

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO – UFRJ
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO
MONOGRAFIA DE CONCLUSÃO DE CURSO

Luiz Carlos de Barros Roth

CONTROLE E GERENCIAMENTO ECONÔMICO DE UM SISTEMA DE
ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL PELO MÉTODO HEURÍSTICO HILL-
CLIMBING

Rio de Janeiro

2012

Luiz Carlos de Barros Roth

CONTROLE E GERENCIAMENTO ECONÔMICO DE UM SISTEMA DE
ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL PELO MÉTODO HEURÍSTICO HILL-
CLIMBING

Monografia de Conclusão de
Curso apresentado à Universidade
Federal do Rio de Janeiro como
requisito parcial para obtenção do título
de graduado em Engenharia de Controle
e Automação

Orientador: Eugenius Kaszkurewicz

Rio de Janeiro

2012

Luiz Carlos de Barros Roth

CONTROLE E GERENCIAMENTO ECONÔMICO DE UM SISTEMA DE
ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL PELO MÉTODO HEURÍSTICO HILL-
CLIMBING

Monografia de Conclusão de
Curso apresentado à Universidade
Federal do Rio de Janeiro como
requisito parcial para obtenção do título
de graduado em Engenharia de Controle
e Automação

Aprovado em 11/05/2012

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eugenius Kaszkurewicz – NACAD/COPPE/UFRJ (Orientador)

Prof. Dr. Amit Bhaya – NACAD/COPPE/UFRJ

Prof. Dr. Glauco Nery Taranto – LASPOT/PEE/COPPE/UFRJ

RESUMO

Neste trabalho, é apresentado o método heurístico Hill-climbing aplicado a um sistema de energia residencial de controle e gerenciamento, baseado no armazenamento de energia através de uma bateria conectada à rede elétrica. O sistema é composto por uma bateria conectada em paralelo à rede elétrica. O foco principal é desenvolver um controlador ótimo que seja, ao mesmo tempo, fácil de implementar e capaz de minimizar os custos de eletricidade para consumidores em residências. Os resultados simulados corroboram com as vantagens desse método.

Palavras-Chave: Sistema de Energia Residencial. Rede Elétrica. Smart Grids. Controle Ótimo. Heurística Hill-climbing. Bateria.

ABSTRACT

This document presents a Hill-climbing technique applied to a residential energy system control and management, based on battery energy storage connected to power grids. The main focus is to develop an optimal controller that is both easy to implement and capable of minimizing the electricity cost for residential customers. Simulation results corroborate to the advantages of this method

Keywords: Residential Energy System. Power Grid. Smart Grids. Optimal Control. Heuristics. Hill-climbing. Battery.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros Ótimos Encontrados	15
Tabela 2 - Resumo das Condições Iniciais.....	16
Tabela 3 - Custos e Economia (HHSER)	20
Tabela 4 – Comparação de Custos e Economia	22

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Rede de Distribuição de Energia.....	3
Figura 2 – Esquema de Conexão da Bateria ao Sistema de Energia Residencial	4
Figura 3 – Representação do Sistema Residencial de Energia em “Stocks and Flows” ...	5
Figura 4 – Perfil Típico de Referência da Demanda de Energia Residencial no período de 24 horas [3]	7
Figura 5 – Perfil de Referência da Variação de Preço Eletricidade no período de 24 horas [3].....	8
Figura 6 – Representação da Escolha de Vizinhança no Método Hill-climbing.....	13
Figura 7 – Esquemática do método HHSER.....	14
Figura 8 – Potência Demandada da Rede Elétrica na ausência da Bateria	16
Figura 9 – Potência Demandada da Rede Elétrica na Presença a Bateria.....	17
Figura 10 – Variação de Potência na Bateria	18
Figura 11 – Sequencia de Chaveamento entre modos da Bateria (Ação de Controle) ...	18
Figura 12 – Perfil do Comportamento de Energia na Bateria	19
Figura 13 – Evolução do Custo Total	19
Figura 14 – Comparação do Comportamento da Bateria.....	21

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	2
1.1.1	OBJETIVO GERAL	2
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2	MODELAGEM DO SISTEMA DE ENERGIA RESIDENCIAL	3
2.1	DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE ENERGIA RESIDENCIAL	3
2.1.1	DEMANDA DE ENERGIA DE UMA RESIDÊNCIA	6
2.1.2	PRECIFICAÇÃO DINÂMICA DA ENERGIA ELÉTRICA	7
2.2	MODOS DE OPERAÇÃO DA BATERIA	8
3	CONTROLE ÓTIMO	10
3.1	PROBLEMA DE CONTROLE ÓTIMO	10
3.2	ESTRATÉGIA DE CONTROLE ÓTIMO	11
3.3	HEURÍSTICA HILL CLIMBING	12
3.3.1	HILL CLIMBING PARA AJUSTE DE PARÂMETROS	12
4	SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	15
4.1	CONSIDERAÇÕES E CONDIÇÕES INICIAIS DO MODELO	15
4.2	RESULTADOS OBTIDOS	16
4.3	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	20
5	CONCLUSÃO	23
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24
	APÊNDICE A – ALGORITMO SIMPLES DE HILL-CLIMBING	

1 INTRODUÇÃO

O controle e o gerenciamento de energia têm atraído considerável interesse da sociedade nos últimos anos. Esse interesse, em parte, é resultado do crescimento populacional, da presença maciça da tecnologia em atividades básicas do nosso cotidiano, da necessidade de preservação do meio ambiente e das crises nos combustíveis fósseis e na economia mundial.

É com base neste cenário que emerge o desafio da utilização da energia elétrica de forma mais eficiente, segura, confiável, produtiva e ecológica. O conceito de *Smart Grids* pressupõe a utilização intensiva das tecnologias de informação, possibilitando a comunicação entre todos os componentes da rede elétrica e a implantação de estratégias de controle e otimização [1]. São características desejadas nos *Smart Grids*: a capacidade de auto-reparo, de tolerar falhas e de integrar as mais diversas formas de geração e armazenamento de energia. Além de viabilizar e se beneficiar de mercados competitivos de energia, favorecendo o mercado varejista e a microgeração de energia [2].

Nesse contexto, a inclusão de baterias é apontada como alternativa eficaz para a integração de fontes renováveis de energia e diminuição dos custos com consumo. Por essa versatilidade, estudos vêm sendo conduzidos no sentido de melhor incluir e gerenciar baterias em ambientes industriais e residenciais [3], [4], [5], [6], [7] e [8].

A proposta deste trabalho consiste na realização de um controle simples, baseado no método Hill-climbing, que minimize o custo de um sistema de energia residencial. O sistema é composto por uma bateria integrada à rede elétrica e considera a demanda de energia, a variação de preço em tempo-real, além de algumas configurações pré-estabelecidas.

O trabalho está estruturado em capítulos e a divisão de conteúdo segue conforme indicado: No Capítulo 2 é feita uma descrição do sistema, são explicados os diferentes modos de operação da bateria (= controles). No Capítulo 3 é formulado o problema de otimização, comentada a estratégia de controle e apresentado o método heurístico Hill-climbing aplicado a sistemas de energia residenciais. No Capítulo 4 são especificadas as

ferramentas utilizadas, as condições iniciais do sistema e discutidos os resultados obtidos. Por fim, o trabalho é concluído com alguns comentários e considerações.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

O propósito deste trabalho é minimizar o custo com o consumo de energia elétrica em uma residência familiar, dado um intervalo definido de tempo, através da atuação ótima de uma bateria, enquanto esta satisfaz um conjunto de restrições impostas por requerimentos do sistema e limitações de componentes individuais.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Particularmente, o foco reside em desenvolver um controle ótimo para um sistema de energia residencial que seja:

- Eficiente.
- Robusto a perturbações.
- Fácil de ser implementado.

2 MODELAGEM DO SISTEMA DE ENERGIA RESIDENCIAL

2.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE ENERGIA RESIDENCIAL

Uma residência típica é alimentada pela rede de distribuição de energia. O abastecimento é determinado pela demanda residencial, que, por sua vez, é resultado do consumo de energia proveniente do uso de eletrodomésticos e outros equipamentos eletroeletrônicos. A Figura 1 apresenta um esquema simples de um sistema de distribuição de energia convencional, desde a sua geração até o seu destino final.

