



**XXI SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO - XIV

GRUPO DE ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E GESTÃO DA TECNOLOGIA DA INOVAÇÃO- GET

**ESTUDO SOBRE A REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA NO HORÁRIO DE
PICO ATRAVÉS DO GERENCIAMENTO DE REFRIGERADORES**

**Glauco Niro
DSEE/FEEC/UNICAMP**

**Luiz Carlos Pereira da Silva(*)
DSEE/FEEC/UNICAMP**

RESUMO

A expansão contínua do uso da eletricidade aumenta a responsabilidade das concessionárias em fornecer energia com qualidade e segurança. Uma alternativa ao método tradicional de expansão dos sistemas elétricos (construção de novas usinas e redes de transmissão) é o gerenciamento da demanda, conceito que integra as Smart Grids, definido como um conjunto de medidas que buscam mudar os hábitos de consumo, propiciando benefícios ao sistema elétrico e ao meio ambiente. Neste artigo analisa-se o impacto que o gerenciamento de refrigeradores pode proporcionar ao sistema elétrico, especificamente na redução do consumo de energia no horário de pico.

PALAVRAS-CHAVE

Gerenciamento de Carga, Pico de Demanda, Refrigeradores, Sistemas de Energia, Redes Inteligentes.

1.0 - INTRODUÇÃO

A energia elétrica foi uma das grandes responsáveis pelo desenvolvimento e progresso da humanidade no último século. Seu consumo cresce a cada dia fazendo com que o sistema elétrico opere perto de sua capacidade máxima, aumentando o risco de falhas e apagões que, através de efeito cascata podem afetar grandes áreas (1).

Para atender esse aumento de demanda, o sistema elétrico vem sendo expandido, tanto na geração quanto na transmissão e distribuição. Porém esse modelo começa a ser repensado, já que exige altos investimentos e provoca impactos ambientais (2). Os envolvidos com o sistema elétrico vêm entrando em consenso da necessidade de uma rede mais inteligente, que detecte e solucione problemas com rapidez e eficiência. Nesse contexto aumentam as discussões e os estudos sobre as chamadas Smart Grids e os benefícios que elas podem proporcionar.

Smart Grids representam um modelo de rede que, através de comunicação em duas vias (consumidores enviando e recebendo informações do sistema elétrico) e com a adoção de medidores eletrônicos e inteligentes, permitirá que os consumidores tenham um papel mais ativo na operação do sistema elétrico, através do gerenciamento de alguns de seus equipamentos e de mudanças nos seus hábitos de consumo.

O gerenciamento do lado da demanda permite, por exemplo, modificações na curva de carga de uma concessionária, proporcionando benefícios dentre os quais a redução do consumo de energia elétrica no horário de pico. Para incentivar a participação dos consumidores em programas de gerenciamento, as concessionárias poderão oferecer incentivos financeiros e assim gerenciar os equipamentos que permitam isso, ou seja, possam ser ligados e desligados sem acarretar em prejuízo e danos para o usuário.

Um dos aparelhos que apresentam potencial de gerenciamento e ser integrado nas Smart Grids é o refrigerador doméstico, objeto de estudo deste trabalho, que devido à sua inércia térmica e isolamento permitem ser ligados e

(*)DSEE/FEEC/UNICAMP, CP 6101, Av. Albert Einstein, n° 400-sala 217A-Bloco A-Cidade Universitária
CEP 13.081-970 Campinas, SP,-Brasil
Tel: (+55 19) 3521-3739 –Email: lui@dsee.fee.unicamp.br

desligados por intervalos de tempo sem causar prejuízos, podendo em horários de pico receber comando para serem desligados e aliviar a carga no período que o sistema está mais carregado.

2.0 - SMART GRIDS

As concessionárias vêm aumentando a busca por uma rede que seja mais segura e confiável, além de fornecer energia com qualidade. Para isso, elas têm investido em pesquisas, controle e monitoramento de suas redes, principalmente através de medidores eletrônicos que, além de aumentar a eficiência da medição, permitem monitoramento em tempo real das unidades consumidoras.

