



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

NAYANE CECÍLIA PEREIRA DE OLIVEIRA

**APLICABILIDADE DOS ALGORITMOS GENÉTICOS NA
ENGENHARIA CIVIL**

**JOÃO PESSOA/PB
2017**

NAYANE CECÍLIA PEREIRA DE OLIVEIRA

**APLICABILIDADE DOS ALGORITMOS GENÉTICOS NA
ENGENHARIA CIVIL**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado como pré-requisito para a
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil pela Universidade
Federal da Paraíba.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Jácome
Sarmiento

**JOÃO PESSOA/PB
2017**

FICHA CARTOLOGRÁFICA

O48a Oliveira, Nayane Cecília Pereira de

Aplicabilidade dos Algoritmos Genéticos na Engenharia Civil. /
Oliveira Nayane Cecília Pereira de. – João Pessoa, 2017.

54f. il.:

Orientador: Prof. Dr. Francisco Jácome Sarmiento.

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Civil) Campus I
- UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1.Algoritmo Genético. 2. Aplicação dos Algoritmos Genéticos. 3.
Vigas. 4. Estradas. Aplicabilidade dos Algoritmos Genéticos na
Engenharia Civil

BS/CT/UFPB

CDU: 2.ed. 624 (043)

FOLHA DE APROVAÇÃO

NAYANE CECÍLIA PEREIRA DE OLIVEIRA

APLICABILIDADE DOS ALGORITMOS GENÉTICOS NA ENGENHARIA CIVIL

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil perante a seguinte Comissão Julgadora:

Francisco Jácome Sarmento

APROVADA

Francisco Jácome Sarmento

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

Hidelbrando José Farkat Diogenes

APROVADA

Hidelbrando José Farkat Diogenes

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

Clovis Dias

APROVADA

Clovis Dias

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

Profª. Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga

Profª. Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga

Matrícula Siape: 1668619

Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

Dedico este trabalho de conclusão da graduação aos meus pais Hilton e Maria Rejane, padrasto Sergio Marcos, minha irmã Nadine, familiares, namorado Eudes Mendonça, professores e amigos que de muitas formas me incentivaram e ajudaram para que fosse possível a concretização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer, em primeiro lugar, a Deus, pela força e coragem que me deu durante toda esta longa caminhada.

Aos meus pais, padrasto e familiares, que com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida. Em especial a minha mãe Maria Rejane, pois seu cuidado e dedicação foi que deram, em alguns momentos, a esperança para seguir.

Ao meu namorado Eudes Mendonça, obrigado pelo carinho, a paciência e por sua capacidade de me trazer paz na correria de cada semestre.

Ao professor – orientador Francisco Jácome Sarmiento pela paciência na orientação e incentivo que tornaram possível a conclusão desta monografia.

A todos os professores do curso, que foram tão importantes na minha vida acadêmica e no desenvolvimento desta monografia.

Aos meus amigos, pelas alegrias, tristezas e dores compartilhadas. Com vocês, as pausas entre um parágrafo e outro de produção melhora tudo o que tenho produzido na vida.

A todos que, direta ou indiretamente, com boa intenção, colaboraram para a realização e finalização deste trabalho.

O sonho de se tornar um profissional da Engenharia Civil passa pelos caminhos da Geometria Analítica, pois as construções geométricas são abstraídas da natureza e aplicadas nas construções de casas, prédios, estradas, edificações em geral, já que segundo Galileu a matemática é o alfabeto na qual o Deus Altíssimo escreveu o mundo...”

(Professor Ms. Edrobe Soares F. de Andrade)

OLIVEIRA, Nayane Cecília Pereira de. **APLICABILIDADE DOS ALGORITMOS GENÉTICOS NA ENGENHARIA CIVIL. Monografia apresentada a** Universidade Federal da Paraíba. Curso de Graduação em Engenharia Civil. João Pessoa, 2017. P. 51.

RESUMO

Este trabalho visa demonstrar a aplicabilidade de Algoritmos Genéticos no campo da Engenharia Civil como mais uma ferramenta que utiliza técnicas computacionais para encontrar melhores soluções para otimização de estruturas, objetivando encontrar soluções que conduzam a um melhor aproveitamento dos recursos, menores custos, e alto desempenho, entre outros. Algoritmos Genéticos (AGs) são técnicas de busca e otimização baseadas no modelo Darwiniano da evolução dos seres vivos. Nas últimas décadas, inúmeras aplicações de AGs têm surgido nos campos das Engenharias e da Computação, mostrando a sua larga aplicabilidade. Neste trabalho são descritas algumas aplicações de AGs dentro da Engenharia Civil, particularmente enfocando a natureza dos problemas envolvidos. O papel de algoritmos genéticos como método de engenharia é discutido, bem como são examinadas algumas perspectivas futuras. Neste trabalho buscou-se apresentar as principais técnicas e parâmetros utilizados por diversos autores nesse tema, dando-se destaque para seu uso na otimização de rodovias e vigas. Os resultados são comparados com os obtidos por outros autores. Esses resultados demonstram que a metodologia implementada permite a obtenção de obras que satisfazem às condições inicialmente impostas com uma evidente redução de gastos, sendo o mais econômico possível.

PALAVRAS-CHAVE: Algoritmos Genéticos, Engenharia Civil, Otimização.

OLIVEIRA, Nayane Cecília Pereira de. **APPLICABILITY OF GENETIC ALGORITHMS IN CIVIL ENGINEERING**. Monograph presented at the Federal University of Paraíba. Undergraduate course in Civil Engineering. John Person, 2017. P. 51.

ABSTRACT

This work aims to demonstrate the applicability of Genetic Algorithms in the field of Civil Engineering as another tool that uses computational techniques to find better solutions for optimization of structures, aiming to find solutions that lead to a better use of resources, lower costs, and high performance, among others. Genetic Algorithms (GAs) are search and optimization techniques based on the Darwinian model of the evolution of living beings. In the last decades, numerous applications of GAs have arisen in the fields of Engineering and Computing, showing its wide applicability. In this work some applications of GAs within Civil Engineering are described, particularly focusing on the nature of the problems involved. The role of genetic algorithms as an engineering method is discussed, as well as some future perspectives are examined. In this paper, we present the main techniques and parameters used by several authors in this theme, highlighting their use in the optimization of highways and beams. The results are compared with those obtained by other authors. These results demonstrate that the implemented methodology allows obtaining works that satisfy the conditions initially imposed with an evident reduction of expenses, being the most economical possible.

KEY WORDS: Genetic Algorithms, Civil Engineering, Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 : Fluxogramas dos modelos AGS e AGH _____	18
Figura 2: Tipos de algoritmos de correções _____	19
Figura 3: Aplicação da reparação relativa à quantidade de acionamentos por bomba _____	19
Figura 4: Método Tradicional: Pontos de Interseção Horizontal (HIP) _____	23
Figura 5: Método Proposto: Pontos de Estação _____	24
Figura 6: Ilustração da área de estudo _____	24
Figura 7: Algoritmo Genético sem técnicas modificadoras _____	25
Figura 8: Algoritmo Genético com técnicas modificadoras _____	26
Figura 9: Algoritmo de Implementação dos AGs _____	27
Figura 10: Viga utilizada na aplicação dos Algoritmos Genéticos _____	30
Figura 11: Diagrama dos esforços cortantes _____	31
Figura 12: Diagrama dos momentos fletores _____	31
Figura 13: Determinação da tensão em um ponto da viga _____	32
Figura 14: Seção 1 analisada manualmente _____	33
Figura 15: Centro de Gravidade da seção 1 _____	34
Figura 16: Seção 2 analisada manualmente _____	35
Figura 17: Centro de gravidade da seção 2 _____	36
Figura 18: Seção Aleatória _____	39
Figura 19: Seção Aleatória _____	39
Figura 20: Seção Aleatória _____	40
Figura 21: Seção Aleatória _____	40
Figura 22: Seção Aleatória _____	41
Figura 23: Perfil de uma viga utilizada na indústria aeronáutica _____	41
Figura 24: Perfil de projeto de uma estrada _____	42
Figura 25 : Cotas do Perfil Longitudinal do traçado do Greide _____	44
Figura 26: Cotas de corte e de aterro _____	45

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA	11
1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	13
1.3 OBJETIVOS	13
1.3.1 OBJETIVO GERAL	13
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 OTMIZAÇÃO VIA ALGORITMOS GENÉTICOS	14
2.2 OTIMIZAÇÃO DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	16
2.3 DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE VIGAS RETANGULARES DE CONCRETO ARMADO	20
2.4 MODELAGEM CHUVA-VAZÃO UTILIZANDO REDES NEURAIS ARTIFICIAIS E ALGORITMOS GENÉTICOS	21
2.5 UMA ABORDAGEM DE ALGORÍTIMOS GENÉTICOS PARA O DESENVOLVIMENTO DO ALINHAMENTO RODOVIÁRIO	21
3. ALGORITMOS GENÉTICOS	27
4. EXEMPLOS DE APLICAÇÕES DOS ALGORITMOS GÊNÉTICOS	30
4.1 VIGAS	30
4.1.1 CÁLCULO DOS PARÂMETROS NECESSÁRIOS PARA A OTIMIZAÇÃO	32
4.1.1.1 SEÇÃO 1	33
4.1.1.2 SEÇÃO 2	35
4.1.2 OTIMIZAÇÃO EM SEÇÕES TRANSVERSAIS DE VIGAS COM O USO DOS ALGORÍTIMOS GENÉTICOS	37
4.1.3 O PROGRAMA	38
4.1.4 RESULTADOS E DISCURSÕES PARA A OTIMIZAÇÃO DE SEÇÕES DE VIGAS	38
4.2 ESTRADAS	42
4.2.1 OTIMIZAÇÃO DE GREIDE DE ESTRADAS COM O USO DE ALGORITMOS GENÉTICOS	43
4.2.2 RESULTADOS E DISCURSOES PARA OTIMIZAÇÃO DE TRAÇADO DE GREIDE DE ESTRADAS	43
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	Erro! Indicador não definido.
REFERÊNCIAS	48
ANEXO	52

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

O conceito de desenvolvimento baseado na sustentabilidade trouxe consigo a preocupação em encontrar soluções que conduzam a um melhor aproveitamento dos recursos, menores custos, e alto desempenho, entre outros. Muitas vezes, o fator experiência é suficiente na resolução destes problemas. No entanto, solucionar problemas mais complicados pode não ser tarefa fácil. Neste contexto, surge a otimização.

A otimização constitui-se em um mecanismo de análise de decisões complexas, que envolve seleção de valores para variáveis, objetivando quantificar performance e medir a qualidade das decisões. A intenção é encontrar a melhor solução, respeitando, se necessário, restrições de viabilidade imposta aos parâmetros do problema.

Devido à dificuldade em se descobrir todas as interações entre variáveis e entre variáveis e restrições, somente em poucas situações se consegue representar completamente um problema real. Desta forma, a formulação para um problema real depende de uma boa aproximação entre conhecimento teórico e experiência em modelamento, requeridos para capturar os elementos essenciais do problema. Um bom julgamento na interpretação dos resultados é indispensável para obter conclusões significativas. Satisfeitos esses quesitos, a otimização é considerada como ferramenta fundamental para análise de problemas reais.

A otimização estrutural por exemplo, é um processo numérico/matemático que proporciona uma melhor configuração da estrutura como uma composição ótima em desempenho e forma, por exemplo, uma estrutura com menor peso, menor flambagem local ou global, menor tensão, máxima rigidez (Silva, 2011). De acordo com Pizzirani (2003), a área de otimização estrutural está dividida em três categorias: otimização dimensional, otimização de forma e a otimização topológica. A otimização dimensional busca uma melhor distribuição das áreas de seção visando a minimização ou maximização da função objetivo. A otimização de forma pretende encontrar o domínio espacial ótimo do problema, este domínio é variável, pois o objetivo é encontrar a melhor forma da estrutura para atender uma determinada solicitação. Por sua vez, na otimização topológica a variável do projeto está associada a distribuição do material. Em geral, para a aplicação dos três tipos de otimização existem vários métodos, desde os mais antigos baseados em soluções analíticas, passando pelos métodos iterativos e os mais recentes métodos de otimização evolutivos como são os algoritmos genéticos.

O cientista Maxwell, no final do século XVIII, utilizou a otimização estrutural com o objetivo de diminuir o uso de material na construção de pontes que suportassem as necessidades de uso. Depois de vários estudos, o referido cientista sugeriu que a forma conceitual de uma estrutura ótima, que utilizasse menos material possível, seria constituída de elementos de treliça (SILVA, 2011). Depois, Maxwell decidiu aplicar essa teoria para o projeto de vários tipos de estruturas, visando utilizar o menor volume de material. Na época, esses estudos ficaram apenas no âmbito da teoria, sem aplicação prática. Bem mais tarde, com o método dos elementos finitos e o surgimento dos computadores é que problemas práticos começaram a ser estudados. Já na década dos 70, algoritmos de otimização topológica foram desenvolvidos e na década seguinte, com a ajuda de softwares, os resultados de Maxwell passaram a ser aplicados na Engenharia Civil.

Os algoritmos genéticos surgem como uma metaheurística e vêm sendo aplicados nos mais diversos problemas de otimização, como em projetos de estradas e rodovias. O projeto de uma rodovia é elaborado partindo de uma necessidade de ligar dois pontos de interesse, sejam eles interesses sociais, industriais, turísticos, ambientais, entre outros. Definindo-se os pontos a serem atendidos pela rodovia a ser projetada, serão efetuados os estudos que subsidiarão a elaboração do projeto, os estudos são: topográfico, traçado, geológico, geotécnico, hidrológico, ambiental e de viabilidade. O item 2.5 deste trabalho traz uma abordagem de algoritmos genéticos para o desenvolvimento do alinhamento rodoviário.

A metaheurística foi utilizada para implementar um algoritmo com o objetivo de minimizar o custo total da estrada, atendendo restrições técnicas dos alinhamentos horizontal e vertical. O custo total incluiu: construção, manutenção, utilização e fatores ambientais e sociais. O método desenvolvido é apropriado para a otimização do traçado geométrico de estradas, por atender as condições necessárias: considera todos os custos dominantes e sensíveis, respeitando as restrições técnicas; otimiza as atribuições horizontais e verticais de modo simultâneo.

Os projetistas de estradas convivem com inúmeras solicitações por parte de proprietários de projetos para apresentarem argumentos que justifiquem a escolha de áreas para exploração e determinação dos traçados durante a fase de estudos para projetos de infraestrutura de transporte.

Estrada é um meio de ligação entre localidades, sendo imprescindível para o desenvolvimento humano e são utilizadas como meio de transporte de pessoas e produtos; em muitas situações são as únicas formas de acesso a uma localidade.

1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

A escolha desse tema surgiu da necessidade de se encontrar soluções otimizadas, práticas e exequíveis para diversas áreas da engenharia civil. O algoritmo genético (AG) é um método populacional de pesquisa dirigida baseada em probabilidade. Assim como as técnicas heurísticas, os AGs têm alcançado grande popularidade, pelo fato de resolver problemas que são considerados complexos na aplicação de procedimentos matemáticos tradicionais. Atualmente os AGs são adotados frequentemente como métodos para simular a evolução natural em busca de soluções ótimas. Dessa forma são usados, com êxito, na solução de problemas de otimização combinatória, otimização de funções reais e, também, em mecanismos de aprendizado de máquina (Kuri e Galaviz, 2002).

