



Grupo de Estudo de Linhas de Transmissão-GLT

Inteligência Artificial aplicada ao projeto de estruturas para linhas de transmissão

Jean Mark Carvalho Oliveira
Pedro Henrique de O. Liberato

Pedro Henrique Rocha de M. Braga (*)
Ricardo de O. e B. Perucci

Tiago Corradi Mello

Engetower Engenharia e Consultoria Ltda.

RESUMO

Este Informe Técnico descreve a experiência da Engetower Engenharia na aplicação de conceitos e técnicas de Inteligência Artificial para acelerar e otimizar as soluções definidas ao longo do projeto de estruturas metálicas treliçadas para linhas de transmissão, com ênfase na etapa de detalhamento para fabricação e montagem das estruturas. Descreve-se sucintamente os resultados obtidos no uso de ferramentas baseadas em Algoritmos Genéticos e Redes Neurais para a tratativa de problemas concernentes ao desenvolvimento do projeto estrutural. Conclui-se que, no modelo de processo baseado no conceito BIM, a utilização de tais recursos é viável e possui expressivo potencial à ser explorado.

PALAVRAS-CHAVE

Torre treliçada, Algoritmos Genéticos, Inteligência Artificial, Linha de Transmissão, Detalhamento estrutural

1.0 - INTRODUÇÃO

O projeto de estruturas metálicas para linhas de transmissão tem início na fase de estimativas preliminares para os empreendimentos, quando são definidas as soluções estruturais, os tipos de estruturas e aplicações a serem adotadas, incluindo a estimativa de pesos das estruturas com as respectivas cargas sobre as fundações. Após essa fase inicial é elaborado o projeto básico estrutural e estudo para o projeto executivo, com a otimização da série de estruturas para o traçado definitivo e perfil topográfico da linha. Estabelecidas as definições do projeto, realiza-se o cálculo das estruturas e o dimensionamento final das barras e conexões.

Após a etapa de cálculo e dimensionamento, é realizado o detalhamento das estruturas, que consiste na materialização do modelo teórico que foi definido a partir da geometria e das hipóteses de carga determinadas por critérios elétricos e mecânico. Nesta fase do projeto devem ser incorporados detalhes como linhas de furação, conexões, dobras e recortes que possibilitem a criação de fichas de fabricação para máquinas CNC e desenhos para montagem da estrutura. A etapa de detalhamento representa mais de 75% do tempo de execução do projeto de uma estrutura sendo, portanto, um ponto crítico do processo produtivo.

Através da incorporação do conceito BIM (*Building Information Modeling*) no processo de desenvolvimento do projeto, o detalhamento passou a ser realizado pela modelagem tridimensional das estruturas a partir de uma silhueta constituída por linhas que contêm as informações necessárias para criação dos elementos estruturais, conforme descrito nos trabalhos de Oliveira *et al.* (1) e Perucci (2). Neste novo modelo de processo, as informações construtivas e o vínculo de interdependência entre as peças são preservados e compartilhados ao longo de todo o ciclo do projeto. A disponibilidade de informações digitalizadas característica desse método possibilita o uso de recursos computacionais e algoritmos de otimização para a redução do tempo gasto no desenvolvimento do projeto das estruturas e obtenção de melhores soluções.

O presente Informe Técnico apresenta aplicações de técnicas de Inteligência Artificial baseadas nos conceitos de Algoritmos Genéticos e Redes Neurais para a obtenção de soluções otimizadas para problemas relacionados ao

desenvolvimento de projetos de estruturas para linhas de transmissão, abrangendo as etapas de estudos preliminares do projeto da linha e de detalhamento das estruturas.

2.0 - ALGORITMOS GENÉTICOS

Os Algoritmos Genéticos se baseiam na Teoria da Evolução de Darwin, segundo a qual, por um mecanismo de seleção natural, ocorre um contínuo aprimoramento genético dos indivíduos de uma determinada espécie ao longo de sucessivas gerações, caracterizando assim um processo evolutivo da espécie. No contexto da computação, o conceito evolucionista de Darwin inspirou o desenvolvimento de algoritmos de otimização que realizam de maneira otimizada a busca de soluções em um espaço de estados. Através de técnicas que simulam o mecanismo de seleção natural, possibilita-se a convergência da busca por soluções ótimas mais rapidamente, uma vez que evita-se que o algoritmo explore desnecessariamente grupos de indivíduos que não possuem as características que atendem aos critérios de otimização definidos.