2.1 Características e Benefícios das Smart Grids

As Smart Grids apresentam como características a capacidade de detectar, analisar, atuar e sanar problemas que surjam na rede elétrica; possibilidade de incorporar equipamentos de consumidores na operação da rede; fornecimento de energia com a qualidade necessária para os modernos equipamentos atuais; integração com o sistema das unidades de geração distribuídas, incluindo as renováveis; monitoramento em tempo real para otimizar o uso de capitais e reduzir custos operacionais e de manutenção do sistema; medição eletrônica, que permitirá a adoção de tarifas diferenciadas por horário (3).

Com a integração de novas tecnologias, monitoramento da rede, adoção de tarifas diferenciadas por horário que incentivam o consumidor a mudar seus hábitos de uso de equipamentos, as Smart Grids podem oferecer benefícios como menor risco de blackouts, rápida recuperação do sistema após a ocorrência de distúrbios, possibilidade do consumidor gerenciar o uso de seus equipamentos, novas oportunidades de P&D e preservação ambiental.

2.2 Medição Eletrônica

Uma das características das Smart Grids é a possibilidade de através de incentivos financeiros, como tarifas diferenciadas por horário, o consumidor gerenciar seus equipamentos, mudando seus hábitos de consumo e beneficiando a operação do sistema elétrico. Porém para que isso seja possível é necessária uma interface inteligente entre o consumidor e a concessionária, feita através de medidores eletrônicos de energia.

Esses medidores devem ter funcionalidades adicionais aos atuais. Além da energia consumida, podem medir a energia exportada, caso o consumidor tenha essa capacidade, registrar informações como a elaboração de perfil de consumo, interrupções (frequência e duração), opções de tarifas para o consumidor escolher a que mais se adeque ao seu perfil, possibilidade de energia pré-paga e até mesmo controle individual sobre alguns equipamentos (4).

A oferta de tarifas diferenciadas com o controle individual e gerenciamento de equipamentos pode provocar mudanças na curva de carga de uma concessionária, permitindo que durante o horário de pico, haja redução no consumo de energia e aumento da margem de segurança de operação do sistema.

2.3 Gerenciamento de Carga

Gerenciamento de carga em redes de distribuição visa alterar os hábitos de consumo de energia do usuário final, promovendo mudanças na curva de carga a fim de prover benefícios para o sistema elétrico. Além de reduzir o consumo no horário de pico, pode ser considerado como reserva girante, não só para os casos de pico de demanda, mas também quando ocorrer faltas no sistema, proporcionando alívio de carga, controle de tensão e frequência (5). Os principais tipos de mudança na curva de carga obtidas com o gerenciamento de carga são mostrados na figura 1.

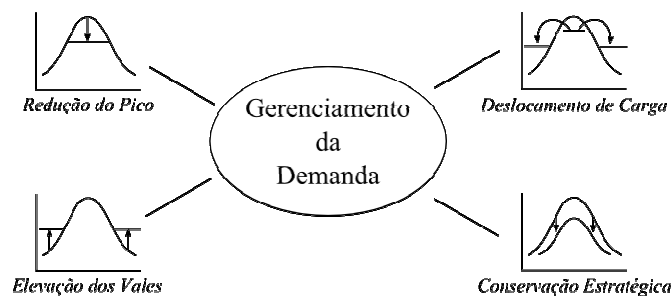


Figura 1 – Tipos de Gerenciamento de Demanda (6)

O gerenciamento do tipo *redução do pico* é a forma mais clássica. Através de controle direto pela concessionária, reduz-se o pico da curva de carga. A *elevação dos vales* é a segunda forma clássica de gerenciamento. Estimula-

se o uso de equipamentos quando o sistema não está carregado, elevando os vales da curva de carga. No *deslocamento de carga* combina-se os dois tipos anteriores, deslocando as cargas do pico para antes e depois desse intervalo. O tipo *conservação estratégica* busca reduzir a demanda em toda a curva, através de programas que incentivem o consumo de forma eficiente (6).