1.3 OBJETIVOS

Para alcançar os objetivos propostos nesse trabalho foi preciso fazer uma ampla busca por informação do tema abordado e por ser os Algoritmos Genéticos uma técnica computacional, os objetivos propostos nesse trabalho, são:

1.3.1 OBJETIVO GERAL

- O presente trabalho tem como principal objetivo avaliar a aplicabilidade de Algoritmos Genéticos (AGs) em vários problemas de otimização encontrados na engenharia civil.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

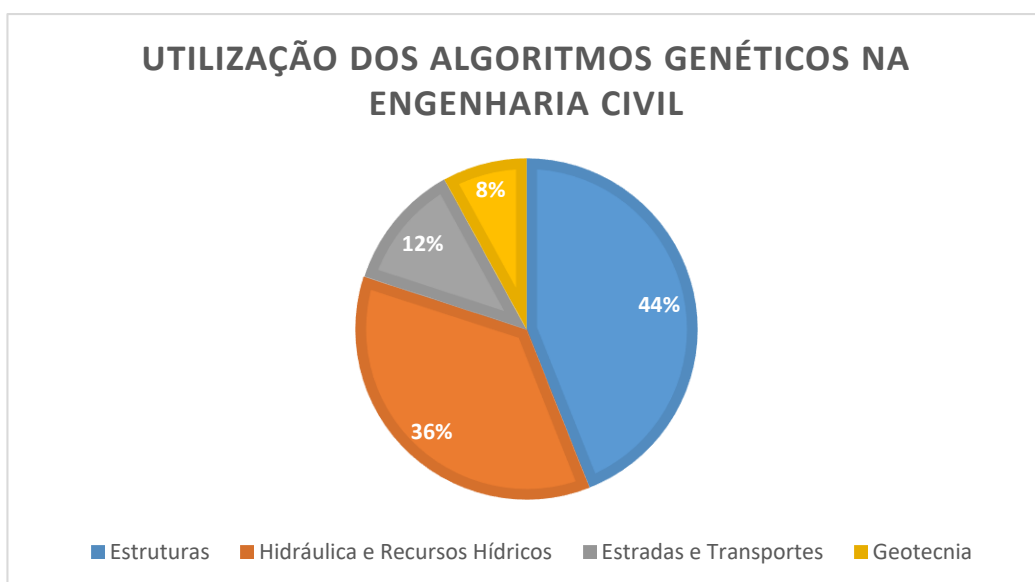
- Fazer uma aplicação para o dimensionamento de seções transversais de vigas;
- Fazer uma aplicação para a otimização do traçado do greide de uma estrada.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 OTIMIZAÇÃO VIA ALGORITMOS GENÉTICOS

Aqui apresenta-se a bibliografia utilizada para obter conhecimentos para o desenvolvimento desse trabalho. Através de uma ampla pesquisa foi feita uma análise do uso dos algoritmos genéticos em algumas das maiores áreas da engenharia civil, como pode ser visto na Figura 1.

Figura 1: Utilização dos algoritmos genéticos na engenharia civil



Fonte: Autor

Na Figura 1 é possível observar que a área de estruturas possui um grande número de aplicações de algoritmos genéticos, sendo em sua maioria problemas mais complexos, temas de teses de pós-graduação, que geralmente possuem em sua resolução soluções em regime não linear, sendo por esse motivo, os algoritmos genéticos um bom método de otimização para esses casos. A segunda área que possui uma grande abordagem dos algoritmos genéticos é a área da hidráulica e recursos hídricos, pois são áreas que possuem dificuldades relacionadas a variáveis dependentes de fatores naturais, tornando alguns problemas mais complexos e de difícil resolução pelos métodos tradicionais. Na área de estradas e transportes, juntamente com a de geotecnia foram encontrados o menor número de aplicações dos algoritmos genéticos, apesar de se caracterizarem como áreas que possuem um grande potencial para a aplicação da computação evolutiva exatamente pelas suas variáveis dependentes da natureza como no caso

dos problemas de recursos hídricos. Dessa forma, os estudos referentes ao uso dos algoritmos genéticos para as áreas de estradas e transportes e geotecnia ainda devem progredir já que a natureza dos seus problemas demonstra um grande potencial para o uso dos algoritmos genéticos em termos de otimização.

Nele aborda-se conceitos de aprendizagem, além de mencionar aplicações e múltiplos objetivos relacionados a aplicação dos algoritmos genéticos na engenharia civil. Por isso, este trabalho apresenta os principais fundamentos teóricos relacionados a Algoritmos Genéticos, tais como: sua definição e etapas de execução.

De acordo com o contexto deste trabalho, será estudado de forma mais detalhada, a técnica de Algoritmo Genético (AG) que, segundo BITTENCOURT, 2008, conforme citado por GOLDBERG, 1989 consiste em uma área de estudo da computação evolutiva, que utiliza como base os conceitos de comportamento adaptativo, e formalizados por Darwin, em sua Teoria da Evolução Natural. Vale ressaltar, que a computação evolutiva é um ramo da computação natural que aplica conceitos da natureza para soluções de problemas computacionais complexos, propondo uma forma alternativa para resolução desses problemas, sem o conhecimento prévio de como chegar a uma solução.

Segundo TICONA, 2003, p. 46, conforme citado por GOLDBERG 1989, o algoritmo genético é uma técnica que foi criada com o intuito de imitar determinados processos observados na evolução natural das espécies. Por isso, tal técnica fundamenta-se nas explicações oferecidas por Charles Darwin a respeito da seleção e evolução dos indivíduos na natureza, como também, em outras teorias de genética formuladas, posteriormente, por estudiosos tais como Gregor Mendel. Assim, o objetivo da técnica de AG consiste em solucionar problemas do mundo real de forma otimizada, sendo aplicável a diversas áreas.

Diante do exposto, é possível afirmar que problemas de otimização, na sua forma geral, têm como objetivo maximizar ou minimizar uma função definida sobre um certo domínio. Na teoria clássica de otimização o valor ótimo é obtido sobre um domínio infinito. Já no caso dos chamados problemas de otimização combinatória, o domínio é tipicamente finito, em que é possível listar os seus elementos e também testá-lo se pertence ou não a esse domínio. O teste de todos os elementos deste domínio se torna inviável, principalmente, quando o domínio é de tamanho de moderado a grande (MIYAZAWA, 2009). Problemas de programação linear e não-linear são problemas de otimização clássica que envolvem a maximização ou minimização de funções num domínio infinito, normalmente definido por um conjunto de restrições (CAIXETA FILHO et al., 2000; BREGALDA et al., 1988).

São inúmeros os aplicativos para a solução de problemas de programação linear e não-linear disponíveis para microcomputadores, entre eles, a ferramenta Solver do aplicativo Microsoft Excel® que, certamente, é o de mais fácil acesso devido à popularidade desta planilha eletrônica, possibilitando acesso à maioria dos leitores que usam microcomputadores (CAIXETA e FILHO et al., 2000). Para soluções de problemas de programação, têm-se os Algoritmos Genéticos que podem auxiliar na resolução, pois são métodos que podem lidar com qualquer problema de otimização, não estando atrelados, por exemplo, a problemas específicos de derivadas (LINDEN, 2008; MIRANDA, 2009; ALCALÁ et al, 2003).

Os Algoritmos Genéticos têm desenvolvimento e funcionamento vinculados à genética, em que todas as novas espécies são produzidas por meio de uma seleção natural em que o mais apto sobrevive gerando descendentes. O algoritmo genético realiza várias funções, entre elas: inicializar a população de cromossomos; avaliar cada cromossomo da população; criar novos cromossomos a partir da população atual e terminar, se o critério de fim for alcançado, se não, reinicializar. Analogicamente, a implementação dos Algoritmos Genéticos parte de uma população indivíduos gerados aleatoriamente, onde realiza-se a avaliação de cada um, com uma função definida e seleciona-se os mais aptos, promovendo os manipuladores ou operadores genéticos como cruzamento e mutação, originando novas gerações de indivíduos (BITTENCOURT, 1998; HOLLAND, 1975; SANTA CATARINA & BACH, 2003).

2.2 OTIMIZAÇÃO DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

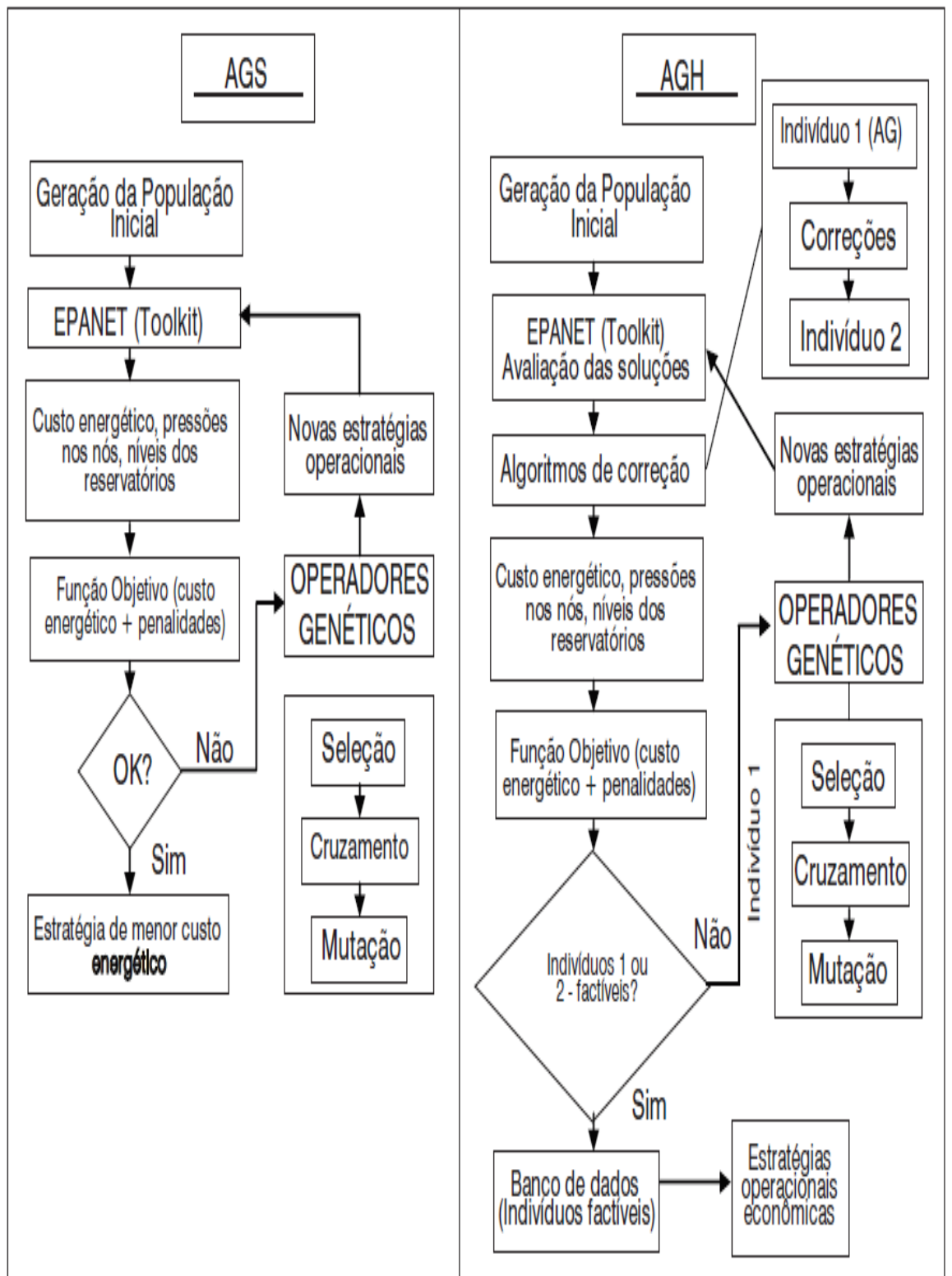
Atualmente, são realizados vários trabalhos, utilizando-se os avanços tecnológicos na área computacional e, conseqüentemente, o desenvolvimento de técnicas de otimização. Visando à redução do custo energético de operação de Sistema de Abastecimento de Água, pode-se citar trabalhos que foram publicados numa edição especial do Journal of Hydroinformatics (MARTINEZ, *et al*, 2007; JAMIESON, *et al*, 2007; SALOMONS *et al*, 2007; RAO; ALVARRUIZ, 2007; RAO; SALOMONS, 2007; ALVISI; FRANCHINI; MARINELLI, 2007) para reduzir o tempo computacional demandado na busca de soluções com custo energético reduzido. Esses autores utilizaram a técnica de Redes Neurais Artificiais (RNA) para replicar os resultados gerados pelo simulador hidráulico EPANET (ROSSMAN, 2000). Em seguida, conectaram o novo modelo de simulação hidráulica ao AG. Após análises feitas em um sistema hipotético e dois estudos de casos reais, os autores chegaram à conclusão que o modelo AG-RNA encontrou ótimas soluções em um período 20 vezes inferior quando

comparado ao AG-EPANET. Já Shamir e Salomons (2008), objetivando reduzir o tempo computacional, criaram um modelo reduzido de um estudo de caso real.

Os autores Costa (Doutor em Recursos Hídricos - UFC), Castro (PhD em Engenharia - UFC) e Ramos (PhD em Engenharia – professora do Instituto Superior Técnico de Lisboa), em seu artigo, intitulado “Utilização de um algoritmo genético híbrido para operação ótima de sistemas de abastecimento de água”, apresentaram um modelo de aplicação do algoritmo genético híbrido, que permite determinar as estratégias de operações com custos energéticos reduzidos. O modelo busca operação ótima de um sistema de abastecimento de água através a otimização operacional do sistema de bombas. O objetivo principal do modelo é encontrar o status de funcionamento de bombas que resulte no menor custo energético possível no horizonte operacional. Entretanto, para o cálculo desse custo, inúmeras variáveis intermediárias devem ser consideradas em cada passo de tempo, como, por exemplo, a variações dos consumos, custos tarifários e estados das bombas (COSTA, CASTRO E RAMOS, 2010).

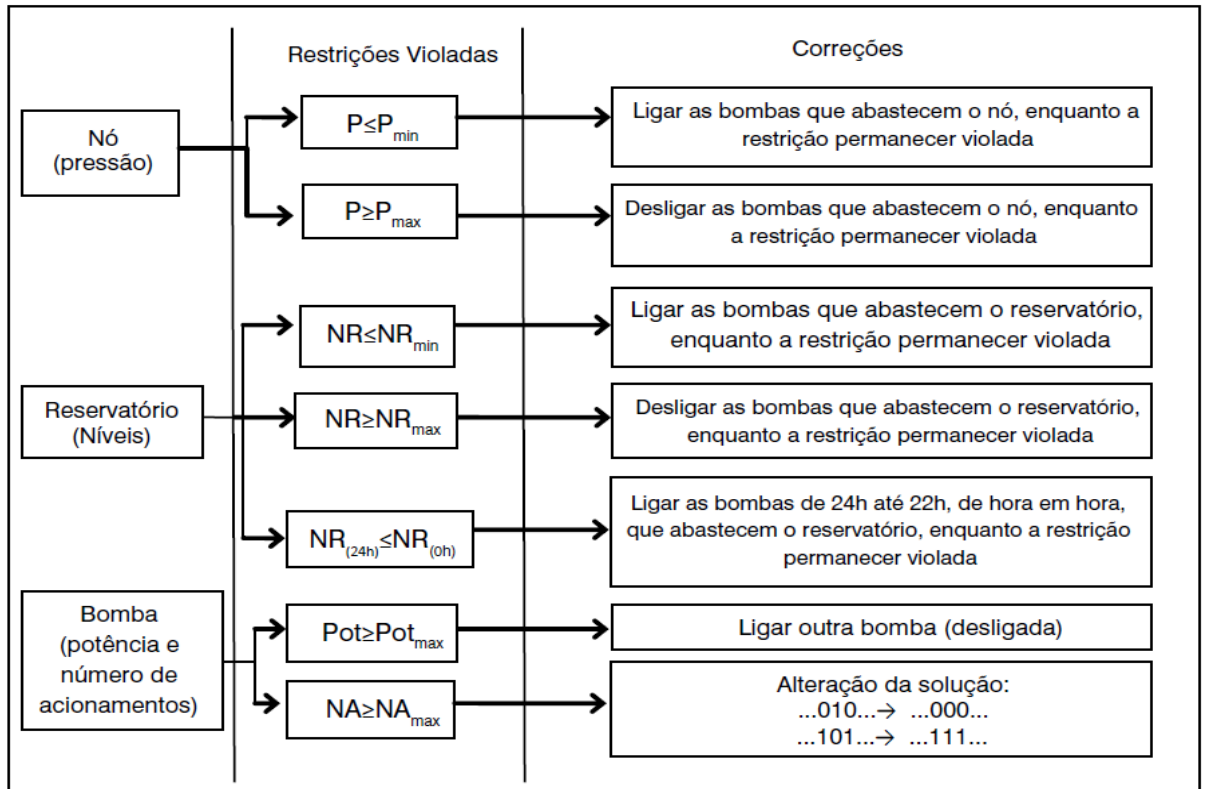
Analisou-se dois modelos de algoritmos genéticos: Algoritmo Genético Simples (AGS), e Algoritmo genético Híbrido (AGH). Basicamente, a diferença entre os modelos é que o AGS faz uso do método das penalidades, transformando as soluções inactíveis em soluções de aptidão reduzida. Os operadores genéticos apenas diversificam as soluções, porém não as tornam factíveis, enquanto que no AGH foram criados algoritmos de correções de soluções que, a cada hora, tentam “corrigir” as soluções geradas pelo AG, tornando-as hidraulicamente factíveis (COSTA, CASTRO E RAMOS, 2010). As diferenças nos modelos podem ser observadas na Figura 1. Os algoritmos de correção são compostos pelas restrições impostas no tipo de projeto, como pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 : Fluxogramas dos modelos AGS e AGH