Como descrito por Russel & Norvig (3), os Algoritmos Genéticos iniciam com um conjunto de k estados aleatoriamente gerados, o qual é denominado população. Cada estado, chamado de indivíduo, é representado por um conjunto de valores de variáveis, em que cada valor corresponde a um gene do indivíduo. Através da função de avaliação (*fitness function*), cada indivíduo recebe um valor de pontuação em função do atendimento aos critérios de otimização definidos. Uma vez determinados os melhores indivíduos da população, realizam-se cruzamentos (*crossovers*) entre esses indivíduos de forma a se gerar uma nova população, na qual os indivíduos possuem características mescladas dos melhores indivíduos da população anterior. Esse procedimento se repete iterativamente ao longo de n gerações, de forma que se obtém indivíduos com características cada vez melhores.

Para garantir a adequada varredura de todo o espaço de possibilidades e evitar que a busca se restrinja a ótimos locais, é importante que haja diversidade genética nos indivíduos ao longo das gerações. Para tal, deve-se definir um número adequado de indivíduos na população inicial e além disso, o próprio algoritmo é programado para induzir mutações aleatórias nos indivíduos de forma a contribuir com a diversidade genética.

2.1 Algoritmos Genéticos aplicados ao detalhamento de estruturas

No contexto de detalhamento de estruturas metálicas, um indivíduo do Algoritmo Genético corresponde a uma determinada configuração, com suas características geométricas e de posicionamento representadas através de genes deste indivíduo. Cada característica é codificada em valores numéricos e representada por um gene, sendo que o conjunto de genes que descrevem o indivíduo compõe o seu código genético. A população, portanto, corresponde a um conjunto de possíveis configurações representadas por indivíduos. A população inicial do Algoritmo Genético é definida a partir da geração aleatória de indivíduos com valores de genes limitados pelas restrições pré-determinadas em função de limitações geométricas, espaciais, normativas ou outros critérios.

Os indivíduos da população são avaliados e classificados segundo requisitos e critérios de otimização que refletem as características desejáveis para a solução do problema em questão, como ausência de colisão entre as peças, redução da quantidade de operações necessárias para fabricação (recortes, dobras etc), dentre outros. Em função de sua classificação, realiza-se o cruzamento resultando em uma nova geração de indivíduos compostos por combinações das características dos indivíduos mais bem avaliados na população anterior. Dessa forma, ao longo de sucessivas gerações, ocorre um aprimoramento contínuo das soluções de maneira análoga ao mecanismo de seleção natural.

As mutações são efetivadas por meio da introdução de características aleatórias não necessariamente presentes no conjunto de características dos indivíduos daquela população e contribuem para assegurar a adequada abrangência da busca no espaço de soluções. Por fim, obtém-se configurações de detalhamento que atendem aos critérios de engenharia e de otimização definidos para o problema, geralmente superiores às soluções obtidas através dos métodos iterativos usuais, predominantemente manuais e empíricos.

2.2 Exemplos de aplicação

O conceito dos Algoritmos Genéticos pode ser aplicado para obtenção de soluções de inúmeros problemas no contexto de projeto e detalhamento de estruturas metálicas para linhas de transmissão. De maneira geral, para todos os problemas, a estrutura básica do algoritmo é estabelecida conforme descrito no item 2.1. No entanto, alguns aspectos como a codificação dos genes do indivíduo e a função de avaliação devem ser adaptadas de forma a se adequar às características e peculiaridades de cada problema. Alguns exemplos de aplicações que já foram desenvolvidas pela Engetower Engenharia, com suas respectivas características e resultados, estão sucintamente descritos nos itens seguintes.

2.2.1 Modelagem de trechos treliçados

O problema consiste em determinar a melhor configuração possível para o treliçamento de trechos da estrutura, considerando o posicionamento relativo entre as peças e outras características como necessidade de recortes, realização de excentricidades etc. O espaço de busca de soluções é composto por todas as possibilidades resultantes da análise combinatória entre todas as variáveis do problema, sendo usualmente tão amplo que pelas abordagens convencionais é inviável a sua varredura completa.

Dentre as possíveis soluções para o problema são consideradas válidas aquelas em que não há colisão entre os objetos e em que são atendidas as restrições definidas pelas normas de projeto e limitações geométricas. Existem inúmeras soluções que atendem a estes requisitos, sendo necessário portanto classificar as soluções através da função de avaliação adequada para seleção da melhor solução.