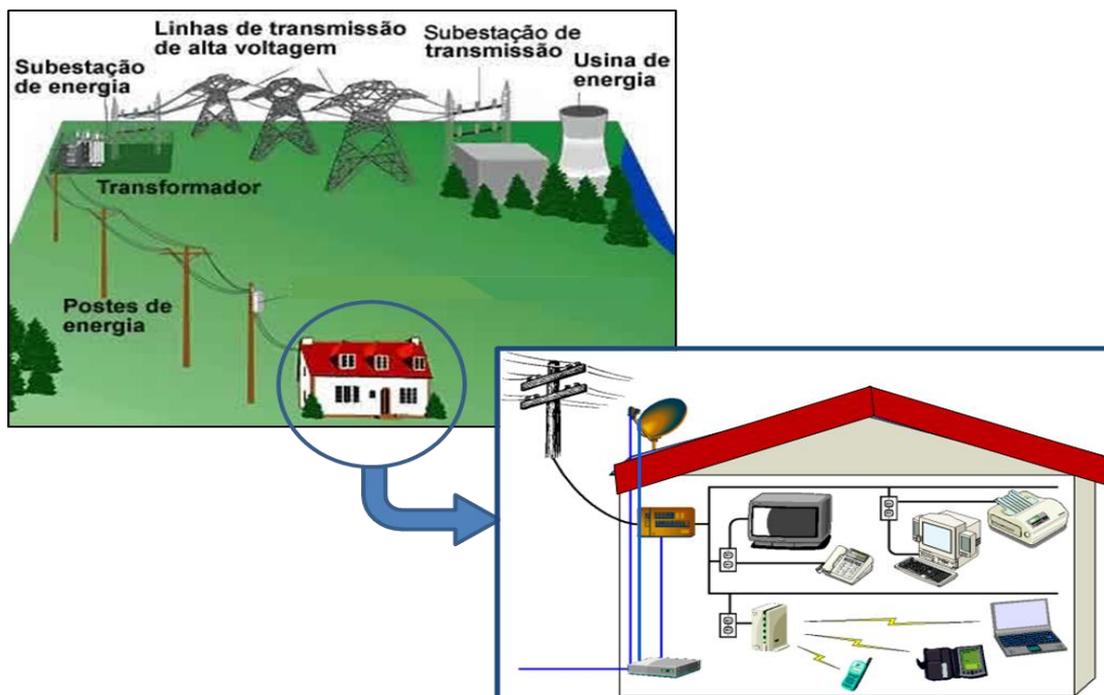


Figura 1 – Rede de Distribuição de Energia

A potência elétrica chega às nossas casas na forma de um sinal senoidal de tensão em corrente alternada (CA). Baterias, no entanto, geram tensão em corrente contínua (CC): a corrente elétrica flui em uma única direção, do terminal positivo para o negativo da bateria. Dessa forma, para que uma bateria seja conectada ao sistema de energia residencial, é necessária a utilização de um inversor de frequência, que converte a corrente alternada em corrente contínua.

Como mostrado na Figura 2 [3], a bateria compõe o sistema de armazenamento e foi projetada para atuar em paralelo á rede elétrica. O fluxo de cargas na rede elétrica é unidirecional, no sentido Rede – Residência, enquanto que o fluxo de cargas na bateria é bidirecional: ora recebendo energia da rede elétrica, ora provendo energia para a residência.

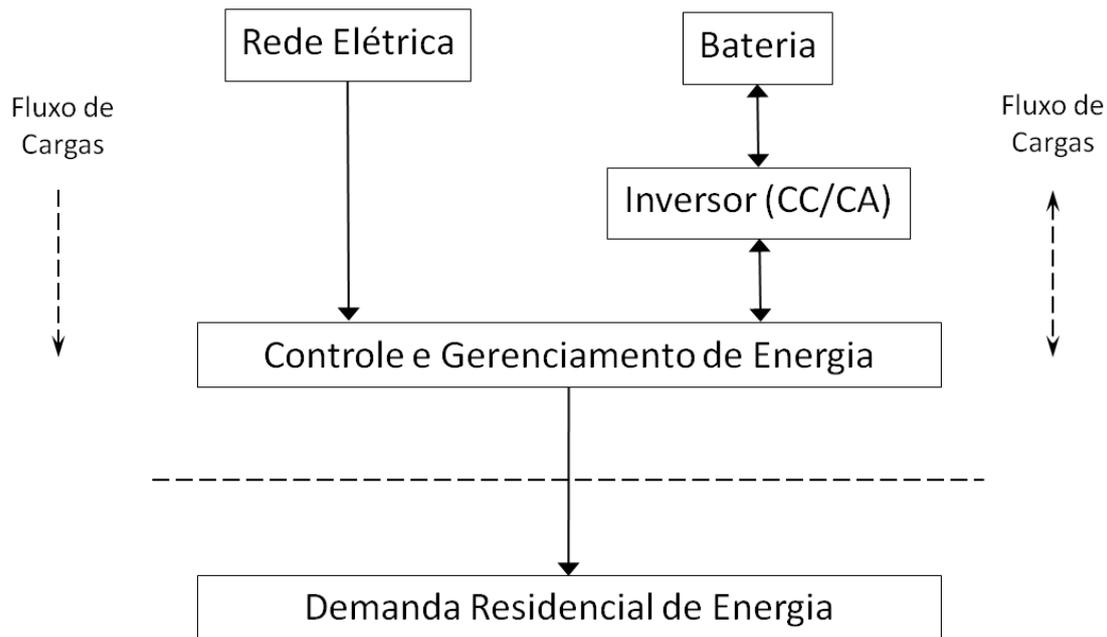


Figura 2 – Esquema de Conexão da Bateria ao Sistema de Energia Residencial

A vantagem do sistema de energia residencial com bateria é ser flexível, podendo ser expandido de forma a incorporar fontes de energia renováveis. Isto porque painéis solares, turbinas eólicas, entre outros, geram eletricidade em corrente contínua.

A bateria utilizada no sistema de armazenagem é um acumulador de chumbo, também conhecido por bateria chumbo-ácido. É a mais antiga e comum espécie de bateria recarregável, sendo constituída pela associação de pilhas ligadas em série. O chumbo atua como ânodo e o dióxido de chumbo, como cátodo.

No funcionamento da bateria são considerados três modos de operação:

- **Modo Carregar:** Quando a carga da bateria estiver baixa e o preço da eletricidade for economicamente atrativo, a rede elétrica proverá, simultaneamente, energia para a casa e para a bateria.

- Modo Descarregar: Enquanto houver carga suficiente na bateria e admitindo um valor elevado no preço da eletricidade naquele instante, toda a demanda da residência será atendida exclusivamente pela bateria.
- Modo Inativo: Dependendo da carga presente na bateria e do preço da eletricidade, o sistema de energia da residência se comportará de forma convencional, isto é, o consumo de energia da casa será atendido diretamente pela rede elétrica.

A Figura 3 é uma representação em “*Stocks and Flows*” (i. e. Estoques e Fluxos) de todo o sistema residencial de energia. Os recipientes, que atuam como integradores, consistem as variáveis de nível. Os canos representam as variáveis de fluxo, ou taxa. As válvulas regulam os fluxos enquanto os círculos indicam os demais componentes do sistema.

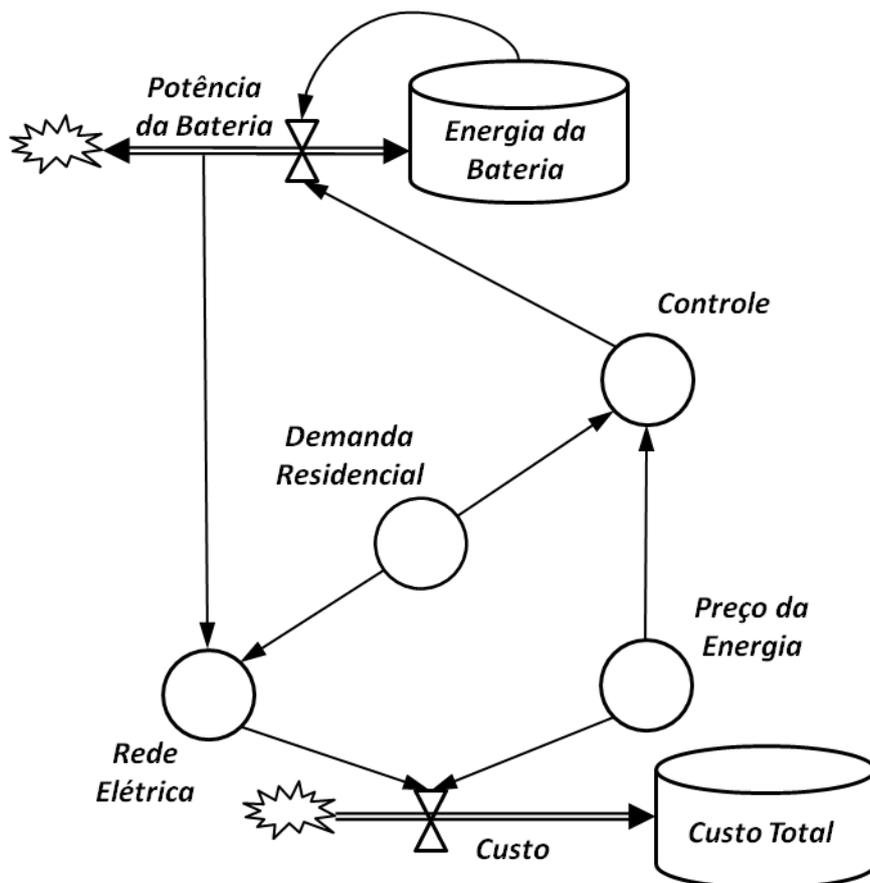


Figura 3 – Representação do Sistema Residencial de Energia em “*Stocks and Flows*”