Fonte: COSTA, CASTRO E RAMOS, 2010

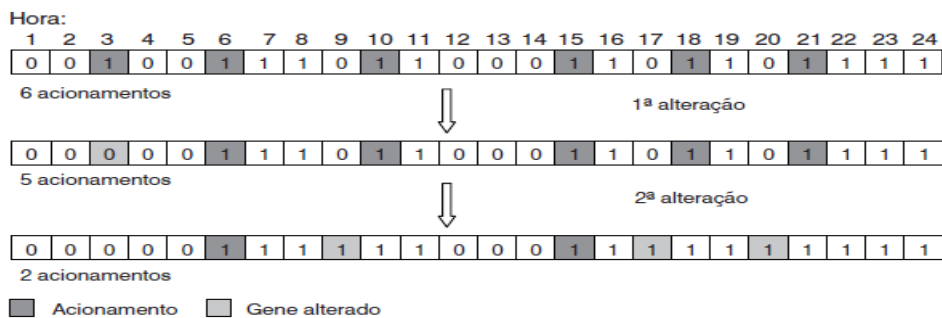
Figura 3: Tipos de algoritmos de correções



Fonte: COSTA, CASTRO E RAMOS, 2010

Dessa forma pode-se observar alguns resultados relativos a operação das bombas e levando-se em consideração que ocorre um elevado gasto energético a cada vez que a bomba é acionada aumentando o custo de operação da rede, verifica-se na Figura 3 onde percebe-se uma redução no número de acionamentos das bombas, o que gera economia de energia na operação do sistema de abastecimento de água.

Figura 4: Aplicação da reparação relativa à quantidade de acionamentos por bomba



Fonte: COSTA, CASTRO E RAMOS, 2010

A análise do modelo é feita em um estudo de caso real localizado na cidade de Ourém (Portugal). O modelo de AGS E AGH foi usado em conjunto com o programa EPANET, onde o AGH-EPANET reduz consideravelmente o tempo computacional em comparação ao AGS-EPANET e aos modelos utilizados na literatura especializada, obtendo êxito também em relação a otimização do sistema operacional de bombas.

2.3 DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE VIGAS RETANGULARES DE CONCRETO ARMADO

ALEXANDRE (2014), apresentou em sua dissertação de Mestrado, o Método dos Algoritmos Genéticos no dimensionamento ótimo de vigas retangulares de concreto armado submetidas a esforços de flexão e cisalhamento. Para ele, esse método de otimização é muito flexível, no que se refere às restrições e facilidade em lidar com variáveis discretas.

No trabalho citado acima, o autor realizou a otimização do pré-projeto de vigas de concreto armado utilizando algoritmos genéticos no dimensionamento ótimo de vigas retangulares de concreto armado submetidos a esforços de flexão e cisalhamento. O objetivo foi a minimização dos custos dos insumos e da mão de obra. Nas palavras de Alexandre:

Alguns estudos que aplicaram o Algoritmo Genético na otimização de estruturas de concreto armado e confrontaram os resultados com os obtidos utilizando métodos determinísticos, demonstraram um grande potencial da ferramenta. Tendo em vista as vantagens citadas e os bons resultados demonstrados na literatura técnica. (ALEXANDRE, 2014, p. 2).

Nessa citação, pode-se observar que a utilização dos algoritmos genéticos minimiza os custos tanto dos materiais como da mão de obra e o resultado fornece a altura da viga, resistência à compressão do concreto, ângulo de inclinação da biela e o detalhamento da armadura, onde se define a quantidade, bitola, posição e tamanho das barras de aço. No estudo desse autor verificou-se:

- Altura da viga (h);
- Resistência à compressão do concreto (f_{ck});
- Ângulo de inclinação da biela (Θ);
- Detalhamento da armadura:
 - ✓ Bitola da armadura positiva (Φ_{pos});
 - ✓ Bitola da armadura negativa (Φ_{neg});

✓ Bitola da armadura transversal (Φ_{est}).

1) Custos: valores de concreto, área de forma, peso do aço e metro de vara de aço.

2) Análise estrutural: esforços internos.

Foi feita a codificação e decodificação das variáveis (em codificação binária e código Gray), e foi utilizada como restrições de projeto o atendimento ao ELU (estado limite último), onde são verificados o momento resistente, o cortante e a altura da linha neutra, e ao ELS (estado limite de serviço), analisando as fissuras e deformações nos elementos constituintes da viga.

2.4 MODELAGEM CHUVA-VAZÃO UTILIZANDO REDES NEURAS ARTIFICIAIS E ALGORITMOS GENÉTICOS

SCHEID (2015) apresenta uma metodologia para modelagem da relação de transformação chuva-vazão de uma bacia hidrográfica utilizando redes neurais artificiais (RNA) acopladas a um algoritmo genético (AG desenvolvido na bacia hidrográfica do rio Piquiri, localizada no estado do Paraná, Brasil).

Os resultados dessa modelagem são comparados a um modelo autorregressivo de média móvel e demonstram a capacidade das redes neurais artificiais juntamente com algoritmos genéticos de explicar um fenômeno não-linear como o processo de transformação chuva-vazão. Nele, o autor apresentou uma comparação entre um modelo de RNA e um de RNA em conjunto com Algoritmos Genéticos. Os modelos usam como dados de entrada de dados vazão e precipitação obtidos de cinco estações pluviométricas e uma estação fluviométrica. A avaliação de desempenho foi verificada pelo índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (R^2) e RMSE (root mean square error). Os resultados obtidos com essa modelagem, foi uma maior generalização dos dados e maior rapidez de convergência nos modelos que em foram associados os Algoritmos Genéticos ao RNA em relação aos modelos que usaram apenas RNA.

2.5 UMA ABORDAGEM DE ALGORÍTIMOS GENÉTICOS PARA O DESENVOLVIMENTO DO ALINHAMENTO RODOVIÁRIO

BOTAN, MAWDESLEY & STACE (2010), aplicou, em seu trabalho, intitulado “Uma abordagem de algoritmo genético para o desenvolvimento do alinhamento rodoviário”, uma nova técnica de otimização baseada em algoritmos genéticos (GA). A técnica é baseada em pontos de estação para configurar alinhamento horizontal em vez de considerar os princípios

convencionais de concepção que utilizam pontos de interseção horizontal (HIP), tangentes e curvas. Para eles, a aplicação desta técnica se justifica pelo desenvolvimento de computadores, software e instrumentos de campo (por exemplo, estação total). A solução resultante, por eles encontrada, é promissora e sugere que outras formulações devem ser investigadas.

São vários os parâmetros envolvidos no processo de desenvolvimento do alinhamento rodoviário, entre eles a geração econômica e a provisão de acesso onde a rodovia é construída. Os custos de construção e manutenção são outros fatores que precisam ser considerados.

Não se pode esquecer o impacto ambiental da rodovia. Tudo isso deve ser pensado em conjunto. No entanto, o problema de desenvolver e selecionar um ótimo alinhamento é, portanto, muito complexo, mas muito importante. Otimização do alinhamento da rodovia objetiva conectar dois pontos terminais com o menor custo possível sujeito às restrições de projeto. Os componentes de custo mais comuns que podem ser considerados são construção, manutenção, localização, terraplanagem, ambientais, sociais e custos de usuários.

Em projetos convencionais de rodovias, os engenheiros rodoviários e os planejadores selecionam vários candidatos como soluções alternativas para avaliar sua adequação para o ambiente da região até chegar com o mais adequado (Wright e Ashford, 1998). Esse processo começa por corrigir vários pontos de interseção horizontal (HIP). O número de HIPs pode depender do comprimento do rodovia e topografia. O número de HIPs aumenta de acordo com a complexidade do meio ambiente.

Os sucessivos HIPs são então conectados por linhas, formando assim uma linha linear trajetória. Essas linhas são chamadas de tangentes e as deflexões em direção entre tangentes sucessivas nos HIPs são chamados de ângulos de deflexão. As curvas são instaladas em cada local HIP para formar o alinhamento horizontal proposto. Esse alinhamento então passa por um processo de avaliação para saber se é ou não adequado ao meio ambiente. A avaliação pode assumir a forma de consideração de custos, danos ao meio ambiente e problemas socioeconômicos sujeitos a várias restrições de projeto e requisitos operacionais que impuseram o alinhamento.

Este processo, através de numerosas iterações, é repetido e deve continuar até encontrar o mais adequado. A seleção da alternativa final é realizada concentrando-se nos elementos de design detalhados. HIPs, ângulos de deflexão, tangentes e raio das curvas estão entre os elementos de design da estrada.

A maioria desses elementos de projeto é limitada pelos limites padrão descritos por documentos como o Manual de Design para Estradas e Pontes (DMRB, 1992-2008) e padrões de design (AASHTO, 1994).

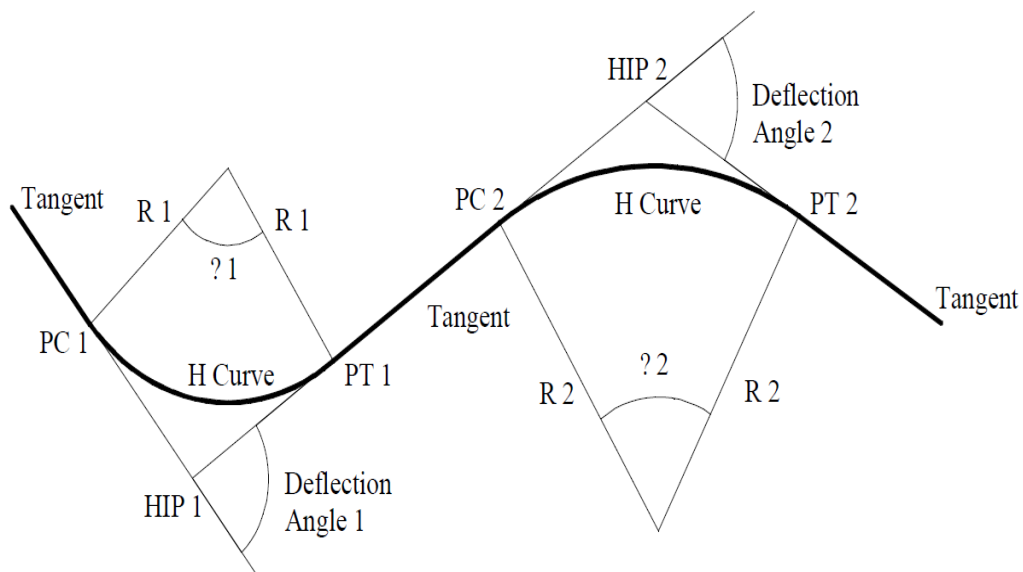
Os pesquisadores tentaram acelerar o processo de planejamento e design do alinhamento rodoviário para encontrar melhores soluções. Cálculo de variações por Shaw e Howard (1982), análise numérica por Chew et al (1989), e os algoritmos genéticos de Jong (1998) e Tat e Tao (2003) são alguns das técnicas que foram usadas. Todas estas têm suas vantagens e desvantagens e todos são baseados em os princípios de design convencional do projeto de alinhamento de rodovias.

Esta nova técnica de otimização com algoritmos genéticos (GA) é baseada em pontos de estação para configurar alinhamento horizontal em vez de considerar os princípios convencionais de concepção que utilizam pontos de interseção horizontal (HIP), tangentes e curvas. Espera-se que isso reduza o número de elementos de design de alinhamento rodoviário necessários e, conseqüentemente, reduzir as restrições impostas ao planejamento e ao design do alinhamento.

Otimização: conectar dois pontos terminais com o menor custo possível e sujeito às restrições de projetos.

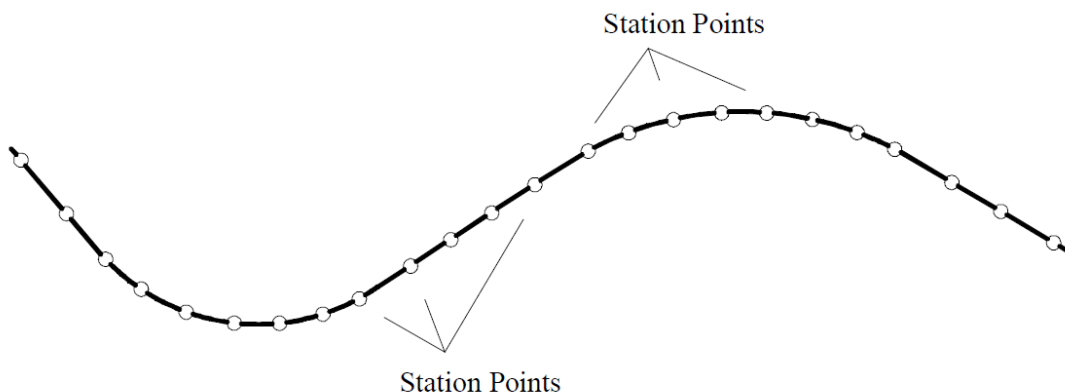
Pontos de estação ao longo da linha central de alinhamento são usadas para definir a configuração de alinhamento. Na Figura 4 e 5, é possível observar os dois métodos.

Figura 5: Método Tradicional: Pontos de Interseção Horizontal (HIP)



Fonte: BOTAN, MAWDESLEY & STACE (2010)

Figura 6: Método Proposto: Pontos de Estação

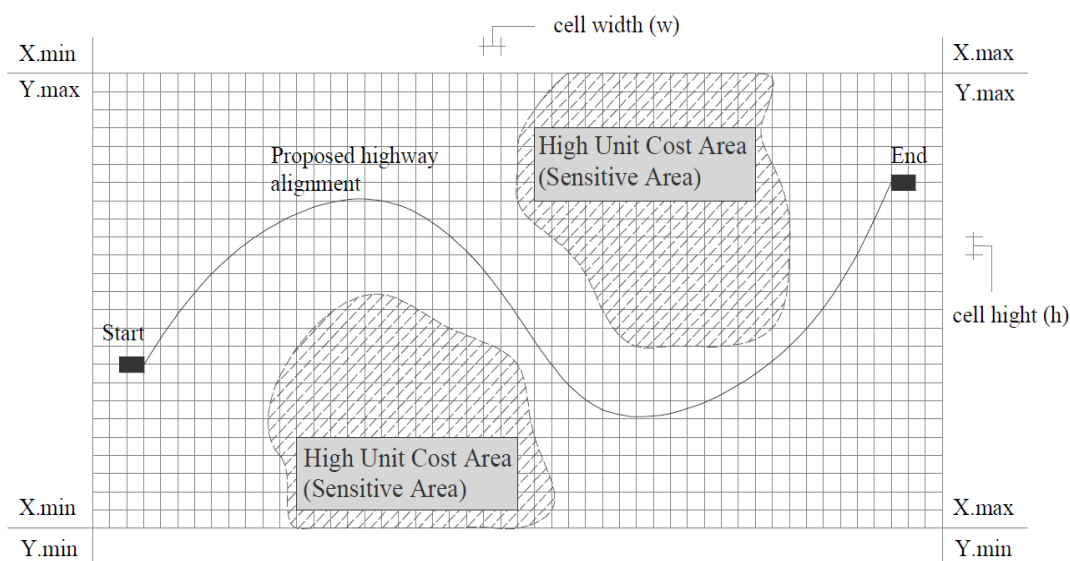


Fonte: BOTAN, MAWDESLEY & STACE (2010)

O modelo foi formulado dividindo a área de estudo em células de grades retangulares, com tamanhos definidos pelo usuário de acordo com as suas necessidades e com o nível de precisão desejado. Quanto menor o tamanho da grade, mais preciso é a representação e melhor será a solução.