A Figura 1 ilustra de maneira simplificada uma possível configuração de um trecho isolado de uma estrutura que, através da codificação adequada, pode ser representada por um indivíduo do Algoritmo Genético.

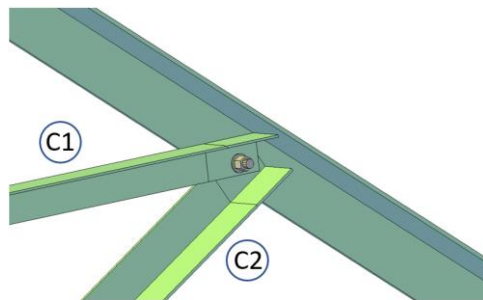


FIGURA 1 – Exemplo de trecho isolado

A Figura 2 exemplifica uma configuração mais abrangente, composta por dezenas de objetos, e se aproxima dos problemas reais que são tratados por essa abordagem.

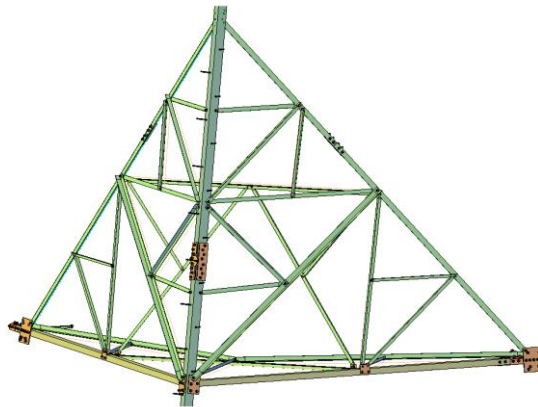


FIGURA 2 – Exemplo de configuração típica

Cada configuração é descrita através do conjunto de características de cada objeto que compõe o problema. Há 3 tipos de genes utilizados de acordo com a característica a ser representada:

- Tipo “numérico”: Consiste em um número real, que representa uma característica que varia continuamente em um intervalo limitado pelas restrições do problema. Exemplos: valor do trusquino (eixo de furação) das cantoneiras, valor da excentricidade de ligações etc.
- Tipo “binário”: Representa uma característica que pode ser descrita por representação binária (1/0). Exemplos: direção da aba das cantoneiras (cima/baixo), posição da aba não apoiada da cantoneira em relação à estrutura (dentro/fora) etc.

- Tipo “TSP”¹: Sequência de valores únicos e sequenciais que se recombina por permutação, descrevendo o posicionamento relativo entre objetos em uma ligação. Exemplo: ordem de apoio de cantoneiras em uma ligação.

A Figura 3 demonstra um exemplo de código genético utilizado para representar o indivíduo correspondente ao caso trivial do problema descrito pela Figura 1.

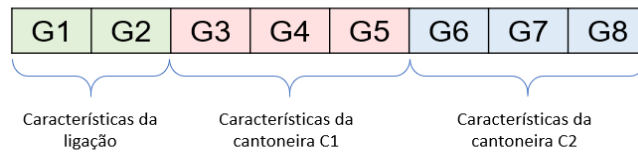


FIGURA 3 – Código genético do indivíduo

A Tabela abaixo exhibe a descrição das características representadas por cada gene da Figura 3:

TABELA – Descrição dos genes

	Gene	Característica	Tipo
Ligação	G1	Valor de excentricidade aplicado na ligação entre as cantoneiras	Numérico
	G2	Ordem de apoio das cantoneiras na ligação	TSP
Cantoneira C1	G3	Valor de trusquino	Numérico
	G4	Direção da aba - cima/baixo	Binário
	G5	Posicionamento da cantoneira em relação a estrutura - dentro/fora	Binário
Cantoneira C2	G6	Valor de trusquino	Numérico
	G7	Direção da aba - cima/baixo	Binário
	G8	Posicionamento da cantoneira em relação a estrutura - dentro/fora	Binário

Definida a estrutura do problema, a população inicial de soluções é gerada aleatoriamente com n indivíduos possuidores de genes com valores limitados pelas restrições pré-definidas. Então, os indivíduos são avaliados e, a partir do cruzamento entre os indivíduos de melhor desempenho, são gerados novos indivíduos que também são avaliados e assim sucessivamente. A Figura 4 demonstra a lógica do mecanismo de cruzamento entre os indivíduos.

