

Gerenciamento de Energia Residencial com Geração Fotovoltaica utilizando Recozimento Simulado

D.B. Vilar; C.M. Affonso; A. F. M. Cardoso
Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Pará - UFPA
Belém, PA, Brazil

diegovilar@hotmail.com; carolina@ufpa.br; antoniocardoso1989@gmail.com

Resumo - Este artigo apresenta uma metodologia para realizar o agendamento do uso de equipamentos residenciais utilizando o método de otimização Recozimento Simulado. O sistema utilizado considera uma residência com geração fotovoltaica, cargas programáveis como ar-condicionado, chuveiro elétrico e outras, além da tarifa Branca, uma tarifa de energia, implementada no Brasil, variável com o tempo. O objetivo do método é reduzir os gastos do consumidor com a compra de energia da concessionária, deslocando o consumo para horários em que a tarifa é mais baixa, e aproveitando a geração fotovoltaica disponível na residência. O método proposto considera ainda as preferências de horário para utilização dos equipamentos estipuladas pelo usuário, assumindo certo nível de conforto. Os resultados mostram-se satisfatórios, obtendo-se uma redução dos custos associados ao consumo de energia.

Palavras chaves-- Recozimento Simulado, Gerenciamento de Energia Residencial, Gerenciamento pelo Lado da Demanda, Geração Fotovoltaica.

I. INTRODUÇÃO

O Gerenciamento pelo Lado da Demanda (GLD) tornou-se uma ferramenta de planejamento importante para muitas companhias de eletricidade, e tem atraído considerável interesse da sociedade nos últimos anos. A utilização de diferentes tecnologias de fontes de energia renovável, como eólica, biomassa e fotovoltaica, além do conceito emergente de Redes Inteligentes (*Smart Grids*) que exige a automatização do sistema, impulsionam ainda mais o desenvolvimento de programas de gerenciamento pelo lado da demanda.

O gerenciamento da demanda consiste em controlar as cargas pelo lado do consumidor com o objetivo de operar o sistema com maior eficiência e sustentabilidade [1]. Por parte da concessionária, pode-se postergar a expansão do sistema com a construção de novas usinas e redes de transmissão e distribuição de energia para atendimento da carga. Por parte do consumidor, é possível reduzir os custos de energia elétrica.

O GLD pode ser feito de forma direta ou indireta [2,3]. Quando feito de forma direta, o controle da carga do

consumidor é feito diretamente pela concessionária, através de um contrato firmado entre ambas as partes, que determina as cargas a serem desligadas ou reduzidas em determinados períodos de tempo. Quando feito de forma indireta, a concessionária procura mudar os hábitos do consumidor através de campanhas educacionais ou ainda através de tarifas variáveis no tempo (*Time-Of-Use- TOU*). Neste caso, a concessionária gera sinais de preço que variam ao longo do dia e os consumidores deslocam espontaneamente sua demanda para horários mais baratos, a fim de reduzir seus custos de energia. Esta é uma das formas mais utilizadas de GLD, objetivando reduzir os custos operativos do sistema nos horários de pico, postergando investimentos.

Diversos trabalhos têm sido publicados recentemente com propostas de gerenciamento energético residencial (*Home Energy Management System – HEMS*). Em [4] é proposto um sistema capaz de analisar tanto o dado de consumo da residência quanto da geração em tempo real baseado em uma arquitetura com Zigbee e PLC (*Power Line Communication*). A partir desses dados é feito um controle remoto para garantir que os níveis de consumo se mantenham até um determinado limite conforme a resposta a demanda.

Em [5] é proposto um algoritmo capaz de reconhecer um sinal externo com pedido de corte de carga e duração, e dessa forma manter o consumo da residência abaixo de certo valor. São controladas as cargas de maior consumo como ar condicionado, chuveiro elétrico, secadora de roupas e carro elétrico, levando em consideração a prioridade das cargas e o conforto do usuário.

Em [6] é apresentada uma abordagem heurística para agendamento de eletrodomésticos inteligentes, usando sistemas tarifários reais e variantes no tempo, obtidos de países escandinavos e da América do Norte, com o intuito de reduzir o custo com a compra de energia, satisfazendo um critério de limitação de consumo. O algoritmo proposto aloca cada dispositivo um após o outro baseado, no que autor chama de “estratégia gulosa”.

