



ALGORITMO GENÉTICO APLICADO AO PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

M. F. Silva^{*1}, G. C. Guimarães¹, F. A. M. Moura², T. L. Oliveira¹, L. R. C. Silva¹, J. O. Rezende¹

¹FEELT – Universidade Federal de Uberlândia

²Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade Federal do triângulo Mineiro

Resumo – O fluxo de potência ótimo pode ser caracterizado como um refinamento dos estudos relacionados ao fluxo de carga, tendo como a finalidade a otimização de um ou mais parâmetros. Deste modo, o objetivo deste trabalho é apresentar o desenvolvimento de uma ferramenta computacional baseada em algoritmo genético para o planejamento e despacho ótimo de fontes de potência ativa, considerando o custo da geração para os sistemas testes formados por fontes térmica, hidrelétrica e a composição das duas. O algoritmo genético implementado para a otimização do problema permite inserir restrições e almeja encontrar o menor custo de geração de potência ativa. O método utilizado para o cálculo do fluxo de carga foi o de Newton-Raphson. Foi utilizado o sistema teste IEEE-30 barras para averiguar a correta operação do algoritmo, o qual apresentou bons resultados de otimização.

Palavras-Chave – Algoritmo genético, Fluxo de potência ótimo, Planejamento da operação.

GENETIC ALGORITHM APPLIED TO THE PROBLEM OF THE OPTIMAL POWER FLOW IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS

Abstract - The optimal power flow can be characterized as a refinement of the studies related to the load flow, having as purpose the optimization of one or more parameters. Thus, the objective of this work is showing the development of a computational tool based on genetic algorithms for the planning and optimum dispatch from different sources of active power, considering the cost of generation to the test systems formed by thermal sources, hydroelectric and a composed of the two. The genetic algorithm implemented to the optimization of the problem, allows insert restriction and seeks to find the lower cost of the active power generation. The method used to calculate the load flow was the Newton-Raphson. It was used the IEEE 30-bus test system to verify the correct operation of the algorithm, which presented good optimization results.

Keywords – Genetic algorithm, Optimal power Flow, Operation planning.

NOMENCLATURA

AE	Algoritmo Evolutivo
AG	Algoritmo Genético
FPO	Fluxo de Potência Ótimo.
SEP	Sistemas Elétricos de Potência

I. INTRODUÇÃO

A eletricidade possui influência direta na qualidade de vida das pessoas e na economia global, sendo um dos elementos primordiais do desenvolvimento econômico e tecnológico. Logo, ferramentas e estudos que venham agregar na melhoria do planejamento da operação se fazem cada vez mais necessários devendo atender simultaneamente a demanda, dentro dos limites relacionados a qualidade da energia, visando uma geração cujo o custo seja o menor possível.

O Fluxo de Potência Ótimo (FPO) tem sido o método mais utilizado para atender a esses objetivos, desde sua introdução por Carpentier em 1962 [1]. Os problemas de FPO inicialmente consideravam modelos matemáticos monobjetivo e eram resolvidos por meios de métodos de otimização clássicos, como por exemplo, o método do gradiente reduzido generalizado [2], método de segunda ordem de Newton [3], métodos de pontos interiores [4], programação linear sucessiva [5], entre outros. Embora, o FPO já tenha sido amplamente abordado na literatura, os métodos de solução existentes muitas vezes se mostram inadequados para o aumento da complexidade dos problemas modernos do fluxo de potência [6].

Sendo assim, outras metodologias que fazem uso de técnicas de Inteligência Artificial (IA) tem sido empregadas, apresentando resultados satisfatórios [7-10]. O presente artigo faz o uso de uma dessas técnicas e encontra-se voltado para a melhoria do despacho econômico ótimo de potência, empregando um Algoritmo Genético (AG) que visa o menor custo da geração. Os resultados e a análise das simulações obtidas para o algoritmo implementado são apresentados para o sistema teste IEEE-30 barras. Assim sendo, na seção II é

* mateuseng@ufu.br

apresentado o problema de fluxo de potência ótimo em sistemas elétricos de potência, na seção III aborda-se de maneira sucinta a respeito da técnica evolutiva utilizada, na seção IV ilustra-se o fluxograma dos algoritmos empregados para o cálculo do fluxo de potência e método de otimização, na seção V expõe-se os resultados obtidos no que tange ao custo da geração com a aplicação do AG, por fim na seção VI apresenta-se a conclusão do trabalho realizado.

II. FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO

O objetivo do FPO é encontrar as condições ótimas de operação de um determinado Sistema Elétrico de Potência (SEP), contemplando funções objetivos como o custo total da geração, desvio de tensão dos barramentos, emissão de poluentes das unidades geradoras, número de ações de controle perante transitórios e regime permanente, entre outros [11]. Os resultados obtidos para a resolução do FPO, além de atenderem as condições de otimização, devem alcançar um estado de operação em que ocorra o equilíbrio entre as potências ativa e reativa, satisfazendo o fluxo de potência e ainda não violando os limites físicos do SEP [12].

Os estudos clássicos relacionados ao fluxo de potência se diferem dos de FPO no sentido de que, para esse, algumas variáveis devem ser previamente especificadas, como a magnitude das tensões e o valor das potências ativas pelas barras de geração, convencionalmente barras do tipo (PV) cujo os valores de potência ativa e a magnitude da tensão terminal são conhecidos. O FPO aborda algumas variáveis de controle, ou todas, como passíveis de ajuste para que se possa atender os critérios de otimização pretendidos.

O estudo e desenvolvimento de novos modelos e técnicas de soluções eficientes para o problema de FPO ainda se mostram relevantes, devido ao contínuo crescimento dos SEPs tanto em termos de dimensão quanto de complexidade. A desregulamentação e a descentralização dos mercados de energia, a inserção da geração de novas fontes renováveis ao sistema, entre outros, demonstram essa necessidade [13].

A formulação geral do FPO pode ser dada pelo seguinte conjunto de equações:

$$\text{Min } f(x, u) \quad (1)$$

s.a.

$$g(x, u) = 0 \quad (2)$$

$$h(x, u) \leq 0 \quad (3)$$

$$x^{\min} \leq x \leq x^{\max} \quad (4)$$

$$u^{\min} \leq u \leq u^{\max} \quad (5)$$

Onde:

- (1) Função objetivo de n variáveis na qual é considerada a otimização das variáveis de controle.
- (2) Conjunto de restrições de igualdade não lineares (equações estáticas de fluxo de potência).

- (3) Conjunto de restrições não lineares de desigualdade (restrições físicas e operacionais).
- (4) Vetor das variáveis dependentes.
- (5) Vetor das variáveis de controle.

O modelo de otimização apresentado de (1-5) é um problema de programação do tipo não linear inteiro misto e não convexo [13]. Maiores explicações a respeito dessas equações e a respeito do fluxo de potência ótimo podem ser encontradas em [11]. Algumas das restrições impostas pelo problema, são apresentadas a seguir.

A. Restrições da geração

As restrições impostas pela geração são apresentadas abaixo:

$$V_{Gi}^{\min} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi}^{\max} \quad (6)$$

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad (7)$$

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \quad (8)$$

Onde:

- i Índice da barra de referência.
- V_G Tensão da barra de geração.
- P_G Potência ativa gerada.
- Q_G Potência reativa gerada.

B. Restrições do fluxo de potência

As restrições relacionadas ao fluxo de potência são apresentadas abaixo:

$$g_1 = P_{Gi} - P_{Di} - P_i(V, \theta) = 0, \forall i \in K \quad (9)$$

$$g_2 = Q_{Gi} - Q_{Di} - Q_i(V, \theta) = 0, \forall i \in K \quad (10)$$

Onde:

- P_D Potência ativa demandada.
- Q_D Potência reativa demandada.
- $P(V, \theta)$ Potência ativa líquida injetada.
- $Q(V, \theta)$ Potência reativa líquida injetada.
- K Representa o conjunto total de barras do sistema.

III. ALGORITMO GENÉTICO

Algoritmos Evolutivos (AEs) utilizam de modelos computacionais dos processos naturais de evolução como uma ferramenta para a resolução de diferentes tipos de problemas. Apesar da ampla variedade de AEs que têm sido desenvolvidos, todos eles têm em comum o conceito de simulação da evolução das espécies para evolução dos indivíduos, por meio dos processos de seleção, mutação e reprodução, sendo que esses dependem da aptidão do indivíduo para o problema em questão [14]. Os mais populares AE são: Algoritmo Genético, Evolução Diferencial, Programação Genética e Sistemas Classificadores Evolutivos [15].

