ESTUDO DE METODOLOGIAS PARA ALOCAÇÃO DE GERADORES DISTRIBUÍDOS EM SIMULAÇÕES DE SISTEMAS ELÉTRICOS

Matheus Holzbach[1], Carla Carol Silva e Carvalho[2], Samilly Teixeira Fernandes Ferreira[2], Katherine Elizabeth Coaguila Zavaleta[2], Adriana Souza Resende[2]

[1]Universidade do Estado de Mato Grosso, Sinop, Brasil (matheus.holzbach@unemat.br)
[2]Universidade do Estado de Mato Grosso, Sinop, Brasil

Resumo: O Brasil tem apresentado um grande crescimento de instalações de geradores distribuídos, seja pelo excelente potencial conferido ao território nacional, como também pelos consecutivos aumentos nas tarifas de eletricidade. Contudo, a entrada desordenada destes geradores descentralizados poderá ocasionar alterações nocivas ao sistema elétrico de distribuição, as quais podem ser previstas por meio de simulações computacionais de cenários futuros. À vista disso, este trabalho propõe o estudo de metodologias empregadas para a alocação de geradores distribuídos dentro do contexto de simulações de sistemas elétricos, possibilitando o estudo de cenários futuros. A metodologia compreendeu uma análise comparativa de três cenários originados por diferentes algoritmos utilizando os métodos: totalmente aleatório, pseudoaleatório e pseudoaleatório com avaliação do coeficiente de variação. Para avaliação dos resultados conquistados em cada um dos cenários, optou-se pela análise do impacto nos níveis de tensão de um sistema de distribuição real após a inserção de 100 geradores distribuídos. Neste sentido, foi demonstrado que cada método conferiu diferentes soluções, sendo que o método pseudoaleatório obteve a maior discrepância entre os níveis de tensão do sistema concentrando os geradores em pontos específicos. Já os outros dois métodos atingiram simulações mais adequadas para os níveis requeridos pela norma de qualidade de energia e distribuições mais uniformes dos sistemas de geração ao longo das barras disponíveis.

Palavras-chave: Geração distribuída; Simulação computacional; Sistemas elétricos de potência; Alocação de geradores; Linguagem R.

INTRODUÇÃO

O processo de geração de energia elétrica está passando por uma reestruturação, onde a produção por meio de combustíveis fósseis tem sido amplamente desencorajada em todo o mundo devido à preocupação com o meio ambiente, estando também em desacordo com o sétimo objetivo de desenvolvimento sustentável da Organização das Nações Unidas e os tratados internacionais de redução das emissões de dióxido de carbono como o Acordo de Paris e o Pacto Climático de Glasgow (United Nations, 2016, 2022).

Dessa forma, o emprego de sistemas de geração renovável tem sido fortemente incentivado para a produção e diversificação da matriz energética (Scarpetta, 2014). No Brasil, a geração distribuída tem conquistado cada vez mais espaços, principalmente sob a forma de sistemas fotovoltaicos, devido ao interesse crescente dos consumidores em produzir sua própria energia. Esta tecnologia colabora positivamente com o meio ambiente, além de diminuir o impacto dos consecutivos aumentos na fatura de energia elétrica (Piotrowski et al., 2021).

Além disso, segundo o estudo realizado por Afifi et al. (2014), é esperado um crescimento ainda maior das tecnologias de aproveitamento solar, chegando a suprir um terço de toda a demanda energética mundial até o ano de 2060.

Contudo, a penetração massiva e desordenada de geradores distribuídos acarreta alterações no sistema de distribuição, como: aumento no nível de tensão nas barras, diminuição das perdas dos alimentadores, redução na vida útil de componentes na rede (Abdelsamad et al., 2015). Para isso a aplicação de ferramentas de simulação de sistemas elétricos se torna fundamental para prever os futuros desafios que o setor manifestara (Lima, 2014).

Para isto, o presente estudo analisa a aplicação de diferentes metodologias para a alocação de geradores distribuídos dentro do processo de simulação de cenários futuros em sistemas elétricos, abrangendo três métodos distintos, sendo estes: totalmente aleatório, pseudoaleatório e pseudoaleatório com avaliação do coeficiente de variação.

MATERIAL E MÉTODOS

A realização do presente estudo compreendeu a metodologia de análise comparativa entre três casos distintos de métodos para a alocação de geradores distribuídos dentro do sistema de distribuição, sendo eles:

- Caso I: método totalmente aleatório;
- Caso II: método pseudoaleatório;
- Caso III: método pseudoaleatório com avaliação do coeficiente de variação.

