

Modelagem de Carga em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica no Brasil via Algoritmo Genético

Josué F. Leal G., Mateus A. O. Leite, and João A. de Vasconcelos

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos 6627, CEP 31270-901
Belo Horizonte - MG, Brasil
{josuef.lealg, vasconcelos.joao.antonio}@gmail.com, maol@ufmg.br

Resumo Este trabalho visa avaliar modelos de carga em sistemas brasileiros de distribuição de energia elétrica. Um procedimento para construção de modelos de carga residenciais e comerciais é apresentado. Os resultados obtidos no procedimento desenvolvido foram avaliados e confrontados com modelos de carga padronizados pela entidade reguladora do setor elétrico brasileiro. Para tal propósito, foram simulados dois sistemas de distribuição de energia elétrica. Em seguida, um algoritmo genético é apresentado para tratar o problema da modelagem de carga. Após a otimização, foram evidenciadas melhorias na modelagem de carga e cálculo das perdas técnicas, especialmente nos horários de maior demanda de energia elétrica.

Keywords: Modelagem de carga, Fluxo de Potência, Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE), Algoritmo Genético.

1 Introdução

Um sistema elétrico de potência é constituído basicamente por três componentes principais: geradores, linhas de transmissão e cargas. O interesse pela modelagem de carga tem sua importância nos processos de restauração pós-blecaute, análise de estabilidade de tensão e na redução de perdas técnicas de potência [1].

Dois abordagens podem ser empregadas para a modelagem de carga: a abordagem baseada em medição direta e a abordagem baseada em componentes. No trabalho apresentado em [2] utilizou-se o método de mínimos quadrados junto com o método de multiplicador de Lagrange para estabelecer modelos de carga de dispositivos eletrônicos, por outro lado, em [3] o autor usa lógica Fuzzy e Evolução Diferencial (DE) para determinar o modelo de carga visto desde uma subestação no Brasil, obtendo como resultado modelos de carga semelhantes ao modelo de carga padronizado. Tanto em [2], como em [3] os autores empregaram a abordagem baseada em medições.

Igualmente, o problema da modelagem de carga é amplamente tratado usando o algoritmo de *Particle Swarm Optimization* (PSO) [4] e [5], segundo os autores

o PSO apresenta melhor comportamento de convergência e eficiência computacional comparado com o Algoritmo Genético na análise dinâmica da carga.

No contexto brasileiro, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) padronizou o modelo ZIP para as cargas conectadas ao Sistema de Distribuição em Média Tensão (SDMT) e em Baixa Tensão (SDBT), entretanto, neste trabalho busca-se avaliar tal modelo padronizado. Para isso, apresenta-se um procedimento para construção de modelos de carga precisos utilizando-se informações oficiais das empresas do setor elétrico do Brasil, junto com informações disponibilizadas na literatura. Em seguida, foram simulados dois SDEE submetidos a ditos modelos de carga construídos, e aos padronizados. Dessa forma, as perdas técnicas de potência e o perfil de tensão dos SDEE foram analisados e confrontados.

Finalmente, é desenvolvido um algoritmo genético para lidar com o problema da modelagem de cargas em SDEE no Brasil. O problema de otimização é formulado como um problema mono-objetivo restrito. Nos testes realizados são considerados diferentes proporções de carregamento de classe residencial e comercial nos SDEE.

2 Modelo de Carga ZIP

A expressão polinomial da equação 1a e 1b, representa o modelo ZIP que descreve respectivamente a potência ativa P e a reativa Q de uma carga, em função do módulo da tensão V nela. A ANEEL estabelece que: para a parcela reativa, o modelo ZIP é composto pelo 100% impedância constante (isto é, $Z_q = 1$, $I_q = 0$, e $P_q = 0$). Entretanto, para a parcela ativa o modelo é definido com 50% de potência constante e 50% de impedância constante [6] (ou seja, $Z_p = 0.5$, $I_p = 0$, e $P_p = 0.5$).

$$P(V) = P_o \left[Z_p \left(\frac{V}{V_o} \right)^2 + I_p \left(\frac{V}{V_o} \right) + P_p \right]. \quad (1a)$$

$$Q(V) = Q_o \left[Z_q \left(\frac{V}{V_o} \right)^2 + I_q \left(\frac{V}{V_o} \right) + P_q \right]. \quad (1b)$$