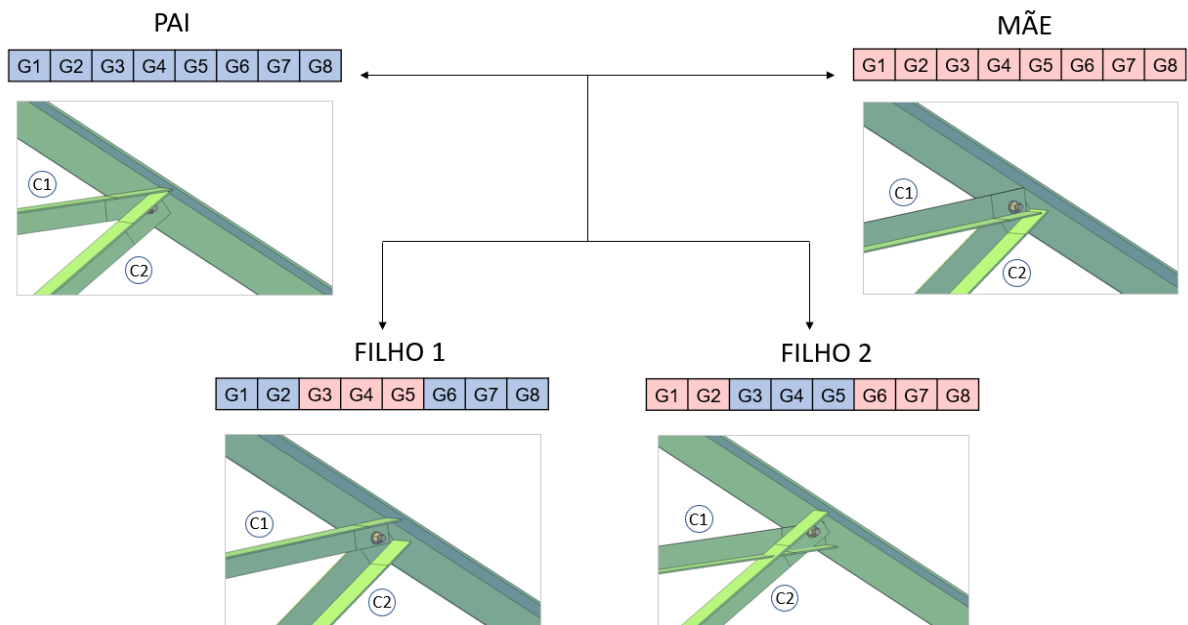


FIGURA 4 – Cruzamento entre indivíduos do Algoritmo Genético

¹ Nomenclatura alusiva ao TSP (*Travelling Salesman Problem*), conhecido em português como “Problema do Caixeiro Viajante”, que é um problema de otimização clássico cuja solução ótima corresponde à rota sequencial mais curta entre cidades que inclua todas as cidades do conjunto sem que haja repetição de cidades no percurso.

A avaliação dos indivíduos gerados é realizada através de uma função analítica que de acordo com as características do problema, atribui uma pontuação correspondente ao desempenho de cada indivíduo. Na avaliação do indivíduo, as características indesejáveis são penalizadas e recebem valores ponderados por fatores de peso que somados resultam na pontuação final. Para esse tipo de abordagem, o algoritmo é configurado para procurar minimizar esse valor por meio de cruzamentos e mutações ao longo das gerações.

No caso ilustrativo representado pela Figura 1, as características que seriam proporcionalmente penalizadas pela função de avaliação seriam a variação de trusquino das cantoneiras, o valor de excentricidade aplicado à ligação e a necessidade de realização de recortes nas cantoneiras. Assim, as configurações que possuam menos excentricidades nas ligações em relação ao modelo teórico e demandem menor quantidade de operações de fabricação serão melhores avaliadas em relação às demais, refletindo os parâmetros de otimização baseados na obtenção de melhor comportamento estrutural e menor tempo e custo de fabricação da estrutura.

Dessa forma, de acordo com os critérios adotados para o problema deste exemplo, a solução final encontrada deve obedecer à seguinte ordem de preferência:

1. Cantoneiras posicionada sem necessidade de desvio de trusquino, sem excentricidade e sem recorte
2. Cantoneiras apenas com desvio de trusquino
3. Cantoneiras apenas com excentricidade
4. Cantoneiras com desvio de trusquino e com excentricidade
5. Cantoneiras com recortes

Estrutura análoga é adotada para codificação de problemas mais complexos, como a configuração ilustrada pela Figura 2, que tem suas características descritas por um código genético composto por centenas de genes. Para problemas mais abrangentes, a codificação do indivíduo e a função de avaliação são devidamente adaptados de forma a se obter soluções que atendam às peculiaridades do problema e aos critérios de otimização definidos.