Para cada um dos casos foi desenvolvido um algoritmo utilizando a linguagem de programação R. Esta linguagem foi escolhida por ser considerada de alto nível, fácil manipulação e por possuir recursos nativos de cálculo de parâmetros estatísticos e de análise de dados.

O primeiro algoritmo desenvolvido compreendeu uma estrutura básica de criação de um vetor solução por meio da escolha aleatória entre as barras disponíveis, como ilustrado no diagrama de fluxo da Figura 1.

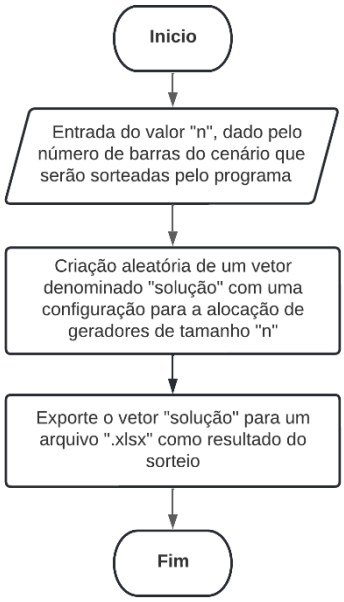


Figura 1. Diagrama de fluxo do algoritmo desenvolvido para o Caso I.

Este algoritmo não requer muito esforço computacional para sua execução, tendo em vista que possui um ciclo de trabalho simples, havendo como entrada somente o número de barras, que serão sorteadas, a receber os novos geradores distribuídos "*n*", e como saída, a exportação do arquivo em formato de tabela ".xlsx".

Cabe ressaltar que este método garante que todas as barras disponíveis para o recebimento de novos geradores disponham da mesma chance de serem escolhidas, diferenciando-se do segundo método denominado de pseudoaleatório. Este segundo método é designado como "quase aleatório" pois o processo de indicação das barras segue índices ou percentuais de chance de escolhas divergentes para cada opção disponível.

Além disso, este método pode ser muito útil em processos de tomadas de decisões em que seja informada as taxas históricas de escolha da variável avaliada. No que se refere a problemática abordada, se o modelador do sistema elétrico obtiver um conhecimento prévio dos locais que concentram as maiores quantidades de instalações de geradores distribuídos (por apresentarem melhores condições de produção por exemplo) estes dados podem ser inseridos no algoritmo com a finalidade de viabilizar a reflexão de cenários de alocação de novos geradores mais condizentes com a realidade.

Conforme ilustrado na Figura 2, o algoritmo construído compreende a criação de um vetor, denominado de sorteio, antes da criação do vetor resposta, para comtemplar a variação de chance entre as barras. Nesse vetor serão inseridas as taxas históricas de barras do sistema que receberam geradores no passado, sendo que estas terão maiores possibilidades de receber os novos geradores.

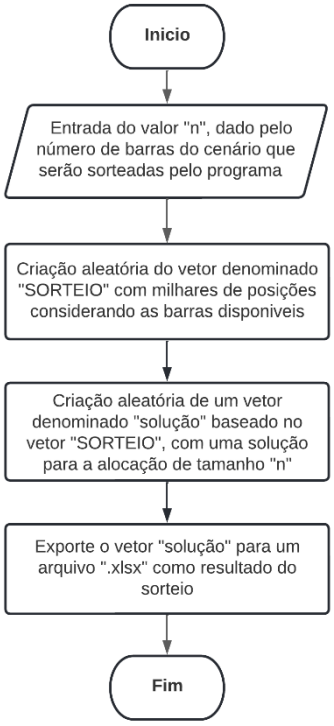


Figura 2. Diagrama de fluxo do algoritmo desenvolvido para o Caso II.

A diferença entre o esforço computacional requerido quando comparado com o primeiro método é irrisória, pois este método apenas agrega a distribuição de probabilidade de escolhas entre as barras, ao contrário do que foi evidenciado anteriormente.

Já para o terceiro e último caso estudado, é acrescentado ao algoritmo do segundo caso uma

ferramenta de avaliação das soluções encontradas por meio do coeficiente de variação dos dados (CV), como exibe a Figura 3.