Os Coeficientes Z_p , I_p , P_p , Z_q , I_q e P_q representam respectivamente, as proporções de Impedância, Corrente e Potência constante da carga. Além disso, P_0 e Q_0 são as potências ativa e reativa da carga quando ela é submetida à tensão nominal V_0 . As equações 2a e 2b, estabelecem que as proporções têm que representar o 100% da potência ativa e reativa da carga.

$$Z_p + I_p + P_p = 1. \quad (2a)$$

$$Z_q + I_q + P_q = 1. \quad (2b)$$

3 Método Proposto para a Modelagem de Carga

O objetivo da abordagem por componentes [7], é derivar um modelo matemático $P_{add}(V, f) + jQ_{add}(V, f)$ que descreva a variação da demanda de potência da carga no barramento em função do módulo da tensão (V) e da sua frequência (f). Assume-se que a frequência é fixa em 60 Hz, assim, em análise de estado estacionário sua influencia é desprezada [1]. De maneira ilustrativa, na Figura 1, é apresentada a estrutura da modelagem de uma residência com seus respectivos componentes/equipamentos e características.

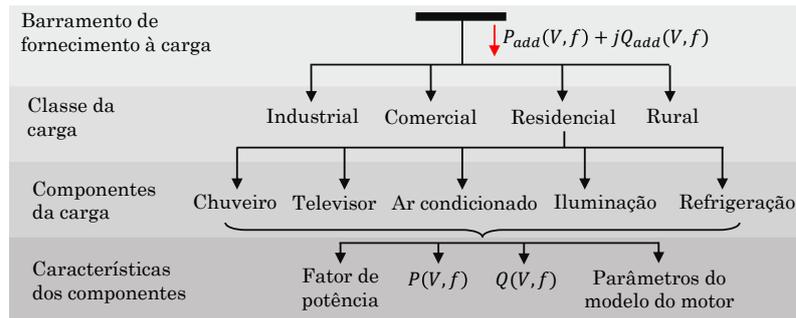


Figura 1. Estrutura da modelagem de carga baseada em componentes, adaptada de [7].

Neste trabalho, o método aplicado é baseado no método exposto em [8], no tanto, aqui é apresentado um método simplificado que não considera as condições climáticas e tampouco a análise demográfica residencial. Então, a análise restringiu-se à região sudeste do Brasil em um dia útil e limitou-se à análise de cargas de classe residencial e comercial. O método proposto para a construção de modelos de cargas é apresentada na Figura 2. Em azul, são destacadas as informações coletadas e armazenadas em uma base de dados utilizando *SQLite (v.3.18)*.

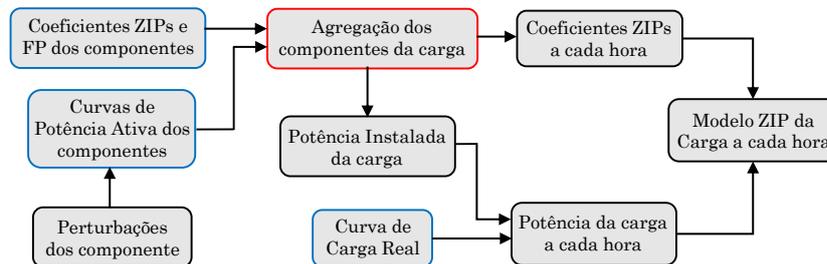


Figura 2. Método aplicado para construção de modelos de carga.

A informações sobre os coeficientes ZIP (Z_p , I_p , P_p , e Z_q , I_q , P_q) e o fator de potência de cada componente foram extraídos de [9], [10], [11]. Por outro lado, utilizando a curva de carga da classe residencial apresentada na Figura 3, é extraído o consumo de potência dos componentes em cada hora, aquela curva foi retirada do Programa de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL)[12].

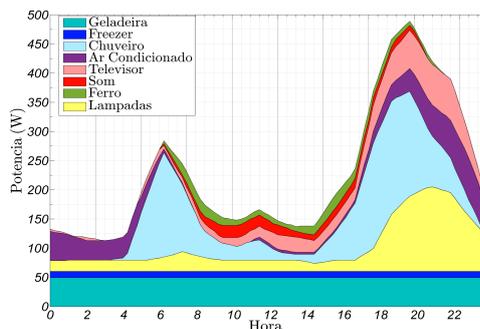


Figura 3. Curva de carga residencial da região Sudeste do Brasil, adaptada de [12].

Entretanto, as informações sobre o consumo de potência por componente da classe comercial foram obtidas mediante um censo feito na cidade de *Belo Horizonte- MG*. No censo, foram escolhidos quatro tipos de empresas do setor comercial (padarias, lojas, supermercado e carpintarias).