Os AGs são técnicas heurísticas de otimização global, se opondo a métodos tradicionais de otimização como o do gradiente que seguem a derivada de uma função para encontrar o máximo dela, ficando facilmente retidos em máximos locais [14]. A busca realizada pelos AGs é estocástica e iterativa não encontrando necessariamente a solução ótima para o problema, mas tendendo a ficar próximo dela. Os principais componentes do AG são apresentados a seguir.

A. Inicialização da população

No AG cada indivíduo da população representa uma possível solução para o problema. A inicialização da população usualmente é realizada de forma aleatória proporcionando uma maior diversidade da população e das soluções. Entretanto, o conhecimento a priori da distribuição das melhores soluções pode ser útil nesse processo, facilitando a eficiência computacional e a acurácia do AG [16]. A inicialização da população utilizada para o AG implementado, foi aleatória e a codificação adotada para os indivíduos se deu por parâmetros reais.

B. Função de avaliação

A função de avaliação, ou função de custo, é responsável por determinar a qualidade de um indivíduo em relação a solução do problema [14]. Ela fornece um valor numérico que reflete a qualidade dos parâmetros apresentados pelo indivíduo para o objetivo em questão. Para um problema de minimização as soluções mais aptas são as de menor custo e para as de maximização, as de maior. Esse custo, ou avaliação, será utilizado para a escolha dos pais da próxima geração.

C. Seleção dos pais

A seleção dos pais simula o mecanismo de seleção natural que atua sobre as espécies biológicas em que os pais mais aptos geram mais descendentes do que os menos aptos. Deve-se privilegiar nesse processo os indivíduos com melhor avaliação, ao mesmo tempo que é necessário o cuidado para que não ocorra a convergência genética da população, ocasionando na falta de diversidade e diminuindo o espaço de busca do conjunto solução. Pode-se destacar para esse processo os métodos de seleção: roleta, torneio, *ranking* e uniforme. Neste trabalho utilizou-se do método da roleta para a seleção dos pais da próxima geração.

D. Cruzamento

O operador cruzamento é responsável pela recombinação do material genético dos indivíduos previamente selecionados, com o objetivo de gerar descendentes mais aptos ao problema abordado. Sendo, um processo fundamental na manutenção das características dos indivíduos mais aptos da população [17]. O operador cruzamento utilizado pelo AG implementado foi o “*Radcliffe’s flat crossover*” [18].

E. Mutação

O operador mutação auxilia na variabilidade do AG. Nesse processo o indivíduo, possível solução, está sujeito a uma probabilidade de sofrer alterações em sua estrutura, sendo que uma probabilidade de mutação alta pode ocasionar na perda das características fundamentais da população [19]. A

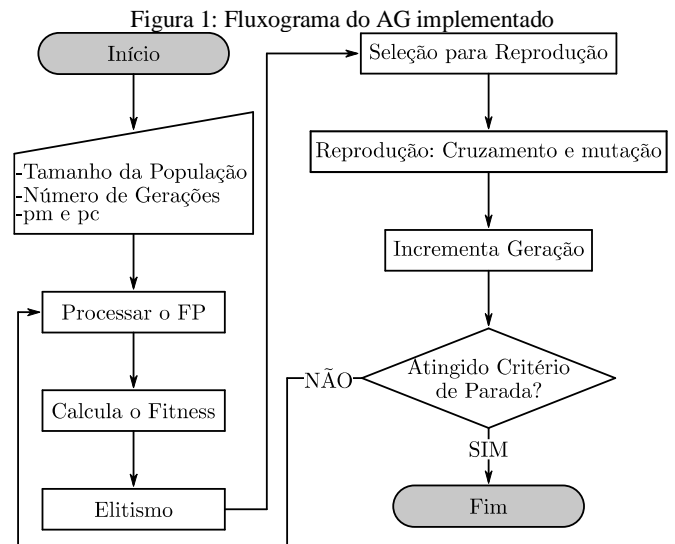
mutação utilizada, se baseia na geração de um novo valor dentro do intervalo do indivíduo selecionado.