O chaveamento entre os modos de operação, na realidade, constitui a ação de controle. O objetivo do controle é minimizar o custo total do consumo de energia. Pelo fluxograma, temos que o custo total é resultado do somatório dos custos em cada instante de tempo, que por sua vez, variam em função do preço do quilowatt e do consumo de potência da rede elétrica.

A energia elétrica é uma *commodity* e os seus valores são determinados pelo mercado atacadista, logo, não é possível controlar a variação dos preços. Sendo assim, a variável controlada é a potência fornecida pela rede elétrica.

A rede elétrica fornece a potência necessária para suprir a demanda de energia da residência. A demanda residencial é resultado dos hábitos de consumo de energia dos moradores.

Com a inclusão da bateria no sistema, se a mesma estiver carregando, a potência fornecida pela rede elétrica aumenta, uma vez que a rede elétrica passa a fornecer potência tanto para atender a demanda residencial quanto para carregar a bateria. Quando a bateria está descarregando, a rede elétrica fornece menos, ou nenhuma, potência para a residência já que parte da demanda, ou toda ela, é atendida pela bateria.

Portanto, o controle atua sobre a potência fornecida pela rede elétrica, regulando os valores de potência da bateria de tal forma que, ao final do processo, o custo total com o consumo de energia seja minimizado.

2.1.1 DEMANDA DE ENERGIA DE UMA RESIDÊNCIA

O sistema de energia residencial proposto é discreto no tempo, sendo adotado um período de amostragem de 1 hora. O sistema poderia ser discretizado considerando um menor período de amostragem, contudo, em concordância com trabalhos anteriores [3], [4], [5], [6], optou-se por manter o mesmo padrão.

A Figura 4 apresenta um típico perfil de demanda residencial de energia. A demanda de energia da residência, $P_l(t)$, varia a cada hora do dia e pode ser expressa como:

$$P_l(t), \text{ para } t = (1, 2, \dots, T). \quad (1)$$

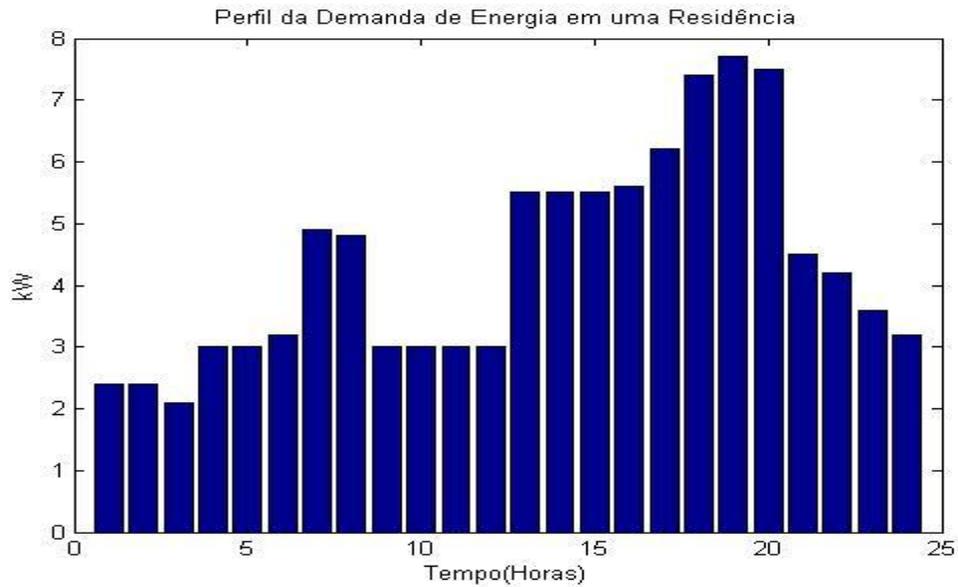


Figura 4 – Perfil Típico de Referência da Demanda de Energia Residencial no período de 24 horas [3]

2.1.2 PRECIFICAÇÃO DINÂMICA DA ENERGIA ELÉTRICA

A precificação dinâmica da eletricidade é uma medida econômica que tem por objetivo eliminar uma sobrecarga nas redes de distribuição de energia deslocando o consumo de eletricidade nos horários de pico para horários de menor procura. O preço da eletricidade varia em tempo real de acordo com a determinação do mercado atacadista.

A Figura 5 mostra uma típica curva de variação do preço da eletricidade em tempo real discretizada em vinte e quatro intervalos de uma hora. A escala de preço poderia ser convertida para o centavo de real, porém, a fim de estabelecer uma comparação com o trabalho [3], ela será mantida em *cents*.

A variação de preço da energia em tempo-real, $p_r(t)$, pode ser expressa como:

$$p_r(t), \text{ para } t = (1, 2, \dots, T). \quad (2)$$

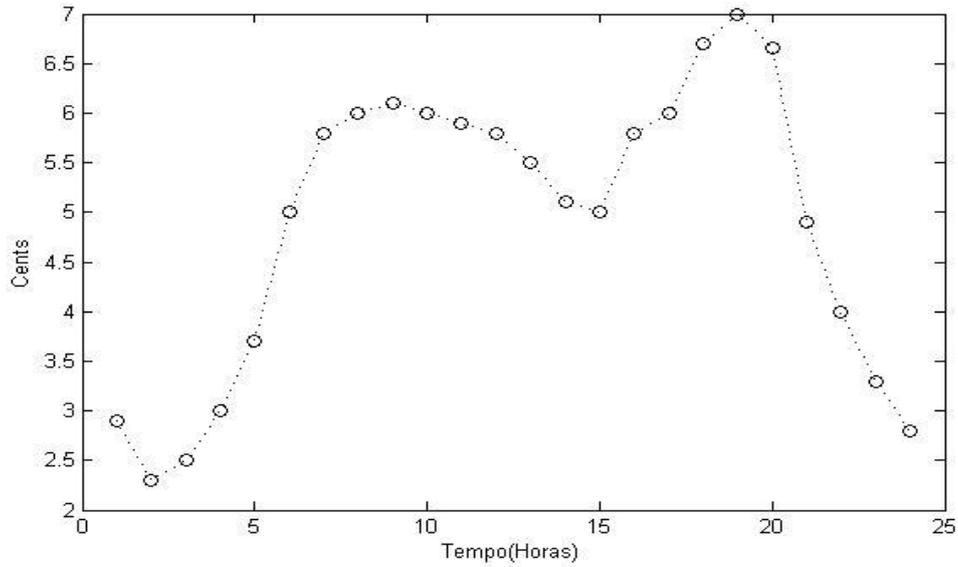


Figura 5 – Perfil de Referência da Variação de Preço Eletricidade no período de 24 horas [3]

2.2 MODOS DE OPERAÇÃO DA BATERIA

Para esta bateria, foi considerado que todas as perdas envolvidas no processo de armazenagem de energia, isto é, as perdas decorrentes do acoplamento com o inversor de frequência, da eficiência da bateria e de demais dispositivos auxiliares, ocorre durante o período de carregamento. Além disso, foi adotada a mesma convenção proposta em trabalhos anteriores [3], [6] para a potência da bateria. $P_b(t)$ negativo significa que a bateria está sendo carregada e $P_b(t)$ positivo, que a bateria está sendo descarregada. Obviamente, quando $P_b(t)$ é igual à zero, a bateria encontra-se em modo inativo.