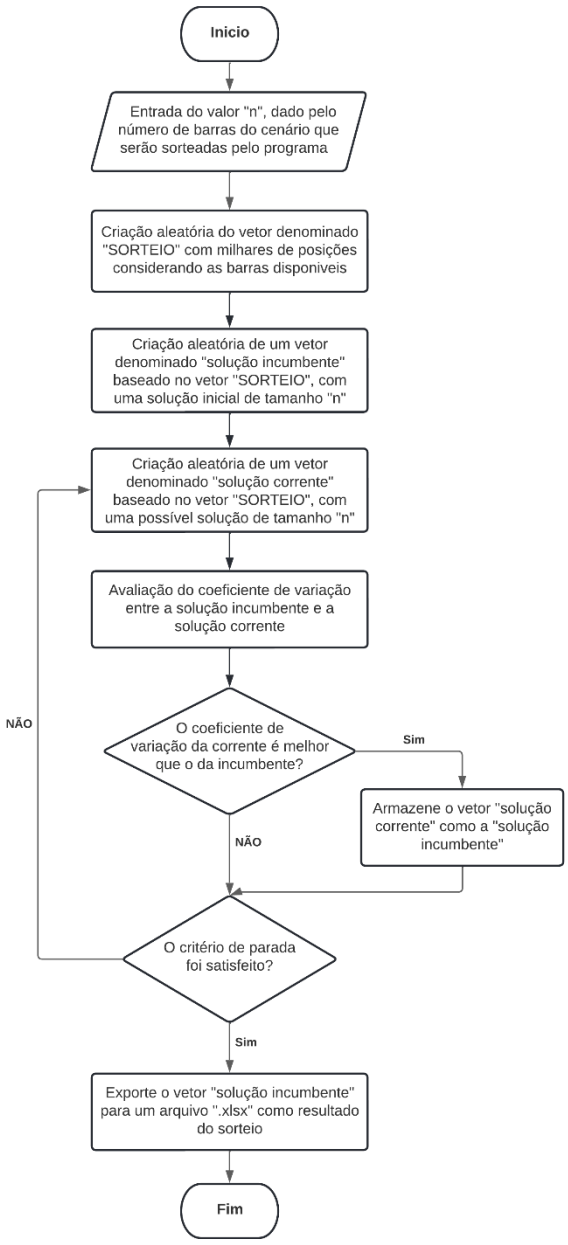


Figura 3. Diagrama de fluxo do algoritmo desenvolvido para o Caso III.

Este coeficiente é uma medida estatística de dispersão dos dados sendo determinado pela razão entre o desvio padrão do conjunto (σ) por sua média ($\bar{X}$), de acordo com a Equação 1 apresentada.

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}} \quad (1)$$

No algoritmo descrito são elaboradas duas soluções nomeadas de incumbente e corrente, ambas baseadas nas barras disponíveis para receber os geradores registradas no vetor sorteio de forma pseudoaleatória. Na continuidade, o algoritmo realiza o cálculo do CV para ambas as soluções e armazena a melhor reposta encontrada como solução incumbente (que contenha a solução com a melhor distribuição entre as barras).

Posteriormente será criada uma nova solução corrente e analisada com a melhor solução incumbente encontrada até o momento. Este processo se repetirá por um número pré-determinado, sendo que quanto maior, mais soluções poderão ser investigadas e consequentemente mais refinada será a solução final. Contudo, a medida que o número de análises cresce o esforço computacional para geração e avaliação das soluções de alocação também se eleva. Para este trabalho, então, foi fixado o número de 1000 avaliações.

Para qualificação dos métodos propostos, foi utilizado o modelo do sistema elétrico de distribuição real de 178 barras desenvolvido no *software* de simulação OpenDSS por Holzbach (2022). Neste modelo foram aplicados os algoritmos discorridos para os três casos para inserção de 100 geradores distribuídos, do tipo fotovoltaico, ao longo das barras disponíveis do sistema e examinado o impacto no sistema de distribuição por meio da alteração no perfil de tensão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O perfil de tensão de um sistema de distribuição é uma representação, que pode ser numérica ou gráfica, determinada após a execução do fluxo de potência. Nela pode ser compreendido a variação da tensão ao passo que ela se distancia do alimentador, e é frequentemente expressa na forma normalizada no sistema p.u. (por unidade). Na Figura 4, é ilustrado o perfil de tensão do sistema antes da inserção de geradores pelos métodos desenvolvidos, obtido através do *software* OpenDSS.