Em [7] é proposto um algoritmo de otimização *bound-branch* e programação linear inteira, com o objetivo de

minimizar a conta com energia ajustando o perfil de consumo do usuário com base nas restrições no uso dos aparelhos, hábito de vida pessoal e limitações de potência.

Nesse contexto, este artigo propõe uma metodologia para realizar o agendamento de equipamentos programáveis em uma residência com geração fotovoltaica, de modo a reduzir os gastos do consumidor com a compra de energia fornecida pela concessionária. O método considera ainda o uso de uma nova tarifa de energia já estabelecida pela ANEEL, chamada Tarifa Branca, a qual é variável no tempo. Para a otimização do sistema utilizou-se o método de Recozimento Simulado, também conhecido como *Simulated Annealing* (SA), uma alternativa aos métodos de otimização natural tradicionais nesse tipo de problema [8,9,10].

II. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Este trabalho apresenta uma estratégia para agendamento de alguns dispositivos residenciais tendo como objetivo a minimização do custo da energia elétrica fornecida pela concessionária distribuidora, considerando a Tarifa Branca e que a residência em análise possui geração fotovoltaica.

O sistema considerado neste artigo inclui alguns equipamentos residenciais a serem agendados ao longo de um dia além da geração fotovoltaica conectada a rede elétrica, conforme ilustra a Fig. 1.

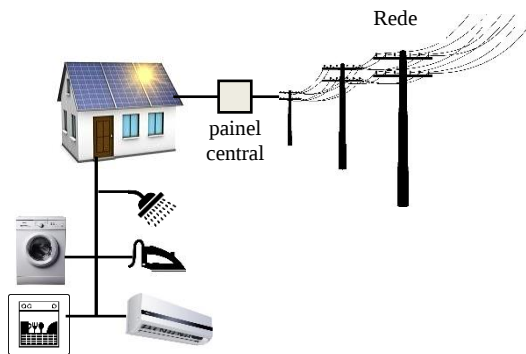


Figura 1. Sistema residencial considerado.

À hora de agendamento de cada dispositivo elétrico é a variável de decisão do problema, sendo determinada através do método de otimização Recozimento Simulado, o qual foi implementado no software MATLAB.

A função objetivo a ser minimizada representa o custo da energia elétrica (R\$/KWh) fornecida pela concessionária considerando uma determinada tarifa de energia em uma dada hora. A função objetivo pode ser representada pela equação:

$$\text{Min. Custo} = \sum_{t=1}^T E_{REDE}(t) * \frac{\text{Tarifa}(t)}{1000} \quad (1)$$

Sendo T o período de 24 horas de um dia e $\text{Tarifa}(t)$ o valor da tarifa no instante t imposta pela concessionária (R\$/kWh).

A energia fornecida pela rede a cada instante t é dada pela diferença entre a energia consumida (E_c) pelos equipamentos residenciais e a energia fornecida pela geração fotovoltaica (E_g):

$$E_{REDE}(t) = E_c(t) - E_g(t) \quad (2)$$

A energia consumida pelos equipamentos a cada instante pode ser calculada usando:

$$E_c(t) = \sum_{n=1}^N \text{Pot}(n) * \text{Ciclo}(n) * K \quad (3)$$

Onde:

N : número total de dispositivos controlados;

Pot : potência dos dispositivos que serão agendados (Watt);

Ciclo : tempo de funcionamento dos dispositivos (hrs);

K é uma variável binária (quando $K=1$ o equipamento é agendado no instante t , quando $K=0$ o equipamento não é agendado no instante t).

A energia fornecida pela geração fotovoltaica (E_g) é calculada baseada em dados típicos de irradiância, conforme será apresentado a seguir.

III. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA

A. Tarifação

A Tarifa Branca é uma nova opção de tarifa de energia oferecida no Brasil para as instalações em baixa tensão, que sinaliza aos consumidores a variação do valor da energia conforme o dia e o horário do consumo [11]. Com a Tarifa Branca, o consumidor passa a ter possibilidade de pagar valores diferentes em função da hora e do dia da semana.