A dinâmica da bateria em cada modo é descrita abaixo:

Modo Carregar: ($P_b(t) < 0$)

$$E_b(t) = E_b(t - 1) - P_b(t) \times \eta(P_b(t)). \quad (3)$$

Sendo $E_b(t)$ a energia remanescente na bateria no instante t e $\eta(P_b(t))$ a eficiência de carregamento na bateria. A equação da eficiência de carregamento foi obtida a partir de [4], [7], [8] e resulta em:

$$\eta(P_b(t)) = 0.898 - 0.173|P_b(t)|/P_{nom}. \quad (4)$$

Na qual P_{nom} representa a potência nominal de saída da bateria.

Modo Descarregar: ($P_b(t) > 0$)

$$E_b(t) = E_b(t - 1) - P_b(t). \quad (5)$$

Modo Inativo: ($P_b(t) = 0$)

$$E_b(t) = E_b(t - 1). \quad (6)$$

Usualmente são levadas em consideração as seguintes restrições para a bateria [3]. A bateria não pode armazenar uma quantidade de cargas superior a sua capacidade máxima. E, se operada com uma quantidade de cargas inferior ao limite mínimo, pode resultar numa diminuição da vida-útil da bateria. Ou seja:

$$E_b min \leq E_b(t) \leq E_b max. \quad (7)$$

A segunda restrição refere-se às potências de carregamento e descarregamento da bateria em cada intervalo de tempo de uma hora. Por questões de segurança, a bateria não deve ser carregada ou descarregada com taxas que excedam os valores máximo e mínimo, evitando danos à bateria, ou seja:

$$P_b min \leq P_b(t) \leq P_b max. \quad (8)$$

Existe, ainda, uma restrição adicional que é resultado da Equação de Equilíbrio de Potência. Em qualquer instante de tempo, a soma das cargas na rede elétrica e na bateria deve ser igual à demanda da residência.

A Equação de Equilíbrio de Potências é expressa por:

$$P_l(t) = P_b(t) + P_g(t). \quad (9)$$

Sendo que $P_l(t)$ representa a demanda de potência na casa em um dado instante, enquanto que $P_g(t)$ e $P_b(t)$ representam, respectivamente, a potência fornecida pela rede elétrica e a potência na bateria neste mesmo instante de tempo.

3 CONTROLE ÓTIMO

3.1 PROBLEMA DE CONTROLE ÓTIMO

O problema de controle ótimo, formulado em [3], resume-se em: determinar a sequencia de operação da bateria (carregar/ descarregar/ inativa) que minimiza o custo total de energia, satisfazendo as restrições do sistema, dado o perfil da demanda de eletricidade e conhecida a curva de variação do preço do quilowatt em tempo-real. O custo de energia em cada intervalo de tempo, $c(t)$, é definido como:

$$c(t) = p_r(t) \cdot P_g(t). \quad (10)$$

Logo, o custo total, C_T , pode ser expresso por:

$$C_T = \sum_{t=1}^T c(t). \quad (11)$$

O problema de otimização, então, pode ser sintetizado como:

$$\begin{cases} \min C_T \\ \text{tal que: } P_l(t) - P_b(t) - P_g(t) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

Sujeito à seguinte dinâmica:

$$\Delta E_b(t) = \begin{cases} -P_b(t) \times \eta(P_b(t)), & \text{se } P_b(t) < 0 \\ -P_b(t), & \text{se } P_b(t) > 0 \\ 0, & \text{se } P_b(t) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

Sendo:

$$\Delta E_b(t) = E_b(t+1) - E_b(t)$$

E limitado por restrições impostas a esta dinâmica:

$$\begin{bmatrix} E_b \text{ max} - E_b(t) \\ E_b(t) - E_b \text{ min} \\ P_b \text{ max} - P_b(t) \\ P_b(t) - P_b \text{ min} \end{bmatrix} \geq 0 \quad (14)$$

3.2 ESTRATÉGIA DE CONTROLE ÓTIMO

A estratégia simples para reduzir o custo total do consumo de energia consiste em: descarregar a bateria nos horários em que o preço do quilowatt é mais caro e carregá-la nos horários em que o preço é mais barato.

O desafio, do ponto de vista da otimização, é determinar a faixa de valores em que é melhor carregar a bateria, descarregá-la ou mantê-la inativa; e as potências com que a bateria deve ser carregada/d Descarregada.

Para encontrar a faixa de operação ótima da bateria, são estabelecidos um valor de corte para o carregamento, δ_c , e um valor de corte para o descarregamento, δ_d , de forma que:

- A bateria carrega apenas quando $p_r(t) < \delta_c$
- A bateria descarrega apenas quando $p_r(t) \geq \delta_d$
- A bateria permanece inativa apenas quando $\delta_c \leq p_r(t) < \delta_d$

Como a curva de variação de preços é limitada por um valor de preço máximo, $p_{r\ max}$, e por um valor de preço mínimo, $p_{r\ min}$, temos que δ_c e δ_d podem variar entre $[p_{r\ min}, p_{r\ max}]$.

Além disso, foi convencionado que, para $P_b(t) < 0$, a bateria está carregando; para $P_b(t) > 0$, a bateria está descarregando e que a bateria está inativa para $P_b(t) = 0$. É conhecido que $P_b(t)$ está limitado por um valor máximo, $P_b\ max$, e um mínimo, $P_b\ min$.

Isso significa que a bateria pode ser carregada com:

$$P_b(t) = \alpha \cdot P_b\ min, \quad \forall \alpha \in \mathbb{R}: (0, 1] \quad (15)$$

E descarregada com:

$$P_b(t) = \beta \cdot P_b\ max, \quad \forall \beta \in \mathbb{R}: (0, 1] \quad (16)$$

Portanto, resolver o problema de otimização implica em obter os parâmetros α , β , δ_c e δ_d que resultam no menor custo total.

3.3 HEURÍSTICA HILL CLIMBING

O método Hill-climbing, assim como outros métodos de busca local, usa uma técnica de aperfeiçoamento iterativo. A técnica é aplicada a um único ponto – o ponto atual – no interior de um espaço de busca. Durante cada iteração, um novo ponto é selecionado na vizinhança do ponto atual. Se um dos pontos na vizinhança corresponder a um melhor valor da função objetivo, esse ponto se torna o ponto atual. O método termina quando nenhum aperfeiçoamento puder ser alcançado.

As soluções obtidas através do Hill-climbing são ótimos locais e seus valores dependem do ponto de partida. Aliás, não há como determinar o erro relativo uma vez que ótimo global é desconhecido. Em contrapartida, a técnica é simples de ser implementada [9].

3.3.1 HILL CLIMBING PARA AJUSTE DE PARÂMETROS

Os parâmetros α e β estão atrelados à potência da bateria, podendo assumir quaisquer valores reais do intervalo $(0, 1]$, em um determinado instante de tempo. Isto significa que os valores ótimos de α e β residem dentro de um espaço de busca infinito.

Por outro lado, δ_c e δ_d , ainda que possam assumir valores reais entre $[p_r, min, p_r, max]$, atuam como critérios de corte de uma curva de preços discretizada no tempo. Em outras palavras, quaisquer valores reais que δ_c ou δ_d assumam entre $p_r(t)$ e $p_r(t + 1)$ redundam, para o sistema de energia, no mesmo efeito. No pior caso, admitindo variações diárias no preço da energia, o número máximo de escolhas que resultam em alteração do modo de operação da bateria está limitado à quantidade de intervalos em $p_r(t)$ pelo período dias considerado.

Por essa razão, a determinação dos parâmetros α e β é priorizada em relação à δ_c e δ_d , sendo inclusive obtidos a partir destes dois últimos parâmetros. Inicialmente, é escolhido um ponto $x_0 = (\alpha_0, \beta_0)$ ao acaso. A vizinhança ao ponto x_0 é expressa por:

$$x_v = \begin{cases} (\alpha_0, \beta_0 \pm t_d) \\ (\alpha_0 \pm t_d, \beta_0) \\ (\alpha_0 \pm t_d, \beta_0 \pm t_d) \end{cases} \quad (17)$$

Tal que t_d representa o passo de atualização do método.

A Figura 6 mostra como é escolhida a vizinhança x_v no interior do espaço de busca e na fronteira.

