

Otimização Multi-Objetivo da Demanda em Redes Elétricas Inteligentes Residenciais

Í. H. Honorato, W. C. Celeste, D. J. C. Coura, S. D. Rissino, H. R. O. Rocha
Departamento de Computação e Eletrônica - CEUNES
Universidade Federal Espírito Santo
Rodovia BR 101 Norte, Km 60, Bairro Litorâneo | São Mateus - ES | CEP 29932-540
icaro.honorato@outlook.com, helder.rocha@ufes.br

RESUMO

O presente trabalho trata de resolver o problema de planejamento da demanda em uma rede elétrica inteligente residencial (*SmartGrids*), com o objetivo de obter um compromisso entre o valor monetário total da energia consumida e o conforto dos inquilinos da residência. O aplicativo de gerenciamento da demanda fazendo uso de otimização multi-objetivo leva em consideração tarifas diferenciadas no tempo (TOU: *Time-Of-Use*) e ciclos de operação dos equipamentos. A Metaheurística NSGA-II é a técnica proposta para resolver o problema de otimização envolvendo o compromisso entre conforto e custo da energia gasta. Testes baseados em simulações em um sistema radial residencial são realizados com o intuito de validar o sistema proposto.

PALAVRAS CHAVE: Planejamento da Demanda, NSGA-II, Tarifas Diferenciadas no Tempo.

Área principal: Energia Elétrica, Metaheurística.

ABSTRACT

This work is to solve the demand planning problem in a smart residential electrical network (*SmartGrids*), in order to reach a compromise between the total monetary value of energy consumed and comfort of the tenants of the residence. The demand management application making use of multi-objective optimization takes into account different rates over time (TOU: *Time-Of-Use*) and equipment operating cycles. The metaheuristic NSGA-II is the proposed technique to solve the optimization problem involving the compromise between comfort and cost of energy expended. Test simulations based hub system in a residential are conducted in order to validate the proposed system.

KEYWORDS: Demand Planning, NSGA-II, Time-Of-Use.

Main area: Power Systems, Metaheuristic.

1. Introdução

O atual modelo de geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica tem se mostrado insustentável, avaliando duas perspectivas: a perspectiva da geração e a perspectiva do consumidor. A geração é feita de forma centralizada, onde grandes usinas geradoras produzem uma considerável quantidade de energia elétrica que deve ser transmitida e posteriormente distribuída às unidades consumidoras, muitas vezes, distantes de suas fontes, gastando-se muitos recursos na construção e manutenção de tais sistemas. Além disso, em geral, a geração dessa grande quantidade de energia elétrica resulta em impactos ambientais consideráveis. Já na perspectiva do consumidor, principalmente entre os consumidores de média e baixa potência, a energia elétrica tem sido utilizada de forma pouco inteligente e sem nenhum controle. Agregado à estas duas perspectivas está o fato de que a energia elétrica tem se tornado cada vez mais cara.

Diante desta realidade, a Geração Distribuída (GD) surge como um novo paradigma de geração e consumo de energia elétrica cada vez mais presente nos mercados de energia elétrica de todo o mundo, em especial, nos países desenvolvidos e em desenvolvimento, os quais são os maiores geradores e consumidores de energia elétrica.

Segundo [Ackermann et al. 2001], este novo paradigma na GD pode ser definido como uma fonte geradora, de baixa potência, conectada diretamente na rede distribuidora ou diretamente nas fontes consumidoras, também de média e baixa potência. Essa ideia de localizar a geração próxima à carga diminui o gasto com recursos na construção e manutenção da rede, e além disso torna a GD muito menos nociva ao meio ambiente.

Dentre as principais tecnologias de GD tem-se as Microrredes (*Microgrids*), [Lasseter 2002], as quais têm permitido o desenvolvimento do conceito de Redes Inteligentes (*Smart Grids*) [Farhangi 2010], [Carvallo e Cooper 2011], [Hadjsaïd e Sabonnadière 2012]. As *Smart Grids* são microrredes dotadas de sistemas de comunicação e controle entre seus elementos, propiciando o uso otimizado da energia produzida, melhorando, inclusive, a qualidade da energia e a eficiência da rede elétrica.

Um dos problemas a ser tratado em uma *Smart Grid* é o Gerenciamento pelo Lado da Demanda (GLD) – *Demand Side Management (DSM)* –, que consiste no planejamento, implementação e monitoramento de ações por parte da concessionária de energia elétrica que objetivam permitir um maior controle do usuário sobre o seu consumo de energia, promovendo o uso eficiente da energia elétrica. Segundo [Gellings 1985] as ações no lado da demanda mais comuns são: Gerenciamento de carga, conservação estratégica, eletrificação, geração de energia pelo lado do consumidor, substituição de equipamentos obsoletos por mais novos e eficientes e ajustes para o crescimento da participação no mercado.