Observa-se que, além de possibilitar uma redução drástica no tempo dispendido na etapa de detalhamento da estrutura, as soluções obtidas por meio desse tratamento tendem a ser superiores às soluções definidas pelos métodos de detalhamento convencionais, resultando em estruturas com melhor comportamento estrutural e tempo e custo de fabricação reduzidos.

2.2.2 Definição de comprimento dos montantes

Torres treliçadas para linhas de transmissão são constituídas de diversos elementos estruturais, principalmente chapas e cantoneiras, que, por sua vez, são classificados de acordo com suas características e funções estruturais. Dentre os tipos de cantoneiras utilizados em estruturas desse tipo estão as cantoneiras do tipo montante, que perfazem o contorno externo da estrutura e se caracterizam por serem os elementos que sofrem esforços mais elevados e, conseqüentemente, possuem os maiores perfis e exercem função estrutural de elevada responsabilidade.

Para a definição do comprimento a ser adotado para os montantes de uma estrutura diversos fatores devem ser considerados, tanto no aspecto estrutural quanto construtivo. O algoritmo desenvolvido para este problema tem por objetivo definir o comprimento dos montantes da torre de forma a se otimizar o aproveitamento dos perfis pelo fabricante, reduzindo tempo e custo de fabricação, bem como atender de maneira satisfatória aos requisitos construtivos para a montagem das estruturas.

O problema é constituído por um conjunto de cantoneiras do tipo montante que devem ter o seu comprimento definido atendendo às restrições geométricas e topológicas da estrutura, que dependem das conexões e emendas entre os elementos, divisão modular dos componentes da torre etc. A Figura 5 ilustra dois montantes com suas respectivas pontas, demonstrando a relação de interdependência existente entre as variáveis do problema. Observa-se que, a ponta 2 (P2) do montante 1 está vinculada à ponta 1 (P1) do montante 2, de forma que a redução do valor em uma implica na adição do mesmo valor na outra, mantendo-se a distância necessária para realização da conexão por meio de emenda entre as peças, conforme definido pelo cálculo. Para fins de simplificação foram omitidos da ilustração os demais elementos que compõe o problema.

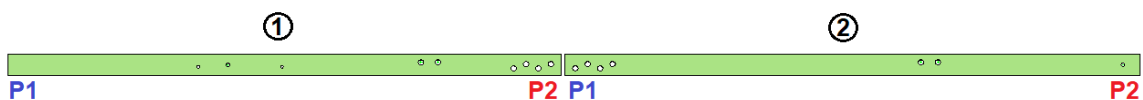


Figura 5 – Montantes colineares com indicação de pontas

O código genético adotado para a descrição da configuração do problema é composto por genes do tipo “numérico”, conforme definição do item 2.2.1, em que cada gene representa a variação do comprimento em cada ponta de cada cantoneira do tipo montante, tendo seu valor limitado pelas restrições determinadas em etapa de pré-tratamento. Através dessa codificação, são gerados indivíduos avaliados de forma que a diferença do comprimento de cada montante em relação aos comprimentos definidos como ideais é proporcionalmente penalizada. Assim, por meio dos mecanismos de seleção e cruzamento, o algoritmo converge para a solução de combinação de comprimentos de montantes que melhor atenda aos critérios de otimização pré-definidos.

Os resultados obtidos pelo uso dessa ferramenta indicam que as soluções definidas por meio do Algoritmo Genético são consideravelmente mais otimizadas que as soluções obtidas por métodos iterativos manuais e empíricos, superando em mais de 50% o número de montantes da estrutura com comprimentos equivalentes ou muito próximos aos ideais em comparação aos métodos usuais.

2.2.3 Posicionamento de blocos e descrições em desenhos 2D

Desenhos bidimensionais representativos dos componentes para montagem e fabricação usualmente compõe a documentação final do projeto de estruturas. No método de detalhamento das estruturas por meio do software de modelagem tridimensional, é utilizado um algoritmo para a extração automática das características geométricas do modelo e a plotagem para representação em um formato de desenho em conformidade com as normas e convenções de projeto.

Na geração dos desenhos é necessária a inserção e posicionamento dos elementos descritivos das peças de maneira legível e organizada, sem que haja sobreposição de elementos. Para que a geração automática seja realizada de maneira adequada e satisfatória, desenvolveu-se um Algoritmo Genético para a definição do posicionamento desses elementos descritivos (blocos de posição, textos de descrição das peças etc).