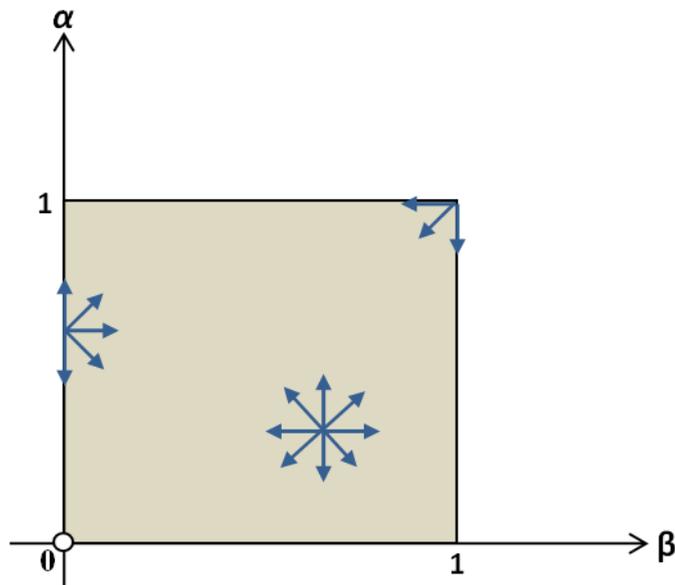


Figura 6 – Representação da Escolha de Vizinhança no Método Hill-climbing

Para cada ponto compreendido pela vizinhança, é determinado um par (δ_c^*, δ_d^*) que minimiza o custo total, C_T . O ponto que oferece o melhor retorno é selecionado como ponto atual. O algoritmo termina quando nenhum aperfeiçoamento é encontrado.

Os parâmetros δ_c^* e δ_d^* são obtidos a partir de uma busca similar ao método Hill-climbing. A diferença encontra-se na escolha da vizinhança e em não utilizar um passo de atualização, o conjunto de valores que podem ser assumidos por δ_c^* e δ_d^* é conhecido. Isso faz com que essa segunda rotina tenha um tempo rápido de execução.

A técnica de escolher pontos iniciais aleatórios permite explorar completamente o espaço de busca, mas negligencia um maior aprofundamento em áreas que possam ser consideradas promissoras [9]. Uma forma de amenizar as fraquezas inerentes ao método Hill-climbing consiste na exploração. Cada solução obtida para α , β , através do Hill-climbing, se torna ponto de partida de uma nova busca com um passo de atualização menor. O processo é repetido até que o passo de atualização seja tão pequeno quanto o

desejado. A Figura 7 é a esquematização da Heurística Hill-climbing aplicada a Sistemas de Energia Residenciais (HHSER).

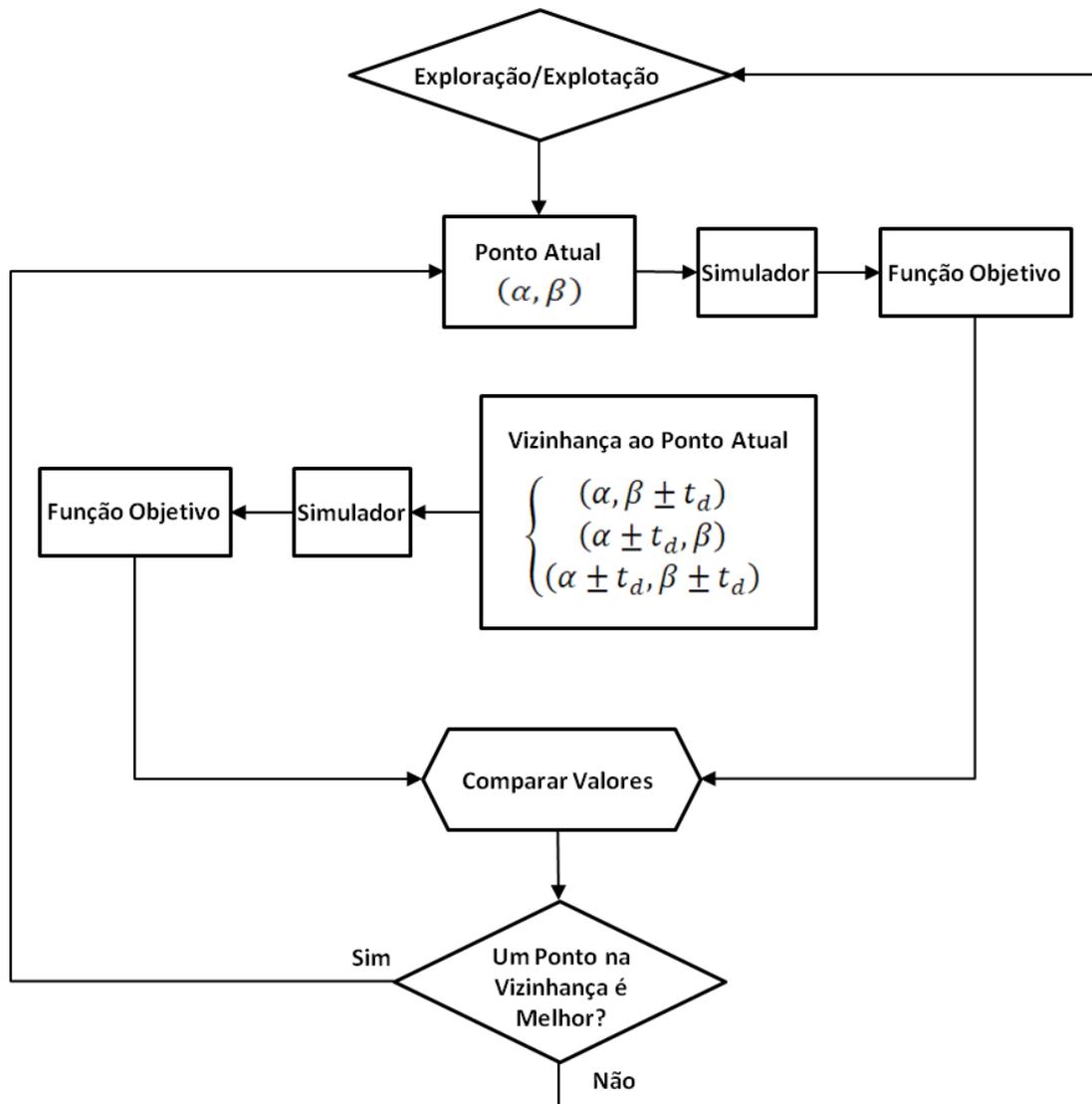


Figura 7 – Esquematização do método HHSER

4 SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 CONSIDERAÇÕES E CONDIÇÕES INICIAIS DO MODELO

Supõe-se que a rede elétrica é capaz de atender a demanda residencial do morador em qualquer instante de tempo. A capacidade da bateria utilizada na simulação é de 100 kWh e que um mínimo de 20% deve ser retido. A potência nominal de saída da bateria e o valor máximo de carregamento / descarregamento são de 16 kW. A carga inicial na bateria é de 80% da capacidade máxima da bateria. A rede elétrica é capaz de, ao mesmo tempo, fornecer energia para a residência e carregar a bateria [3]. Foi considerado que a bateria e a rede elétrica podem fornecer, simultaneamente, energia elétrica para a casa.

O período de simulação é de uma semana, de segunda a domingo. É considerado que o perfil de energia nos dias de semana é diferente do perfil nos fins de semana. Além disso, nenhum usuário é tão metódico a ponto conseguir repetir com exatidão seu perfil de consumo elétrico. Supõe-se então uma perturbação aleatória de até $\pm 10\%$ na curva de demanda [3]. De forma a testar a robustez de HHSER a ruídos é proposta uma perturbação aleatória até $\pm 10\%$ na curva de preços.

A Tabela 1 apresenta os valores obtidos para os parâmetros de otimização. A Tabela 2 resume as condições iniciais do sistema de energia residencial. A simulação foi conduzida com auxílio do programa MATLAB 7.0.

Tabela 1 - Parâmetros Ótimos Encontrados

<i>Parâmetros</i>	<i>Valor</i>
α	0.8550
β	1.0000
δ_c	3.9850
δ_d	5.0850

Tabela 2 - Resumo das Condições Iniciais

<i>Condições Iniciais</i>	<i>Valor</i>
Carga Inicial na Bateria [$E_b(0)$]	80kWh
Capacidade Máxima da Bateria [E_bmax]	100kWh
Energia Mínima na Bateria [E_bmin]	20kWh
Potência Nominal da Bateria [P_{nom}]	16kW
Potência Máxima da Bateria [P_bmax]	16kW
Potência Mínima da Bateria [P_bmin]	-16kW

4.2 RESULTADOS OBTIDOS

Analisando as Figuras 8 e 9 fica evidente a mudança de comportamento da rede elétrica com a inserção da bateria. Na Figura 8, a rede elétrica atende diretamente a toda a demanda residencial. Isso é análogo a um Sistema de Energia Residencial, no qual a bateria se mantém inativa durante todo o processo. De (9), quando $P_b(t) = 0$, $P_l(t) = P_g(t)$.