Nos dias úteis, o valor da Tarifa Branca varia em três horários: ponta, intermediário e fora de ponta. Nos horários de ponta e no intermediário, a energia é mais cara. Fora de ponta, a energia é mais barata. Nos feriados nacionais e nos finais de semana, o valor da tarifa é sempre fora de ponta. Os períodos de ponta, fora de ponta e intermediário são definidos pela ANEEL para cada distribuidora, segundo critérios técnicos, nos processos de revisão tarifária. O preço da tarifa varia de acordo com a concessionária de energia local.

Antes da criação da Tarifa Branca havia apenas uma tarifa, chamada Tarifa Convencional, cobrada, pela energia consumida em R\$/kWh e com valor único para todas as horas do dia. A Fig. 2 ilustra a variação da Tarifa Branca e da Tarifa Convencional ao longo de um dia. Para os fins deste trabalho serão utilizados os seguintes valores observados na Tabela I com base na tarifação das Centrais de Energia Elétrica do Pará SA (CELPA).

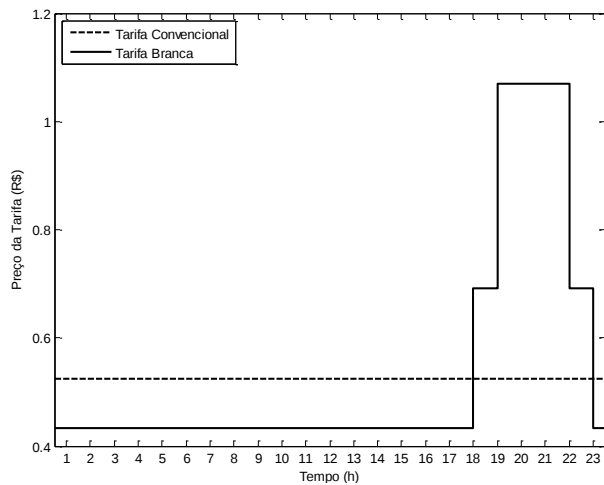


Figura 2. Perfil das Modalidades Tarifária em um dia útil.

TABELA I. MODALIDADES TARIFÁRIAS

MODALIDADE	PERÍODO	R\$/kWh
TARIFA BRANCA	Ponta	R\$1,06989
	Intermediário	R\$0,69178
	Fora da ponta	R\$0,43264
CONVENCIONAL	--	R\$0,52539

B. Dispositivos Residenciais

Os dispositivos utilizados para agendamento são do tipo programáveis, sendo tipicamente utilizados em residências brasileiras, e que contribuem significativamente para a demanda de horário de pico em dias úteis. A Tabela II ilustra os dispositivos utilizados neste trabalho. O agendamento é feito levando em consideração a preferência de horário estipulada pelo usuário e o tempo de funcionamento do equipamento. Por exemplo, segundo o usuário, o ferro de passar deve ser ligado apenas entre 17hs e 21hs.

TABELA II. INFORMAÇÃO DOS DISPOSITIVOS

Dispositivos analisados	Potência média (W)	Ciclo de funcionamento (min)	Uso diário	Restrições de horários de funcionamento
Chuveiro Elétrico	3500	10	2	6:00 – 7:00 17:00 – 22:00
Maq. Lavar Roupas	1000	60	1	6:00 – 7:30 17:00 – 22:00
Máq. Lavar Louça	1500	40	2	12:30 – 13:00 18:00 – 22:00
Ferro de passar	1000	90	1	17:00 - 21:00
Ar Condicionado	2000	60 480	2	13:00 18:00 - 22:00

C. Geração Fotovoltaica

Foi considerado o uso de 6 módulos fotovoltaicos do modelo Canadian CSI cs6p-255p e o inversor XANTREX XPOWER 3000 (3000 w / 120vac / 60hz / 12vdc). A modelagem deste sistema foi feita com base em [12] conforme as equações a seguir. A energia fornecida pelo painel fotovoltaico (E_g) em Wh pode ser calculada por:

$$E_g(t) = E_{fv} * N_{inv} * N_{abs} \quad (4)$$

Onde:

E_{fv} : Energia entregue pelo painel (Wh).