Uma célula = custo unitário {representa custos com movimentos de terra}.

Figura 7: Ilustração da área de estudo



Fonte: BOTAN, MAWDESLEY & STACE (2010)

1. Custos considerados:

✓ Custo do comprimento

✓ Custo de localização (custos de aquisição de terrenos)

✓ Custo do usuário (referente ao desgaste dos veículos)

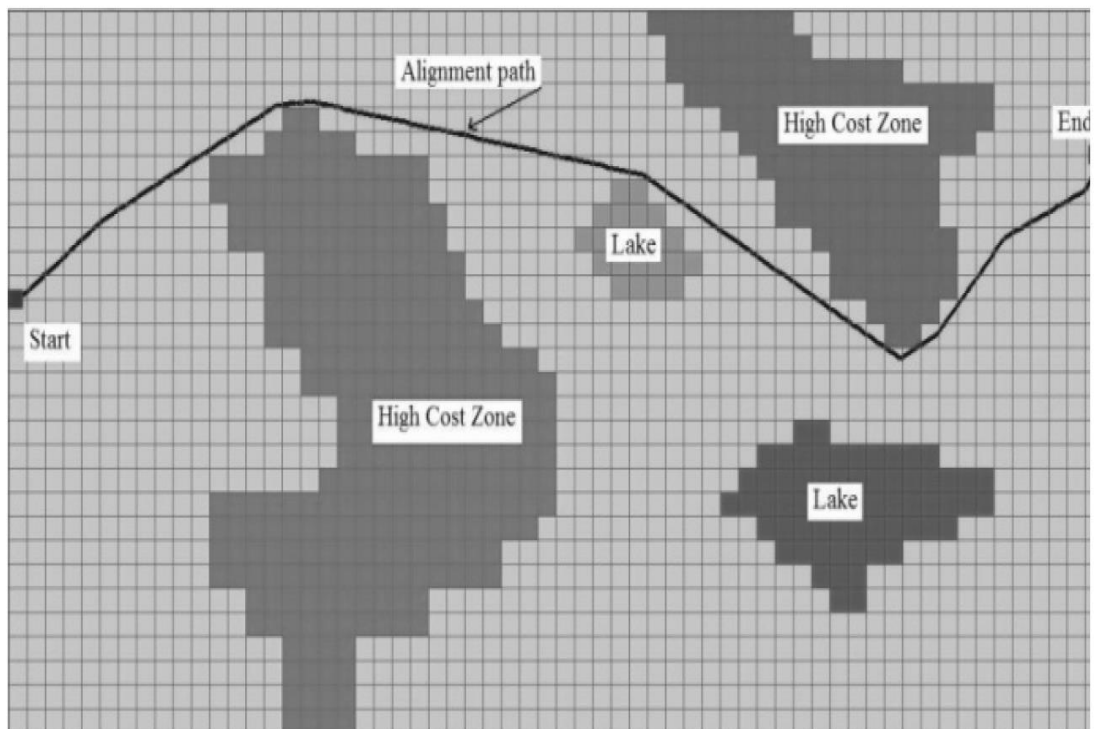
✓ Custo incorrido pelo usuário para viajar ao longo da estrada.

2. Objetivo: minimizar a combinação linear dos três custos considerados aplicados com determinados fatores de ponderação = função fitness.

3. Modelo: as variáveis de decisão do alinhamento são coordenadas X e Y dos fatores da estação.

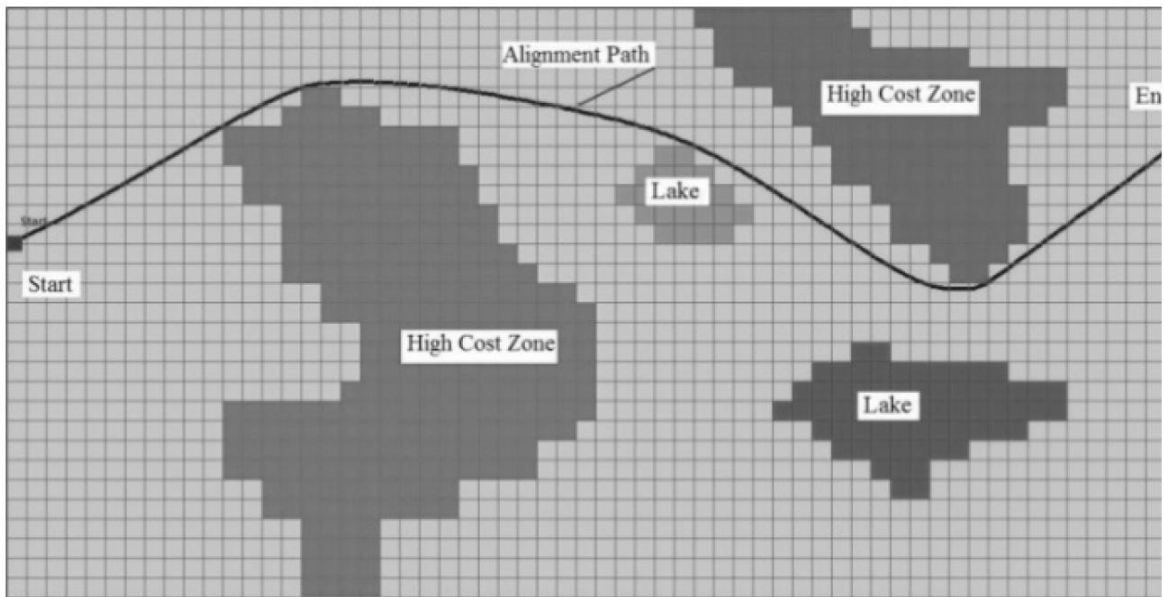
Vários cenários foram testados, observando-se vantagens como a geração de um menor comprimento de alinhamento e um maior alinhamento possível. Entretanto, foram testadas técnicas modificadoras que se baseiam no fato de que pontos de estação sucessivas devem ser acompanhadas por uma direta possível. Em algumas circunstâncias esse algoritmo (com a utilização de técnicas modificadoras) produziu alinhamentos aparentemente mais suáveis. Veja-se na Figura 7 e 8.

Figura 8: Algoritmo Genético sem técnicas modificadoras



Fonte: BOTAN, MAWDESLEY & STACE (2010)

Figura 9: Algoritmo Genético com técnicas modificadoras



Fonte: BOTAN, MAWDESLEY & STACE (2010)

Esses pesquisadores apresentaram método de otimização de alinhamento bidimensional de otimização de alinhamento rodoviário baseado em algoritmo genético. Foi introduzida uma nova técnica para realizar a configuração de alinhamento. Os resultados indicam que o método mantém promessas. No entanto, os resultados mostram que um desenvolvimento adicional é necessário para gerar alinhamentos mais realistas. Operadores de GA mais específicos e outras técnicas de modificação serão investigados.

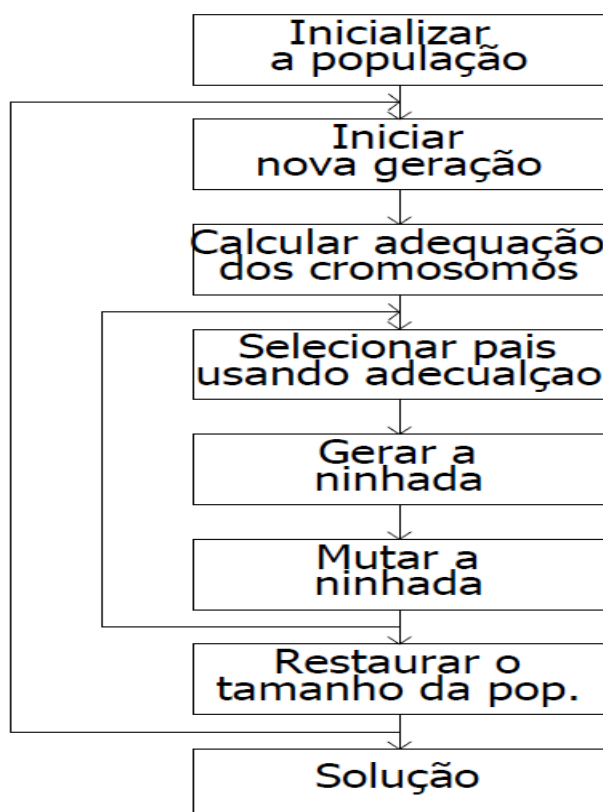
Os artigos citados acima, diferencia-se nos seguintes aspectos: Costa, Castro e Ramos (2010), apresentaram um modelo de aplicação do algoritmo genético híbrido, que permite determinar as estratégias de operações com custos energéticos reduzidos; Alexandre (2014) apresenta o método dos algoritmos genéticos no dimensionamento ótimo de vigas retangulares de concreto armado submetidas a esforços de flexão e cisalhamento; Scheid (2015), desenvolve uma modelagem do processo de transformação chuva / vazão, usando apenas redes neurais artificiais (RNA) acoplada a um algoritmo genético (AG) e Botan, Mawdesley e Stace (2010), sugerem uma nova técnica utilizando algoritmos genéticos para o traçado do alinhamento ótimo de uma estrada, aplicando também técnicas modificadoras que melhoram o desempenho dos algoritmos genéticos.

3. ALGORITMOS GENÉTICOS

Percebe-se que existe, na natureza, uma ação seletiva entre os seres vivos e, os mais aptos possuem uma maior chance de sobrevivência e com isso uma maior probabilidade de transmitirem suas características a seus descendentes e os menos aptos possuem chances reduzidas, dificultando ou impossibilitando de garantir que suas características continuem a existir.

Os algoritmos genéticos (AG) foram desenvolvidos por Holland (1975) como uma técnica de busca, na qual a população de pontos de busca, evolui a partir de variações e seleções aleatórias. Os AGs estão baseados nos princípios biológicos da evolução. Em processos de otimização, representam uma alternativa interessante aos métodos tradicionais de gradiente, especialmente em casos não lineares. Não requerem continuidade nas funções a serem otimizadas, e um mesmo algoritmo pode atacar numerosos problemas de diferentes situações. Os AGs podem ser descritos na seguinte sequência de operações mostrada na Figura 9:

Figura 10: Algoritmo de Implementação dos AGs



Fonte: BOTAN, MAWDESLEY & STACE (2010)

Com o passar dos tempos, se não ocorrer mudanças no critério de eficiência, é esperado que os seres menos aptos deixem de existir, restando assim somente os indivíduos mais aptos (Grosko, 2006). Essa adaptabilidade aplicada no reino animal, é composta por regras lógicas que podem ser aplicadas em qualquer sistema que possua critérios de eficiência e se comporte de maneira similar ao meio ambiente: selecionando, perpetuando ou eliminando. Inspirando-se nestas regras, Holland (1975) em meados da década de 70 propôs o algoritmo genético que funciona através de mecanismos similares à teoria da evolução das espécies. Este algoritmo estabelece critérios de desempenho (função objetivo) e busca combinar diferentes características (variáveis de projeto) para obter a melhor solução possível.

O algoritmo genético é uma importante ferramenta de otimização. Algumas características evidenciaram sua eficiência e influenciaram na popularização desta técnica. Adeli e Sarma (2006) destacam alguns pontos que descrevem bem as características deste algoritmo: o AG possui uma acelerada convergência, pois trabalha com um conjunto de soluções em cada interação, onde cada solução ou ponto do espaço de projeto é denominado indivíduo e o conjunto de indivíduos forma uma população.

Hoje, os estudos sobre os Algoritmos Genéticos (AG) têm-se se ampliados devido à sua flexibilidade, relativa simplicidade de implementação, e eficácia em realizar busca global em ambientes adversos. Em geral, a evolução natural implementa mecanismos adaptativos de otimização embora estejam longe de serem uma forma de busca aleatória.

AGs tentam dirigir a busca para regiões do espaço onde é provável que os pontos ótimos estejam e possuem um paralelismo implícito decorrente da avaliação independente de cada um dos candidatos à solução, ou seja, pode-se avaliar a viabilidade de um conjunto de parâmetros para solução de problemas de otimização. Os problemas de otimização em sistemas de razoável complexidade não raro exigem grande capacidade de processamento devido à necessidade de muitas avaliações da função objetivo. Estas avaliações podem envolver longas simulações que, para muitos casos práticos, implica na utilização de um ou mais aplicativos de alto custo computacional e complexidade já desenvolvidos e disponíveis.

As informações requeridas pelo AG são apenas as avaliações das funções, não sendo necessárias informações sobre o gradiente e nem envolvem a determinação de direções de busca e passos, presentes em muitos algoritmos clássicos de otimização. Assim, o AG não é do tipo hill climbing e a possibilidade de encontrar mínimos locais como resposta é reduzida.

O AG não trabalha diretamente com os valores das variáveis de projeto, mas sim com uma codificação destes valores para cada indivíduo, arranjos em uma sequência de caracteres ou genes, chamada de cromossomo. Esta codificação é chamada genótipo e o gene é a unidade

básica de representação no cromossomo e os valores que ele assume são chamados de alelos. Dentre as diversas formas de codificação citam-se a binária, a inteira e a real, que se distinguem pela representação dos números nas formas binária (0 ou 1), decimal inteira e real, respectivamente.

Na representação inteira, usada neste trabalho, cada gene armazena um código inteiro representando uma variável de projeto x e o seu alelo pode ser o próprio valor da variável de projeto se x for inteiro ou pode representar a posição em uma lista que associa a variável a um valor qualquer, podendo ser um caractere alfanumérico ou lógico. Esta estratégia qualifica o AG para solução de problemas de otimização discreta (combinatória).

Os programas que utilizam algoritmos genéticos possuem diversas formas de seleção para atingir um determinado valor ótimo para uma função, critérios esses como a seleção por roleta, por classificação, por estado estacionário e elitismo, que possuem particularidades fazendo com que o uso de diferentes ferramentas possibilite que o programa se adeque aos mais variados tipos de problemas. Por meio da aplicação de operadores genéticos, como mutação e crossover, que possuem como princípio básico transformar a população através de sucessivas gerações, estendendo a busca até chegar a um resultado satisfatório, e assim, manter a diversidade das características de adaptação adquiridas ao longo das diversas gerações, é realizada a otimização com base no indivíduo mais apto para a determinada questão.

