerada localmente;
- Disponibilidade financeira, ou o quanto o consumidor pode ou quer gastar com energia;
- Conforto e prioridade, que representam quais dispositivos podem ser desligados ou ligados de acordo com o conforto do usuário ou prioridade do equipamento;
- Energia comprada, que é a energia fornecida pela concessionária via Rede Pública (RP);
- Tarifa, que é o custo da energia, se adquirida da RP, em um determinado momento;
- Energia consumida nos ramais da UC.

A UGC gera:

- Atuação nos ramais da UC, conectando ou desconectando eletricamente tais ramais, a fim de controlar a curva de demanda;
- Atuação na entrada da rede inteligente, de modo a permitir ou não a compra de energia elétrica da RP.

Na Fig. 2 é apresentado, em detalhe, a UGC, a qual subdivide-se em três módulos que podem se comunicar através de um barramento de dados. São eles:

- Banco de Dados (BD), o qual provê uma forma eficiente de guardar e disponibilizar todas as informações que forem pertinentes, isto é, que servirem aos demais módulos da UGC;
- Módulo Supervisório (MS), o qual é responsável por gerenciar e apresentar da forma que for mais conveniente às informações de operação da rede inteligente;
- Módulo de Otimização e Controle (MOC), responsável pelo controle da curva de demanda.

A principal função do MS é apresentar as informações do consumo e qualidade de energia, de modo que os consumidores entendam e reconheçam com facilidade seus perfis de consumo, seja através visualização de gráfico ou relatórios.

O MOC tem base em um otimizador metaheurístico que leva em consideração todas as informações que

entram na UGC e que são armazenadas no banco de dados. O objetivo é controlar os ramais através de mecanismos de atuação. Assim, as cargas podem ser desligadas ou acionadas automaticamente no instante desejado, inclusive em situações onde a tarifa de energia é mais barata. O efeito será o deslocamento da curva de demanda.

Com o MOC, a rede inteligente também será capaz de determinar de forma automática em quais instantes ela comprará energia da concessionária.

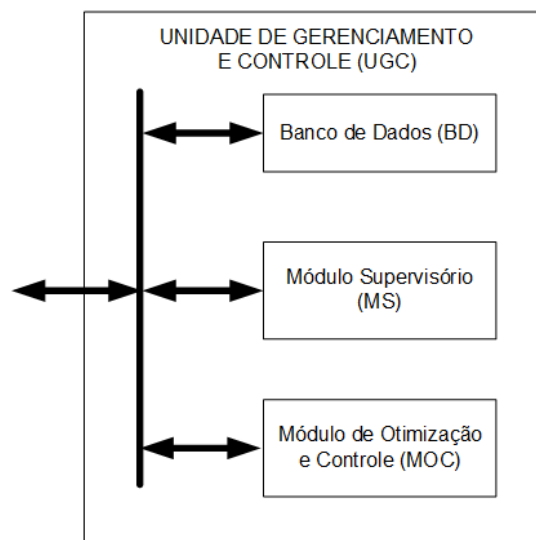


Fig. 2. Detalhe da unidade de gerenciamento e controle.

Na Fig. 3 é mostrado em detalhes a UC, que se divide nos seguintes módulos:

- Módulo Atuador *on/off*, que é formado por um conjunto de contatores que conectam/desconectam eletricamente os ramos do barramento central da rede inteligente;
- Módulo de Medição de Energia, o qual é responsável por medir a corrente em cada ramo, tensão na RP e tensão na geração interna.

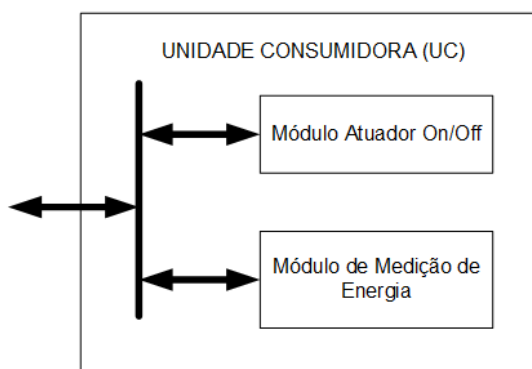


Fig. 3. Detalhe da unidade de gerenciamento e controle.