2.4 Refrigeradores em Smart Grids

Para o gerenciamento, o equipamento deve permitir ser ligado e desligado sem interferir na rotina do usuário. Um equipamento que atende essa exigência é o refrigerador doméstico, que graças a sua isolamento e inércia térmica pode ser ligado ou desligado por intervalos de tempo sem acarretar em prejuízos.

No Brasil, estima-se que em 92,1% das residências tenham refrigeradores (7). Considerando-se que em cada residência existe pelo menos um aparelho, existem aproximadamente 53 milhões de refrigeradores, que são responsáveis por cerca de 34% do consumo residencial total de energia (8). Essa quantidade elevada de refrigeradores e conseqüentemente grande parcela no consumo de energia o habilitam a se integrar na operação do sistema elétrico, permitindo que uma concessionária envie um sinal para que os refrigeradores sejam desligados num momento que o sistema elétrico precise de alívio de carga ou liga-los num momento em que seja necessário.

3.0 - MODELO DO REFRIGERADOR

Para a análise do impacto dos refrigeradores, procurou-se um modelo que fosse simples, porém descrevesse seu comportamento de forma fiel. O modelo utilizado foi:

$$C \frac{dT}{dt} + G(T - T_a) + P_{disturbio} = -w \cdot P$$

onde C é a capacidade térmica da massa de ar, G é a condutância térmica, P é a potência do aparelho, T é a temperatura interna do ar, T_a é a temperatura ambiente, $w = 1$ quando o aparelho está ligado e $w = 0$ quando está desligado e $P_{disturbio}$ representa distúrbios como a abertura/fechamento de porta (9).

No início da simulação, os refrigeradores tiveram suas temperaturas internas iniciais distribuídas aleatoriamente dentro da faixa de operação. A temperatura ambiente foi variável de acordo com um dia típico. Quando a porta é aberta o ar quente exterior entra no refrigerador. Esse ar quente provoca um aumento da temperatura interna, ligando o refrigerador para que a temperatura abaixe. Cada evento desse provoca um aumento de 10 Wh no consumo de energia (10). As aberturas de porta foram modeladas como uma potência constante durante um intervalo de tempo. A ocorrência desses eventos foi sorteada de forma aleatória, com maior probabilidade de incidência nos horários de almoço e jantar.

4.0 - RESULTADOS

A idéia de implantar o gerenciamento em refrigeradores é atuar em seu funcionamento de modo que seja possível deixa-los desligados o maior tempo possível no horário de pico e assim reduzir a demanda de potência do sistema. Inicialmente foi feita simulação do gerenciamento de um grupo de refrigeradores para em seguida inserir esses resultados em simulações que buscavam analisar o impacto desse gerenciamento em um sistema elétrico.

4.1 Gerenciamento de Refrigeradores

Primeiramente implementou-se um controle direto para gerenciamento. Esse controle consiste em um instante antes do horário de pico os refrigeradores recebem um sinal para serem ligados, armazenando energia térmica e no horário de pico outro sinal, desta vez para ser desligado. Considerou-se que o pico de consumo no sistema ocorre às 19:00. A figura 2-(a) mostra o resultado do funcionamento de um grupo de 100 refrigeradores.

Esse tipo de gerenciamento mostrou-se eficiente na redução da demanda de potência no horário de pico, entretanto, pode-se notar que quando todos os refrigeradores recebem o comando para serem ligados, há um grande pico de consumo. Isso é indesejável, pois sobrecarrega o sistema elétrico.

Para sanar esse problema, o grupo de 100 refrigeradores foi dividido em subgrupos de 10, os quais foram ligados em instantes diferentes. O resultado é mostrado na figura 2-(b).