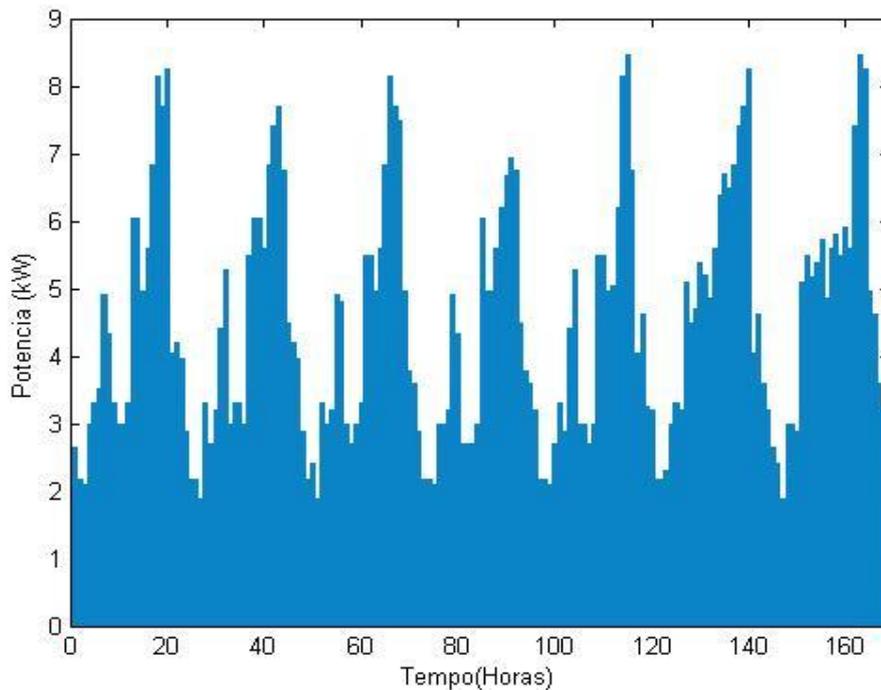


Figura 8 – Potência Demandada da Rede Elétrica na ausência da Bateria

Na figura 9, tomando a curva da variação de preços como referência, é possível perceber que a rede elétrica fornece potência para a residência e carrega a bateria nos instantes em que o preço do quilowatt é atrativo; deixa de consumir eletricidade quando o preço é elevado, toda a demanda é atendida pela bateria, e provê o necessário para atender a demanda residencial, quando o preço é considerado pouco atrativo.

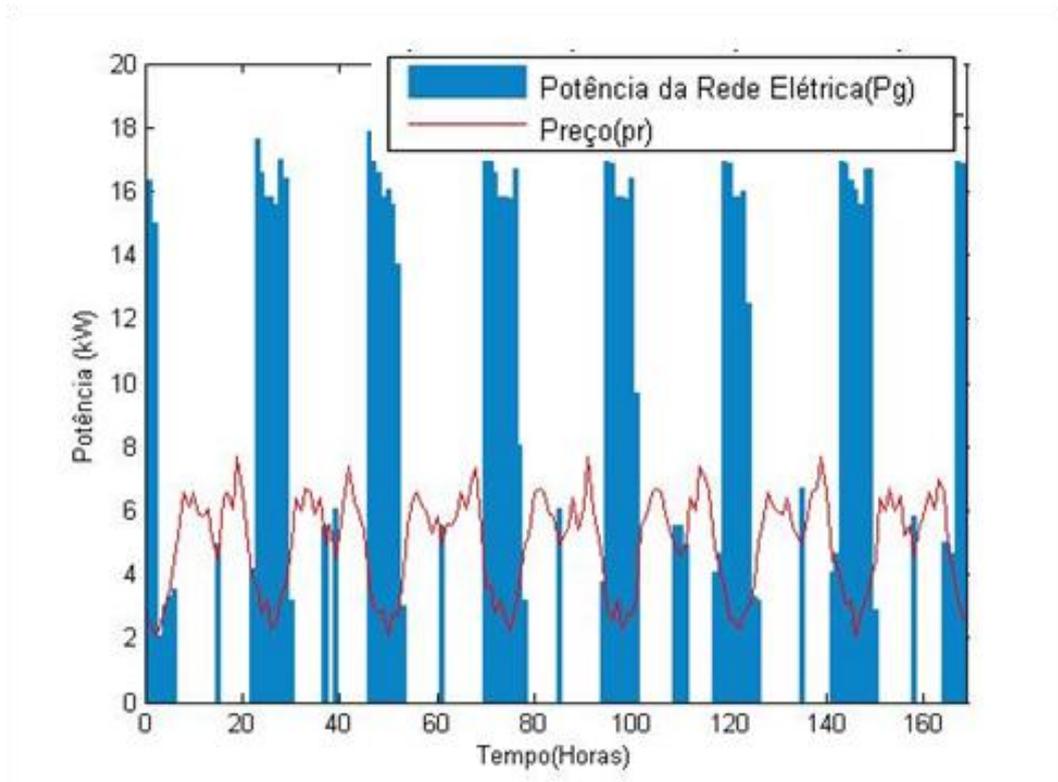


Figura 9 – Potência Demandada da Rede Elétrica na Presença a Bateria

A Figura 10 é a contraparte da Figura 9 e nos mostra o comportamento da bateria no intervalo de uma semana. É importante notarmos que as restrições de potência, isto é, $P_b(t) \leq |16| \text{ kW}$, são respeitadas durante todo período de simulação.

A Figura 11 ilustra a atuação do controle pelos modos de operação da bateria. Foi definido que o estado (-1) representa a bateria descarregando; o estado (0), a bateria inativa; e o estado (1), a bateria carregando. Assim como nas Figuras 9 e 10, é possível observar que a alteração nos modos de operação da bateria acompanha a estratégia estabelecida.