Vários trabalhos na literatura têm abordado o problema de GLD. Dentre tais trabalhos pode-se citar [Sui et al. 2011] onde foi desenvolvido um software que considera Geração Distribuída (GD), sistema de recarga de veículos elétricos híbridos e de dispositivos de armazenamento de energia com o objetivo de regular a curva de demanda e a qualidade de energia do sistema proposto. Cita-se ainda [Logenthiran et al. 2012] onde foi proposto um algoritmo evolucionário com representação binária para a solução do problema de GLD. [Siebert et al. 2012] desenvolveu um sistema baseado em Algoritmos Genéticos para agendamento de consumo de eletrodomésticos em uma residência, considerando os requisitos de tarifas diferenciadas no tempo (*Time-Of-Use*). [Teixeira e Ferreira 2014] estendeu o trabalho de [Siebert et al. 2012] quando decidiu incluir um banco de baterias para armazenamento de energia elétrica e cenários de geração distribuída através de micro geração eólica e solar residencial.

Os programas de GLD podem ser divididos em duas categorias, a saber: o GLD direto, no qual a concessionária determina as cargas a serem desconectadas ou reduzidas, conforme condições especificadas em um contrato de interrupção com o consumidor; e o GLD indireto, onde o próprio consumidor remaneja sua demanda em resposta a sinais de preço gerados pela concessionária.

Neste artigo é tratado o problema de GLD indireto, onde é considerada a curva diária de tarifação da energia elétrica, tal como a *Time-Of-Use (TOU)*, que varia para diferentes períodos

do dia visando refletir situações típicas de fornecimento e demanda de energia, em intervalos fixos, como a tarifa branca, regulamentada em 2011 pela ANEEL [ANEEL 2010] e são definidos níveis de conforto/prioridade do usuário no uso de equipamentos elétricos/eletrônicos. O objetivo geral é o de desenvolver um método, com o uso do algoritmo genético NSGA II, que permita a redução monetária da energia paga pelo consumidor final, mas sem a perda de conforto dos inquilinos da residência.

Na Seção 2 são apresentados mais detalhes sobre o Gerenciamento pelo Lado da Demanda Indireto, enquanto que na Seção 3 é descrita a metaheurística NSGA-II para tratar o problema de otimização multi-objetivo. Na Seção 4 é apresentada a formulação do problema tratado neste artigo. A Seção 5 e 6 mostram detalhes da obtenção da matriz de conforto e a codificação adotada na formulação. Resultados de testes de simulações são comentados na Seção 7. Por fim, a Seção 8 apresenta as principais conclusões baseadas nos resultados obtidos.

2. Gerenciamento pelo Lado da Demanda Indireto

O GLD Indireto consiste em programas onde o controle da carga não é realizado de forma direta, ou seja, pela concessionária de energia elétrica. Esses programas promovem alterações na curva de demanda mediante mudanças nos hábitos de consumo de energia elétrica por parte do consumidor.

Estes programas são: As tarifas variantes no tempo, incentivando o consumidor a modificar seus hábitos de consumo em horários de maior valor tarifário para horários de menor valor tarifário; programas de educação, publicidade e marketing, visando ensinar o consumidor como utilizar de forma consciente a energia elétrica além de programas governamentais que oferecem descontos em produtos que consomem menos energia elétrica [Braga 2014].

2.1. Relação do GLD Indireto com o Sistema de Gerenciamento e Controle de Curva de Demanda (SGCCD) da *Smart Grid*

Um SGCCD, conforme a Figura 2.1, é organizado em três blocos fundamentais:

- Unidade de Gerenciamento e Controle (UGC);
- Unidade Consumidora (UC);
- Rede Pública (RP).

É a Unidade de Controle e Gerenciamento que se enquadra no GLD Indireto, recebendo as seguintes informações para isso: geração interna (quantidade de energia gerada pela *Smart Grid*), energia consumida nos ramais, disponibilidade financeira do consumidor, tarifa corrente, que é o valor instantâneo pago pela energia adquirida da RP e a energia comprada de uma concessionária, fornecida via RP, resultando nas seguintes ações: Atuação on/off em ramais e também na entrada da *Smart Grid*.

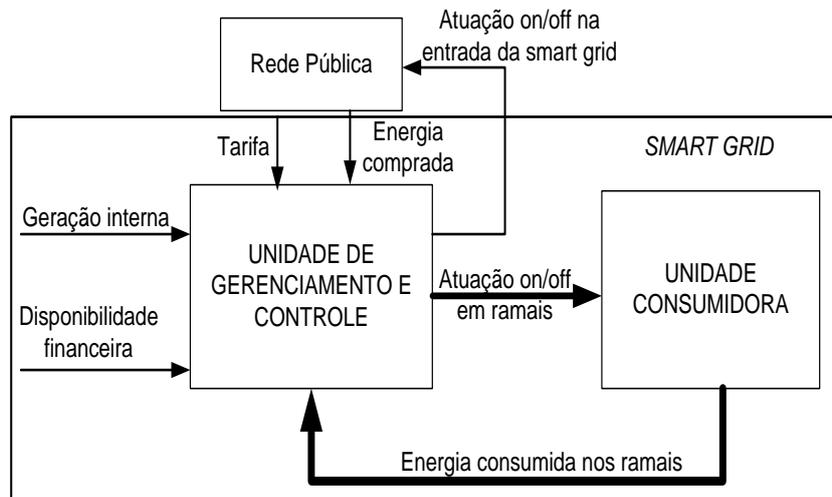


Figura 2.1. Sistema de Gerenciamento e Controle de Curva de Demanda.