N_{inv} : Eficiência do inversor

N_{abs} : Taxa de absorção da energia fotovoltaica (%)

A energia entregue pelo painel (E_{fv}) em Wh, a cada instante, pode ser calculada por:

$$E_{fv}(t) = S * N_p * I_m * t * loss \quad (5)$$

Onde:

S : Área do painel solar fotovoltaico (m^2).

N_p : Eficiência do painel.

I_m : Irradiância média global.

t : Período de tempo (s)

$loss$: Perdas.

Considerando um cenário de irradiância média global ao longo do dia fornecido pelo Laboratório de Energia Solar (LABSOL) Porto Alegre – RS via software Radiasol2 [13], é possível determinar a geração diária do sistema fotovoltaico, segundo (4), como pode ser observado na Fig. 3.

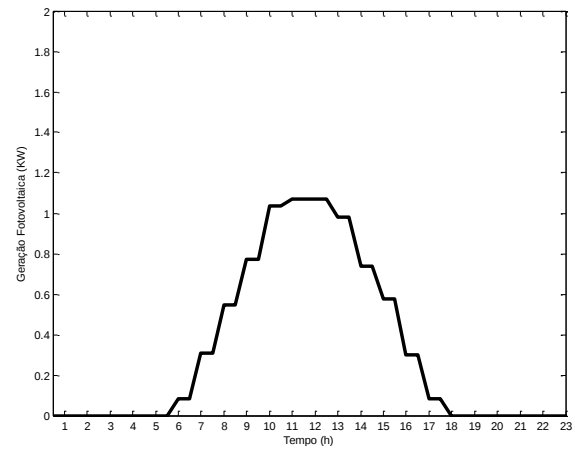


Figura 3. Energia fornecida pelo painel fotovoltaico em um dia típico.

IV. RECOZIMENTO SIMULADO

O Recozimento Simulado é uma meta heurística inspirada no processo físico de recozimento de um sólido para obtenção de estados de baixa energia, através de aquecimento e resfriamento lento. O método original foi proposto em [14], porém somente com Kipkpatrick [15] passou a ser utilizado como método para resolver problemas de otimização combinatória, como é o caso deste trabalho.

No algoritmo, uma solução inicial é repetidamente melhorada através da realização de pequenas mudanças locais até que se chegue à melhor solução. O método aceita soluções piores do que a atual para reduzir a probabilidade de ficar preso em algum ótimo local.

O algoritmo utilizado é apresentado a seguir:

- Passo 1. Atribuir a X uma solução inicial;
- Passo 2. Determinar Energia inicial $E(X)$;
- Passo 3. Definir uma temperatura inicial T_0 ;
- Passo 4. Verificar se as condições de parada foram encontradas;

Passo 5. Gerar aleatoriamente um ponto X_n vizinho de X ;
Passo 6. Calcular $\Delta E = E(X_n) - E(X)$;
Passo 7. Verificar se $\Delta E < 0$;
Passo 8. Se Passo 7 for verdadeiro: fazer $X = X_n$;
Passo 9. Se Passo 7 não for verdadeiro: gerar um número aleatório r . Se $r < \exp(-\Delta E/T)$ fazer $X = X_n$;
Passo 10. Retornar ao Passo 5;
Passo 11. Atualizar T . $T = P_r * T$;
Passo 12. Retornar ao passo 4.

Os valores iniciais dos parâmetros adotados no método foram:

- Temperatura inicial (T_0) = 30;
- Parâmetro de Resfriamento (P_r) = 0,85;
- Número de iterações em cada temperatura (N_t) = 15;
- Número de ciclos de Resfriamento (N_r) = 90.

V. RESULTADOS

Para avaliar o desempenho da metodologia proposta será realizado um estudo de caso de uma residência que possui geração fotovoltaica e será considerado o uso dos eletrodomésticos indicados na Tabela II.

Para analisar a viabilidade da ferramenta proposta foram considerados três casos:

- Caso 1: Referência;
- Caso 2: HEMS;
- Caso 3: HEMS com geração fotovoltaica.