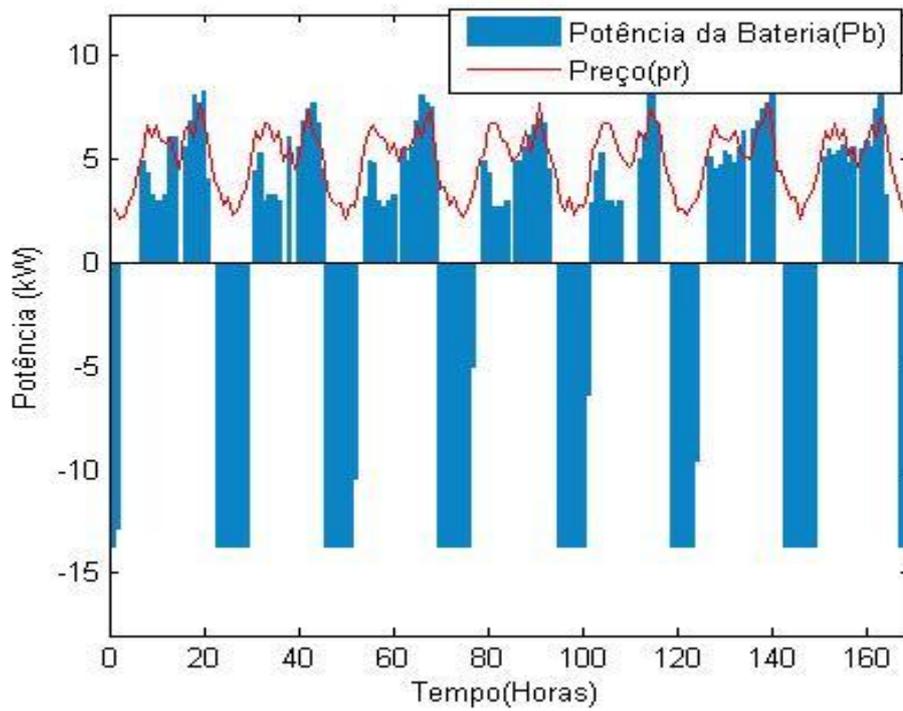


Figura 10 – Variação de Potência na Bateria

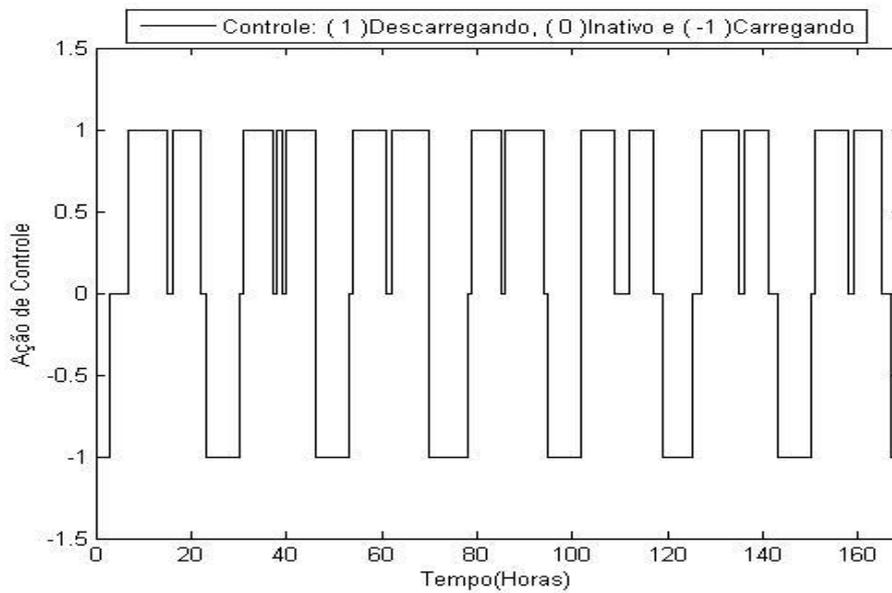


Figura 11 – Sequencia de Chaveamento entre modos da Bateria (Ação de Controle)

A Figura 12 demonstra o comportamento da bateria durante a simulação do modelo. É importante observar que durante todo o período de funcionamento da bateria,

o nível de energia não ultrapassa o limite superior, a capacidade da bateria, de 100kWh, tampouco o limite inferior de 20kWh.

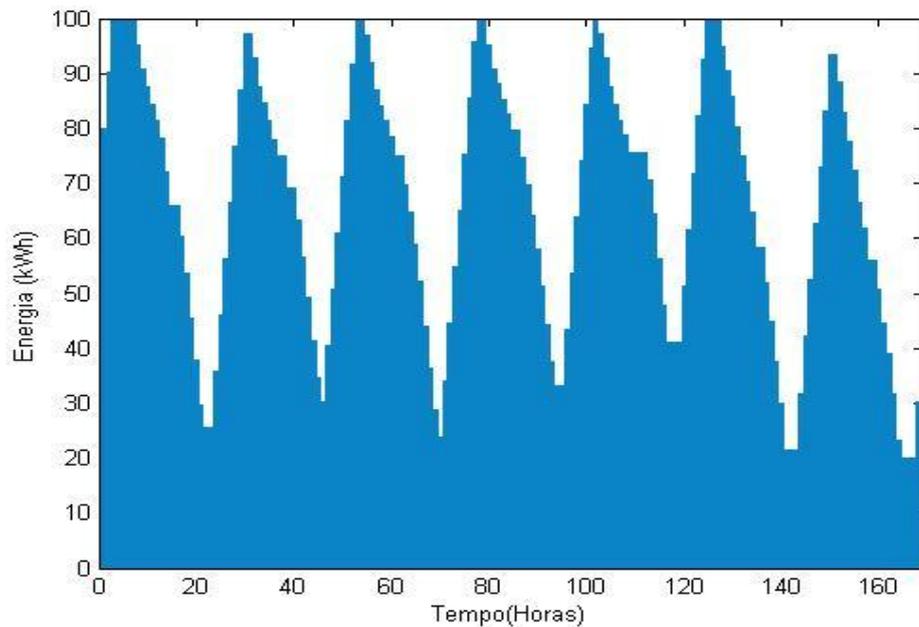


Figura 12 – Perfil do Comportamento de Energia na Bateria

Pela Figura 13 é possível acompanhar a evolução dos gastos com o consumo de eletricidade em uma residência. Desperta a atenção, que com menos da metade de um dia a ação de controle já resulta em uma pequena economia.

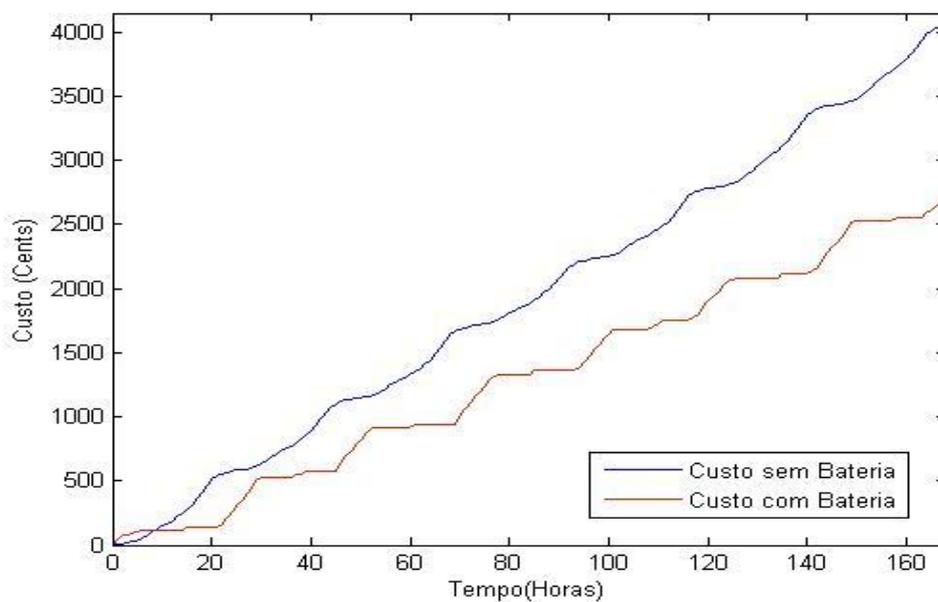


Figura 13 – Evolução do Custo Total

A Tabela 3 resume os custos e a economia alcançada pelo método HHSER.

Tabela 3 - Custos e Economia (HHSER)

Custo Total Sem a Bateria	4048.93 cents
Custo Total Com a Bateria	2732.80 cents
Economia	32.51%

4.3 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

A fim de testar a eficiência do controle em Hill-climbing, os resultados obtidos são comparados aos resultados encontrados pelo controle baseado em *Adaptive Dynamic Programming* (ADP) proposto por *T. Huang et D. Liu* [3].

O objetivo de controle, o modelo de sistema de energia residencial, os componentes utilizados no sistema e as condições iniciais do sistema são as mesmas. A única diferença é que neste trabalho foi considerada a hipótese de ambas a rede elétrica e a bateria fornecerem energia elétrica simultaneamente à residência enquanto que em [3], essa hipótese é descartada: o fornecimento é feito ou pela bateria, ou pela rede elétrica. Entretanto, como o valor encontrado para parâmetro de descarga da bateria, β , é igual a 1.000, mesmo partindo de uma hipótese diferente, rede elétrica e bateria não fornecem simultaneamente energia elétrica à residência.

A Figura 14 apresenta um comparativo dos gráficos de comportamento da bateria. Os gráficos da parte superior representam a variação da potência da bateria enquanto que os gráficos da parte inferior, o nível de energia presente na bateria em cada instante. Os gráficos à esquerda são os obtidos pelo método ADP, e foram retirados de [3], enquanto que os gráficos à direita foram obtidos pelo método HHSER.

É possível observar, através de uma comparação destes gráficos, algumas diferenças no comportamento da bateria durante a simulação. No método HHSER, a potência máxima com que a bateria é carregada é menor, além de serem mais frequentes os intervalos em que a bateria se mantém inativa. Como consequência, observando os ciclos diários, alguns picos dos níveis de carga se mantiveram abaixo da capacidade

máxima da bateria enquanto que a quantidade de cargas presentes, em alguns ciclos, se manteve bem acima do limite mínimo estabelecido.