3. Otimização Multi-objetivo

Muitos problemas de tomada de decisão na engenharia envolvem a otimização simultânea de vários e conflitantes objetivos. Esse tipo de problema é conhecido como *Multi-Objective Optimization Problem* (MOOP). A otimização multi-objetivo apresenta um conjunto de soluções ótimas conhecido como Frente de Pareto, que representam o melhor compromisso entre os objetivos do problema.

Na otimização multi-objetivo existem duas abordagens no tratamento do problema, conforme [Deb 2001]. Na primeira, em que são definidas as prioridades e pesos entre os vários objetivos de interesse, encontra-se a solução ótima baseada nas informações fornecidas. Já na segunda encontra-se o conjunto de soluções não-dominadas (Frente de Pareto) para posteriormente escolher uma entre elas, sem possuir nenhuma informação adicional.

A formulação de um problema de otimização multi-objetivo envolve a minimização ou maximização de funções-objetivo sujeitas a um conjunto de restrições. Assim, a formulação pode ser expressa como [Deb 2001],

$$\begin{aligned}
 & \text{Max / Min } f_m(x), & m = 1, 2, \dots, M \\
 & \text{S.a. } g_j(x) \geq 0, & j = 1, 2, \dots, J \\
 & h_k(x) = 0, & k = 1, 2, \dots, K \\
 & x_i^{(Min)} \leq x_i \leq x_i^{(Max)}, & i = 1, 2, \dots, n
 \end{aligned} \quad (1)$$

onde $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ é um vetor de variáveis de decisão, $x_i^{(Min)}$ e $x_i^{(Max)}$ são os limites mínimo e máximo das variáveis de decisão, g_j e h_k representam as restrições de desigualdade e igualdade respectivamente.

3.1 Dominância e Soluções de Pareto Front

O conceito de dominância é usado em algoritmos multi-objetivo para indicar e comparar o grau de qualidade de uma solução em relação à outra. Diz-se que uma solução x domina y , se, e somente se, para todos os objetivos envolvidos no domínio da função, x não for pior que y em nenhum objetivo e existir pelo menos um objetivo em que x seja melhor que y . Todas as soluções não dominadas de um conjunto de soluções formam a Frente de Pareto que representa o melhor compromisso entre os objetivos do problema.

3.2 Algoritmo Evolucionário Multi-objetivo NSGA-II

O algoritmo *Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA-II), é um algoritmo evolucionário elitista e incorpora um mecanismo de preservação das soluções dominantes através das gerações [Deb 2001].

O processo inicia-se a partir de uma população P_t com N cromossomos obtidos aleatoriamente. A geração seguinte Q_t é obtida usando operadores genéticos empregados no algoritmo genético. Cada solução da população tem um valor de aptidão (*fitness*), F_n e N^* , que é definido pelo seu nível de dominância na população.

A geração Q_t é obtida aplicando-se os operadores de seleção, cruzamento e mutação. As populações da geração P_t e Q_t são unidas em uma única $R_t = P_t \cup Q_t$, com $|R_t| = 2N$. Para as seguintes gerações é usada a população R_t anterior para gerar uma nova que é obtida mediante a ordenação de R_t por não dominância gerando assim várias fronteiras (conjuntos) nessa população. Esses conjuntos de soluções são então inseridos na nova população por não dominância até que a população tenha N cromossomos. Se ao adicionar o último conjunto de cromossomos na nova população, esta ultrapassar o tamanho N da nova população, o algoritmo NSGA-II escolhe os cromossomos desse último conjunto que estejam mais espalhados (*Crowding Distance*). A Figura 3.1 ilustra melhor todo esse processo de iteração do algoritmo NSGA-II. Copiam-se a partir daí apenas as soluções que completam a nova população P_{t+1} para que esta tenha apenas N soluções.

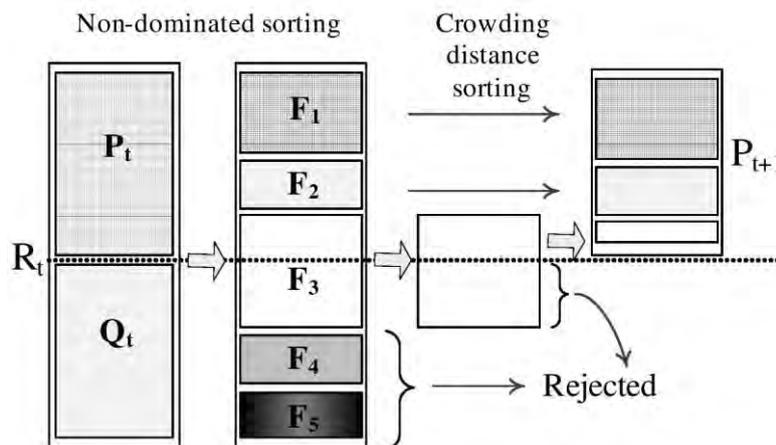


Figura 3.1. Esquema do modelo do NSGA-II.