A. Caso 1: Referência

No Caso 1 a alocação dos dispositivos é realizada utilizando a tarifa branca e sem a presença da geração fotovoltaica. Este é o caso de referência, onde a alocação dos dispositivos ao longo de um dia útil é feita atendendo apenas a rotina do usuário, a qual é apresentada na Tabela III. Neste caso, o custo diário de energia é de R\$18,56. A Fig. 4 ilustra o uso e o consumo dos dispositivos ao longo do dia para este caso.

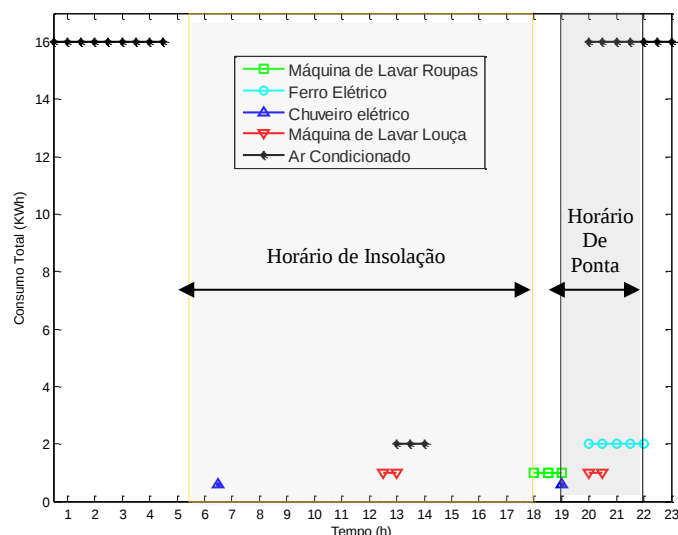


Figura 4. Agendamento para o Caso 1.

TABELA III. AGENDAMENTO PROPOSTO PELO USUÁRIO

Dispositivos	Período de utilização proposto
Chuveiro Elétrico	6:30 19:00
Lavadora de Roupa	18:00
Máquina de Lavar Louça	12:30 20:00
Ferro de passar roupa	20:00
Ar Condicionado	13:00 20:00

B. Caso 2: HEMS

Neste cenário, o método de otimização proposto é usado para agendar os dispositivos, considerando o uso da tarifa branca sem a presença da geração fotovoltaica.

A Fig.5 mostra o uso dos dispositivos controlados durante o dia; os resultados mostram que as cargas foram deslocadas do período de pico, com tarifas mais caras, para períodos onde o valor é menor, reduzindo o pico de demanda. O custo com eletricidade nesse cenário é de R\$14,60; resultando em um benefício econômico para o cliente de 21,33% quando comparado ao cenário 1.

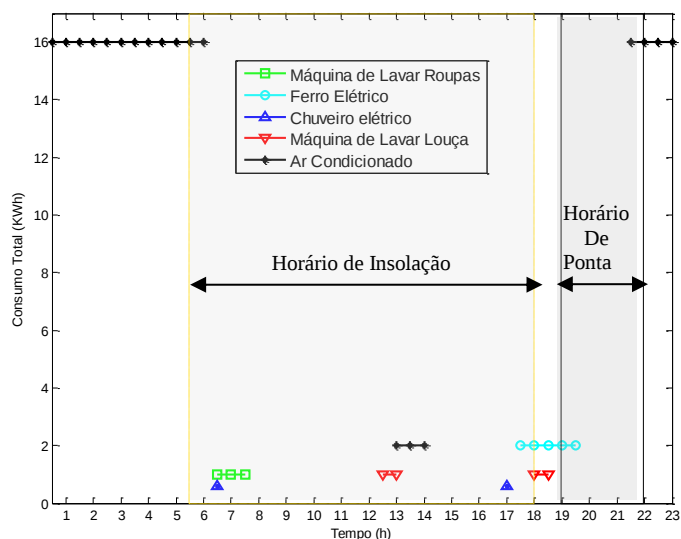


Figura 5. Agendamento para o Caso 2.

C. Caso 3: HEMS com geração fotovoltaica

Neste caso a alocação dos dispositivos é realizada utilizando a tarifa Branca com a presença da geração fotovoltaica. A Fig.6 apresenta o agendamento dos equipamentos obtido ao longo de um dia. Nota-se um deslocamento dos dispositivos que se situavam no horário de ponta, local onde a tarifa nesse modelo é mais cara, para áreas adjacentes, principalmente para a área, que possui influência da geração fotovoltaica.