A Fig. 4 ilustra a arquitetura geral. As linhas tracejadas representam comandos ou dados. Já as linhas contínuas representam barramentos de energia elétrica. Nesta é mostrada a ligação de todos os módulos citados anteriormente, com a adição de:

- Quadro de distribuição, para distribuição da energia elétrica;
- Controlador, dispositivo microcontrolador pra efetuar leituras e controle;
- Carga, dispositivo que de fato consome a energia.

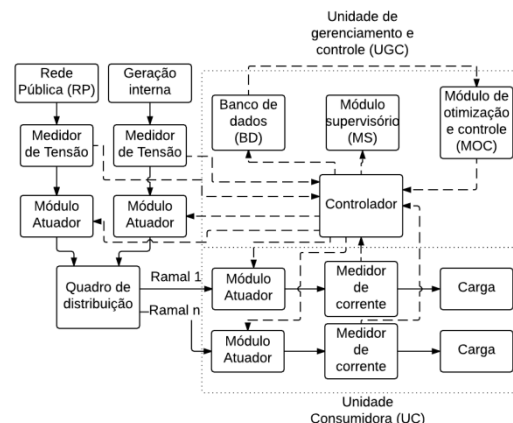


Fig. 4. Sistema geral.

Na Fig. 4 pode-se observar os medidores de tensão, este são implementados nos ramais principais das fontes, tanto da rede pública quanto da geração interna, assim, é possível determinar qualidade da energia que chega. E junto com os medidores de corrente em cada ramal calcular a potência que está sendo utilizada para então construir a curva de demanda.

4 Gerenciamento de Demanda

O Gerenciamento pelo Lado da Demanda é definido por ações no lado do consumidor, e busca modelar a curva de carga para beneficiar tanto o consumidor como a concessionária. As ações mais importantes no lado da demanda são: redução do consumo de ponta, preenchimento de vales e deslocamentos de cargas. Com isso, o GLD concede uma alternativa para evitar grandes investimentos no aumento da capacidade de geração. Em seu escopo também destaca a independência energética por meio de fontes limpas de energia (Gellings and Chamberlin, 1993). No GLD indireto, o consumidor organiza sua demanda em resposta aos preços gerados pela concessionária (Garcia, 2002). Considerando que as concessionárias distribuidoras passem a estimular o deslocamento do consumo por meio de tarifas mais caras em horários de pico, o GLD planejará reduzir o consumo nestes períodos. Então, o usuário poderá definir um perfil que possibilita a redução dos custos e aumento da eficiência do sistema (Campos, 2004).

O algoritmo de GLD indireto do projeto será capaz de ligar ou desligar, automaticamente, uma carga e então agendar o uso dos ramais de uma residência para fim de modelar a curva de carga, ou seja, definir em qual horário utilizar cada ramal. Seus parâmetros de entrada são: valor da tarifação no tempo e configuração de conforto. Dependendo das escolhas dos

parâmetros o algoritmo limita o uso de certas cargas e o usuário não tem controle sobre essas cargas.

Uma matriz de conforto genérica é exemplificada na Tabela 1. Ela apresenta a prioridade de uso dos ramais em cada faixa de horários. As faixas de uso são definidas como: conforto máximo, médio e mínimo.

Conforto máximo é definido pelos horários em que o usuário habitualmente usa o ramal, sendo representado pelo valor 3.

Conforto médio é definido pelos horários próximos aos que o usuário habitualmente usa o ramal, sendo representado pelo valor 2.

Conforto mínimo é definido pelos horários longe dos que o usuário habitualmente usa o ramal, sendo representado pelo valor 1.

Tabela 1. Matriz de conforto

Hora \ Ramal	...	6	7	8	...	24
Ramal 1	...	2	3	3	...	2
Ramal 2	...	1	3	3	...	1
...	...	...	...	...	...	...
Ramal n	...	3	3	2	...	3

A matriz de conforto é obtida através das informações provenientes do sensor de tensão instalado nos pontos de chegada de energia e do medidor de corrente em cada ramal. Durante certo período de tempo esses dados serão capturados e armazenados em um banco de dados para, posteriormente, serem analisados. Com sua análise é possível determinar a curva de carga de cada ramal e com isso gerar a matriz de conforto, possibilitando o cálculo de agendamento de horário de uso.