4. Formulação do Problema Multi-objetivo

A otimização da demanda é um problema combinatório sujeito a restrições de alocação da carga, ou seja, o objetivo é obter uma solução que minimiza os custos com a energia elétrica e maximiza o conforto dos inquilinos da residência, sujeita a restrições tais como: matriz de conforto, ciclos de operação, prioridade do equipamento e custo fixo diário, isto é:

$$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_{i=1}^{M=24} \left(\left[\sum_{j=1}^N X(i, j) \times Ed(j) \times Tu(j) \right] \times C(i) \right) \\ & \text{Max} \frac{\left(\sum_{i=1}^{M=24} \sum_{j=1}^N X(i, j) * Y(i, j) * P(j) \right)}{N * M * \text{máx}(P)} \end{aligned}$$

s/a :

$$(1) \frac{\left(\sum_{f=T_{Min}}^{T_{Max}} \left[y(f) = \begin{cases} 1, & \text{se } X(f, k) = 1 \\ 0, & \text{se } X(f, k) = 0 \end{cases} \right] \right)}{\text{DuracaoCiclo}(k)} = \text{Ciclo}(k); \quad k = 1:N \quad (2)$$

$$(2) \sum_{i=1}^{M=24} \left(\left[\sum_{j=1}^N X(i, j) \times Ed(j) \times Tu(j) \right] \times C(i) \right) \leq C_{Limite}$$

$$(3) \sum_{j=1}^N Z(j) \leq N$$

$$(4) P \in [1,2,3]$$

$$(5) X \in [0,1]$$

$$(6) Y \in [1,2,3]$$

$$(7) Z \in [0,1]$$

Onde:

- $X(i, j)$, indica se o j -ésimo equipamento consome energia no instante i ;
- $Ed(j)$, é a energia demandada pelo j -ésimo ramal da residência;
- $Tu(j)$, é o tempo de utilização do equipamento em frações de horas;
- $Y(i, j)$, representa o conforto do j -ésimo equipamento no instante i ;
- $C(i)$, é o custo da energia elétrica comprada da rede pública no instante i ;
- $P(j)$, representa a prioridade do j -ésimo ramal da residência;
- C_{Limite} , é o custo limite diário que o consumidor determina para si;
- M , é a quantidade de partes em que se divide um dia de funcionamento da *Smart Grid*;
- N , é o número de ramais nos quais a carga de uma *Smart Grid* pode se dividir;
- $\text{Ciclo}(k)$, indica o número de ciclos de operação do k -ésimo equipamento;
- $\text{DuracaoCiclo}(k)$, indica a duração máxima, em horas, do ciclo de funcionamento do k -ésimo equipamento;
- $Z(j)$, representa a quantidade de equipamentos em operação;
- T_{MIN} e T_{MAX} representam, respectivamente 1h e 24h;

A restrição:

- (1), indica que o número de ciclos de operação do k -ésimo equipamento deve estar de acordo com as informações de ciclo, pré-determinadas sobre ele;
- (2), indica que os planos de demanda devem ser gerados, tomando como parâmetro de limitação do custo, o valor que o consumidor quer pagar diariamente;
- (3), indica que nem todos os equipamentos devem obrigatoriamente estar em funcionamento em um plano de demanda;
- (4), (5), (6) e (7) garantem, respectivamente, que P seja um vetor com a prioridade de cada ramal (pequena - 1, média - 2, máxima - 3) onde cada elemento é inteiro no intervalo $\{1,3\}$, X seja uma matriz-solução binária, Z um vetor binário e Y representa a matriz de conforto (mínimo - 1, médio - 2, máximo - 3) que é inteira no intervalo $\{1,3\}$.

5. Matriz de Conforto

A matriz de conforto representa, para cada ramal, de acordo com a utilização dos ramais pelo (s) consumidor (es), quais faixas de horário são de: conforto máximo, conforto médio e conforto mínimo.

Conforto máximo, representado pelo número 3, é definido pelos horários em que o consumidor habitualmente utiliza os ramais de sua residência.

Conforto médio, representado pelo número 2, é definido pelos horários próximos aos que o consumidor habitualmente utiliza os ramais de sua residência.

Conforto mínimo, representado pelo número 1, é definido pelos horários distantes dos que o consumidor habitualmente utiliza os ramais de sua residência.

A Tabela 5.1 abaixo ilustra uma matriz de conforto, onde se observa a classificação das horas do dia com os índices indicativos de conforto, conforme descrito acima.

Tabela 5.1. Matriz De Conforto gerada para um plano de demanda contendo 10 ramais.