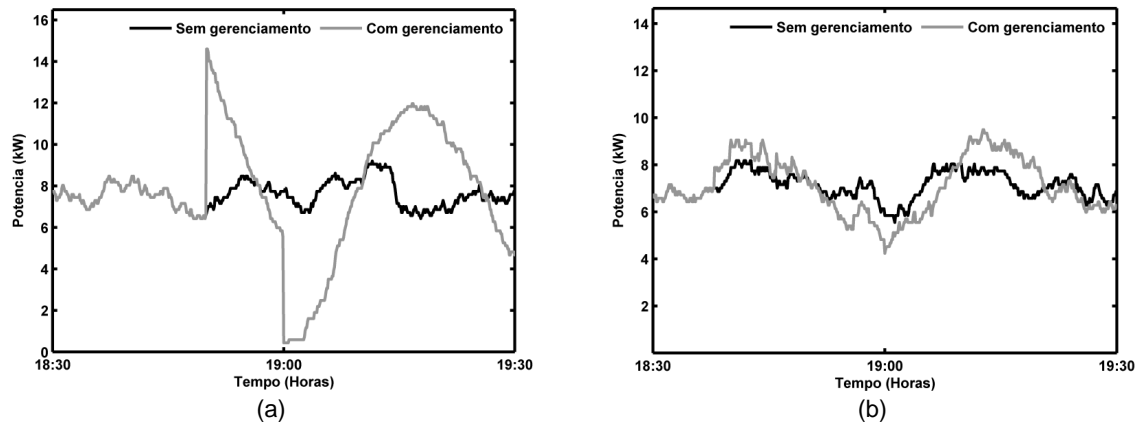


Figura 2 – Demanda de de potência de 100 refrigeradores com gerenciamento direto (a) e com subgrupos (b).

Com essa subdivisão, não há mais o pico elevado de potência quando o gerenciamento é iniciado, porém nota-se que os refrigeradores ainda permanecem com algum sincronismo em seu funcionamento. Esse gerenciamento, entretanto, não apresentou grande redução na demanda de potência e o tempo em que a demanda considerando o gerenciamento ficou abaixo do caso sem gerenciamento não foi grande (15 minutos). Torna-se necessário encontrar um esquema de gerenciamento que apresentasse maior redução, por um tempo maior e sem pico na demanda no seu início.

Foi proposto então um gerenciamento que atuasse nas temperaturas limites de funcionamento do refrigerador (temperaturas nas quais o refrigerador liga e desliga). O objetivo é armazenar energia térmica durante mais tempo para poder liberá-la no horário de pico. A figura 3-(a) mostra a temperatura média de um grupo de 100 refrigeradores. Observa-se que quando o gerenciamento é iniciado, a temperatura média diminui, permanecendo próxima do limite mínimo de funcionamento (temperatura na qual o refrigerador é desligado) e quando ocorre o momento de maior carregamento no sistema ela eleva-se, indicando que a energia armazenada está sendo liberada. O resultado desse gerenciamento na demanda de potência desse grupo de 100 refrigeradores é mostrado na figura 3-(b).

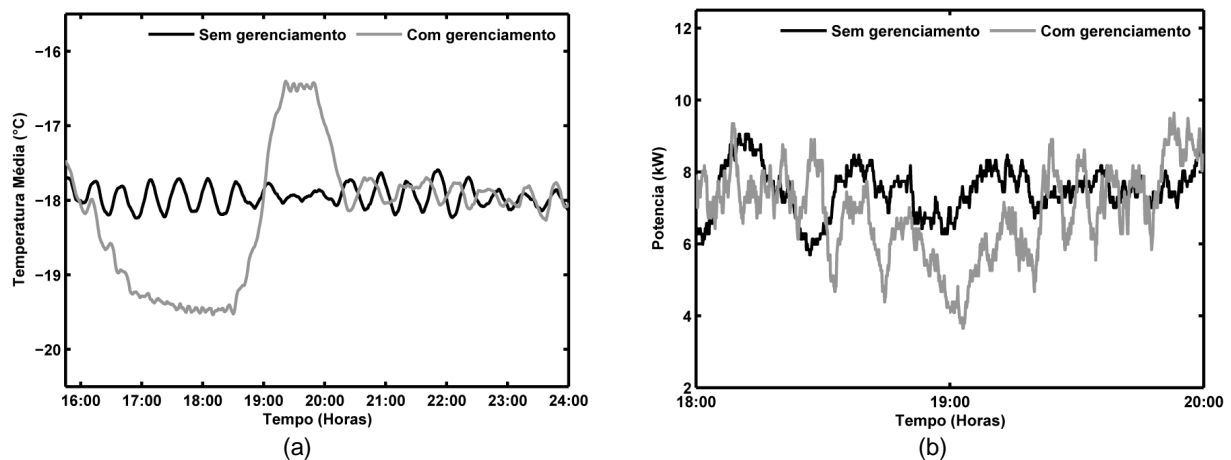


Figura 3 – Temperatura média (a) e demanda de potência (b) de 100 refrigeradores com gerenciamento dos limites de temperatura de funcionamento.