4. EXEMPLOS DE APLICAÇÕES DOS ALGORITMOS GÊNÉTICOS

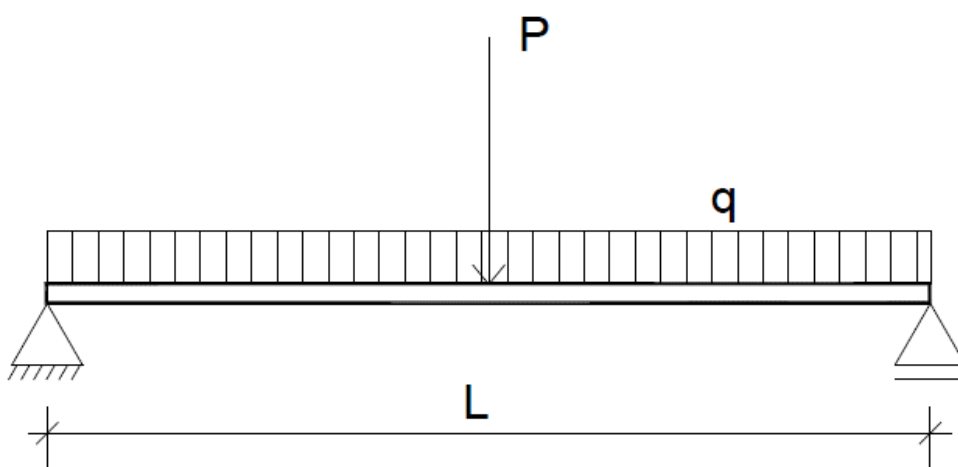
4.1 VIGAS

Pode-se definir viga como sendo um elemento estrutural unifilar por ter um eixo bem definido. Uma viga é um modelo estrutural: um modelo matemático que abstrai o comportamento de uma viga real. Define-se viga como um modelo estrutural cujas barras estão todas em um mesmo eixo (que pode ser inclinado ou curvo) (MARTHA, 2010).

A viga tem como função principal vencer vãos e transferir esforços de lajes, paredes e outros elementos aos pilares da edificação. De acordo com os esforços pelas vigas resistidos, no que se refere a flexão, e quando o plano de ação contém um dos principais eixos de inércia, diz-se que a viga está solicitada a flexão normal simples e quando esses esforços incluem ações à seção transversal, diz-se que a viga está solicitada a flexão normal composta.

No presente trabalho será utilizada uma viga bi apoiada, ou seja, que possui dois apoios, sendo um do segundo gênero (que não permite movimento de translação) e outro de primeiro gênero (que permite movimento de translação em apenas uma direção, nesse caso, na direção horizontal), não possuindo restrições a rotação em nenhum dos apoios. Em relação ao carregamento, a viga utilizada será solicitada por um carregamento uniformemente distribuído referente ao seu peso próprio, e a uma carga concentrada no meio do seu vão, como pode ser observado na Figura 10

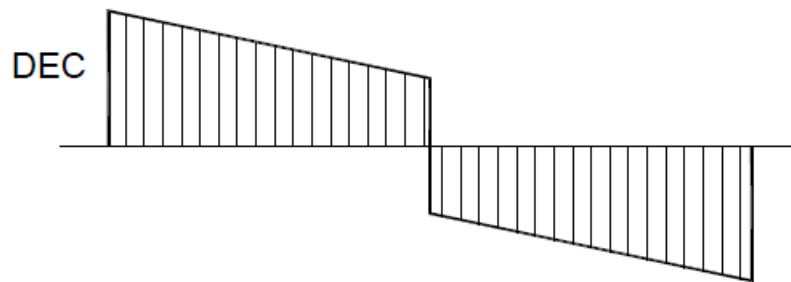
Figura 11: Viga utilizada na aplicação dos Algoritmos Genéticos



Fonte: GÓMEZ, SOUZA, LEMOS, VALLE, MORARES (2014)

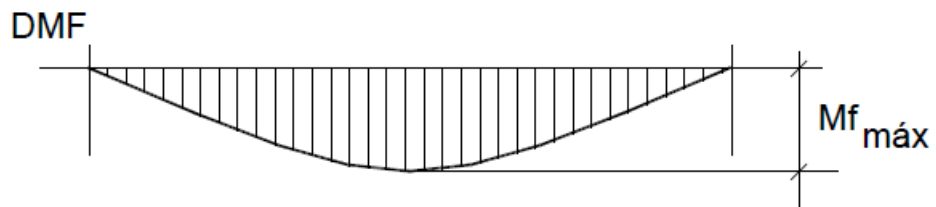
Os diagramas dos esforços solicitantes no modelo de viga escolhido são demonstrados nas Figuras 11 e 12.

Figura 12: Diagrama dos esforços cortantes



Fonte: GÓMEZ, SOUZA, LEMOS, VALLE, MORARES (2014)

Figura 13: Diagrama dos momentos fletores



Fonte: GÓMEZ, SOUZA, LEMOS, VALLE, MORARES (2014)

No cálculo da tensão atuante na viga será considerado apenas os esforços provenientes dos momentos fletores, sendo este, o valor do momento fletor máximo, localizado no meio do vão da viga, como foi demonstrado na figura 12. O valor da tensão é dado pela equação 1.

$$\sigma = \frac{Mf \times Y}{I} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

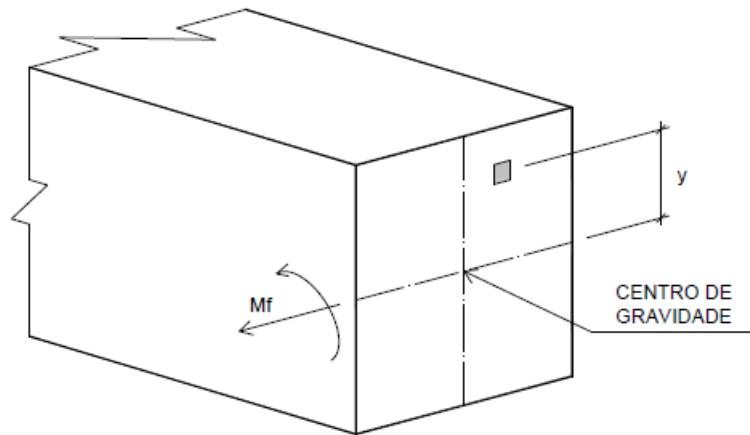
σ = tensão em um ponto da seção da viga;

Mf = momento fletor atuante naquela seção da viga;

Y = distância vertical do ponto ao centro de gravidade da seção;

I = momento de inércia da seção em relação ao centro de gravidade.

Figura 14: Determinação da tensão em um ponto da viga



Fonte: GÓMEZ, SOUZA, LEMOS, VALLE, MORARES (2014)

Considerando que a viga tem seção transversal constante, e que a tensão máxima irá ocorrer nos pontos mais afastados do centro de gravidade ($Y_{\text{máx}}$), os valores de $Y_{\text{máx}}$ e I também serão constantes, o que resulta em um Módulo Resistente da seção $W = I/Y_{\text{máx}}$ constante.

Adotando como critério de ruptura a condição de que a viga apresente tensões normais atuantes maiores que a tensão admissível pelo material, tem-se então que o requisito a ser atendido será: $\sigma_{\text{máx}} < \sigma_{\text{adm}}$.

A partir dessas considerações o objetivo será definir dentre várias seções de uma viga de um mesmo material, uma seção que seja mais eficiente em termos de peso, ou seja, uma seção que suporte maiores tensões com o menor consumo de material possível. Dessa forma, pode-se dizer, que o problema objetiva encontrar dentre todas as seções transversais possíveis, aquela que possui o maior módulo de resistência, em conjunto com a menor área transversal.

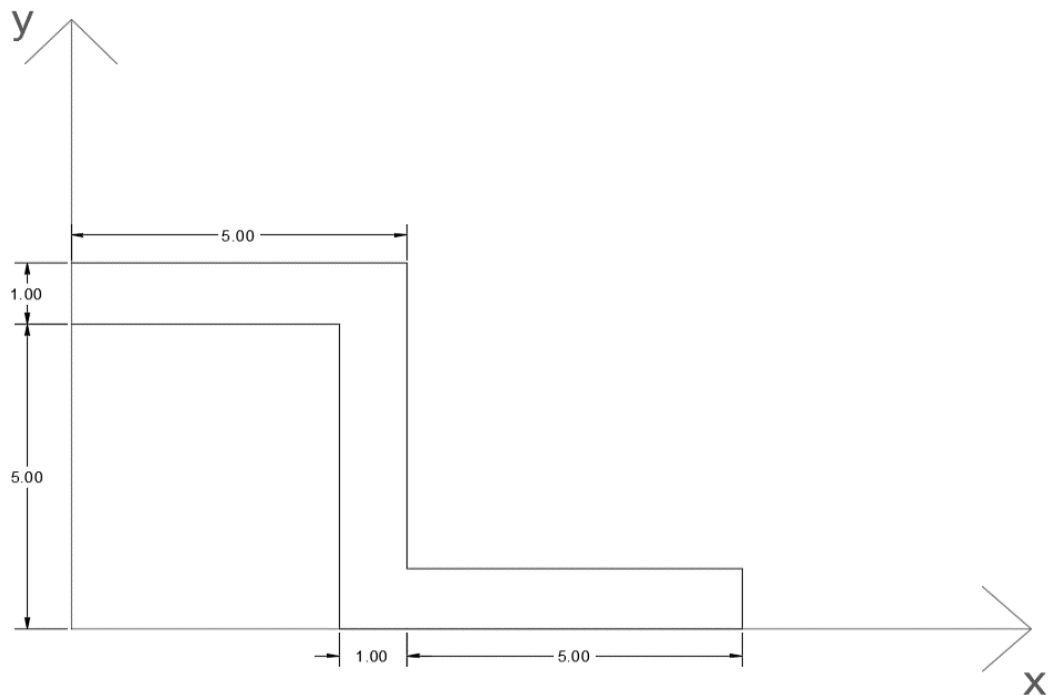
4.1.1 CÁLCULO DOS PARÂMETROS NECESSÁRIOS PARA A OTIMIZAÇÃO

Diante do exposto, será feita uma demonstração do cálculo manual dos parâmetros necessários para a otimização da seção da viga. Foram escolhidas duas seções atípicas, e para cada uma foram calculados a área, o centro de gravidade, o momento de inércia e o módulo de resistência da seção. Os momentos de inércia foram calculados com o auxílio do teorema dos eixos paralelos ou de Steiner.

4.1.1.1 SEÇÃO 1

A seção 1 pode ser visualizada na Figura 14. As unidades de medidas descritas estão todas em centímetros.

Figura 15: Seção 1 analisada manualmente



Fonte: Autor

Dada a seção mostrada da Figura 14, foi realizado o cálculo da sua área, centro de gravidade, momento de inércia e módulo de resistência. Os cálculos desses parâmetros são descritos a seguir.

- Área (A1):

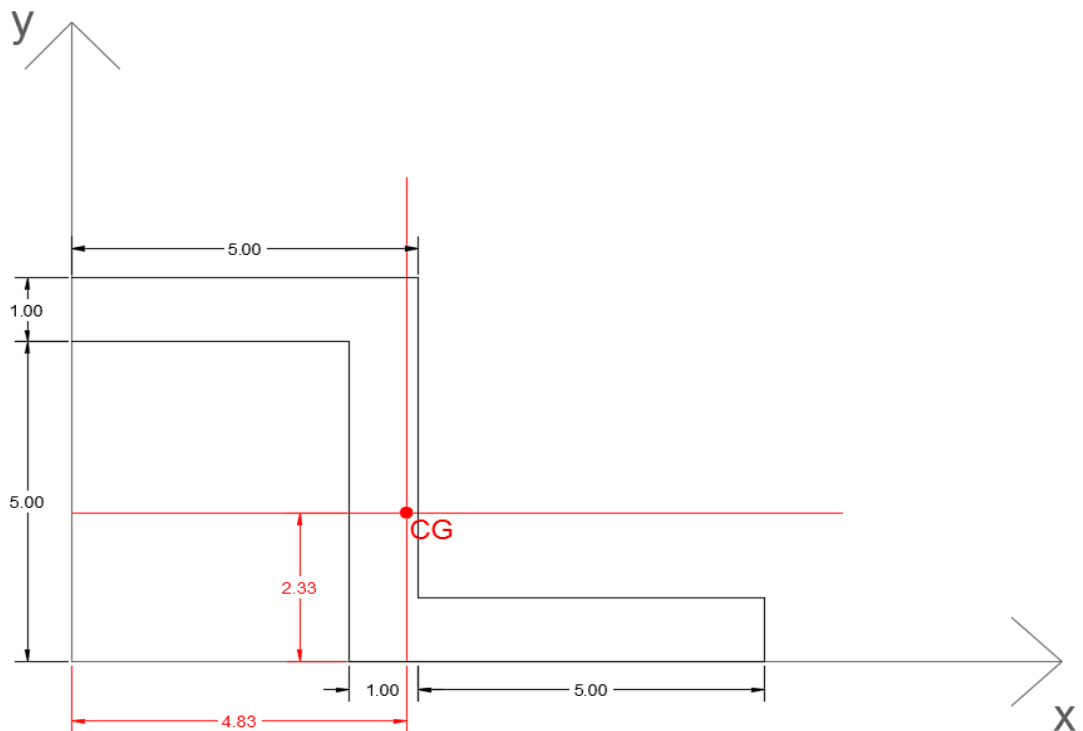
$$A1 = 5 \times 1 \times 3 = 15 \text{ cm}^2$$

- Centro de Gravidade (CG1):

$$Yg = \frac{5 \times 5,5 + 5 \times 2,5 + 5 \times 0,5}{15} = 2,33 \text{ cm}$$

$$X_g = \frac{5 \times 2,5 + 5 \times 5,5 + 5 \times 7,5}{15} = 4,83 \text{ cm}$$

Figura 16: Centro de Gravidade da seção 1



Fonte: Autor

- Momento de Inércia (I1)

$$I_{y1} = \frac{1 \times 5^3}{12} + 5 \times 2,33^2 + \frac{5 \times 1^3}{12} + 5 \times 0,33^2 + \frac{1 \times 5^3}{12} + 5 \times 2,67^2 = 84,58 \text{ cm}^4$$

$$I_{x1} = \frac{5 \times 1^3}{12} + 5 \times 3,17^2 + \frac{1 \times 5^3}{12} + 5 \times 0,17^2 + \frac{5 \times 1^3}{12} + 5 \times 1,83^2 = 78,38 \text{ cm}^4$$

- Módulo de Resistência

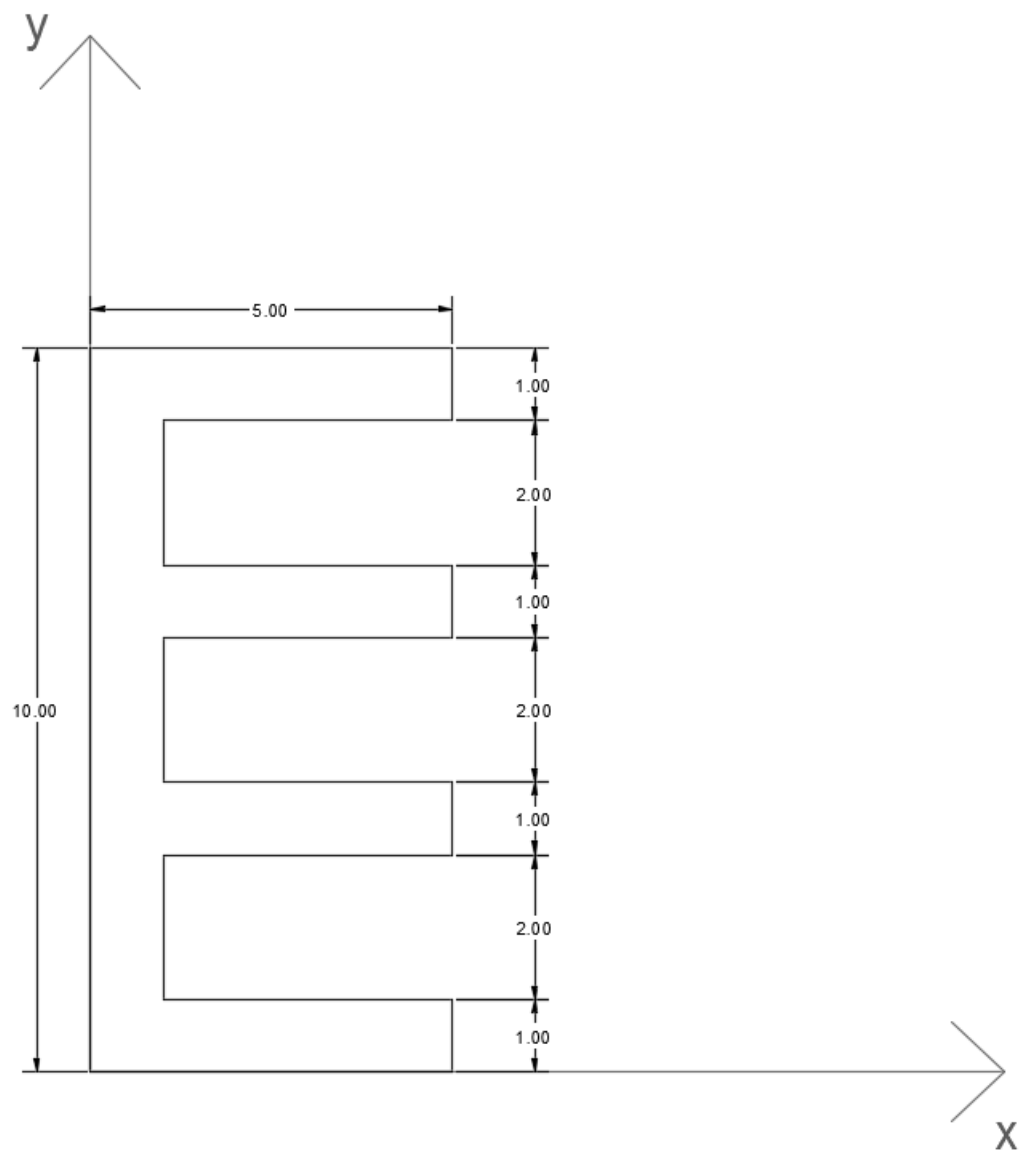
A partir do cálculo do centro de gravidade, temos de o $Y_{1\text{máx}}$ da seção será 3,67 cm ($6 - 2,33 = 2,67$ cm). Então o módulo de resistência da seção 1 (W1), será:

$$W1 = \frac{84,58}{3,67} = 23,05 \text{ cm}^3$$

4.1.1.2 SEÇÃO 2

A seção 2 pode ser visualizada na Figura 16. As unidades de medidas descritas estão todas em centímetros.