<i>Equipamento/Hora</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>...</i>	<i>24</i>
<i>Equipamento 1</i>	1	1	1	1	1	3	3	2	...	2
<i>Equipamento 2</i>	1	1	1	1	3	3	2	2	...	3
<i>...</i>
<i>Equipamento 10</i>	1	1	1	1	1	3	3	3	...	1

A obtenção da matriz de conforto se dará da seguinte forma:

1. Haverá um medidor de tensão instalado no relógio de distribuição da residência, e um medidor de corrente em cada ramal da residência.
2. Com esses medidores, os dados de consumo de energia elétrica serão coletados, durante um período de tempo determinado, armazenados em um banco de dados e analisados a fim de construir-se uma curva de demanda para cada equipamento.
3. Com os dados de consumo de cada equipamento, as curvas de carga de cada equipamento serão determinadas os horários de máximo, médio e mínimo conforto, com base em cálculos estatísticos.
4. Após o passo 3, a matriz de conforto é concluída, capturando ao máximo a realidade de uso dos ramais da residência.

Desta forma, garante-se uma análise mais confiável do comportamento do usuário, de modo a propor planos de demanda que se adequem tanto ao conforto do usuário, quanto ao custo total a ser pago.

6. Codificação da Solução

Detalhes da modelagem binária do cromossomo usada no NSGA-II proposto neste trabalho são delineados nesta seção.

Na modelagem aqui proposta, cada matriz-solução X representa um plano de demanda, ou seja, uma possível solução para o problema. Logo, cada plano de demanda é representado por uma matriz em que cada linha representa um equipamento ou ramal j , e cada coluna representa o período de alocação do equipamento iniciada no instante i durante um dia de funcionamento de uma *Smart Grid*. A dimensão da matriz corresponde ao número máximo de equipamentos ou ramais, dado por N , e ao número máximo de períodos de funcionamento de uma *Smart Grid* em um dia de funcionamento, dado por M . Os elementos da matriz contêm valores binários, assumindo valor “1” quando o equipamento estiver consumindo energia e “0” caso contrário.

A Tabela 6.1 ilustra a codificação de um cromossomo para um sistema de 10 equipamentos. Nota-se neste caso específico que $N=10$ e $M=24$, de modo que cada período corresponde a uma hora inteira.

Tabela 6.1. Plano de demanda codificado segundo as especificações de modelagem do problema.

<i>Equipamento/Hora</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>...</i>	<i>24</i>
<i>Equipamento 1</i>	0	0	0	0	0	0	1	1	...	0
<i>Equipamento 2</i>	0	0	0	0	1	1	0	1	...	0
<i>...</i>
<i>Equipamento 10</i>	0	0	0	1	0	0	1	1	...	0

7. Testes e Resultados

O algoritmo proposto foi implementado na linguagem de programação *Matlab®* e, para avaliar o desempenho da metodologia proposta foram realizados testes com um sistema residencial de 10 ramais (foi considerado 1 equipamento por ramal). A Tabela 7.1 apresenta os parâmetros usados no NSGA-II, respectivamente.

Tabela 7.1. Parâmetros de simulação utilizados no NSGA-II.

<i>Parâmetros</i>	<i>Valor</i>
<i>Tamanho da População</i>	100
<i>Inicialização da População</i>	Aleatório ou Heurística
<i>Número de Gerações</i>	Variável
<i>Método de Seleção</i>	Torneio Determinístico
<i>Taxa de Cruzamento</i>	0,95
<i>Cruzamento</i>	Um ponto
<i>Taxa de Mutação</i>	0,02
<i>Elitismo</i>	Sim

O resultado de uma otimização multi-objetivo é um conjunto de soluções não-dominadas chamado Frente de Pareto. As métricas usadas neste trabalho, para medir a qualidade da Frente de Pareto são: Espaçamento, Espalhamento Máximo. Cada métrica destaca um aspecto diferente da Frente de Pareto. Espaçamento (S) estima a diversidade para a Frente de Pareto obtida. Espalhamento Máximo (MS) avalia a extensão máxima abrangida pelas soluções não-dominadas na Frente de Pareto.

A Tabela 7.2 mostra os resultados das métricas durante a convergência do NSGA-II para planos de demanda com custo total máximo de R\$10,00 por dia.

Tabela 7.2. Métricas de Convergência do NSGSA-II.

<i>Gerações</i>	<i>S</i>	<i>MS</i>
<i>5</i>	1.6653	4.5058
<i>10</i>	2.0231	5.2026
<i>15</i>	1.8098	5.6730
<i>20</i>	2.1751	6.1317
<i>25</i>	2.0747	7.8039

A Tabela 7.3 apresenta as características dos equipamentos instalados na residência tais como: potência média, tempo de operação, em minutos, quantidade de ciclos de utilização do respectivo equipamento no período de 24 horas e a prioridade de cada ramal conforme o uso do consumidor. Pode-se observar que, o equipamento de menor potência média possui 600 Watts de potência, indicando que esta é uma residência detentora de uma alta demanda de energia.

Tabela 7.3. Características dos equipamentos presentes na residência.