Dessa forma, ocorre maior redução do consumo de energia e consequentemente do custo, pois parte da energia que era proveniente, exclusivamente da rede, agora será suprida pela geração fotovoltaica. Isso fica evidenciado no caso da máquina de lavar roupas que além de ter reduzido seu consumo pelo efeito da geração fotovoltaica, ainda foi alocado para um horário onde a tarifa é mais barata. Neste caso, o

custo diário de energia é de R\$10,90 ocorrendo uma redução de 41,27% comparado ao cenário 1. A Fig. 7, a seguir, mostra um gráfico comparativo entre a curva de carga proposta para o agendamento dos dispositivos dos casos 1, 2 e 3 evidenciando a redução do consumo e o deslocamento de carga.

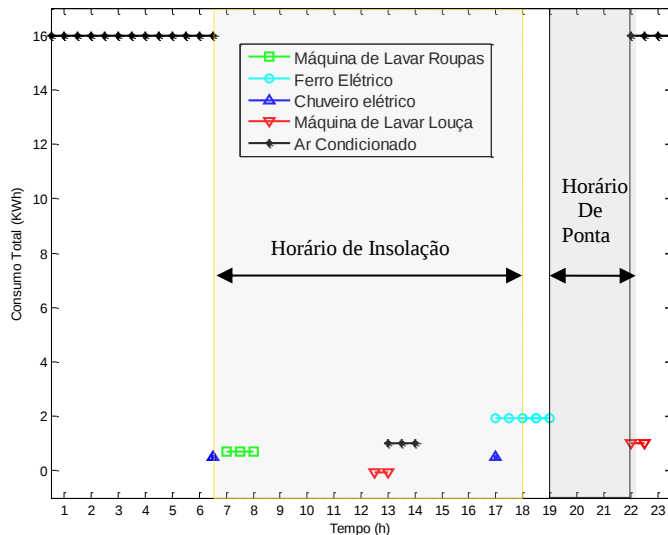


Figura 6. Agendamento para o Caso 3.

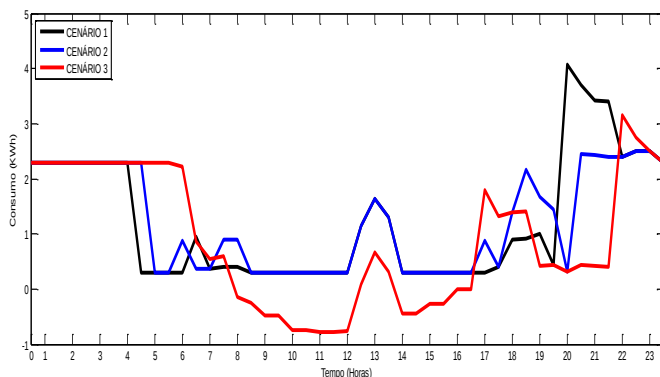


Figura 7. Consumo de energia para os casos 1, 2 e 3 em KWh.

Afim de tornar os resultados mais expressivos, este trabalho estimou o custo mensal com energia elétrica para todos os cenários apresentados. Para isso algumas condições são consideradas para os finais de semana:

- a taxa mais barata de energia é usada para todas as horas do dia durante os finais de semana;
- o usuário não liga a máquina de lavar e o ferro durante os finais de semana;

A tabela IV apresenta o custo mensal de energia. Observa-se que em ambos os cenários 2 e 3 apresentam benefícios econômicos, porém muito mais significativo para o ultimo caso, onde a geração fotovoltaica esta disponível.

TABELA IV. CUSTO MENSAL DE ENERGIA PARA OS CASOS ESTUDADOS

Caso	Considerações	Custo mensal (R\$/dia)	Redução (%)
Caso 1 (Referência)	Sem agendamento	462,77	---
Caso 2	HEMS	383,57	17,11
Caso 3	HEMS e Ger. Fotovoltaica	309,57	33,11

VI. CONCLUSÃO

Este artigo propôs a criação de uma ferramenta para gerenciamento da energia de um consumidor residencial, minimizando os gastos com a compra de energia da concessionária, utilizando o algoritmo de Recozimento Simulado. O algoritmo foi implementado utilizando o software MATLAB e os resultados se mostraram eficientes.