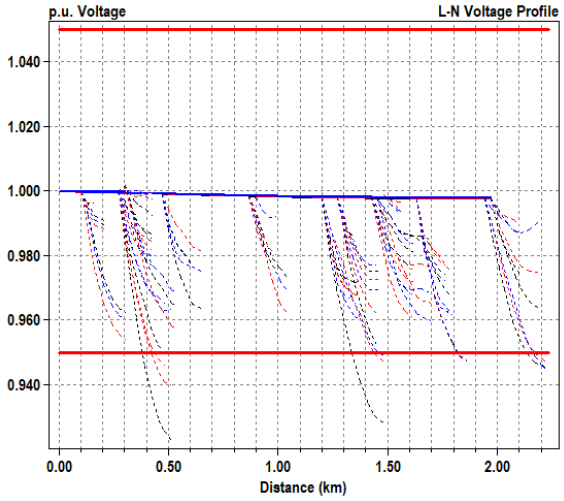


Figura 4. Perfil de tensão das barras sem a inserção dos geradores pelos algoritmos.

Este primeiro perfil de tensão apresentado, compreende um caso típico de sistema de distribuição

radial, onde o nível da tensão tende a diminuir conforme se distancia do alimentador. Em algumas partes do sistema são registradas quedas acentuadas inferiores a 0,92 p.u., ou seja, discrepantes do limite aceitável pelo PRODIST 8 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Os níveis de tensão estabelecidos pela norma para a tensão secundária averiguada variam de 117V (aproximadamente 0,92 p.u.) até 133 volts (aproximadamente 1.05 p.u.). Estes limites são estipulados para garantir a qualidade no fornecimento de eletricidade do consumidor, para que não ocorra o mal funcionamento de equipamentos (efeito de subtensão), bem como a queima dos mesmos (efeito de sobretensão).

Após a inserção dos geradores pelos métodos é esperado que os níveis de tensão do sistema aumentem devido a injeção de potência ativa nas barras, onde a alocação dos geradores pode modificar o cenário como representado na imagem a seguir. Na Figura 5 é apresentado o perfil de tensão após a inserção dos geradores prevista pelo primeiro método.

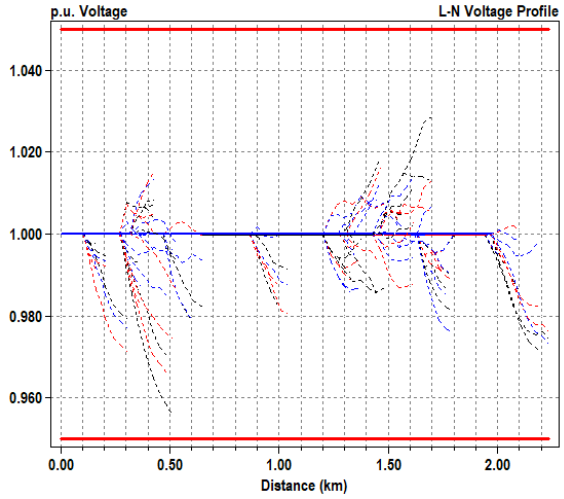


Figura 5. Perfil de tensão das barras após a inserção dos geradores pelo Caso I.

Neste primeiro caso, após a inclusão dos 100 geradores distribuídos da forma totalmente aleatória, foi facultado ao sistema de distribuição uma melhora considerável nos seus perfis de tensão, com uma pequena elevação em alguns pontos específicos do sistema, todavia sem extrapolar os índices de qualidade preconizados pela normativa.

Já para o segundo método de alocação, observado no gráfico apresentado na Figura 6, a inserção dos geradores fotovoltaicos ocorre de forma pseudoaleatória, com diferentes índices de ocorrência de escolha das barras.

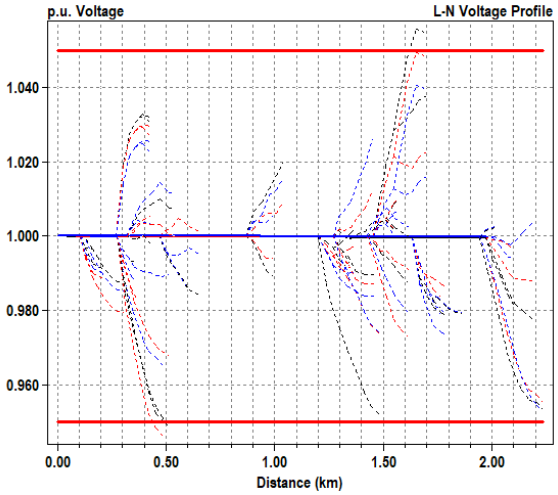


Figura 6. Perfil de tensão das barras após a inserção dos geradores pelo Caso II.