Para a codificação deste problema, cada elemento descritivo é tratado como um polígono com seu posicionamento no plano do desenho representado por um par de coordenadas cartesianas referentes ao seu ponto central. Um indivíduo do algoritmo consiste no conjunto de elementos descritivos com suas respectivas posições em que os genes do seu código genético correspondem aos valores das coordenadas de posicionamento dos elementos, com sua faixa de variação limitada pelas dimensões do formato do desenho.

O algoritmo evolui através da geração e combinação de genes dos indivíduos que são avaliados quanto ao desempenho por critérios de penalização na pontuação de forma que, ao longo de sua execução, os elementos são induzidos a ficar o mais próximo possível das peças às quais as descrições se referem, atendendo às restrições pré-definidas e sem que haja qualquer sobreposição entre objetos constituintes do desenho. A Figura 6 ilustra configurações correspondentes ao trecho isolado de um desenho para exemplificação do mecanismo de evolução de indivíduos ao longo de n gerações.

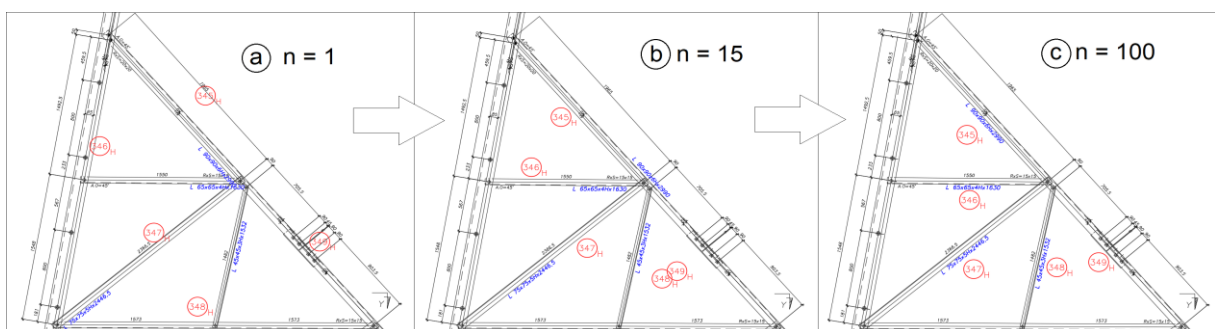


FIGURA 6 – Evolução do Algoritmo Genético ao longo de n gerações

A Figura 6 - (a) corresponde a configuração de um indivíduo da 1ª geração, na qual observa-se a existência de sobreposição de objetos, blocos indicadores de posição distantes das peças etc. Na Figura 6 - (b) nota-se a evolução da solução em um indivíduo da 15ª geração, no entanto nesse estágio ainda há algumas sobreposições de objetos além de outras características que contrariam a convenção adotada para os desenhos. A Figura 6 - (c) representa um indivíduo da 100ª geração, em que todos os critérios de otimização foram atendidos, demonstrando a eficácia do algoritmo na convergência para uma solução otimizada. Dessa forma, o uso dessa ferramenta baseada em Algoritmos Genéticos possibilita a geração automática de desenhos complexos atendendo satisfatoriamente aos critérios normativos de legibilidade.

3.0 - REDES NEURAIS

Redes Neurais Artificiais (RNA) são técnicas computacionais inspiradas no processo de aprendizado natural, em que através de um sistema nervoso de múltiplas camadas ocorrem milhões de conexões e sinapses entre os neurônios constituintes do sistema. A partir desse conceito, foram desenvolvidos diversos modelos computacionais e matemáticos que, embora bem mais simplificados que o sistema natural, simulam uma rede neural natural e possibilitam que um algoritmo aprenda progressivamente a partir da experiência e por analogia utilize esse aprendizado para realizar predições para novas informações.

O funcionamento das unidades análogas aos neurônios em uma RNA consiste na recepção de sinais de entrada por cada unidade, que são multiplicados por um valor ou peso e, a partir da soma ponderada desses sinais, pode ser atingido um valor de excitação necessário para que a unidade produza determinado valor de saída.

A rede é treinada com dados de entrada rotulados para os quais gera uma predição e, pela comparação com o valor correto do rótulo, aplica as devidas correções nos pesos de suas unidades constituintes de forma a minimizar o erro. Essa etapa se repete sucessivamente para todo o conjunto de dados de treinamento, de forma que a rede em treinamento para classificação ou para regressão melhore progressivamente a sua acurácia ou reduza o seu erro, respectivamente. Existem diversos modelos de redes neurais e a definição da arquitetura e hiperparâmetros de uma rede trata-se de extenso campo de estudo em que existem diversas possibilidades, cada qual com as suas peculiaridades.