A partir das informações já mencionadas, são atingidos modelos ZIP dos componentes de cargas residenciais e comerciais. Assim, para obter um modelo ZIP equivalente da carga é preciso fazer a agregação dos seus componentes, conforme explica-se na seção 3.1. Em seguida, a potência do modelo agregado é substituída por um valor extraído de curvas de carga reais segundo a classe da carga, observe-se a Figura 2. Tais curvas são extraídas da campanha de medição da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG).

Finalmente, o método proposto permite construir modelos de carga que se aproximam à realidade, levando em consideração medições reais, bem como informações experimentais e da literatura. Os modelos construídos são chamados modelos de “referência” para avaliar o modelo de carga da ANEEL e também, para avaliar o desenvolvimento do AG proposto.

3.1 Agregação de Modelos de Carga

A seguir, é mostrado o procedimento de agregação de modelos ZIP para a potência ativa P , embora, o mesmo procedimento é aplicado para a potência reativa Q , entretanto, a demonstração do procedimento encontra-se em [1]. Para M componentes de uma carga residencial ou comercial, o modelo ZIP equivalente da potência ativa é determinado pela equação 3. O mesmo procedimento é

aplicado para agregar M cargas residenciais e/ou comerciais ligadas a um mesmo barramento.

$$P_t = \sum_{n=1}^M P_n . \quad (3)$$

Em que, P_n é o modelo do n -ésimo componente da carga, dado pela equação 4. Entretanto, na equação 5, é determinado o modelo ZIP equivalente P_t da carga, sujeito à equação 6.

$$P_n(V) = P_{o,n} \left[Z_{p,n} \left(\frac{V}{V_o} \right)^2 + I_{p,n} \left(\frac{V}{V_o} \right) + P_{p,n} \right] . \quad (4)$$

$$P_t(V) = P_o^* \left[Z_p^* \left(\frac{V}{V_o} \right)^2 + I_p^* \left(\frac{V}{V_o} \right) + P_p^* \right] . \quad (5)$$

$$Z_p^* + I_p^* + P_p^* = 1 . \quad (6)$$

3.2 Aplicação

Dado um SDEE, em cada barramento fornecedor de energia deve-se obter um modelo ZIP em cada hora, para tal proposito, devem gerar-se e agregar-se os componentes das cargas e obter o modelo ZIP equivalente de cada uma delas. Em seguida, os modelos das cargas devem também ser agregados para finalmente obter o modelo ZIP do barramento para cada hora do dia. Feito isso em todos os barramentos do SDEE, pode-se executar o fluxo de potência e determinar a perda técnica na hora correspondente. A potência do barramento deve ser fornecida para limitar o número cargas geradas no mesmo.

O fluxo de potência é executado no software *Open Distribution System Simulator* (OpenDSS) [13], também padronizado pela ANEEL. Entretanto, o algoritmo de construção de modelos de cargas foi desenvolvido em MATLAB (v2014).

4 Algoritmo Genético - AG

A Figura 4 ilustra as principais funções do algoritmo genético desenvolvido [14], [15]. De maneira geral, um indivíduo é uma solução candidata que determina os coeficientes ZIPs da potência ativa e reativa para todas as cargas do SDEE em apenas uma hora do dia, assim, para cada hora é considerada uma população de N indivíduos, por conseguinte, $H = 24$ populações são consideradas. O OpenDSS, por sua vez, é o responsável de calcular o fluxo de potência para todos os indivíduos de cada população, e de acordo com a perda de potência ativa no SDEE, um valor de aptidão é atribuído para cada indivíduo. Maiores detalhes sobre o cálculo da perda técnica são apresentados na Subseção 4.2.

Em seguida, os processos de seleção e produção das H populações são realizados. O método de *Torneiro* foi usado no processo de seleção. Cada população

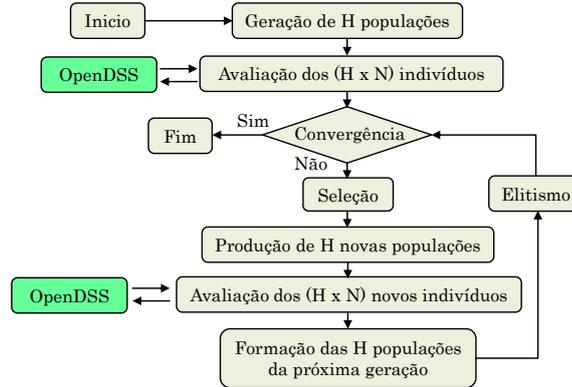


Figura 4. Fluxograma do algoritmo genético desenvolvido para o problema da modelagem de carga.