Pode-se notar que este cenário resultou em diferenças entre tensões máximas e mínimas mais destoantes que em relação ao método anterior, devido ao fato da alocação dos geradores ocorrerem em sua maioria em locais que já havia a presença de sistemas de geração. Ainda, este método, para a inserção de 100 geradores no modelo, acarretou na elevação do perfil de tensão acima de 1.05 p.u., estando fora dos limites aceitáveis como prevê a legislação brasileira vigente de qualidade de energia.

Para o terceiro caso, onde há uma avaliação do coeficiente de variação entre as barras, a solução escolhida pelo algoritmo continha a solução com a melhor distribuição dos geradores ao longo do sistema. No gráfico apresentado na Figura 7, observa-se que para este método houve pouca elevação centralizada no perfil de tensão, sem extrapolação dos limites aceitáveis e uma boa melhora nas quedas pré-existentes.

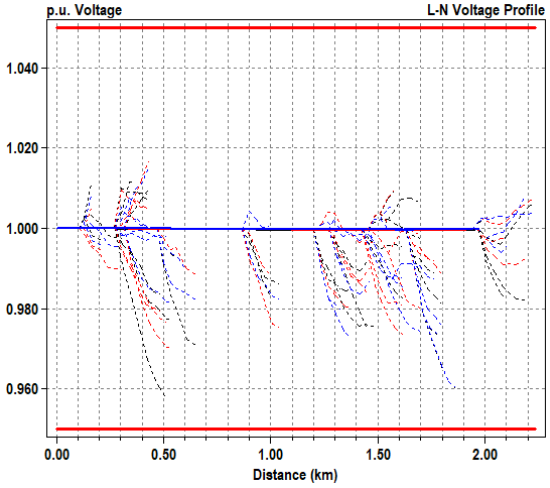


Figura 7. Perfil de tensão das barras após a inserção dos geradores pelo Caso III.

Para cada um dos casos analisados, os resultados dos sorteios realizados pelos algoritmos estão disponibilizados na seção nomeada de apêndice deste trabalho.

CONCLUSÃO

Constata-se, então, que há uma expectativa que nos próximos anos a entrada de geradores distribuídos, motivadas pela geração renovável, continue se expandindo no sistema elétrico, podendo provocar problemas nos índices de qualidade de energia. Para isso a modelagem e simulação, por meio do fluxo de potência, tem se mostrado essencial para a antecipação dos desafios a serem enfrentados.

Este estudo aborda a problemática de métodos para a alocação de geradores distribuídos na simulação de cenários futuros dos sistemas elétricos de distribuição. A metodologia baseada em uma análise comparativa de três métodos distintos, oportunizou a observação que a posição de inserção da mesma quantidade de geradores pode acarretar na variação do perfil de tensão do sistema elétrico.

O primeiro método, totalmente aleatório, é o mais volátil dos ponderados, pois não se pode ter nenhum controle sobre a solução originada por ele. Embora este tenha apresentado uma inserção que não apresentou problemas quanto aos índices de qualidade de energia.

O caso II, foi o método que teve a maior discrepância entre os níveis de tensão do sistema, devido a concentração de geradores em pontos específicos. O que pôde ser solucionado pela avaliação do coeficiente de variação agregado ao método para o terceiro caso. Neste último cenário, a inserção de geradores de forma mais esparsa contribuiu para a solução das quedas de tensão que o sistema apresentava antes da inserção, sem que o mesmo ultrapassasse os níveis de tensão aceitáveis.

Em resumo, este estudo reforça que independentemente do método adotado pelo pesquisador na execução da simulação, cada método disponível proporcionará uma resposta diferente, pois a previsão de instalação dos novos geradores no futuro é uma questão de difícil acerto.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT) pelo apoio financeiro – Processo 0378574/2021.

REFERÊNCIAS

ABDELSAMAD, S. F.; MORSI, W. G.; SIDHU, T. S. Probabilistic impact of transportation electrification on the loss-of-life of distribution transformers in the presence of rooftop solar photovoltaic. I**EEE Transactions on Sustainable Energy**, vol. 6, no. 4, pp. 1565-1573, out. 2015.