3.1 Redes Neurais aplicadas ao projeto de estruturas

Os resultados obtidos por Kim *et al.* (4) demonstram a aplicabilidade das Redes Neurais para a otimização do projeto de estruturas treliçadas. Conforme verificado por Fonseca (5), Redes Neurais podem ser treinadas para a predição de esforços em barras de estruturas treliçadas parametrizadas em substituição a programas de análise estrutural. Há ainda o potencial de utilização de Redes Neurais para a classificação e definição de detalhamento de trechos da estrutura em função dos seus elementos constituintes e suas características absolutas e relativas etc.

As Redes Neurais são capazes de reconhecer padrões implícitos que não são evidentes para a percepção humana, o que contribui para elevar a versatilidade e o potencial do método para o tratamento de problemas no contexto de projetos de estruturas metálicas para linhas de transmissão. No entanto, um fator limitante de sua utilização é a necessidade intrínseca da existência de conjuntos com volume de dados suficientes para a viabilização do treinamento da rede e o adequado aprendizado.

3.2 Exemplo de aplicação de Redes Neurais

A partir do conjunto de dados digitalizados e disponíveis no acervo da Engetower, foram desenvolvidas ferramentas baseadas em Redes Neurais para o tratamento de problemas e atendimento à demandas existentes ao longo do curso de desenvolvimento do projeto de estruturas. Segue abaixo um exemplo de utilização de uma Rede Neural na etapa de estimativas preliminares do projeto.

3.2.1 Estimativa do peso de estruturas

Na fase de estudos iniciais do projeto realiza-se a estimativa de peso das estruturas e de cargas sobre as fundações. Usualmente essa estimativa é feita a partir da analogia com estruturas semelhantes de projetos anteriores que são redimensionadas e adaptadas às condições de carregamento e demais peculiaridades do novo projeto. Dessa forma, geralmente obtém-se estimativas de peso com variação inferior a 5% em relação ao peso real, demonstrando a eficácia do método. No entanto todo esse processo é relativamente demorado, uma vez que é realizado para cada estrutura da série. Assim, visando reduzir o tempo gasto nessa etapa do projeto, propôs-se o desenvolvimento de uma Rede Neural para predição dos pesos das estruturas em função das definições preliminares do projeto.

Para o desenvolvimento da ferramenta, utilizou-se o acervo da Engetower que conta com o histórico de milhares de projetos de estruturas para linhas de transmissão com todas as informações relativas às definições dos projetos e das estruturas. Realizou-se o tratamento adequado destes dados, selecionando características geométricas e de carregamento das estruturas com os respectivos pesos correspondentes às alturas de suas diversas configurações. De posse dos dados devidamente tratados, com cada entrada do conjunto de dados de treinamento correspondendo às características e definições prévias do projeto de uma determinada estrutura e o respectivo rótulo correspondendo aos pesos daquela estrutura, passou-se à implementação e treinamento da Rede Neural. Após o treinamento e adequada calibração dos hiperparâmetros da rede, obteve-se uma ferramenta capaz de prever o peso de estruturas a partir da inserção dos dados de entrada.

A predição do peso de uma estrutura a partir de variáveis de entrada consiste em um problema típico de regressão e a métrica utilizada para avaliar o seu desempenho foi o erro quadrático médio que, para a rede desenvolvida,

demonstrou ser tão baixo quanto o erro quando a estimativa é realizada pelo método usual. A Rede Neural, porém, diferencia-se por realizar a estimativa de pesos instantaneamente, acelerando consideravelmente a etapa inicial de desenvolvimento do projeto. Tal desempenho mostrou-se bastante satisfatório, demonstrando a validade dessa abordagem para a tratativa desse tipo de problema.

4.0 - CONCLUSÃO

A digitalização e compartilhamento de informações decorrentes da implementação do conceito BIM no processo de projeto de estruturas metálicas para linhas de transmissão possibilita a exploração de recursos baseados em Inteligência Artificial para o tratamento de dados e desenvolvimento de soluções ao longo do projeto. A experiência da Engetower na aplicação dos conceitos dos Algoritmos Genéticos e Redes Neurais para solução de problemas típicos do desenvolvimento de projetos estruturais demonstrou ser uma abordagem viável e eficaz, uma vez que os resultados obtidos foram satisfatórios e atenderam aos objetivos propostos.