Esse tipo de gerenciamento apresentou melhores resultados, pois não houve pico de potência quando ele foi iniciado, além da demanda de potência permanecer abaixo do original por mais tempo do que nos outros dois tipos (47 minutos), sendo esse tipo de gerenciamento adotado para as análises a seguir.

4.2 Impacto em Sistemas Elétricos

Para analisar o impacto do gerenciamento de refrigeradores em sistemas elétricos, utilizou-se uma rede de 70 barras e 69 ramos que no caso base apresenta potência ativa total de 3,8 MW e potência reativa total de 2,7 MVA (11). A curva de carga considerada em cada barra segue a forma mostrada na figura 4, com pico de consumo às 19:00.

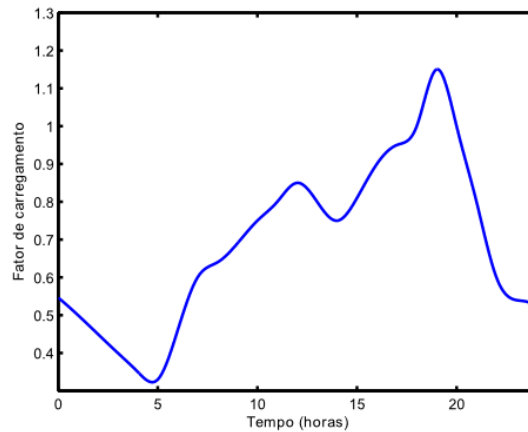


Figura 4 – Curva de carga adotada.

A potência média de um refrigerador é de 75 W. Em cada barra, estimou-se que aproximadamente 10% da demanda é referente aos refrigeradores (12). Encontrando o número de refrigeradores em cada barra de carga, rodou-se fluxo de carga (13) com a influência dos refrigeradores nas barras, o que foi feito da seguinte forma:

$$P_{gerenc.}^{barra} = P_{barra} - P_{refr.} + P_{refr. ger.}$$

onde $P_{gerenc.}^{barra}$ é a potência da barra após o gerenciamento, P_{barra} é a potência da barra sem o gerenciamento, $P_{refr.}$ é a potência do grupo de refrigeradores sem gerenciamento numa dada barra e $P_{refr. ger.}$ é a potência de um grupo de refrigeradores com gerenciamento numa dada barra. Na figura 5 mostra-se o resultado obtido na subestação do sistema.

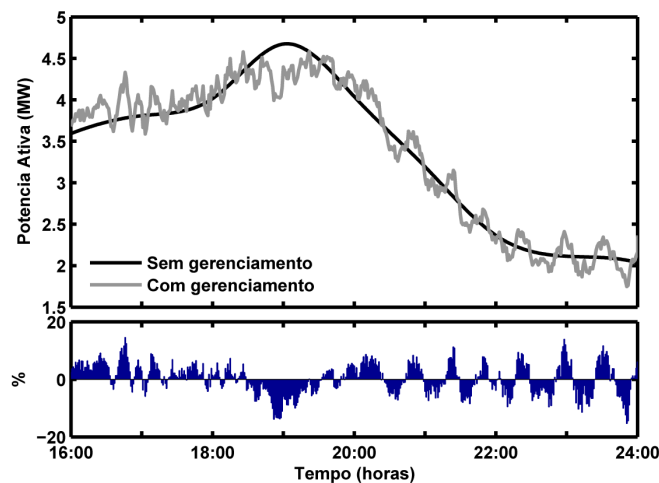


Figura 5 – Potência ativa na subestação do sistema com e sem gerenciamento de refrigeradores.