é submetida ao processo de cruzamento, sendo uma combinação linear de dois indivíduos de uma mesma população. Entretanto, o operador de mutação consiste em pequenas alterações aleatórias do indivíduo conforme o explicado na Subseção 4.3.

Por fim, os novos ($H \times N$) indivíduos são avaliados e incluídos com sua respectiva população. Para cada população opte-se pela formação da sua próxima geração com os N melhores indivíduos escolhidos entre seus indivíduos N antigos e N indivíduos novos. Logo após, o módulo do Elitismo se encarga de armazenar o melhor indivíduo de cada população.

Ao final do processo evolutivo, é obtido um conjunto formado pelos melhores H indivíduos que representam as soluções ao problema da modelagem de carga em cada hora do dia. O procedimento descrito se repete até que o critério de parada seja atendido, sendo adotado o número máximo de gerações.

4.1 Representação dos Indivíduos

Um indivíduo X é formado por $I = 6$ variáveis de decisão, três delas representam os coeficientes ZIP da parcela ativa e as outras três, os coeficientes ZIP da parcela reativa da carga. A codificação real é usada para a representação do indivíduo e o espaço de busca é definido como: $X_{min} \leq X_i \leq X_{max}$ para $i = \{1, 2, 3, \dots, I\}$, em que, $X_{min} = -5.0$ e $X_{max} = 5.0$ conforme com [16].

A geração dos indivíduos iniciais foi feita de forma que as restrições 2a e 2b do modelo ZIP sejam satisfeitas. Além disso, sua geração inicial foi criada de forma tendenciosa utilizando os coeficientes ZIP padronizados pela ANEEL.

4.2 Avaliação da População

A função objetivo F_h é definida na equação 7, ela é usada para calcular o somatório do erro quadrático entre a perda técnica de potência referência ($Loss_{ref}$)

e a perda técnica do indivíduo ($Loss_X$), para o conjunto D de dias em uma determinada h hora/população específica, em que, $h = \{1, 2, 3, \dots, H\}$.

$$F_h = \frac{1}{D} \sum_{d=1}^D \left(Loss_{ref}^d - Loss_X^d \right)^2. \quad (7)$$

A perda técnica do indivíduo ($Loss_X$) é calculada conforme a equação 8, para k arestas fechadas, pertencentes ao conjunto T de arestas do SDEE. As grandezas, Z_k e I_k representam respectivamente, a impedância e corrente da aresta k .

$$Loss_X = \Re \left[\sum_{k \in T} Z_k |I_k(X)|^2 \right]. \quad (8)$$

Além disso, o indivíduo deve satisfazer a restrição técnica operativa para o fornecimento de energia no Brasil, definida na equação 9. Ela estabelece que a tensão V para qualquer carga n do conjunto de cargas N pertencentes ao SDEE deve estar entre a faixa especificada de 0,93p.u. e 1,05p.u. [6].

$$0,93 \text{ p.u.} \leq V_n \leq 1,05 \text{ p.u.} \quad \forall n \in N \quad (9)$$

4.3 Seleção e Reprodução

O método de *Torneiro* [15] foi implementado para a seleção dos indivíduos que participarem do processo de cruzamento e mutação. O método é aplicado em cada população h e permite que o melhor indivíduo seja selecionado apenas duas vezes.

O cruzamento é uma combinação linear de dois indivíduos de uma mesma população h , definidos como $X_{h,1}$ e $X_{h,2}$. Na equação 10, o parâmetro α_{ge} estabelece a polarização do indivíduo $X_{h,1}$ que apresenta melhor aptidão que o indivíduo $X_{h,2}$. Essa polarização é definida na equação 11, seu comportamento é linearmente proporcional ao máximo de gerações predefinidas ge_{max} , sendo que, $\alpha_{min} = 0,5$ e $\alpha_{max} = 0,95$. Destaca-se que, a combinação linear satisfaz as restrições 2a e 2b no novo indivíduo $X_{h,novo}$.

$$X_{h,novo} = \alpha_{ge} * X_{h,1} + (1 - \alpha_{ge}) * X_{h,2}. \quad (10)$$

$$\alpha_{ge} = \alpha_{min} + \left(\frac{\alpha_{max} - \alpha_{min}}{ge_{max}} \right) ge. \quad (11)$$