As soluções definidas por meio das ferramentas baseadas em Algoritmos Genéticos demonstraram ser, no geral, superiores às adotadas pelos métodos usuais. Acredita-se que tal resultado seja devido à capacidade do algoritmo de explorar um espaço de busca de soluções muito superior ao que é usualmente explorado por métodos empíricos e manuais. O uso das ferramentas possibilitou, além da obtenção de soluções mais otimizadas, significativa redução no tempo dispendido na etapa de detalhamento das estruturas, proporcionando portanto ganhos de natureza técnica e econômica.

Os resultados obtidos com o uso de Redes Neurais apresentaram vantagens principalmente em relação à redução de tempo de execução de etapas específicas do projeto em comparação aos métodos usuais. A necessidade de disponibilidade prévia de conjuntos de dados demonstrou ser um fator limitante do método, restringindo a sua aplicação. No entanto, tal limitação tende a ser superada à medida que o volume de informações digitalizadas aumenta com o desenvolvimento contínuo de novos projetos que incorporam o conceito BIM.

Por fim, destaca-se o potencial de exploração de técnicas de Inteligência Artificial para acelerar e otimizar a obtenção de soluções ao longo do desenvolvimento do projeto de estruturas como uma possibilidade intrínseca ao novo modelo de processo proposto nesta nova era de informações digitalizadas e integradas, resultando em um incremento na qualidade e eficiência do processo como um todo.

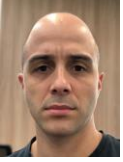
5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) OLIVEIRA, J. M. C. *et al* - *Implementação da Modelagem Tridimensional no Projeto de Torres Treliçadas para Linhas de Transmissão*. XXIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE – Curitiba, Brasil, 2017.
- (2) PERUCCI, R. de O. e B – *Implementação da tecnologia Building Information Modeling (BIM) em projetos de estruturas para linhas de transmissão*. Trabalho de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.
- (3) RUSSEL, S. J., & NORVIG – *Artificial intelligence: A modern approach*. 3 ed. Upper Saddle River, N.J.; New Delhi: Prentice Hall/Pearson Education, 2003.
- (4) KIM, Seong Beom *et al*. - *Optimum Design of Truss Structures using Neural Network*. Seoul-the International Conference on Sustainable Building Asia - Seoul, South Korea, 2007.
- (5) FONSECA, Marcelo da - *Otimização de estruturas treliçadas planas e espaciais sob carregamentos estáticos e dinâmicos, usando algoritmos genéticos e redes neurais*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, 2007.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Jean Mark Carvalho Oliveira - Nascido em Teófilo Otoni/MG, em 11/01/1985, graduou-se em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais no ano de 2009. Atua desde 2007 na Engetower Engenharia na elaboração de projetos de estruturas metálicas para LT's e SE's.



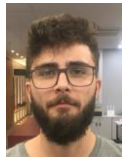
Pedro Henrique de O. Liberato - Nascido em Belo Horizonte/MG, em 21/02/1982, graduou-se em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais no ano de 2006. Possui pós graduação em Gestão de Projetos pela Fundação Dom Cabral. Trabalhou com desenvolvimento de softwares para o AutoCAD com a tecnologia ObjectARX .NET durante dois anos. Trabalhou também durante nove anos com desenvolvimento de sistemas WEB e aplicativos móveis para diversos segmentos. Trabalha na Engetower Engenharia desde 2015 no setor de Tecnologia da Informação desenvolvendo o software de detalhamento 3D.



Pedro Henrique Rocha de Menezes Braga (*) - Nascido em Belo Horizonte/MG, em 25/03/1991, graduou-se em Engenharia Mecânica pela Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais no ano de 2018. Atua desde 2017 na Engetower Engenharia na elaboração de projetos de estruturas metálicas para LT's e SE's.



Ricardo de O. e B. Perucci - Nascido em Belo Horizonte/MG, em 22/06/1994, graduou-se em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais no ano de 2018. Atua desde 2016 na Engetower Engenharia na elaboração de projetos de estruturas metálicas para LT's e SE's.



Tiago Corradi Mello - Nascido em Belo Horizonte/MG, em 12/07/1996, estuda Engenharia Civil na Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais com previsão de conclusão em 2019. Atua desde 2016 na Engetower Engenharia como estagiário no setor de engenharia.