F. Elitismo

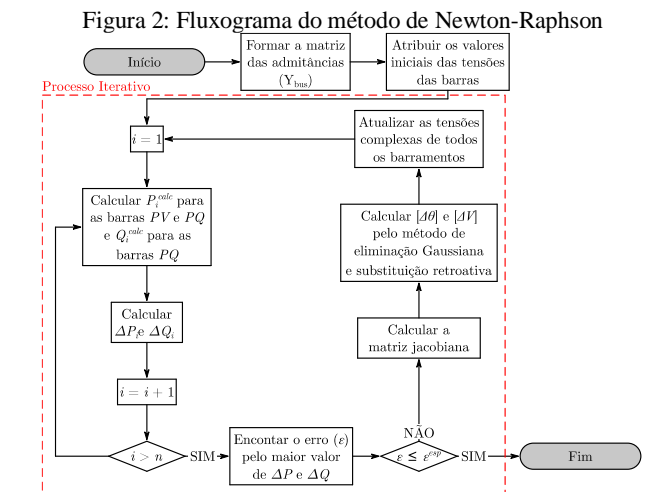
O operador elitismo garante um melhor desempenho do AG com o passar das gerações. O princípio desse operador é que os n melhores indivíduos de cada geração não devem ser perdidos na geração da próxima, garantindo que as suas características sejam preservadas [14]. Neste trabalho, esse operador é utilizado.

IV. ALGORITMO PROPOSTO

O AG desenvolvido segue o fluxograma apresentado pela Figura 1. Inicializada a população, definida a quantidade de gerações e as respectivas probabilidades de cruzamento e mutação, processa-se o fluxo de potência e segue-se as demais etapas já descritas do algoritmo, até que o critério de parada seja atingido, ou seja, até que o número de gerações estipulado seja alcançado.



O método de Newton-Raphson utilizado para o cálculo do fluxo de potência, segue o fluxograma da Figura 2. A cada nova geração processa-se novamente o FP, respeitando-se as restrições e calculando-se o novo *Fitness* dos indivíduos.



V. ESTUDO DE CASO

Para averiguar a correta operação do algoritmo de FPO desenvolvido, foi utilizado o sistema teste IEEE-30 barras [20]. Tal sistema possui uma carga total de 283,4 MW.

As barras de geração e os seus respectivos limites de potência ativa em p.u. adotados na base de 100 MVA são apresentados pela Tabela I.

Tabela I - Limites de potência ativa do sistema teste IEEE 30 barras

	Mín.	Máx.
P_{G1}	-	1,00
P_{G2}	0,20	0,80
P_{G5}	0,15	0,50
P_{G8}	0,10	0,35
P_{G11}	0,10	0,30
P_{G13}	0,12	0,40

As respectivas variáveis de controle adotadas para a solução do FPO são os valores das potências ativas das barras do tipo PV, sendo que as faixas de valores para essas variáveis são fornecidas pela Tabela I. Para todos os casos a barra 1 foi adotada como barra de referência para o fluxo de carga.

Os limites inferior e superior das probabilidades de cruzamento e mutação adotadas foram respectivamente: $pc_{min} = 0,1$; $pc_{max} = 0,9$; $pm_{min} = 0,01$; $pm_{max} = 0,5$. As restrições impostas pelo problema foram tratadas com o uso de penalidades. O critério de parada adotado para o AG implementado foi o número de gerações e a tolerância para o fluxo de carga de $\varepsilon = 10^{-5}$.

Os resultados obtidos são apresentados para os seguintes casos:

- O sistema elétrico teste possui apenas geração térmica.
- O sistema elétrico teste possui apenas geração hidrelétrica.
- O sistema elétrico teste é composto por gerações térmica e hidrelétrica.

O custo da geração pode ser representado pela função quadrática [11]:

$$f = \sum_{i \in K_G} a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i \text{ (\$/h)} \quad (11)$$

Onde:

K_G representa o conjunto total de barras de geração do sistema.

a_i (\$/h.MW²), b_i (\$/h.MW) e c_i (\$/h) os coeficientes de custo de cada gerador dependentes do tipo de geração.

Os valores dos coeficientes correspondentes ao sistema IEEE-30 barras adotados para o cálculo do custo da geração das fontes de energia térmica e hidrelétrica [13], são apresentadas pela Tabela II.