Para o cálculo do agendamento, o usuário determinará um valor máximo que pode ser gasto por dia e uma das opções de conforto, máximo, médio ou mínimo. E com estas entradas o algoritmo gera, com base na matriz de conforto e tarifação no tempo, o plano de controle de demanda.

O plano de demanda com conforto máximo procura alocar os ramais próximos aos horários habituais, porém respeitando o valor máximo de gasto diário. Nesta configuração a valor gasto diário possivelmente estará perto do valor determinado.

O plano com o conforto médio procura agendar as cargas nos horários próximos aos habituais e que seja de tarifas mais baratas, o que propõe uma readaptação de usuário que perderá conforto. Nesta configuração o valor gasto será, possivelmente, mais barato do que o pré-determinado.

O plano com conforto mínimo agenda as cargas em horários distantes dos habituais, reduzindo o conforto devido à mudança de horários. Assim, esta configuração é a que, possivelmente, terá menor valor de gasto sem ultrapassar o pré-determinado.

5 Medidores e Atuadores

5.1 Medidor de corrente

Nesta subseção será descrito sobre o circuito e componentes do medidor de corrente que é representado na Fig. 5.

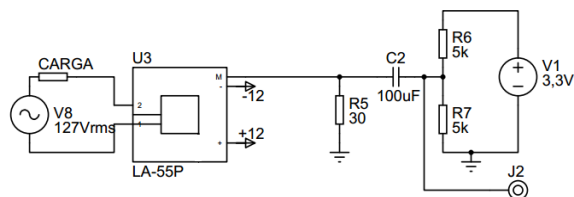


Fig. 5. Circuito medidor de corrente

No projeto foi usado, para medição de corrente, o sensor LA-55p do fabricante LEM, este trabalha de forma não invasiva e tem limite máximo de ± 70 A. Porém foi determinado como valor máximo ± 50 A de entrada. Ele está sendo alimentado por uma fonte simétrica de ± 12 volts. A corrente na saída do sensor segue uma proporção de 1:1000 como se fosse uma fonte de corrente controlada por corrente, assim, ± 50 A na entrada implica em ± 50 mA na saída. Deste modo, o valor de R5 é 30Ω , este foi calculado para que seja dissipado $\pm 1,5$ volt no mesmo, formando um tensão de pico a pico de 3 volts, o que fica dentro dos limites de leitura do controlador.

Devido ao sistema embarcado ser capaz de realizar leituras apenas de 0,0 a 3,3 volts, foi adicionado um circuito divisor de tensão para que se tenha um deslocamento de 1,65 volts no sinal de saída do sensor. Este é implementado utilizando uma fonte de 3,3 volts e um divisor de tensão com os resistores de $5 K\Omega$. O pino J2 é a entrada no sistema embarcado.

5.2 Medidor de Tensão

Nesta subseção será descrito sobre o circuito e componentes do medidor de tensão, como mostra a Fig. 6.

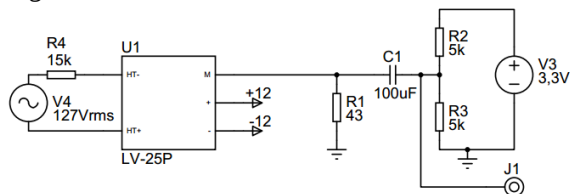


Fig. 6. Circuito medidor de tensão

No projeto foi usado para medição de tensão o sensor LV-25p fabricado pela LEM. Este funciona como se fosse uma fonte de corrente controlada por corrente. Desse modo, a corrente que passa por R1 será proporcional a corrente que passa em R4, vide Fig. 6. O sensor está sendo alimentado por uma fonte simétrica de ± 12 volts. A corrente máxima na entrada, que passa por R4, deve ser 14 mA. Então considerando a tensão em rms de entrada sendo 127 volts e adicionando 10% para oferecer uma faixa de segurança no caso de aumento na tensão medida. Levando isso em

consideração temos que a tensão de pico máxima será $127 \times \sqrt{2} \times 1,1 \approx 198$ volts. Dessa forma, R4 tem valor mínimo de $14,14 \text{ K}\Omega$, no protótipo escolheu-se o valor de $15 \text{ K}\Omega$. Isso permite que a tensão máxima medida alcance um valor de 210 V.