AFIFI, S. N.; DARWISH, M. K.; TAYLOR, G. A. impact of photovoltaic penetration on short circuit levels in distribution networks. **International Conference on Renewable Energies and Power Quality**, Brunel University, p. 1-4, abr. 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/292657348_IMPACT_OF_PHOTOVOLTAIC_PENETRATION_ON_SHORT_CIRCUIT_LEVELS_IN_DISTRIBUTION_NETWORKS. Acesso em: 17 out. 2021.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional): Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, 2021.** Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf. Acesso em: 12 de maio 2022.

HOLZBACH, M. **Análise da inserção de geração distribuída fotovoltaica em um modelo de sistema elétrico de distribuição real utilizando o software OpenDSS.** Orientadora: Adriana Souza Resende. 2022. 127 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade do Estado de Mato Grosso, Sinop, 2022.

LIMA, D. O. **Modelação de redes de distribuição de energia elétrica com carregamento não linear, incluindo elementos de regulação e compensação.** Orientador: Carlos Alberto Canesin. 2014. 187 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014.

PIOTROWSKI, J. L.; NETO, N. K.; ABAIDE, A. R., FARRET, F. A. Análise técnica da inserção de veículos elétricos e geração fotovoltaica no sistema de distribuição. *In*: Seminar on Power Eletronics and Control, **Anais** […]. Santa Maria: UFSM, 2021. p. 2-4. DOI: https://doi.org/10.53316/sepoc2021.044.

SCARPETTA, A. **Avaliação da viabilidade econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente da biodigestão de dejetos suínos.** Orientador: Ronaldo Hoffmann. 2014. 32 f. Monografia (Especialização em Eficiência Energética) – Departamento de Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos, Universidade Federal de Santa Maria, Quaraí, 2014.

UNITED NATIONS. **Report of the Conference of the Parties on its twenty-first session, held in Paris from 30 November to 13 December 2015.** Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/docs/

2015/cop21/eng/10a01.pdf. Acesso em: 30 mar. 2022.

UNITED NATIONS. **Report of the Conference of the Parties on its twenty-sixth session, held in Glasgow from 31 October to 13 November 2021.** Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cp2021_01_adv%20..pdf. Acesso em: 30 mar. 2022.

APÊNDICE

Tabela 1. Barras sorteadas pelos algoritmos construídos para os cenários analisados.

Barra sorteada	Caso I	Caso II	Caso III
1	088	168	075
2	139	037	166
3	053	087	059
4	110	100	006
5	010	093	157
6	046	169	007
7	165	079	168
8	133	141	144
9	010	105	067
10	134	073	010
11	140	135	118
12	174	169	097
13	086	082	090
14	016	088	029
15	127	028	082
16	086	110	137
17	046	133	158
18	038	117	020
19	054	156	074
20	080	110	163
21	090	029	028
22	112	132	012
23	144	134	125
24	093	169	047
25	164	139	127
26	039	087	045
27	050	108	090
28	081	066	027
29	130	143	085
30	102	004	028
31	037	029	032
32	019	164	113
33	077	112	055
34	041	059	159
35	167	044	070
36	160	076	147
37	174	054	124
38	024	086	013
39	122	133	007
40	067	158	003
41	026	118	110
42	125	050	122
43	155	050	061
44	008	063	014
45	096	159	147
46	025	048	010
47	023	025	096
48	004	175	029
49	114	038	152
50	067	168	003
51	043	074	16
52	014	156	003
53	175	124	124
54	010	150	153
55	125	035	127
56	137	123	042
57	156	101	119
58	152	052	018
59	072	046	095
60	132	144	134
61	083	092	058
62	132	099	140
63	059	151	126
64	077	125	083
65	167	103	129
66	160	113	021
67	035	141	147
68	013	152	077
69	100	153	025
70	041	114	147
71	083	154	085
72	065	082	073
73	059	116	058
74	005	078	091
75	093	078	021
76	034	094	004
77	075	006	003
78	081	151	036
79	080	031	018
80	107	078	103
81	053	044	016
82	075	035	013
83	099	086	041
84	094	168	030
85	066	166	121
86	135	110	036
87	053	008	006
88	059	028	104
89	089	106	143
90	096	134	149
91	079	097	150
92	114	024	040
93	089	174	017
94	162	151	140
95	085	121	026
96	141	166	116
97	006	127	168
98	134	080	164
99	011	136	095
100	027	047	063