Sem o gerenciamento, o pico de consumo ocorre às 19:02, com demanda de potência de 4676 kW. Com a presença de gerenciamento, a demanda de potência nesse instante é de 4344 kW e o maior pico acontece às 19:22, valendo 4582 kW, sendo menor que o pico sem gerenciamento (-2%). Além disso, a demanda de potência fica menor durante 54 minutos. Na parte de baixo da figura observa-se a variação percentual da demanda de potência com o gerenciamento ao longo do período considerado. Durante o período de maior carregamento do sistema, a redução percentual da demanda chega a 13%.

A figura 6 mostra a redução percentual na demanda de potência ativa nas barras em que foi adotado o gerenciamento de refrigeradores – barras com carga e que podiam conter no mínimo 50 refrigeradores correspondendo a 10% da potência total.

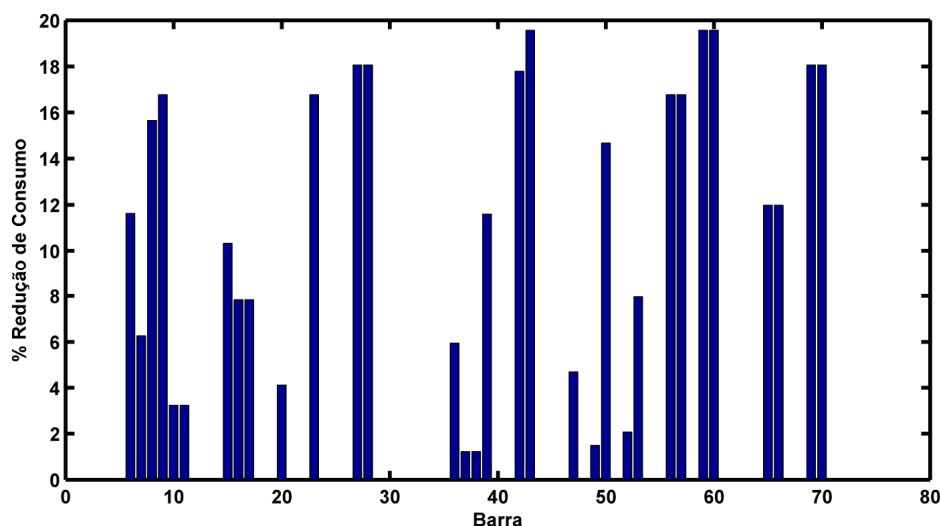


Figura 6 – Redução percentual na demanda de potência com a adoção do gerenciamento.

Pode-se notar que em todas as barras onde o gerenciamento foi adotado houve redução de demanda no horário de pico. Em algumas barras, como a 37 e 38 a redução foi menor (1,22%) e a maior redução foi nas barras 43, 59 e 60 (19,6%). As barras 37 e 38 estão entre as barras que apresentam maior potência de carga (0,385 MW) e consequentemente maior número de refrigeradores (400) comparado com as barras 43, 59 e 60 (0,024 MW e 50 refrigeradores). A Tabela 1 mostra o consumo diário de energia com e sem gerenciamento.

Observando-se a Tabela 1 nota-se que o consumo diário de energia nas barras em que foi adotado o gerenciamento de refrigeradores não apresentou grande variação, tendo oscilado pouco para mais ou para menos. Isso se deve ao fato de na implementação do gerenciamento ter sido utilizada a técnica *deslocamento de carga*, reduzindo o consumo de energia no horário de maior demanda e deslocando esse consumo para horários que o sistema estava menos carregado.

Tabela 1 – Consumo diário de energia (MWh) na ausência e presença de gerenciamento