Em seguida, o indivíduo $X_{h,novo}$ é submetido ao processo de mutação ou não, de acordo com uma probabilidade definida a priori. O operador de mutação ρ é calculado na equação 12, ele é aplicado na parcela de corrente constante I_p da potência ativa, entretanto, na potência reativa é aplicado na parcela de impedância constante Z_q . O valor de β é aleatório e definido entre $-1 \leq \beta \leq 1$.

$$\rho = 0,05\beta [X_{max} - X_{min}]. \quad (12)$$

Para manter a factividade do individuo após do processo de mutação, isto é satisfazer as equações 2a e 2b, é preciso que o ΔI_p gerado na mutação, seja inserido aleatoriamente em Z_p ou P_p . De igual maneira, o ΔZ_q dever ser inserido.

5 Resultados

A seguir, são apresentados resultados de perdas técnicas e perfis de tensão de dois sistemas, conforme três modelos de carga: o modelo referência, o modelo padrão ou ANEEL, e o modelo otimizado. Para cada SDEE, foram simulados $D = 100$ dias e o AG foi executado 15 vezes, para populações de $N = 10$ indivíduos e $ge_{max} = 20$ gerações. Os 24 modelos otimizados de cada hora foram retirados da melhor solução após as 15 execuções na hora correspondente.

5.1 Sistema IEEE 33 barras

O sistema de distribuição de 33 barramentos da IEEE tem características conhecidas na literatura [17]. Pelo que, o OpenDSS fornece a simulação desse SDEE. Na Tabela 1, são apresentadas a melhor, média e pior diferença entre o modelo otimizado e o modelo de referência, bem como, entre o modelo ANEEL e o modelo de referência. Além disso, o perfil de tensão do sistema considerando os três modelos avaliados é exibido na Figura 5. Neste teste, cada barramento do sistema foi simulado com carregamento 75% residencial e 25% comercial. As perdas médias atingidas pelos modelos de carga são exibidas na Figura 7a.

Tabela 1. Função Objetivo para $D = 100$ dias simulados - M. ANEEL v.s. M. Referência, e M. Otimizado v.s. M. Referência

Modelo	Caso	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7	h_8	h_9	h_{10}	h_{11}	h_{12}
	Melhor (10^{-5})	0.01	13.0	2.43	3.30	0.25	0.10	0.01	0.11	0.01	0.05	0.17	1.24
ANEEL	Médio (10^{-4})	1.62	2.39	1.82	2.51	1.46	0.26	0.40	0.43	0.24	0.17	0.52	0.83
	Pior (10^{-4})	3.59	5.01	3.44	3.72	3.76	1.04	1.34	1.66	1.00	0.49	1.98	2.26
	Melhor (10^{-5})	0.05	0.01	0.02	0.53	0.02	0.01	0.02	0.005	0.00	0.00	0.02	1.03
Otimizado	Médio (10^{-4})	0.41	0.14	0.21	0.36	0.26	0.50	0.47	0.27	0.20	0.16	0.27	0.87
	Pior (10^{-4})	1.57	0.44	0.65	0.99	0.82	1.89	0.28	1.45	0.57	0.47	0.92	2.42
Modelo	Caso	h_{13}	h_{14}	h_{15}	h_{16}	h_{17}	h_{18}	h_{19}	h_{20}	h_{21}	h_{22}	h_{23}	h_{24}
	Melhor (10^{-5})	0.87	0.39	1.51	0.03	0.07	0.20	0.12	0.73	0.09	0.31	0.11	0.02
ANEEL	Médio (10^{-4})	1.05	2.47	0.93	0.37	0.65	0.85	1.04	3.50	3.44	1.72	1.51	0.51
	Pior (10^{-4})	2.92	5.25	2.25	1.12	1.90	2.30	7.40	20.7	13.5	12.8	6.60	1.70
	Melhor (10^{-5})	0.28	1.34	0.02	0.00	1.73	0.003	0.79	0.19	26.5	0.04	4.51	0.008
Otimizado	Médio (10^{-4})	0.48	0.79	0.82	1.11	2.06	2.82	2.77	13.1	12.5	2.18	13.5	0.76
	Pior (10^{-4})	1.43	1.90	2.52	4.85	7.30	12.5	8.24	37.4	33.2	6.50	32.2	3.83