<i>Equipamento</i>	$P_{Média}$ (W)	T_{Op} (min)	<i>Cic.</i>	<i>Prior.</i>
<i>Chuveiro Elétrico</i>	4500	10	2	3
<i>Lavadora de louça</i>	1250	30	1	3
<i>Ferro de passar a seco</i>	1000	60	2	2
<i>Bomba d'agua</i>	736	40	1	3
<i>Chuveiro Elétrico</i>	4500	10	3	3
<i>Ar-condicionado</i>	2200	240	2	3
<i>Cafeteira Elétrica</i>	600	30	2	1
<i>Lavadora de Roupa</i>	1500	60	1	2
<i>Mini System</i>	1800	30	2	1
<i>Computador Desktop</i>	600	60	3	3

Neste trabalho a tarifa TOU considerada foi a Tarifa Branca, utilizando três valores diferenciados no tempo conforme descritos em [Teixeira e Ferreira 2014]. Pode-se observar na Tabela 7.4 que o período de ponta, isto é, período onde a tarifa é mais cara, está compreendido entre 18h e 21h, enquanto que o período fora de ponta, está dividido em dois setores: o período de 18h às 19h e de 21h às 22h compreende a tarifação intermediária e de 22h às 17h é o horário de menor tarifação.

Tabela 7.4: Tarifação da energia elétrica conforme a Tarifa Branca.

<i>Valor (R\$/KWh) *</i>	<i>Período (horas)</i>
0,46452	23 às 17
3 X 0,46452	18 e 22
5X 0,46452	19 às 21

*Segundo a ANEEL, este valor é valido no seguinte período: 07/08/2015 - 06/08/2016.

A Figura 7.1 mostra a Curva de Pareto obtido após a convergência do NSGA-II, resultando em 12 planos de demanda para um custo fixo pré-determinado de R\$10,00 por dia. Foram gerados planos de demanda com custo variando de R\$ 4,86 à R\$ 9,54. São destacados, o plano de maior custo, menor custo, e médio custo e, na Figura 7.2 é representada a distribuição de custo por hora do dia destes planos em relação ao custo por hora da Tarifa Branca utilizada neste trabalho.

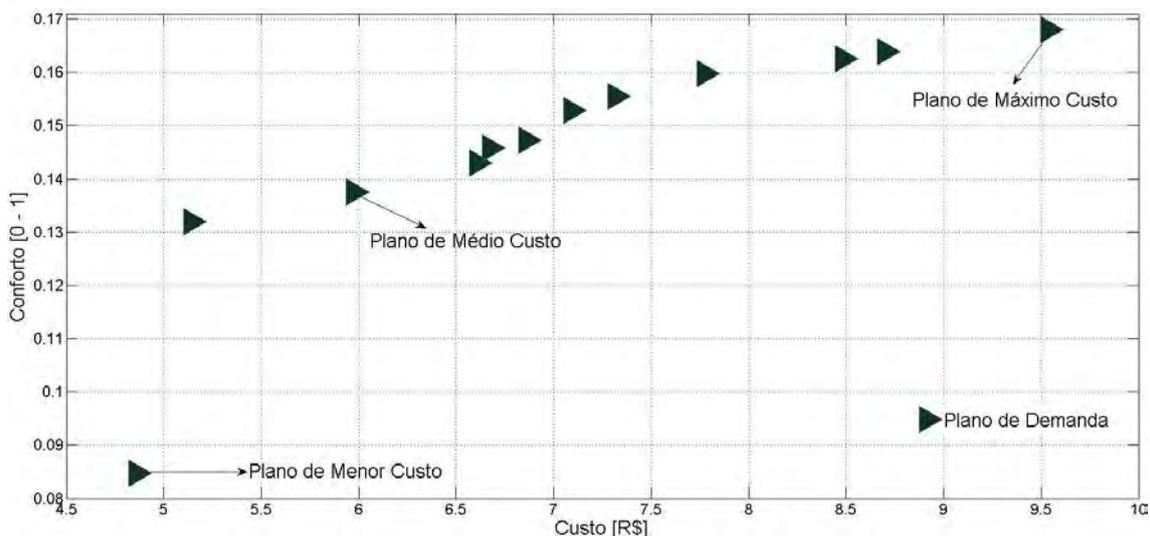


Figura 7.1. Planos de demanda gerados pelo algoritmo NSGA-II, aplicado em uma residência com 10 equipamentos elétricos/eletrônicos instalados.