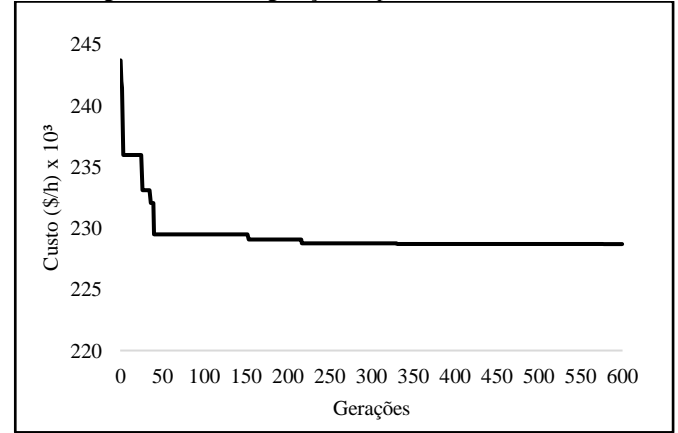
Tabela II: Coeficientes de custo

		G_1	G_2	G_5	G_8	G_{11}	G_{13}
Térmica	a	10	10	20	10	20	10
	b	200	150	180	100	180	150
	c	100	120	40	60	40	100
Hidrelétrica	a	0	0	0	0	0	0
	b	130	97,5	117	65	117	97,5
	c	156	117	140,4	78	140,4	117

A. O sistema elétrico teste possui apenas geração térmica.

A Figura 3 apresenta o custo da geração de potência ativa para a melhor solução encontrada em cada uma das gerações para o caso A.

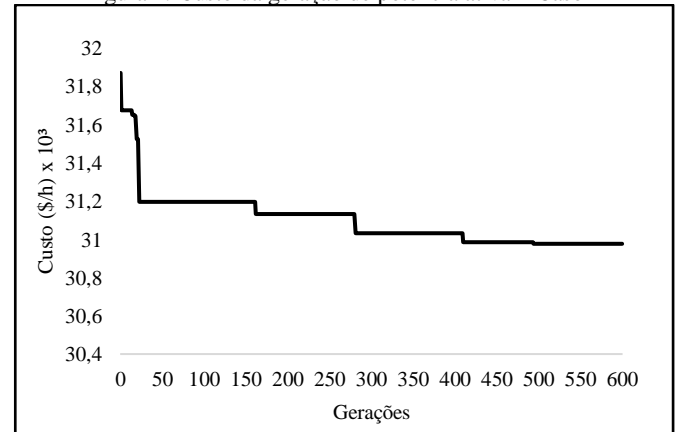
Figura 3: Custo da geração de potência ativa – Caso A



B. O sistema elétrico teste possui apenas geração hidrelétrica

A Figura 4 apresenta o custo da geração de potência ativa, considerando-se somente os coeficientes de custo relacionados as hidrelétricas.

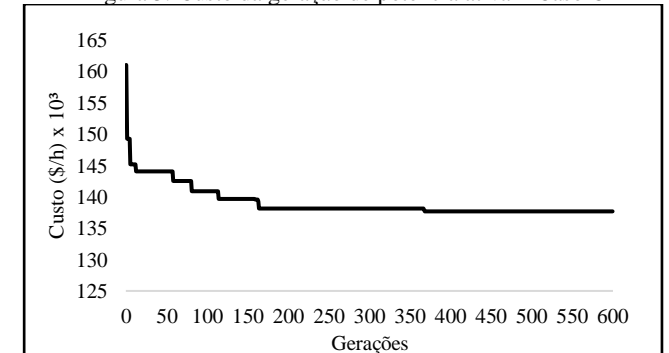
Figura 4: Custo da geração de potência ativa – Caso B



C. O sistema elétrico teste é composto por gerações térmica e hidrelétrica.

A Figura 5 apresenta o custo da geração de potência ativa considerando a barra de oscilação, G_1 , como fonte hidrelétrica e as demais como fonte térmica.

Figura 5: Custo da geração de potência ativa – Caso C



A Tabela III apresenta o resumo dos resultados obtidos pelo algoritmo proposto. As potências estão fornecidas em MW e o custo total da geração em (\$/h).

Tabela III – Resumo dos resultados obtidos pelo AG

	A	B	C
P_{G1}	71,7920300	58,5167800	99,6076300
P_{G2}	76,0898340	78,6715100	64,1169000
P_{G5}	37,4799580	50	28,9393800
P_{G8}	34,7021280	35	34,1338600
P_{G11}	28,5753980	25	25,6374600
P_{G13}	39,1495800	40	36,3603800
Custo x 10 ³	228,6973661	30,9764533	137,6508858
Geração	578	495	369

Pelas Figuras 3-5 e a Tabela IV, pode-se verificar a eficiência do algoritmo proposto levando em conta o despacho ótimo de potência ativa, dentro do problema de FPO. O AG desenvolvido foi capaz de encontrar soluções de boa qualidade para o problema em questão, respeitando-se as restrições do problema e minimizando de acordo com as variáveis de controle adotadas o custo da geração.