Figura 17: Seção 2 analisada manualmente



Fonte: Autor

Dada a seção mostrada da Figura 16, foi realizado o cálculo da sua área, centro de gravidade, momento de inércia e módulo de resistência. Os cálculos desses parâmetros são descritos a seguir.

- Área (A2):

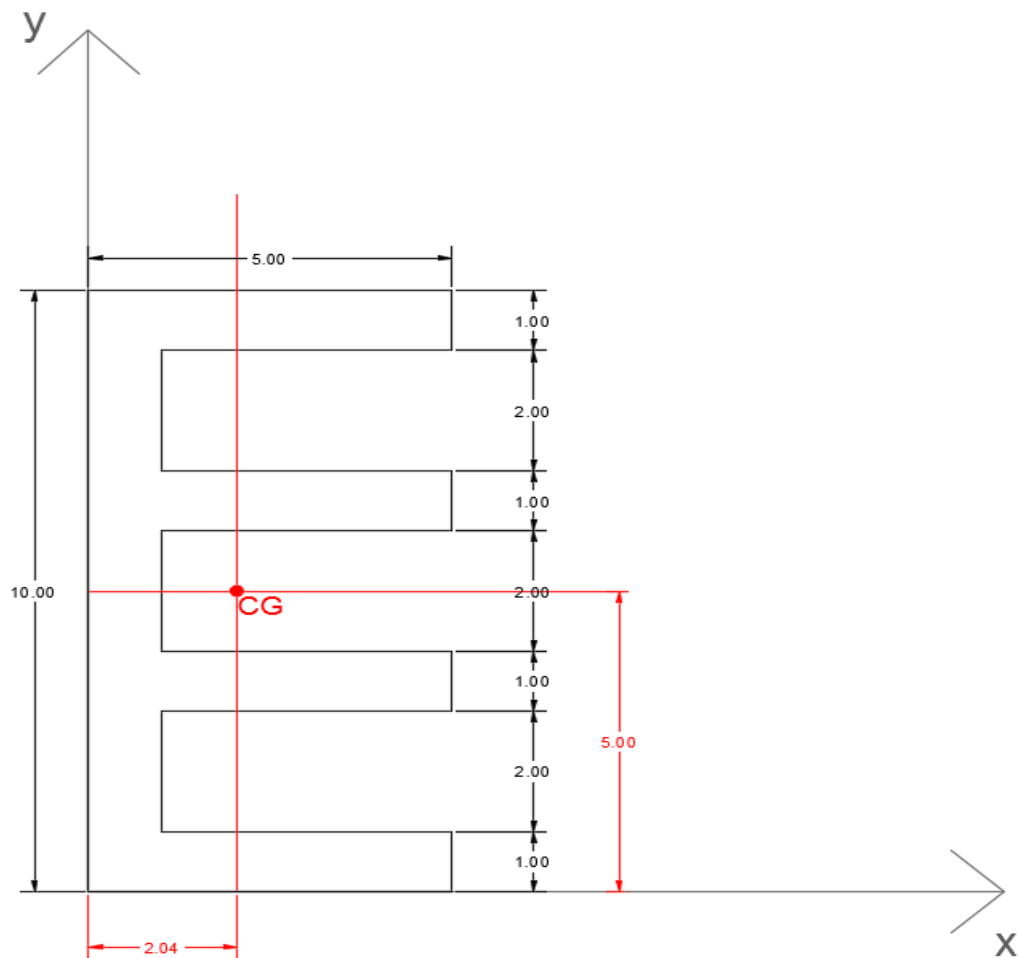
$$A1 = 1 \times 10 + 4 \times 1 \times 4 = 26 \text{ cm}^2$$

- Centro de Gravidade (CG2):

$$Yg = \frac{4 \times 0,5 + 4 \times 3,5 + 4 \times 6,5 + 4 \times 9,5 + 10 \times 5}{26} = 5,0 \text{ cm}$$

$$Xg = \frac{4 \times 3 \times 4 + 10 \times 0,5}{26} = 2,04 \text{ cm}$$

Figura 18: Centro de gravidade da seção 2



Fonte: Autor

- Momento de Inércia (I₂)

$$I_{y2} = \frac{10 \times 1^3}{12} + 10 \times 1,54^2 + \left(\frac{1 \times 4^3}{12} + 4 \times 0,96^2\right) \times 4 = 60,63 \text{ cm}^4$$

$$I_{x2} = \frac{1 \times 10^3}{12} + 10 \times 0^2 + \left(\frac{4 \times 1^3}{12} + 4 \times 4,5^2\right) \times 2 + \left(\frac{4 \times 1^3}{12} + 4 \times 1,5^2\right) \times 2 = 140,67 \text{ cm}^4$$

- Módulo de Resistência

A partir do cálculo do centro de gravidade, temos de o Y_{2máx} da seção será 5,00 cm. Então o módulo de resistência da seção 2 (W₂), será:

$$W_2 = \frac{140,67}{5,00} = 28,13 \text{ cm}^3$$

4.1.2 OTIMIZAÇÃO EM SEÇÕES TRANSVERSAIS DE VIGAS COM O USO DOS ALGORÍTIMOS GENÉTICOS

Como foi demonstrado anteriormente, é necessário analisar diversas seções para se atingir uma seção otimizada, e o cálculo manual dos parâmetros de cada seção acaba sendo muito exaustivo e pouco eficiente, dessa forma, o uso de um algoritmo que faça vários testes, minimizando ou maximizando uma determinada função é uma maneira bem mais eficiente e rápida para se fazer esse tipo de análise. A otimização será realizada com o emprego de algoritmos genéticos com o uso do Visual Basic, do Visual Studio.

As seções foram geradas através de um programa desenvolvido pelo professor Francisco Jácome Sarmiento no Visual Basic, e a análise foi realizada com base no parâmetro W (Módulo de Resistência) e na sua área. São gerados parâmetros aleatórios onde o objetivo é maximizar o fator W/A. Ao maximizar essa relação, percebe-se que o resultado será uma seção transversal com uma maior resistência e que possui a menor área possível, ou seja, uma seção eficiente em termos de segurança e economia, o que sempre é o objetivo dos estudos em engenharia.

4.1.3 O PROGRAMA

O programa utilizado foi desenvolvido pelo professor Doutor da Universidade Federal da Paraíba, Francisco Jácome Sarmiento, especialmente para este exemplo de aplicação, com o objetivo de mostrar a evolução das seções a partir da seleção dos parâmetros necessários para o dimensionamento e da maximização da função W/A . Foi considerado um gride 5×5 , ou seja, cada seção possui uma altura de 5 unidades.

4.1.4 RESULTADOS E DISCURSÕES PARA A OTIMIZAÇÃO DE SEÇÕES DE VIGAS

Como pode-se observar nas figuras 18, 19, 20 e 21 percebe-se que a otimização desde o início tende para a geração de resultados onde há uma redução de material na porção central da seção. Há uma evolução das soluções vistas nas Figuras 18, 19, 20 e 21 respectivamente, onde o valor da função W/A cresce, iniciando com seções não comerciais, pois não possuem material na alma, até a seção I. Esse resultado demonstra que conforme a massa se localiza mais afastada da linha neutra obtém-se maior inércia e, conseqüentemente, melhor relação entre o W e a área.

Os resultados são coerentes com estudos já confirmados pela literatura sobre otimização de seções de vigas, onde verifica-se que a seção I é a seção comercial mais eficiente em termos de economia, e segurança estrutural. Isso ocorre, pois, considerando apenas os esforços provenientes dos momentos fletores, que, salvo algumas exceções específicas, são os mais expressivos para a maioria dos dimensionamentos de vigas, sabe-se que esses esforços atuam com valores de tensões máximas nas bordas da seção (podendo ser na borda inferior ou superior, para momentos positivos ou negativos, respectivamente), e na altura da linha neutra o esforço proveniente dos momentos fletores é nulo, o que nos dá a ideia de que, em uma situação hipotética, se não possui esforços atuando sobre ponto, teoricamente, não necessita-se de material resistente naquele determinado ponto.

Figura 19: Seção Aleatória



Fonte: *print screen* da aplicação no sistema operacional Windows 10

Figura 20: Seção Aleatória



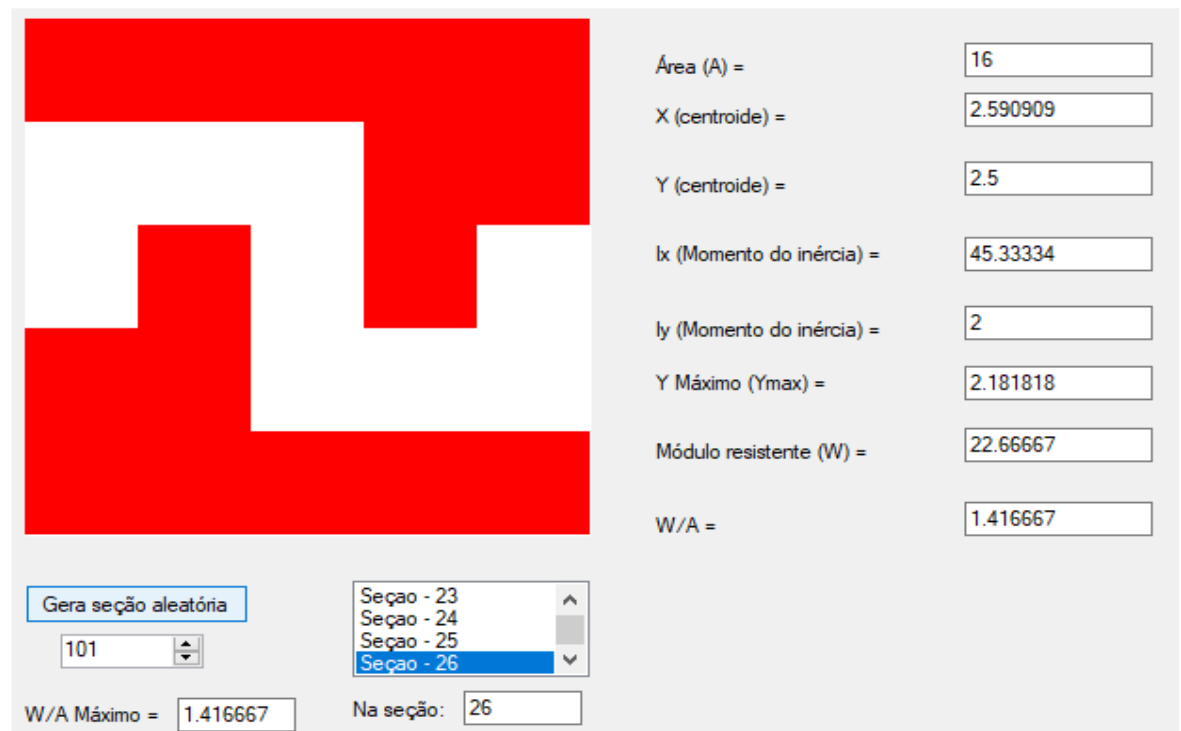
Fonte: *print screen* da aplicação no sistema operacional Windows 10

Figura 21: Seção Aleatória



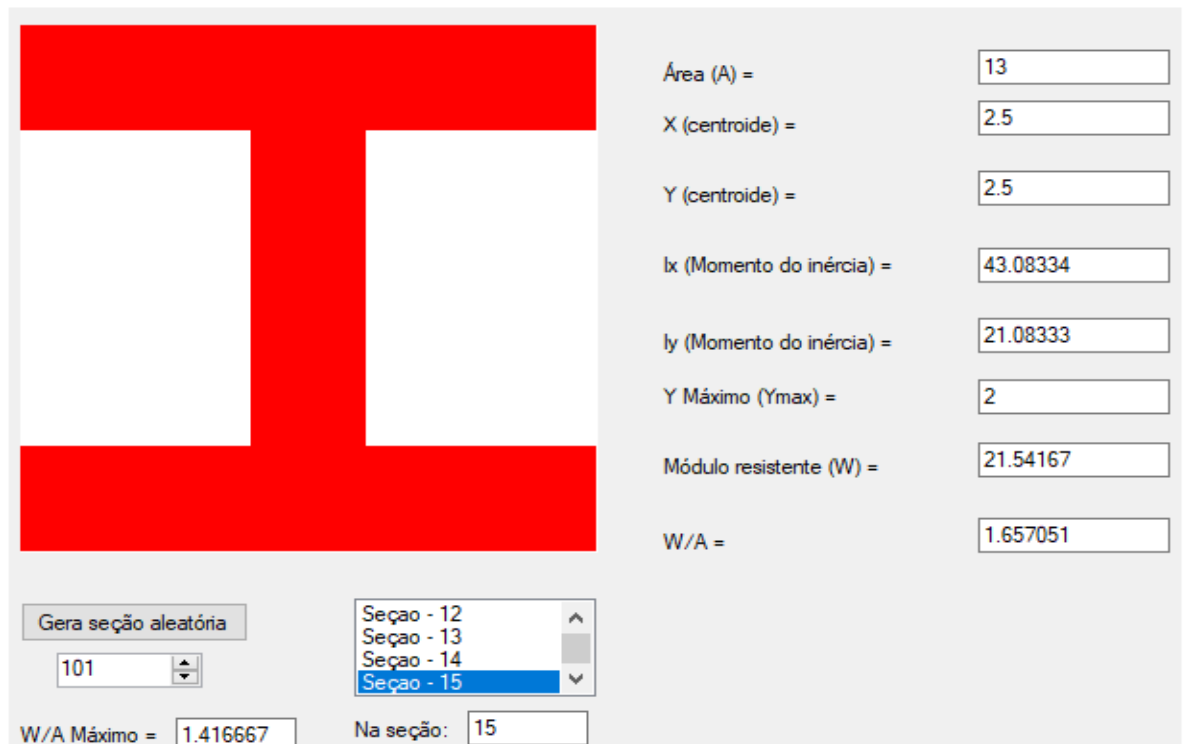
Fonte: *print screen* da aplicação no sistema operacional Windows 10

Figura 22: Seção Aleatória



Fonte: *print screen* da aplicação no sistema operacional Windows 10

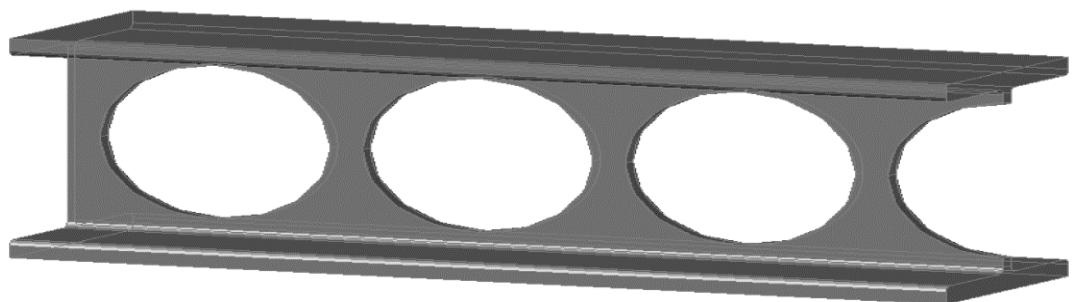
Figura 23: Seção Aleatória



Fonte: *print screen* da aplicação no sistema operacional Windows 10

Pode-se então fazer uma observação com uma análise dos perfis I usados na indústria aeronáutica, onde a alma das seções apresenta aberturas para a redução do peso próprio da viga, como pode ser visto na Figura 23, sem perda de resistência que comprometa a segurança da estrutura, o que proporciona uma maior economia e eficiência em relação ao custo de material utilizado e a resistência da seção respectivamente.