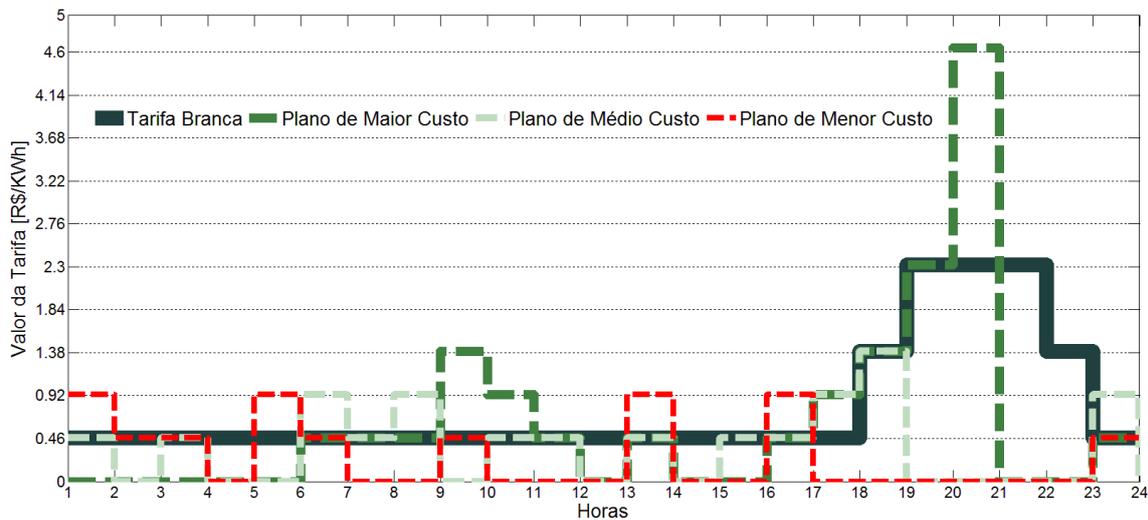


Figura 7.2. Distribuição do custo por hora nos planos de demanda mínimo, médio e máximo destacados na Figura 7.1, com base na Tarifa Branca considerada neste trabalho.

Os planos de máximo, médio e menor custo/conforto, são exibidos, abaixo, em tabelas descritivas. Como mencionado anteriormente, esta é uma residência detentora de uma alta demanda de energia, logo, a predeterminação de um pequeno custo por dia, implica necessariamente na redução do conforto. O objetivo é exatamente mostrar ao consumidor que, independentemente do nível de conforto escolhido, este é influenciado pelos seguintes fatores: custo preestabelecido, a quantidade de ramais e suas respectivas demandas energéticas, duração, horários e prioridades de uso dos ramais. O resultado desta dependência pode ser visto no desligamento de alguns equipamentos, nas tabelas a seguir que, mesmo possuindo prioridade máxima, precisam ser desligados para garantir um nível de conforto adequado aos fatores de influência.

Os horários de funcionamento dos equipamentos propostos usando NSGA-II, para um conforto máximo são demonstrados na Tabela 7.5. Neste plano de demanda, os dois chuveiros elétricos e a bomba d'água podem ser ligados em horários de maior tarifação e, com a exceção de um dos chuveiros elétricos, que também pode ser utilizado em um dos horários de tarifação intermediária (18:00h – 19:00h) e do ar-condicionado que foi desligado, todos os outros equipamentos foram agendados para funcionar em horários de tarifação mínima.

Tabela 7.5. Agendamento proposto para máximo conforto.

Equipamento	Hora do dia Proposta [NSGA-II]
<i>Chuveiro Elétrico</i>	8:00-9:00 e 17:00 – 18:00
<i>Lavadora de louça</i>	7:00 – 8:00
<i>Ferro de passar a seco</i>	6:00 – 7:00 e 11:00 – 12:00
<i>Bomba d'água</i>	19:00 – 21:00
<i>Chuveiro Elétrico</i>	10:00 – 11:00, 18:00 – 19:00 e 20:00 – 21:00
<i>Ar-condicionado</i>	----
<i>Cafeteira Elétrica</i>	9:00 – 11:00
<i>Lavadora de Roupa</i>	23:00 – 1:00
<i>Mini System</i>	9:00 – 10:00 e 13:00 – 14:00
<i>Computador Desktop</i>	9:00 – 10:00 e 16:00 – 18:00
Custo [R\$/dia]	9,54
Conforto [0 - 1]	0.170

Os horários de funcionamento dos equipamentos proposto usando NSGA-II, para um conforto médio são demonstrados na Tabela 7.6. Neste plano de demanda, não há nenhum

equipamento funcionando em horário de ponta, apenas a cafeteira está agendada para funcionar em horário de tarifação intermediária e além disso, o ar-condicionado e o mini system foram desligados.

Tabela 7.6: Agendamento proposto para conforto médio.

<i>Equipamento</i>	<i>Hora do dia Proposta [NSGA-II]</i>
<i>Chuveiro Elétrico</i>	8:00 – 9:00 e 17:00 – 18:00
<i>Lavadora de louça</i>	23:00 – 00:00
<i>Ferro de passar a seco</i>	15:00 – 16:00 e 23:00 – 00:00
<i>Bomba d'água</i>	10:00 – 12:00
<i>Chuveiro Elétrico</i>	1:00 – 2:00, 13:00 – 14:00 e 16:00 – 17:00
<i>Ar-condicionado</i>	----
<i>Cafeteira Elétrica</i>	3:00 – 4:00, 18:00 – 19:00
<i>Lavadora de Roupa</i>	6:00 – 8:00
<i>Mini System</i>	----
<i>Computador Desktop</i>	6:00 – 7:00, 9:00 – 10:00, 17:00 – 18:00
<i>Custo [R\$/dia]</i>	5,97
<i>Conforto [0-1]</i>	0.140

Os horários de funcionamento dos equipamentos proposto usando NSGA-II, para um mínimo conforto são demonstrados na Tabela 7.7. Neste plano de demanda, nenhum equipamento funciona em horário de ponta ou de tarifação intermediária e além disso o mini system, computador e ar-condicionado foram desligados.