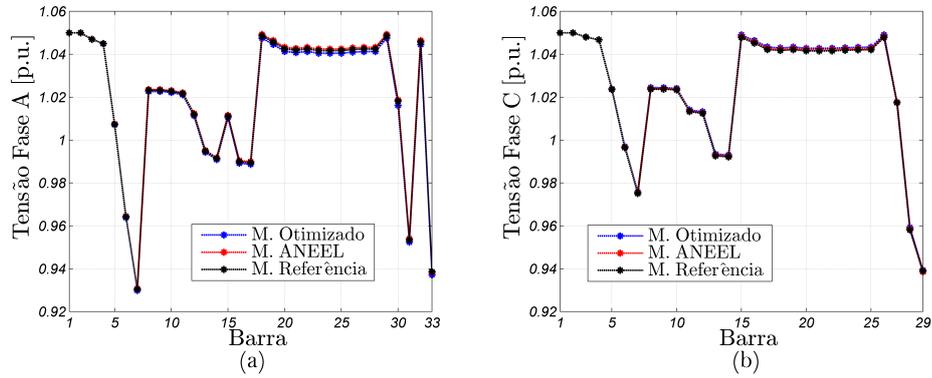


Figura 5. Perfil de tensão do SDEE da IEEE de 33 barras. (a) Fase A, às 10 hora. (b) Fase C, às 20 horas.

5.2 Sistema de Distribuição Brasileiro

Em segundo lugar, um sistema real de distribuição de energia do Brasil foi avaliado, o sistema possui 136 barramentos, 107 deles com carga, assim como, 156 arestas e $2,27 \times 10^{18}$ topologias radiais possíveis. Todas as informações do SDEE estão disponíveis em [18]. Neste teste, o sistema foi equilibrado e apenas foi considerada sua topologia inicial. A simulação foi executada com carregamento 50% residencial e 50% comercial em cada um dos barramentos fornecedores. De igual forma, na Tabela 2 são apresentadas as discrepâncias da perda técnica do modelo referência com respeito ao modelo otimizado e ao modelo ANEEL.

Na Figura 6a, é apresentado o perfil de tensão do sistema em um horário de baixa carga (10 horas), pode-se perceber que os modelos avaliados não apresentam discrepâncias consideráveis.

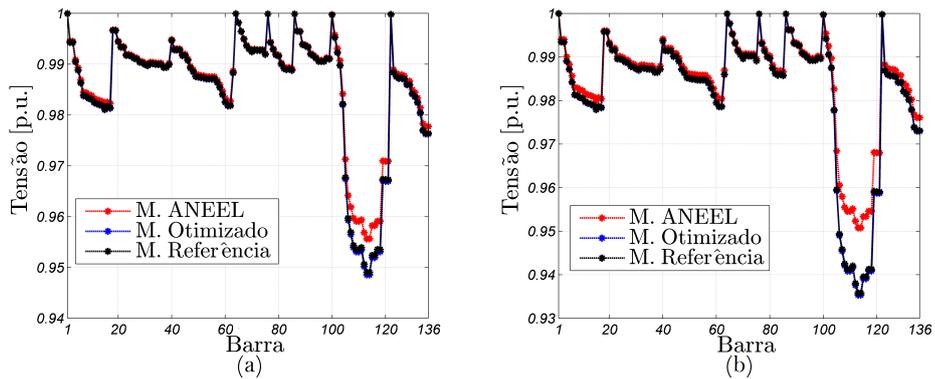


Figura 6. Perfil de tensão do SDEE brasileiro de 136 barras. (a) Às 10 horas. (b) Às 19 horas.

Porém, o perfil de tensão no horário de maior carga (19 horas) é mostrado na Figura 6b, nela, observa-se que o fluxo de potência calculado a partir do modelo ANEEL apresenta discrepâncias significativas com o modelo de referência.