Figura 24: Perfil de uma viga utilizada na indústria aeronáutica



Fonte: GÓMEZ, SOUZA, LEMOS, VALLE, MORARES (2014)

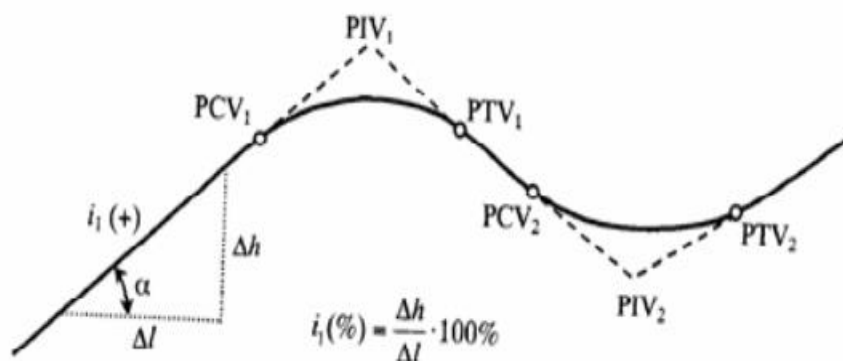
4.2 ESTRADAS

O estudo para a execução de obras rodoviárias possui várias etapas. Dentre essas etapas pode-se citar como as principais o projeto geométrico, projeto de terraplanagem, pavimentação, drenagem, entre outras. A concepção inicia-se basicamente com o projeto geométrico, que é composto por um conjunto de levantamentos, estudos, definições de soluções técnicas e cálculos que pretendem garantir a viabilidade técnica, econômica e social do produto final (Martins Pereira, Raton, Blasi e Küster Filho, 2007).

Para dar início ao projeto geométrico, primeiramente é realizado o estudo do traçado, que deve ter como base a finalidade de garantir melhoria física e operacional ao segmento de travessia urbana com disciplinamento do tráfego por meio de adequação geométrica, proporcionando melhor fluidez, segurança e conforto ao usuário, tanto do tráfego de passagem quanto do tráfego local (DNIT).

O traçado do greide de uma estrada caracteriza-se como o traçado das cotas do perfil longitudinal da via. O projeto de uma estrada em perfil é constituído de greides retos, concordados dois a dois por curvas verticais. Os greides retos são definidos pela sua declividade, que é a tangente do ângulo que fazem com a horizontal. Na prática, a declividade é expressa em porcentagem (Macedo, 2008). Na figura 24 identifica-se o perfil de um projeto de estrada, onde tem-se a designação de PIV como ponto de interseção vertical, PCV como ponto de curvatura vertical e PTV, como ponto de tangência vertical.

Figura 25: Perfil de projeto de uma estrada



Fonte: MACEDO, 2008

Por ser um dos pontos iniciais do estudo de concepção de uma rodovia, o traçado ótimo de um greide tem influência significativa na qualidade do projeto. Um dos custos mais expressivos em uma obra rodoviária são os custos oriundos de movimentos de terra como cortes e aterros. Um traçado otimizado de um greide pode reduzir esses gastos de forma considerável, entretanto, como esse traçado depende de diversos elementos naturais como a topografia, a geologia e até mesmo a hidrologia do local, a otimização não é um trabalho tão simples.

4.2.1 OTIMIZAÇÃO DE GREIDE DE ESTRADAS COM O USO DE ALGORITMOS GENÉTICOS

Inicialmente é importante levar em conta alguns parâmetros que caracterizam o tipo de estrada e o tipo de projeto que se deseja elaborar.

Para o presente exemplo de aplicação, será considerado uma Estrada Classe I, Tipo de Relevo ondulado e qualidade do pavimento Médio

4.2.2 RESULTADOS E DISCURSÕES PARA OTIMIZAÇÃO DE TRAÇADO DE GREIDE DE ESTRADAS

O programa foi rodado com as considerações citadas anteriormente. Como resultado, o programa gera cotas otimizadas de greide, de corte e de aterro, que podem ser conferidas na planilha em anexo. A partir da planilha elaborada foram produzidos gráficos que ilustram o comportamento dos resultados obtidos pelo programa.

Na Figura 25, pode-se observar a comparação das cotas naturais do terreno, ou seja, as cotas obtidas por meio do levantamento topográfico, e as cotas do greide calculadas pelo programa. Através da análise do gráfico em conjunto com a planilha em anexo, observa-se que em muitos pontos a cota topográfica se aproxima bastante da cota calculada para o greide, reduzindo assim o volume de corte ou de aterro necessário nesses pontos.

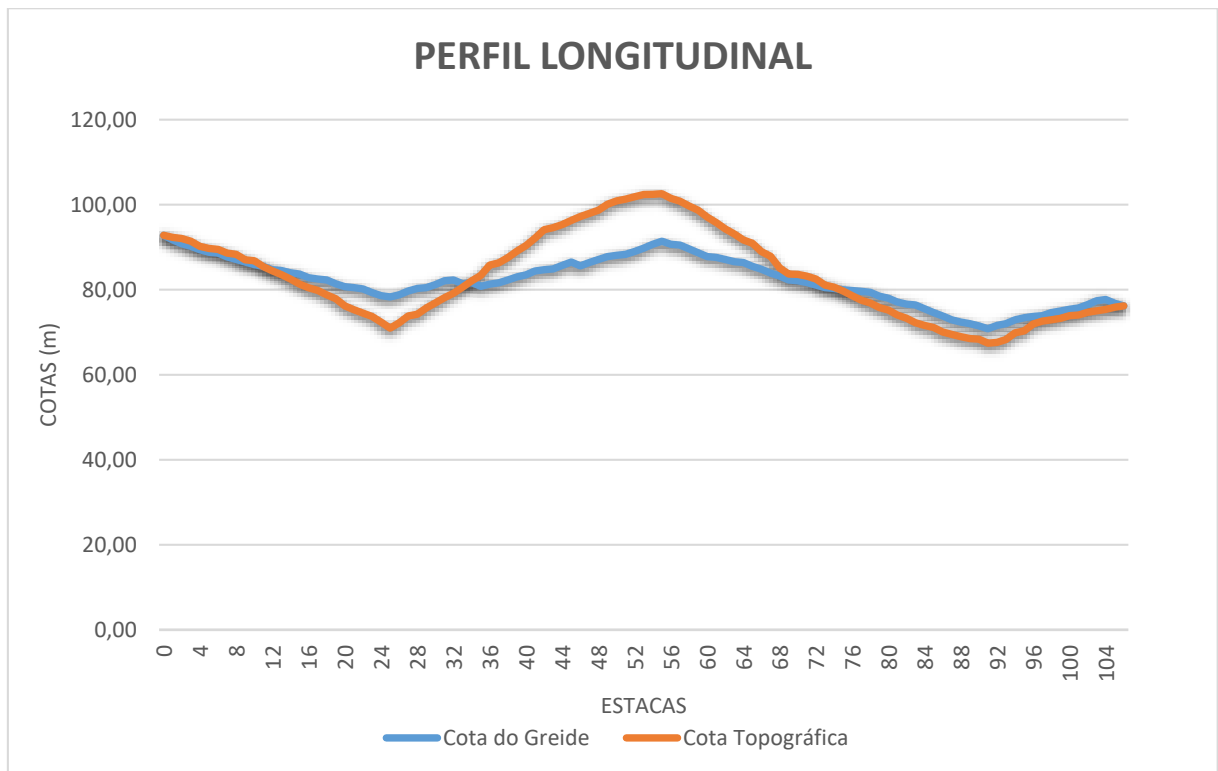
A Figura 26 demonstra as cotas de corte e de aterro. Pela análise do gráfico e da planilha em anexo, é possível verificar que houve um maior volume de corte, sendo possível fazer uma compensação com a utilização do volume retirado no corte para o uso no aterro.

O principal fator levado em conta na otimização do traçado do greide são os custos com o movimento de terra, que costumam onerar bastante o orçamento desse tipo de obra, apesar disso fatores de eficiência do traçado também são levados em consideração, como por exemplo, o traçado de curvas que atendam às necessidades específicas de projeto. É importante lembrar

que também devem ser ponderados da otimização as restrições de projetos referentes a topografia, geologia, hidrologia etc., do local.

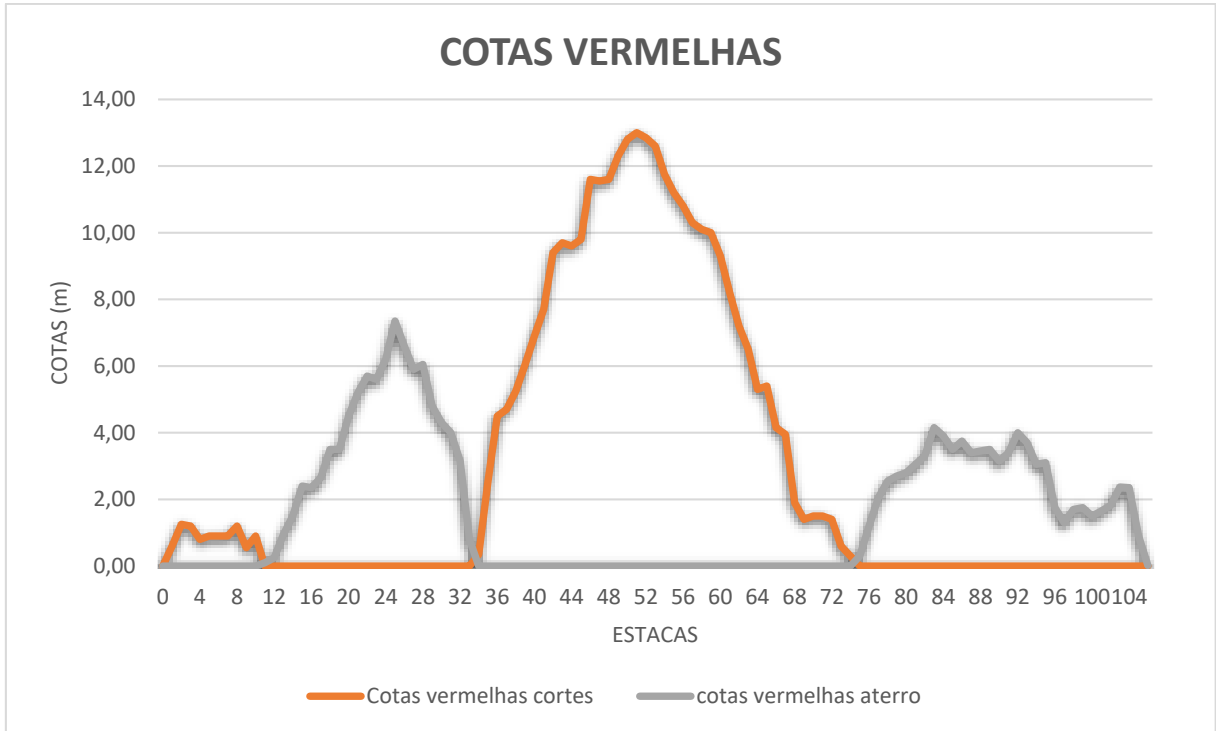
Apesar de explanar os resultados da otimização via algoritmos genéticos, nesse caso, é importante salientar que apenas uma comparação com o método tradicional poderá confirmar com exatidão o quanto essa otimização foi satisfatória. Com a comparação dos volumes de cortes e de aterros, e a comparação dos custos referentes aos dois métodos seria possível obter uma resposta com maior exatidão da economia que seria realizada.

Figura 26 : Cotas do Perfil Longitudinal do traçado do Greide



Fonte: Autor

Figura 27: Cotas de corte e de aterro



Fonte: Autor

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do que foi estudado neste trabalho é importante destacar a diversidade de áreas dentro da engenharia civil em que foram aplicados programas que utilizam algoritmos genéticos para resolver problemas de otimização, independentemente do tipo ou complexidade do mesmo. Os resultados obtidos em diversos trabalhos científicos mostraram em sua totalidade alguma eficiência em relação aos métodos tradicionais de resolução. Alguns podem se mostrar mais eficientes e interessantes do ponto de vista prático, enquanto outros podem ser mais facilmente aplicados para teorias e pesquisas para o melhoramento dos estudos na área analisada.

Alguns artigos como o dos autores Luis Henrique Magalhães Costa, Marco Aurélio Holanda de Castro e Helena Ramos, 2010, em que se utilizou de um algoritmo genético híbrido para operação ótima de sistemas de abastecimento de água se mostrou uma alternativa muito interessante e eficiente para projetos de abastecimento, já que os custos de operações das bombas em sistemas de abastecimento de água são bastante relevantes.

Destaca-se também a tese de mestrado do autor Leonardo de Jesus Alexandre, onde foi realizado um estudo sobre o dimensionamento ótimo de vigas retangulares de concreto armado, onde foi levado em conta, a análise estrutural parâmetros como resistência característica do concreto (f_{ck}) e o detalhamento da armadura com o objetivo de obter uma redução significativa no custo da viga.

O uso dos algoritmos genéticos também pôde-se mostrar eficiente no desenvolvimento do alinhamento horizontal de uma estrada, entretanto, no artigo analisado de Botan A. AL-Hadad, Michael J. Mawdesley & Rod Stace, da Universidade do Reino Unido observou-se uma maior eficiência quando o algoritmo foi aplicado com algumas técnicas modificadoras, que melhoraram o traçado das curvas, deixando-as mais suaves.

Foram realizadas também duas aplicações em áreas distintas com programas que utilizam algoritmos genéticos. Primeiramente foi feita uma otimização para seções transversais de vigas bi-apoiadas, submetidas ao seu peso próprio e a uma carga concentrada no meio do seu vão. O objetivo foi encontrar uma seção que possua alta resistência com a menor área transversal. Os resultados naturalmente já são conhecidos pela literatura, entretanto o programa mostrou que através da seleção de variáveis aleatórias, e da otimização (maximização) da função W/A , mesmo sem inserir conhecimentos específicos de resistência dos materiais, as seções evoluíram para modelos coerentes com os já conhecidos e estudados, onde a matéria

deve se afastar da linha neutra da seção, encontrando como perfil comercial otimizado o perfil I, resultado igual ao dos estudos já conhecidos para esse problema.