Tabela 7.7. Agendamento proposto para mínimo conforto.

<i>Equipamento</i>	<i>Hora do dia Proposta [NSGA-II]</i>
<i>Chuveiro Elétrico</i>	2:00 – 4:00
<i>Lavadora de louça</i>	23:00 – 00:00
<i>Ferro de passar a seco</i>	9:00 – 10:00 e 16:00 – 17:00
<i>Bomba d'água</i>	1:00 – 2:00 e 0:00 – 1:00
<i>Chuveiro Elétrico</i>	1:00 – 2:00, 13:00 – 14:00 e 16:00 – 17:00
<i>Ar-condicionado</i>	----
<i>Cafeteira Elétrica</i>	5:00 – 6:00 e 13:00 – 14:00
<i>Lavadora de Roupa</i>	5:00 – 7:00
<i>Mini System</i>	----
<i>Computador Desktop</i>	----
<i>Custo [R\$/dia]</i>	4,86
<i>Conforto [0 - 1]</i>	0.084

8. Conclusões

O desenvolvimento do aplicativo de gerenciamento da demanda de energia elétrica em uma residência, fazendo o uso de otimização multi-objetivo, com o algoritmo genético NSGA-II, gerou propostas de agendamento apropriadas no contexto de um gerenciamento inteligente de cargas em uma *smart grid* pois, dadas as características dos equipamentos da residência e o custo preestabelecido, o aplicativo foi capaz de estabelecer um compromisso entre custo e conforto.

Observou-se também, a corroboração dos programas de GLD Indireto pois, ao possibilitar o consumidor a gerar planos de demanda com base em seus equipamentos e seu limite de custo diário, ele pode, por si próprio, perceber a necessidade de readequação: na eficiência energética, na quantidade, no tempo de utilização e nos horários de utilização de cada equipamento. O consumidor pagará menos pela energia consumida e ao mesmo tempo, a concessionária de energia elétrica será beneficiada, visto que, com tais readequações haverá suavização da curva de carga e redução da demanda máxima. Em busca de melhores resultados e

mais vantagens tanto para o consumidor quanto para a concessionária, almeja-se ainda a inserção de energias renováveis e baterias, para armazenamento de energia elétrica, na geração dos planos de demanda.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do CNPq, Proc. 443384/2014-2 e a da FAPES/ES, Proc. 67651259/14 pelo suporte financeiro a esta pesquisa.

Referências

- Ackermann, T., Andersson, G., & Söder, L. (2001). Distributed generation: a definition. *Electric power systems research*, 57(3), 195-204.
- BRASIL. ANEEL. Nota Técnica nº 360 de 06 de dezembro de 2010. Apresenta o resultado das análises e a metodologia geral a ser utilizada na Estrutura Tarifária aplicada ao setor de distribuição de energia elétrica. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2010/120/documento/nota_tecnica_n%C2%BA_360_2010_sre-srd-aneel.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2016.
- Braga, N. B. (2014). *Gerenciamento pelo Lado da Demanda em áreas Residenciais* (Doctoral dissertation, Universidade Federal do Rio de Janeiro).
- Carvalho, A., & Cooper, J. (2015). *The advanced smart grid: Edge power driving sustainability*. Artech House.
- Deb, K. (2001). *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms* (Vol. 16). John Wiley & Sons.
- Farhangi, H. (2010). The path of the smart grid. *Power and energy magazine, IEEE*, 8(1), 18-28.
- Gellings, C. W. (1985). The concept of demand-side management for electric utilities. *Proceedings of the IEEE*, 73(10), 1468-1470.
- Hadjsaid, N., & Sabonnadière, J. C. (Eds.). (2013). *Smart Grids*. John Wiley & Sons.
- Lasseter, R. H. (2002). Microgrids. In *Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE* (Vol. 1, pp. 305-308). IEEE.
- Logenthiran, T., Srinivasan, D., & Shun, T. Z. (2012). Demand side management in smart grid using heuristic optimization. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, 3(3), 1244-1252.
- Sui, H., Sun, Y., & Lee, W. J. (2011, July). A demand side management model based on advanced metering infrastructure. In *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011 4th International Conference on* (pp. 1586-1589). IEEE.
- Siebert, L. C., Aoki, A. R., Yamakawa, E. K., & Toledo, F. O. (2012). Gerenciamento pelo Lado da Demanda em Redes Inteligentes Utilizando Algoritmos Genéticos. *IV SBSE–Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*.
- Teixeira, C. P., & Ferreira, V. H. (2014). Gerenciamento da Demanda Residencial Utilizando Métodos de Otimização Natural e Considerando a Geração Distribuída. Anais do IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), Foz do Iguaçu.