Barra	Sem	Com	Barra	Sem	Com	Barra	Sem	Com
Subst.	66,06	66,05	23	0,4663	0,4661	50	0,5329	0,5327
6	0,6728	0,6726	27	0,4330	0,4328	52	3,7806	3,7804
7	1,2491	1,2489	28	0,4330	0,4328	53	0,9826	0,9824
8	0,4996	0,4994	36	1,3157	1,3155	56	0,4663	0,4661
9	0,4663	0,4661	37	6,4070	6,4068	57	0,4663	0,4661
10	2,4149	2,4147	38	6,4070	6,4068	59	0,3997	0,3995
11	2,4149	2,4147	39	0,6745	0,6743	60	0,3997	0,3995
15	0,7576	0,7574	42	0,4396	0,4395	65	0,6532	0,6530
16	0,9993	0,9990	43	0,3997	0,3995	66	0,6532	0,6530
17	0,9993	0,9990	47	1,6654	1,6653	69	0,4330	0,4328
20	1,8986	1,8984	49	20,718	20,722	70	0,4330	0,4328

Analisou-se também o efeito que o gerenciamento teria na redução de perdas ativas nos ramos do sistema. Na figura 7 é mostrada a perda ativa total. No instante de maior carregamento foi obtida uma redução de 8% nas perdas ativas totais no sistema estudado.

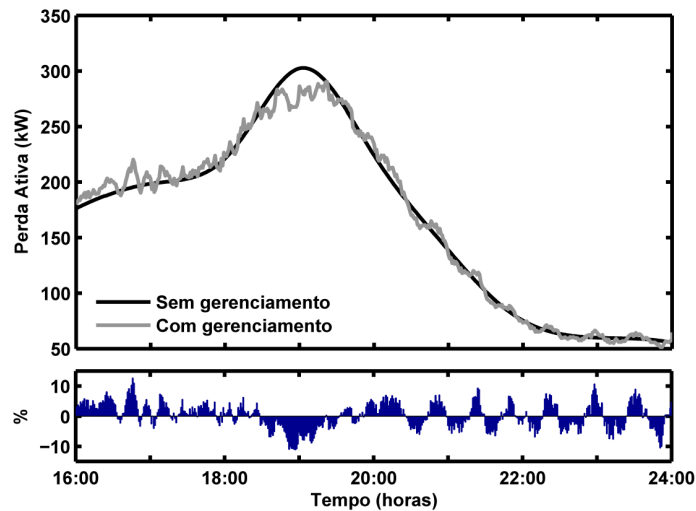


Figura 7 – Perda ativa no total nos ramos do sistema.

A figura 8 mostra o perfil de tensão do sistema no instante de maior carregamento. Pode-se observar que ao implementar o gerenciamento de refrigeradores e promovendo assim alívio de carga no momento de maior carregamento, também houve melhora no perfil de tensão do sistema nesse instante, com a tensão em algumas barras sendo elevada.

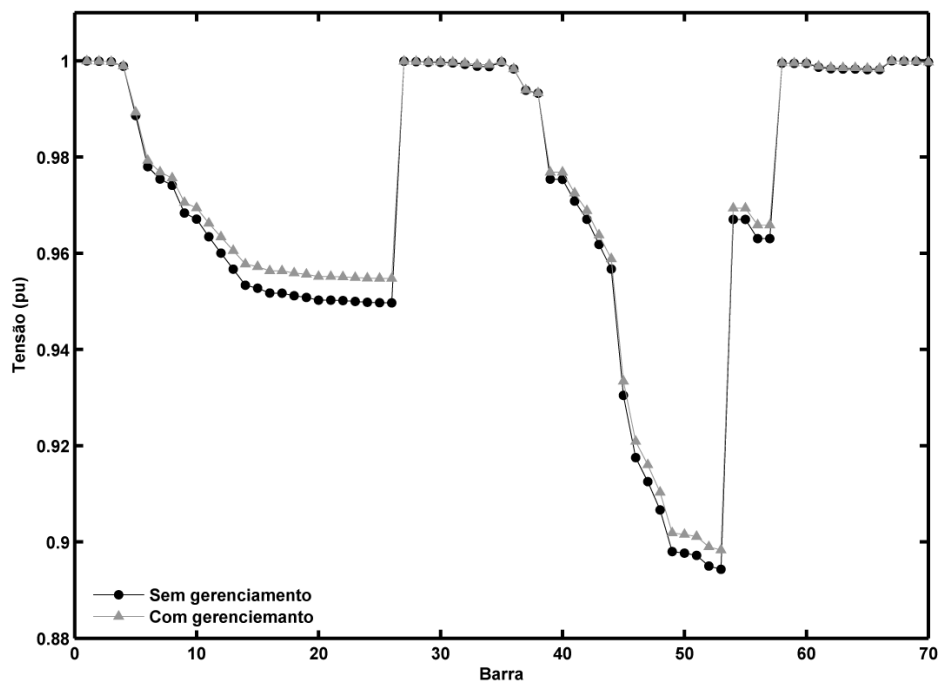


Figura 8 – Perfil de tensão nas barras do sistema.