A segunda aplicação foi para a otimização do traçado do greide de uma estrada, com o objetivo de reduzir os volumes de movimentos de terra, já que esses custos são bastante onerosos no orçamento de obras rodoviárias, além de melhorar a eficiência do alinhamento geral da estrada oferecendo conforto, segurança e economia. Os resultados obtidos se apresentaram satisfatórios, entretanto apenas uma comparação com os cálculos do mesmo projeto, com as mesmas variáveis e restrições pelos dois métodos, tradicional e com algoritmos genéticos, irá quantificar o quando um método é eficiente em relação ao outro.

Dessa maneira, pode-se considerar, que os algoritmos genéticos são ferramentas muito eficientes na solução de problemas de engenharia, podendo ser aplicados em todas as áreas. A economia e a segurança sempre foram fundamentos indispensáveis para a engenharia, então é importante que os estudos e pesquisas evoluam, e que se façam mais aplicações práticas com algoritmos genéticos aplicados a engenharia civil, pois, como pode ser visto nesse trabalho, os artigos a aplicações apresentados demonstram grande eficiência do método, que certamente, se continuarem sendo desenvolvidos, iram gerar mais desenvolvimento tecnológico, aumentando a qualidade dos projetos e das obras, juntamente com uma maior eficácia econômica.

REFERÊNCIAS

- AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Officials. 1994.
- ADELI, H.; SARMA, K. **Cost Optimization of Structures - Fuzzy Logic, Genetic Algorithms, and Parallel Computing**. West Sussex: John Wiley & Sons, Ltda. 2006.
- ALCALÁ, R, BENITEZ, J. M.,CASILLAS, J., CORDÓN, O., PÉREZ, R., Fuzzy Control of HVAC Systems Optimized by Genetic Algorithms. *Applied Intelligence*, v.18 n.2, p.155-177, March-April 2003
- ALEXANDRE, L.J. **Otimização do pré-projeto de vigas de concreto armado utilizando algoritmos genéticos**. 2014. 152 p. Dissertação (Mestrado em ciências em engenharia civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de pós-graduação e pesquisa de engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Acesso em: 24 set. 2017.
- BARROS, F. V F. **Uso de algoritmos evolucionários na calibração de modelos hidrológicos e na operação de sistemas de reservatórios**. 2007. 198 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil/Área de Concentração em Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Ceará. Acesso em: 24 set. 2017.
- BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. **Calibração automática de um modelo hidrológico utilizando um algoritmo evolucionário multiobjetivo**. Acesso em: 25 out. 2017
- BITTENCOURT, Guilherme. **Inteligência Computacional**. 2008. Acesso em: 24 set. 2017. (Apostila).
- BOTAN A.A.; MAWDESLEY, M. J.; STACE, R. **A genetic algorithm tp highway alignment development**. The University of Nottingham,UK, 2010.
- CAIXETA FILHO, J. V., GOLDBARG, M. C. e PACCA, H. L. L., **Otimização Combinatória e Programação Linear: Modelos e Algoritmos**. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2000.
- CARVALHO, André Ponce de Leon F. de. **Algoritmos Genéticos**. 2009. Disponível em: <<http://conteudo.icmc.usp.br/pessoas/andre/research/genetic/>>. Acesso em: 22 nov. 2017.
- CHEW, E. P., GOH, C. J., and FWA, T. F., 1989. **Simultaneous Optimization of Horizontal and vertical Alignments of Highways**, *Transportation research, Part B*, 23(5), 315-329.
- COSTA, F. F.; MACHADO, E. C. M. **um algoritmo genético para alocação de água em reservatórios**. 2015. XXI Simpósio brasileiro de Recursos Hídricos. Brasília – DF.
- COSTA, L. H. M.: Engenheiro Civil. Doutor em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará (UFC); Castro, M. A. H. de: Engenheiro Civil. PhD em engenharia. Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Hidráulica de Ambiental da UFC; RAMOS, Helena: Engenheira Civil. PhD em engenharia. Professora do Instituto Superior Técnico de Lisboa. **Utilização de um algoritmo genético híbrido para operação ótima de sistemas de abastecimento de água**. Artigo Técnico. Fortaleza – CE. 2010.

CUNHA, A. P.; PINTO, W. T. **Calibração de Modelo Hidráulico via Algoritmos Genéticos para Rede de Abastecimento de Água**. 2014. 68 p. Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária – Universidade Federal de Goiás.

DNIT, Departamento Nacional de Infraestruturas e Transportes.

FORMIGA, K. T. M.; CHAUDHRY, F. H.; VIERIA, M. E. A. G. **Otimização multiobjetivo de redes de abastecimento de água**. 2006. VI SEREA - Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água, João Pessoa (Brasil). Acesso em: 14 ago. 2017.

GÓMEZ, L. A.; SOUZA, A. C.; LEMOS, D.; VALLE, A.; MORARES, P. D. **Aplicação da programação de geométrica genética na otimização de perfis de vigas**. *Internacional Journal of knowledge Engineering and Manegement* – Universidade Federal de Santa Catarina. 2014

GOLDBERG, 1989 *apud* TICONA, 2003. Goldberg, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, MA. *apud* TICONA, Waldo Gonzalo Cancino. **Aplicação de Algoritmos Genéticos Multi-Objetivo para Alinhamento de Seqüências Biológicas**. 2003. 112 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Matemáticas e de Computação) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação – Universidade de São Paulo – São Carlos. Disponível em: Acesso em: 24 set. 2017.

GOLDBERG e HOLLAND, 1988 *apud* BITTENCOURT, 2008. D.E. Goldberg and J.H. Holland. **Genetic algorithms and machine learning**: Introduction to the special issue on genetic algorithms. *Machine Learning*, 3, 1988. *apud* BITTENCOURT, Guilherme. **Inteligência Computacional**. 2008. Disponível em: Acesso em: 24 set. 2017. (Apostila).

GROSKO, A. P.; GORSKI, J. R.; DIAS, J. S. **Algoritmo Genético**: Revisão Histórica e Exemplificação. CBIS 2006 - X Congresso Brasileiro de Informática em Saúde. 2006.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems**. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975.

JAMIESON RA, Beaumont C, Nguyen MH, Culshaw NG (2007) **Synconvergent ductile flow in variable-strength continental crust**: Numerical models with application to the western Grenville orogen. *Tectonics* 26: TC5005, doi:10.1029/2006TC002036

JONG, JC, 1998. **Otimizando Alinhamentos estrada com Algoritmos Genéticos**, Ph.D. dissertação, Universidade de Maryland, College Park, EUA.

KURI, Àngel; GALAVIZ, José. **Algoritmos Genéticos**. Editora: México IPN UNAM Fondo de Cultura Económica, 2002. 202 p.

LIMA, M. L. R. **Otimização topológica a paramétrica de vigas de concreto armado utilizando algoritmos genéticos**. 2011. 114 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil/Área de Concentração em Engenharia de Estruturas) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Acesso em: 23 set. 2017.

LIMA, Prof. Milton Luiz Paiva de. **Noções de topografia para projetos rodoviários**. 2008. Disponível em: <[http://www.topografiageral.com/Curso/capitulo 14.php](http://www.topografiageral.com/Curso/capitulo%2014.php)>. Acesso em: 22 nov. 2017.

LINDEN, R., **Algoritmos Genéticos**. Rio de Janeiro: Brasport, 2008.

MACEDO, Edvaldo Lins. **Noções de Topografia Para Projetos Rodoviários**. 2008. Disponível em: <<http://www.topografiageral.com/Curso/Download/Capitulo%2005.pdf>>

MANUAL DE DESIGN PARA ESTRADAS E PONTES (DMRB, 1992-2008).

MANZATO, Gustavo Garcia. **O traçado de uma estrada**. Disponível em: <[https://www.feb.unesp.br/Home/Departamentos343/EngenhariaCivil/gustavogarciamanzato/2017estra dasaula1b.pdf](https://www.feb.unesp.br/Home/Departamentos343/EngenhariaCivil/gustavogarciamanzato/2017estra%20da%20aula%201b.pdf)>. Acesso em: 22 nov. 2017.

MARTHA, Luiz Fernando. **Análise de estruturas: conceitos e métodos**. Elsevier Brasil. 2010 560 p.

MARTINEZ; JAMIESON; SALOMONS; RAO; ALVARRUIZ; ALVISI; FRANCHINI. **Utilização de um algoritmo genético híbrido para operação ótima de sistemas de abastecimento de água**. 2007. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522010000200011

MIYAZAWA, F.K.; SOUZA, C.C. **Introdução à Otimização Combinatória**. 2009. Disponível em <<https://www.ic.unicamp.br/~fkm/lectures/intro-otimizacao.pdf>>

MIRANDA, M. S. N. **Algoritmos Genéticos: Fundamentos e Aplicações**. Rio de Janeiro: GTA/UFRJ, 2009.

NETO, M. F. A.; HOLANDA, M. A.C. **Projeto de redes de distribuição de água por algoritmo genético**. IV SEREA - Seminário Hispano-Brasileiro sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água, João Pessoa. 2004. Acesso em: 28 set. 2017.

PEREIRA, Djalma Martins; RATTON, Eduardo; BLASI, Gilsa Fernandes. **Projeto geométrico de rodovias - parte I**. 2007. Disponível em: <<http://www.dtt.ufpr.br/TransportesA/Arquivos/ApostilaPG-ParteI-2008.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2017.

PIZZIRANI, Flávia. **Otimização topológica de estruturas utilizando algoritmos genéticos**. 2003. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/265124/1/Pizzirani_Flavia_M.pdf>

ROSA, T. O.; LUZ, H. S. **Conceitos Básicos de Algoritmos Genéticos: Teoria e Prática**. XI Encontro de Estudantes de Informática do Tocantins, 2009, Palmas. Centro Universitário Luterano de Palmas, 2009. p. 27-37. Disponível em: <<http://tinyurl.com/ylouf6>>. Acesso em: 24 set. 2017.

SILVA, F. B. (2011). **Algoritmos Genéticos para Otimização de Estruturas Reticuladas Baseadas em Modelos Adaptativos e Lagrangeano Aumentado**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 186 p.

SCHEID, Felipe Alex. **Modelagem Chuva-vazão utilizando Redes Neurais Artificiais: aplicação e estudo de caso numa bacia hidrográfica**. Edições acadêmicas. 2015.

SHAW, JFB e Howard, BE, 1982. **Expressway Route Optimization pelo OCP**, *Journal of Transportation Engenharia*, ASCE, 108 (3), 227-243.

TAT, CW e TAO, F., 2003. **Usando GIS e Algoritmos Genéticos em estrada Alinhamento Optimization**, *Inteligente Sistema de transporte*, 2, 1563-1567.

TICONA, Waldo Gonzalo Cancino. **Aplicação de Algoritmos Genéticos Multi-Objetivo para Alinhamento de Seqüências Biológicas**. 2003. 112 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Matemáticas e de Computação) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação – Universidade de São Paulo – São Carlos. Acesso em: 24 set. 2017.

WRIGHT, P. H; ASHFORD, R.J. **Transportation engineering: planning and design**. 1998. 4th ed. New York : J. Wiley.

ANEXO

ESTACA	COTA TOPOGRÁFICA (m)	COTA GREIDE (m)	COTAS VERMELHAS CORTE (m)	COTAS VERMELHAS ATERRO (m)
0	92,80	92,80	-	-
1	92,30	91,70	0,60	-
2	92,05	90,80	1,25	-
3	91,40	90,20	1,20	-
4	90,20	89,40	0,80	-
5	89,70	88,80	0,90	-
6	89,50	88,60	0,90	-
7	88,60	87,70	0,90	-
8	88,30	87,10	1,20	-
9	87,05	86,50	0,55	-
10	86,80	85,90	0,90	-
11	85,40	85,50	-	0,10
12	84,45	84,70	-	0,25
13	83,55	84,50	-	0,95
14	82,50	84,00	-	1,50
15	81,30	83,70	-	2,40
16	80,45	82,80	-	2,35
17	79,85	82,50	-	2,65
18	78,80	82,30	-	3,50
19	77,90	81,40	-	3,50
20	76,20	80,70	-	4,50
21	75,30	80,50	-	5,20
22	74,50	80,20	-	5,70
23	73,70	79,30	-	5,60
24	72,40	78,60	-	6,20
25	70,95	78,30	-	7,35
26	72,20	78,80	-	6,60
27	73,80	79,70	-	5,90
28	74,25	80,30	-	6,05
29	75,70	80,50	-	4,80
30	76,90	81,20	-	4,30
31	78,10	82,10	-	4,00
32	79,15	82,30	-	3,15
33	80,60	81,40	-	0,80
34	82,05	81,70	0,35	-
35	83,35	80,80	2,55	-
36	85,80	81,30	4,50	-
37	86,30	81,60	4,70	-

ESTACA	COTA TOPOGRÁFICA (m)	COTA GREIDE (m)	COTAS VERMELHAS CORTE (m)	COTAS VERMELHAS ATERRO (m)
38	87,55	82,30	5,25	-
39	89,05	83,00	6,05	-
40	90,40	83,50	6,90	-
41	92,10	84,40	7,70	-
42	94,10	84,70	9,40	-
43	94,60	84,90	9,70	-
44	95,30	85,70	9,60	-
45	96,30	86,50	9,80	-
46	97,20	85,60	11,60	-
47	97,95	86,40	11,55	-
48	98,70	87,10	11,60	-
49	100,10	87,80	12,30	-
50	100,90	88,10	12,80	-
51	101,30	88,30	13,00	-
52	101,85	89,00	12,85	-
53	102,40	89,80	12,60	-
54	102,45	90,70	11,75	-
55	102,60	91,40	11,20	-
56	101,50	90,70	10,80	-
57	100,80	90,50	10,30	-
58	99,70	89,60	10,10	-
59	98,70	88,70	10,00	-
60	97,10	87,80	9,30	-
61	95,80	87,60	8,20	-
62	94,30	87,10	7,20	-
63	93,10	86,60	6,50	-
64	91,70	86,40	5,30	-
65	90,90	85,50	5,40	-
66	88,95	84,80	4,15	-
67	87,85	83,90	3,95	-
68	85,10	83,20	1,90	-
69	83,70	82,30	1,40	-
70	83,60	82,10	1,50	-
71	83,20	81,70	1,50	-
72	82,50	81,10	1,40	-
73	81,10	80,50	0,60	-
74	80,60	80,30	0,30	-
75	79,70	80,00	-	0,30
76	78,60	79,80	-	1,20
77	77,55	79,60	-	2,05

ESTACA	COTA TOPOGRÁFICA (m)	COTA GREIDE (m)	COTAS VERMELHAS CORTE (m)	COTAS VERMELHAS ATERRO (m)
78	76,85	79,40	-	2,55
79	75,80	78,50	-	2,70
80	75,20	78,00	-	2,80
81	74,05	77,10	-	3,05
82	73,30	76,60	-	3,30
83	72,25	76,40	-	4,15
84	71,60	75,50	-	3,90
85	71,10	74,60	-	3,50
86	70,05	73,80	-	3,75
87	69,50	72,90	-	3,40
88	68,95	72,40	-	3,45
89	68,50	72,00	-	3,50
90	68,35	71,50	-	3,15
91	67,40	70,80	-	3,40
92	67,60	71,60	-	4,00
93	68,30	72,00	-	3,70
94	69,85	72,90	-	3,05
95	70,30	73,40	-	3,10
96	71,95	73,70	-	1,75
97	72,60	73,90	-	1,30
98	72,90	74,60	-	1,70
99	73,25	75,00	-	1,75
100	73,90	75,40	-	1,50
101	74,05	75,70	-	1,65
102	74,68	76,50	-	1,82
103	75,03	77,40	-	2,37
104	75,35	77,70	-	2,35
105	75,90	76,80	-	0,90
106	76,18	76,20	-	0,02