VI. CONCLUSÕES

O FPO é um problema complexo dentro da área de planejamento de operação de sistemas elétricos de potência, sendo de fundamental importância o estudo de técnicas e metodologias que contribuam para esse problema. Desta forma, este trabalho apresentou um algoritmo genético, incluídas restrições do sistema, aplicado ao despacho ótimo de potência ativa, dentro do problema de FPO.

Os resultados obtidos considerando-se três situações distintas de fontes de geração demonstram que o AG conseguiu encontrar soluções de qualidade, levando-se em conta a otimização das variáveis de controle, tendo como objetivo a minimização do custo total da geração e respeitando-se as restrições impostas pelo problema.

REFERÊNCIAS

- [1] CARPENTIER: Contribution to the economic dispatch problem. Bull. Soc. Fr. Electr. 8(3), 431–447
- [2] SUN, D.I.; ASHLEY, B.; BREWER, B.; HUGHES, B.A.; TINNEY, W.F. Optimal power flow by Newton approach. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Piscataway, v. 10, p. 2864-2880, 1984.
- [3] FRANK, S.; STEPONAVICE, I.; REBENNACK, S. Optimal power flow: a bibliographic survey I. Energy Systems, Heidelberg, v. 3, n. 3, p. 221-258, 2012.
- [4] GRANVILLE, S. Optimal reactive dispatch through interior point methods. IEEE Transactions on Power Systems, Piscataway, v. 9, n. 1, p. 136–146, Feb 1994. ISSN 0885-8950.
- [5] MANTOVANI, J. R. S; GARCIA, A. V. A Heuristic method for reactive power planning. IEEE Transactions on Power Systems, Piscataway, v. 11 n. 1, p. 68-74, 1996.
- [6] DOMMEL, H. W.; TINNEY, W.F. Optimal power flow solutions. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Piscataway, v. 10, p. 1866-1876, 1968.
- [7] ABIDO, M. A. Optimal power flow using particle swarm optimization. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, London, v. 24, n. 7, p. 563-571, 2002.
- [8] MIRANDA, V., Srinivasan, D. and Proença, L.M. (1998). Evolutionary computation in power systems – example 2: Genetic algorithms in hydrothermal operation planning, Electric Power & Energy Systems 20(2):93-97.
- [9] ZOUMAS, C., Bakirtzis, A., Theocharis, J. and Petridis, V. (2004). A genetic algorithm solution approach to the hydrothermal coordination problem, IEEE Transaction on Power Systems 19(2): 1356–1364.
- [10] A. G. Bakirtzis, P. N. Biskas, C. E. Zoumas and V. Petridis, "Optimal power flow by enhanced genetic algorithm," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 17, no. 2, pp. 229-236, May 2002.
- [11] ZHU, J.Z. (2009) Optimization of Power System Operation. IEEE Press Editorial Board, Hooken.
- [12] MIKILITA, Miguel Armino Saldanha. Um modelo de fluxo de potência ótimo para minimização do corte de carga. 2005. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- [13] ARAUJO, Elayne Xavier Souza. Fluxo de potência ótimo em sistemas elétricos de potência através de um algoritmo genético multiobjetivo. 2018. 164 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2018.
- [14] LINDEN, Ricardo. Algoritmos genéticos uma importante ferramenta da inteligência computacional. Rio de Janeiro: Brasport, 2006.
- [15] MIRANDA, V & Srinivasan, D & Proença, LM. (1998). Evolutionary computation in power systems. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 20. 89–98.
- [16] E. S. N. DEEPA, S. N. S. Introduction to Genetic Algorithms. Springer, 2008
- [17] MELANIE, M. An Introduction to Genetic Algorithms. The MIT Press, 1998.
- [18] RADCLIFFE, N. (1990). *Genetic Neural Networks on MIMD Computers*. PhD thesis, University of Edinburgh, UK.
- [19] NOGEUIRA, Heber Valdo. Algoritmo genético compacto com dominância para seleção de variáveis. 2017. 64 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência da Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.
- [20] COLLEGE OF ENGINEERING UNIVERSITY OF WASHINGTON. Power systems test case archive. Disponível em: <http://labs.ece.uw.edu/pstca/>.