5.0 - CONCLUSÃO

A adoção do gerenciamento de carga mostrou-se uma boa saída para atender o crescimento do consumo de energia e aumentar a segurança da operação do sistema elétrico. Para que ela tenha resultados, é necessário utilizar equipamentos que permitam ser ligados e desligados de acordo com o interesse das concessionárias sem afetar os consumidores.

O refrigerador doméstico mostrou-se ser um equipamento que atende esse requisito propiciando benefícios para o sistema. A adoção de esquemas de gerenciamento mostrou ser capaz de reduzir o consumo de energia no período de maior carregamento do sistema, deslocando esse consumo para momentos que o sistema estava com menos carga, beneficiando a operação do sistema elétrico.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Bellarmine, G.T.. Load management techniques. 2000 Southeastcon Proceedings of IEEE, pp. 139-145.
- (2) Paracha Z. I., Doulai, P. Load management: techniques and methods in electric power system. IEEE Energy management and power delivery Conf., v. 1, pp. 213-217.
- (3) Momoh, J. A. Smart Grid design for efficient and flexible power networks operation and control. IEEE Power Systems Conference and Exposition, pp. 1-8.
- (4) Agencia Nacional de Energia Elétrica. Implementação de medição eletrônica em baixa tensão.
- (5) Thornley, V., Kermskey, R., Barbier, C., Nicholson. User perception of demand side management. SmartGrids for distribution IET-CIRED Seminar, pp. 1-4.
- (6) Gellings, C. W. The concept of demand-side management for electric utilities. Proceedings of IEEE, v. 73, n. 10, p. 1468-1470.
- (7) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Domicílios particulares permanentes, por existência de alguns bens duráveis segundo as Unidades da Federação – PNAD 2007.
- (8) Empresa de Pesquisa Energética, Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica. v.3, n. 35, Jul. 2010.
- (9) Garcia-Valle, R., da Silva, L. C. P., Xu, Z., Ostergaard., J. Smart demand for improving short-term voltage control on distribution networks, IET Generation, transmission & distribution, vol. 3, pp. 724-732.
- (10) Masjuki, H. H., Saidur, Choudhury, R. I. A., Mahlia, T. M. I. Factors effecting energy consumption of household refrigerator-freezers. Proc. 2000 IEEE TENCON, v.2, pp. 92-96.
- (11) Baran, M. E., Wu, F. F. Optimal capacitor placement on radial distribution systems. IEEE Trans. Power Delivery, vol. 4, pp. 725-734.
- (12) Meier, A. Refrigerator energy use in the laboratory and in the field. Energy and Building, vol. 22, pp. 233-243.
- (13) Zimmerman, R. D., Murillo-Sánchez, C. E., Thomas, R. J. Matpower's Extensible Optimal Power Flow Architecture. Power and Energy Society General Meeting, 2009 IEEE, pp. 1-7.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Luiz Carlos Pereira da Silva nasceu em Guaraí-TO em 30/10/1972. Concluiu o doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas em 2001. Atualmente é Professor Livre Docente da Universidade Estadual de Campinas. Publicou 41 artigos em periódicos especializados e 112 trabalhos em anais de eventos. Participou de 10 eventos no exterior e 17 no Brasil. Atua na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Transmissão da Energia Elétrica, Distribuição da Energia Elétrica e Geração de Energia Elétrica.



Glauco Niro Nasceu em Campinas-SP em 26/07/1983. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas em 2008 e em 2009 ingressou no programa de mestrado da mesma universidade. Atua na área de Engenharia Elétrica com ênfase em Smart Grid e Gerenciamento da Demanda.