Tabela 2. Função Objetivo para $D = 100$ dias simulados - M. ANEEL v.s. M. Referência e M. Otimizado v.s. M. Referência

Modelo	Caso	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7	h_8	h_9	h_{10}	h_{11}	h_{12}
ANEEL	Melhor (10^{-4})	4.42	0.00	0.64	0.00	0.59	0.03	0.26	0.01	9.46	18.6	32.9	26.1
	Médio (10^{-2})	0.52	0.10	0.04	0.05	0.01	0.03	0.82	0.51	1.07	2.09	3.60	3.89
	Pior (10^{-2})	0.68	0.02	0.16	0.01	0.13	0.07	0.15	0.19	1.30	2.48	4.08	5.96
Otimizado	Melhor (10^{-5})	0.22	0.19	0.11	0.16	0.20	0.44	1.29	1.86	3.74	6.15	6.68	7.97
	Médio (10^{-4})	0.03	0.02	0.01	0.02	0.03	0.06	0.16	0.22	0.43	0.75	0.80	0.97
	Pior (10^{-3})	0.42	0.37	0.24	0.29	0.40	0.78	2.00	2.53	5.69	9.65	10.7	12.2

Modelo	Caso	h_{13}	h_{14}	h_{15}	h_{16}	h_{17}	h_{18}	h_{19}	h_{20}	h_{21}	h_{22}	h_{23}	h_{24}
ANEEL	Melhor (10^{-4})	32.6	51.0	55.5	15.2	67.1	102.2	86.3	92.4	63.7	52.5	27.1	12.0
	Médio (10^{-2})	3.50	5.51	6.10	2.32	7.38	14.3	9.34	12.0	7.32	5.92	3.09	1.44
	Pior (10^{-2})	3.99	6.07	6.56	3.16	8.17	19.2	10.2	14.6	8.08	6.31	3.42	1.67
Otimizado	Melhor (10^{-5})	5.72	2.29	9.19	20.9	30.3	35.6	44.1	40.1	17.6	3.85	0.93	0.76
	Médio (10^{-4})	0.69	0.26	1.13	2.74	3.82	4.34	5.10	4.85	2.07	0.52	0.13	0.09
	Pior (10^{-3})	8.2	3.05	14.7	36.9	43.9	50.8	59.5	59.0	25.2	6.22	1.84	1.25

A perda técnica média do SDEE é exibida na Figura 7b. Nela, destaca-se que no horário entre as 14 e 18 horas a carga comercial tem grande participação na demanda de potência e a discrepância entre o modelo referência e o modelo ANEEL chega a atingir um erro médio de 0.025 p.u. Entretanto, nesse mesmo horário o modelo otimizado atingiu um erro médio de 0.007 p.u. o que demonstra uma melhoria significativa dos modelos de carga obtidos pelo AG. Na tabela 3 são expostos os modelos otimizados no horário já mencionado.

Os resultados da tabela 3 indicam que a atividade comercial tem tendência a modelar-se como potência constante, o que pode ter explicação, em que a demanda do setor comercial está fortemente influenciada por motores de indução.

Tabela 3. Coeficientes ZIP otimizados no horário das 14 horas até as 18 horas.

Coeficiente ZIP	h_{14}		h_{15}		h_{16}		h_{17}		h_{18}	
	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q
Z	4.494	1.969	4.226	2.887	0.248	3.980	-2.951	1.570	-1.593	-1.523
I	-0.251	-4.297	-0.686	-0.272	-3.220	-3.667	-0.715	-0.127	-0.772	0.520
P	-3.242	3.328	-2.539	-1.614	3.971	0.686	4.667	-0.442	3.365	2.003

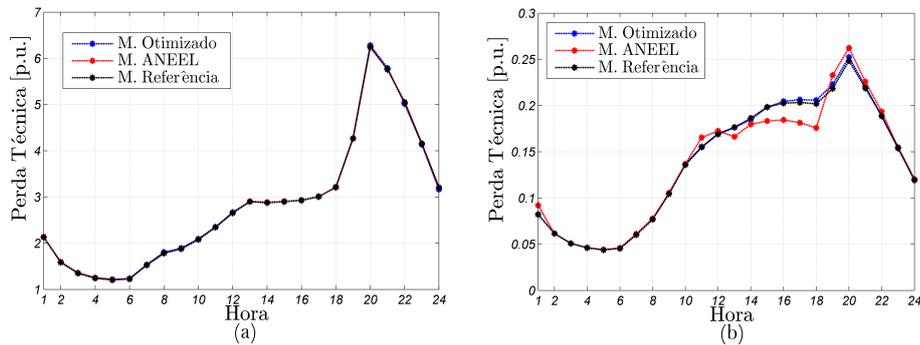


Figura 7. Perda Técnica média dos 100 dias. (a) Sistema IEEE 33 $S_{base} = 69KVA$, carregamento 75% residencial e 25% comercial. (b) Sistema Brasileiro $S_{base} = 1MVA$, carregamento 50% residencial e 50% comercial.