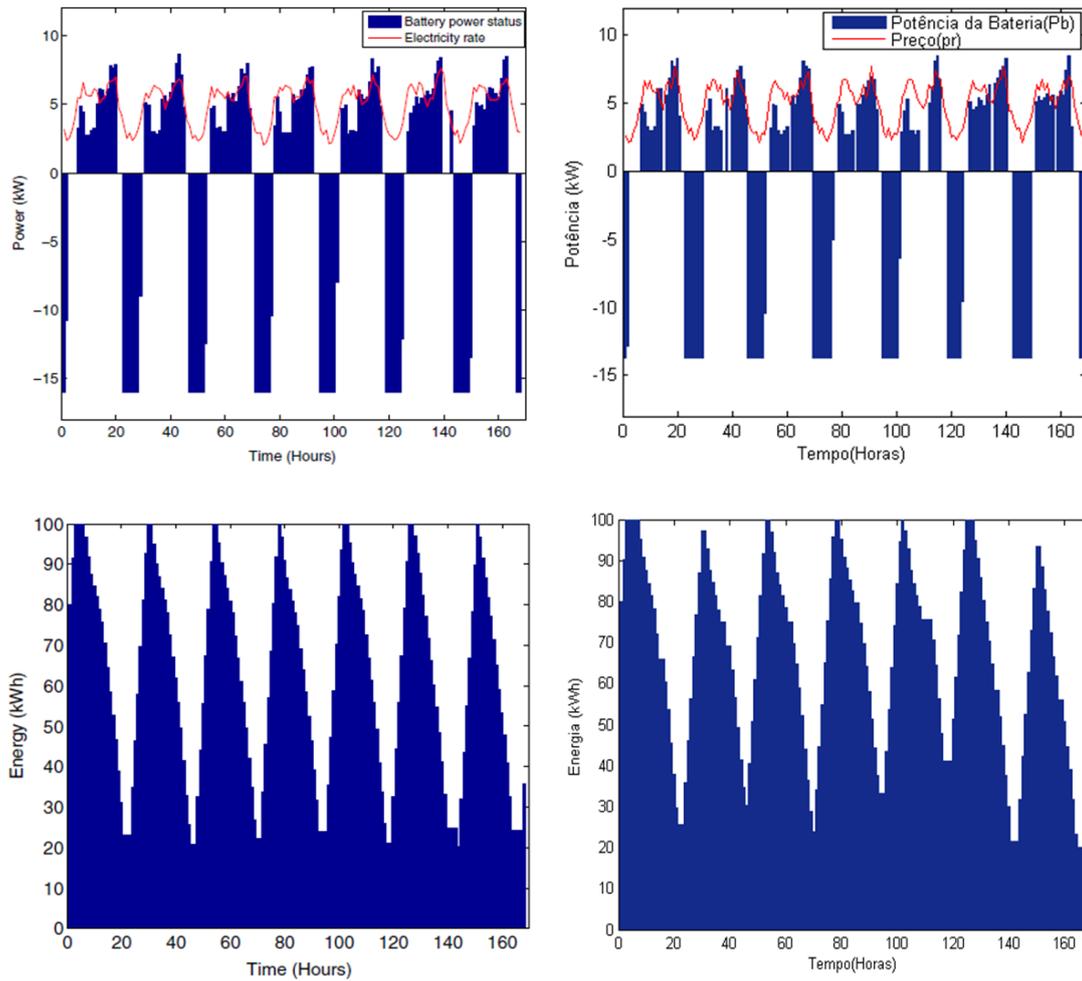


Figura 14 – Comparação do Comportamento da Bateria

A Tabela 4 resume os resultados obtidos através dos dois métodos. A Figura 15 apresenta um comparativo dos gráficos de comportamento da bateria. Os gráficos da parte superior representam a variação da potência da bateria enquanto que os gráficos da parte inferior, o nível de energia presente na bateria em cada instante. Os gráficos à esquerda são os obtidos pelo método ADP, e foram retirados de [3], enquanto que os gráficos à direita foram obtidos pelo método HHSER.

Tabela 4 – Comparação de Custos e Economia

	ADP	HHSER
Custo Total Sem a Bateria	4124.13 cents	4048.93 cents
Custo Total Com a Bateria	2866.64 cents	2732.80 cents
Economia	30.49%	32.51%

A economia gerada pelo controle HHSER foi levemente superior, 2,02% a mais de economia em relação ao controle ADP. Na prática, podemos considerar que ambos os controles produziram o mesmo resultado para um mesmo sistema de energia residencial.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi proposto um novo controle, baseado na heurística Hill-climbing, para o gerenciamento de um sistema de energia residencial. O método conseguiu balancear precisão na ação de controle, fácil implementação e eficiência. O HHSER mostrou-se robusto a perturbações aleatórias tanto no perfil da demanda de energia como na variação dos preços em tempo real, permitindo que o controle seja aplicado a diferentes cenários com diferentes perfis de consumo de energia. O HHSER revelou-se ainda competitivo frente ao esquema de controle por redes neurais baseado em *Adaptive Dynamic Programming*; apresentando ganhos similares de economia de custo para a um mesmo sistema residencial de energia. Em virtude da sua fácil implementação aliada à consistência dos resultados obtidos, o método de controle ótimo HHSER poderia ser aplicado a casos reais de demanda de energia residencial.

Para trabalhos futuros é sugerida a incorporação de métodos preditivos ao controle ótimo HHSER. Uma possibilidade seria a aplicação de uma janela móvel que armazenasse perfis diários da variação dos preços do quilowatt e que, a cada nova entrada, atualizasse os parâmetros de controle. Outro campo a ser explorado é o de fontes de energias renováveis. O acoplamento de painéis solares ao sistema é simples de ser executado e só se fariam necessárias mudanças naquilo que tange a modelagem do sistema.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. Falcão, “Smart Grids e microrredes: o futuro já é presente”, in *the VIII Symposium of Automation of Electrical Systems (SIMPASE)*, Barra da Tijuca, Rio de Janeiro, Brasil, Agosto. 2009.
- [2] G. Venayagamoorthy, “Emerging Computational Methods for Smart Grids,” in *the Fourth International Symposium on Resilient Control Systems*, Boise, Idaho, EUA, Agosto. 2011.
- [3] T. Huang e D. Liu, “Residential energy system control and management using adaptive dynamic programming,” in *Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, pp. 119-124, San Jose, Califórnia, EUA, 31 de Julho – 5 de Agosto, 2011
- [4] A. G. Bakirtizis e P. S. Dokopoulos, “Short term generation scheduling in a small autonomous system with unconventional energy system,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3, no. 3, Agosto. 1988.
- [5] P. M. Corrigan e G. T. Heydt, “Optimized dispatch of a residential solar energy system,” in *North American Power Symposium*, pp. 4183-4188, Las cruces, Novo México, EUA, Setembro. 2007.
- [6] B. Lu e M. Shahidehpour, “Short term scheduling of a battery in a grid connected PV/battery system,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 1053-1061, Maio. 2005.
- [7] T. Y. Lee “Operating schedule of battery energy storage system in a time-of-use rate industrial user with wind turbine generators: a multipass iteration particle swarm optimization approach,” *IEEE Transactions on Energy Conversions*, vol. 22, no. 3, pp. 774-782, Setembro. 2007.
- [8] T. Yau, L. N. Walker, H. L. Graham e R. Raithel, “Effects of battery storage devices on power system dispatch” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, no. 1, pp. 375-393, Janeiro. 1981.
- [9] Z. Michalewicz e D. B. Fogel, *How to solve it: Modern Heuristics*, Berlin: Springer-Verlag, Março. 2004.

APÊNDICE A – ALGORITMO SIMPLES DE HILL-CLIMBING

Abaixo, um exemplo de um algoritmo simples do método heurístico Hill-climbing [9].

```
BEGIN  
   $t \leftarrow 0$   
  Inicializar  $best$   
  REPEAT  
     $local \leftarrow FALSE$   
    Selecionar aleatoriamente um ponto  $x$   
    Calcular o valor da função no ponto  $x$ ,  $f(x)$   
    REPEAT  
      Selecionar pontos na vizinhança de  $x$ ,  $x_v$   
      Dentre os novos pontos, selecionar o ponto  $x_n$  que retorna  
      o melhor valor da função objetivo  $f$   
      IF  $f(x_n)$  melhor que  $f(x)$   
        THEN  $x \leftarrow x_n$   
      ELSE  $local \leftarrow TRUE$   
    UNTIL  $local$   
     $t \leftarrow t + 1$   
    IF  $f(x)$  melhor que  $f(best)$   
      THEN  $best \leftarrow x$   
  UNTIL  $t \leftarrow MAX$   
END
```