A corrente na saída do sensor segue uma proporção de 2500:1000, assim, $\pm 14 \text{ mA}$ passando por R4 implica em $\pm 35 \text{ mA}$ passando por R1. Deste modo, o valor de R1 é 43Ω , este foi calculado para que seja dissipado $\pm 1,5$ volt no mesmo, o motivo está descrito na seção 5.1.

5.3 Circuito Atuador

No circuito atuador foi usado o relé de estado sólido SSR-25 DA do fabricante FOTEK, que suporta chavear até 25 amperes. Para garantir o acionamento do mesmo, foi implementado um *driver* de corrente. Este *driver* foi construído com o transistor BC547 funcionando no modo de saturação. Assim, o relé é acionado com aproximadamente 5 volts proveniente da fonte. A Fig. 7 apresenta o circuito do atuador, onde o pino J1 é conectado ao microcontrolador.

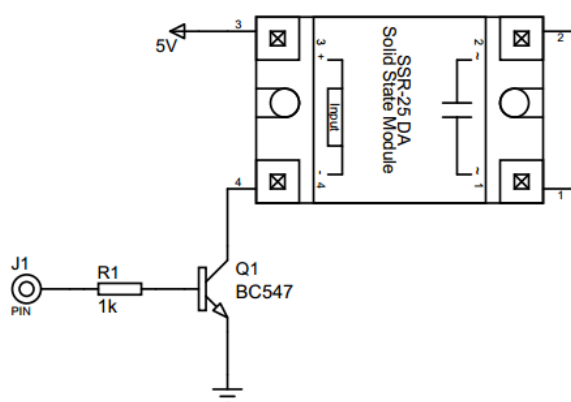


Fig. 7. Circuito atuador

6 Resultados

Os circuitos propostos nas subseções 5.1, 5.2 e 5.3 foram implementados como descritos.

Para aquisição de dados foi usado um conversor analógico-digital de 12 bits. Considerando o 25º harmônico da frequência fundamental de 60 Hz, ou seja, a frequência de 1500 Hz, deve-se amostrar com a taxa de no mínimo 3000 Hz segundo o Teorema de Nyquist, onde este descreve que a taxa de amostragem deve ser no mínimo duas vezes maior do que a maior frequência para garantir a reconstrução do sinal (Landau, 1967). No projeto, foi escolhido o valor de 5000 Hz para a taxa de amostragem de ambos os sensores, permitindo uma maior flexibilidade na aquisição de dados.

A Fig. 8 representa a leitura do circuito medidor de tensão representada na subseção 5.2. Os valores medidos foram de uma rede elétrica monofásica com tensão de $127 \text{ V}_{\text{RMS}}$ e 60 Hz de frequência.

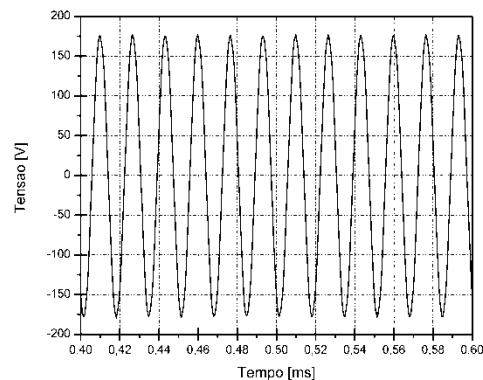


Fig. 8. Sinal de tensão

A Fig. 9 representa uma leitura de corrente consumida por um ferro de solda através do circuito demonstrado na subseção 5.1. O mesmo estava ligado na tensão elétrica representada na Fig. 8.

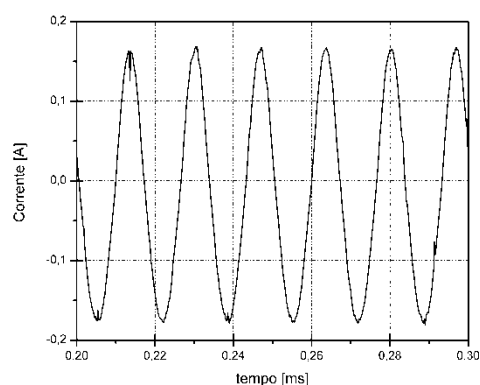


Fig. 9. Sinal de corrente

A seção 2 descreve alguns parâmetros de qualidade de energia. A partir das medições de tensão (Fig. 8) podem-se determinar esses requisitos: tensão regime permanente (subseção 2.1), harmônicos (subseção 2.2), flutuação de tensão (2.3) e variação de frequência (subseção 2.4). A Fig. 10 apresenta a FFT da Fig. 8 que auxilia na determinação dos critérios de qualidade.