Este estudo provou que o método de otimização proposto pode reduzir o custo diário com a compra de energia mesmo em um cenário com forte restrição horária e sem o auxílio da automação residencial. Além disso, a proposta de agendamento dos dispositivos de uma residência se mostrou competente para modular a curva de carga de acordo com a estratégia de gerenciamento da demanda, evitando os horários de ponta, visando aproveitar o mínimo custo da tarifa ao mesmo tempo em que buscava aproveitar o período de geração fotovoltaica, já que esta possui custo nulo para o consumidor.

Além disso, a escolha do painel solar, assim como os valores tarifários e dispositivos utilizados foram escolhidos com base em modelos padrões utilizados no Brasil, o que torna esse trabalho bem próximo da realidade. Vale ressaltar que não foram computados os ganhos em créditos com a geração excedente do sistema fotovoltaico a ser trocada com a concessionária e não foi controlada toda a demanda da residência, somente as cargas de maior impacto, o que torna os resultados mais expressivos.

REFERÊNCIAS

- [1] C. W. Gellings, J. H. Chamberlin, *Demand-Side Management: Concepts and Methods, Segunda Edição*. Lilburn, GA, EUA: The Fairmont Press Inc., 1993.
- [2] G. Strbac, "Demand side management: Benefits and challenges", *Energy Policy*, vol. 36, n. 12, pp. 4419-4426, 2008.
- [3] Z. Baharlouei, M. Hashemi, "Demand side management challenges in smart grid: A review", in *Proc. 2013 Smart Grid Conference*, pp. 96-101.
- [4] J. Han, C. Choi, W. Park, I. Lee and S. Kim. Smart Home Energy Management System Including Renewable Energy Based on ZigBee and PLC. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 60, No. 2, May 2014.
- [5] M. Pipattanasomporn, M. Kuzlu and S. Rahman. An Algorithm for Intelligent Home Energy Management and Demand Response Analysis. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 3, No. 4, December 2012.
- [6] C. Ogwumike, M. Short, M. Denai. Near-Optimal Scheduling of Residential Smart Home Appliances Using Heuristic Approach. *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2015.
- [7] Y. Zhou, Y. Chen, G. Xu, C. Zheng. Home Energy Management from Demand Side in Smart Grid. *IEEE Innovative Smart Grid Technologies. Asia 2014*.

- [8] C. P. Texeira, V. H. Ferreira. Gerenciamento da Demanda Residencial Utilizando Métodos de Otimização Natural e Considerando Geração Distribuída. *Anais do V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, Foz do Iguaçu, 2014.
- [9] L. C. Siebert, A. R. Aoki, E. K. Yamakawa, F. O. Toledo, “Gerenciamento pelo Lado da Demanda em Redes Inteligentes Utilizando Algoritmos Genéticos”, *Anais do IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, Goiânia, 2012.
- [10] Z. Zhao, W. C. Lee, Y. Shin and K. Song. An Optimal Power Scheduling Method for Demand Response in Home Energy Management System. *IEEE Transactions On Smart Grid*, Vol. 4, No. 3, September 2013.
- [11] ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Tarifa branca. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=781>.
- [12] A. Saha, M. Kuzlu, W. Khamphanchai, M. Pipattanasomporn, S. Rahman, O. Elma, U. S. Selamogullari, M. Uzunoglu, B. Yagcitekcin, “A Home Energy Management Algorithm in a Smart House Integrated with Renewable Energy”, in *Proc. 2014 5th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, pp. 1-6
- [13] LABSOL (Laboratório de Energia Solar). Software Radiasol2. Disponível em: <http://www.solar.ufrgs.br>.
- [14] N. Metropolis, et al., “Equation of state calculations by fast computing machines”, *J. Chem. Phys.* vol. 21, pp. 1087-1092, 1953.
- [15] S. Kipkpatrick, C. D. Gelatt, M. P. Vecchi, “Optimization by Simulated Annealing”, *Science, New Series*, vol. 220, pp. 671-680, 1983.