6 Conclusões

Neste artigo, um método para a construção de modelos de carga foi exposto e avaliado em dois SDEE. Nesses sistemas, os modelos de carga otimizados foram analisados e confrontados com o modelo de carga padronizado pela ANEEL. Os resultados indicam que em sistemas de menor dimensão o modelo ANEEL corresponde corretamente aos modelos de carga construídos. No entanto, em um sistema de maior dimensão, pode-se observar que em horários de maior demanda o modelo ANEEL não conseguiu representar corretamente as cargas. Sendo assim, o cálculo de fluxo de potência mostra uma discrepância nos ramais do sistema de distribuição.

Finalmente, modelos otimizados a partir do AG desenvolvido apresentam uma melhoria significativa na representação da carga e por conseguinte, no cálculo das perdas técnicas. É intuitivo pensar que em sistemas reais de distribuição de grande dimensão, maior relevância terão os modelos de carga no cálculo de fluxo de potência, e também, é interessante estabelecer modelos de carga conforme a classe de carregamento do SDEE.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro da FAPEMIG e da CAPES - Brasil.

Referências

1. FEEC and UNICAMP, *Modelagem de Carga para Análise Computacional de Sistemas de Energia Elétrica: Metodologias e Técnicas de Parametrização*. Campinas-SP, Brasil: P&D: 316, Março 2011.

2. F. L. Quilumba, W.-J. Lee, H. Huang, D. Y. Wang, and R. L. Szabados, "Load model development for next generation appliances," in *2011 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Oct 2011, pp. 1–7.
3. W. A. Gaspar, E. J. d. Oliveira, P. A. N. Garcia, and M. B. d. Amaral, "Static load model adjustment using fuzzy logic and differential evolution," in *2012 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications*, Nov 2012, pp. 1–6.
4. P. Regulski, D. S. Vilchis-Rodriguez, S. Djurovic, and V. Terzija, "Estimation of composite load model parameters using an improved particle swarm optimization method," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 2, pp. 553–560, April 2015.
5. L. Rodríguez-García, S. Pérez-Londoño, and J. Mora-Flórez, "Particle swarm optimization applied in power system measurement-based load modeling," in *2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, June 2013, pp. 2368–2375.
6. ANEEL, "Prodist: Módulo 7 - cálculo de perdas na distribuição," *Em: <http://www.aneel.gov.br/prodist>*, 2015.
7. P. Kundur, *Power System Stability and control*. California, EUA: McGraw-Hill Inc., Maio 1994.
8. G. Tsagarakis, A. J. Collin, and A. E. Kiprakis, "Modelling the electrical loads of uk residential energy users," *2012 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, pp. 1–6, Sept 2012.
9. A. Bokhari, A. Alkan, R. Dogan, M. Diaz-Aguiló, F. de León, D. Czarkowski, Z. Zabar, L. Birenbaum, A. Noel, and R. E. Uosef, "Experimental determination of the zip coefficients for modern residential, commercial, and industrial loads," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 3, pp. 1372–1381, June 2014.
10. N. Lu, Y. Xie, Z. Huang, F. Puyleart, and S. Yang, "Load component database of household appliances and small office equipment," pp. 1–5, July 2008.
11. F. Lamberti, C. Dong, V. Calderaro, and L. F. Ochoa, "Estimating the load response to voltage changes at uk primary substations," pp. 1–5, Oct 2013.
12. E. PROCEL, "Avaliação do mercado de eficiência energética no brasil-ano base 2005-classe residencial-relatório brasil," *Em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp>*, 2007.
13. R. C. Dugan, *OpenDSS Manual, Program Revision: 7.6*. Electric Power Research Institute, Inc, March 2016.
14. Z. Detorakis and G. Tambouratzis, "Introduction of a sectioned genetic algorithm for large scale problems," *2007 2nd Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems*, pp. 2–7, Dec 2007.
15. M. Melanie, *An Introduction to Genetic Algorithms*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, Maio 1999.
16. S. J. Ranade, A. Ellis, and J. Mechenbier, "The development of power system load models from measurements," *2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Developing New Perspectives (Cat. No.01CH37294)*, vol. 1, pp. 201–206 vol.1, 2001.
17. I. Power and E. Society, "Distribution test feeders," *Em: <http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/index.html>*, 2017.
18. UNESP, "136 buses, 156 branches medium city real distribution system for network reconfiguration," *Em: <http://www.feis.unesp.br/#!/departamentos/engenharia-eletrica/pesquisas-e-projetos/lapsee/downloads/>*, 2017.