A curva de demanda é montada a partir dessas informações como explicado na seção 3.

Para garantir o agendamento, o circuito demonstrado na subseção 5.3 desempenha a função de atuação para cada ramal, proporcionando que o mesmo só pode funcionar em determinado tempo.

7 Conclusão

O desenvolvimento de circuitos atuadores e circuitos medidores de tensão e correntes se mostrou adequado para o algoritmo de gerenciamento, pois o mesmo pode obter as informações necessárias e a partir delas atuar sobre ramais da rede e controlar a curva de demanda.

A proposta desse modelo de *Smart Grid* tem-se apresentado adequadamente em dois cenários: o cenário do usuário e o cenário da concessionária.

Em relação ao consumidor, o sistema possibilita a escolha de planos de demanda com base nos equipamentos e limite de custo diário, isso resultará em uma conta de energia de menor valor, ou até uma redução total da conta e possível venda de energia para concessionária dependendo do porte de geração interna. As informações de qualidade, tempo de uso e horários de utilização de cada aparelho pode se tornar uma ferramenta de conscientização fazendo com que o usuário perceba a importância de economizar e readequar cargas.

Do lado da concessionária, a suavização da curva de carga proposto pelo GLD resultará em sistemas de geração menos robustos e mais baratos, além de diminuir perdas de transmissão.

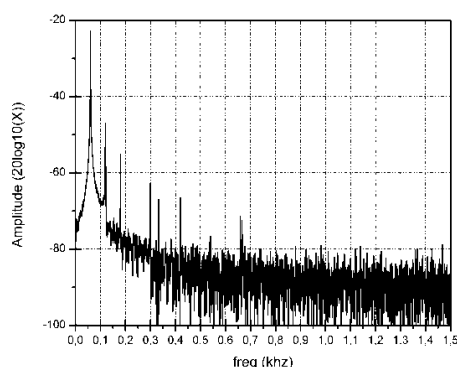


Fig. 10. Espectro de frequência do sinal de corrente

Agradecimentos

Os autores deste artigo agradecem o apoio do CNPq, Proc. 443384/2014-2 e da FAPES/ES, Proc. 67651259/14.

Referências Bibliográficas

- Ackermann, T., Andersson, G., and Söder, L. (2001). Distributed generation: a definition. *Electric power systems research*, 57(3), pp. 195-204.
- Agência Nacional de Energia Elétrica, (2008). *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST: Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica*.
- Blum, C. and Roli, A. (2003). Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison. *ACM Computing Surveys*, 35(3), pp. 268-308.
- Falcão, D. M. (2009). Smart grids e microrredes: o futuro já é presente. *Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos*, 8.
- Franco, E. (2005). *Qualidade de Energia - Causas, efeitos e soluções*. Engcomp tecnologia em automação e controle LTDA.
- Gellings, C. W. (1985). The concept of demand-side management for electric utilities. *Proceedings of the IEEE*, 73(10), pp. 1468-1470.
- Gellings, C. W. and Chamberlin, J. H. (1993). *Demand-side Management, p. Concepts and Methods*. Oklahoma: PennWell Publishing Company.
- Inatomi, T. A. H. and Udaeta, M. E. M., 2007. *Análise dos impactos ambientais na produção de energia dentro do planejamento integrado de recursos*. III Workshop Internacional Brasil - Japão: Implicações Regionais e Globais em Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável.
- Landau, H. J. (1967). Sampling, data transmission, and the Nyquist rate. *Proceedings of the IEEE*, 55(10), pp. 1701-1706.
- Mehl, E. L. (2012). *Qualidade da energia elétrica*. Universidade Federal do Paraná.
- Santos, F. A. and Santos, F. M. (2008). *Geração distribuída versus centralizada*.
- Siebert, L. C., Aoki, A. R., Yamakawa, E. K., and Toledo, F. O. (2012). *Gerenciamento pelo Lado da Demanda em Redes Inteligentes Utilizando Algoritmos Genéticos*. IV SBSE-Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos.