

4

Formulação matemática e implementação computacional

4.1

Introdução

Neste capítulo é apresentada a formulação matemática do problema de otimização da configuração geométrica de *risers* rígidos RCHA, assim como sua implementação computacional. São apresentados os principais aspectos do processo de otimização, tais como as variáveis de projeto, as funções objetivo e as restrições associadas ao problema. Os programas computacionais usados no processo de otimização são apresentados e seu funcionamento é explicado detalhadamente.

4.2

Descrição do *riser* RCHA

O RCHA (*riser* em catenária hidro-amortecido) (Mourelle et. al, 2010) consiste em um *riser* rígido composto por vários trechos de flutuadores distribuídos ao longo de seu comprimento, conforme ilustrado na Figura 4.1. Os flutuadores, denominados aqui de amortecedores hidrodinâmicos, desempenham um papel fundamental no comportamento estrutural desses *risers*, pois são capazes de absorver grande parte dos movimentos que lhes são transmitidos pelas unidades flutuantes e, com isso, conseguem atenuar a propagação das ondas compressivas de grandes amplitudes ao longo de seus comprimentos. Essa diminuição nas amplitudes das ondas compressivas acarreta uma redução nos níveis de tensões solicitantes, sobretudo nas regiões críticas onde os *risers* entram em contato com o fundo do mar (conhecidas como *Touch Down Zone*, ou *TDZ*) e, conseqüentemente, faz com que os RCHA ofereçam uma maior resistência com relação ao fenômeno da flambagem. Além disso, a redução das amplitudes dos movimentos dos *risers*, diminui o efeito provocado pelas vibrações induzidas por vórtices (*VIV*), que se originam com a passagem das correntes marítimas e, com isso, aumenta a vida útil dos *risers*, com relação à fadiga.

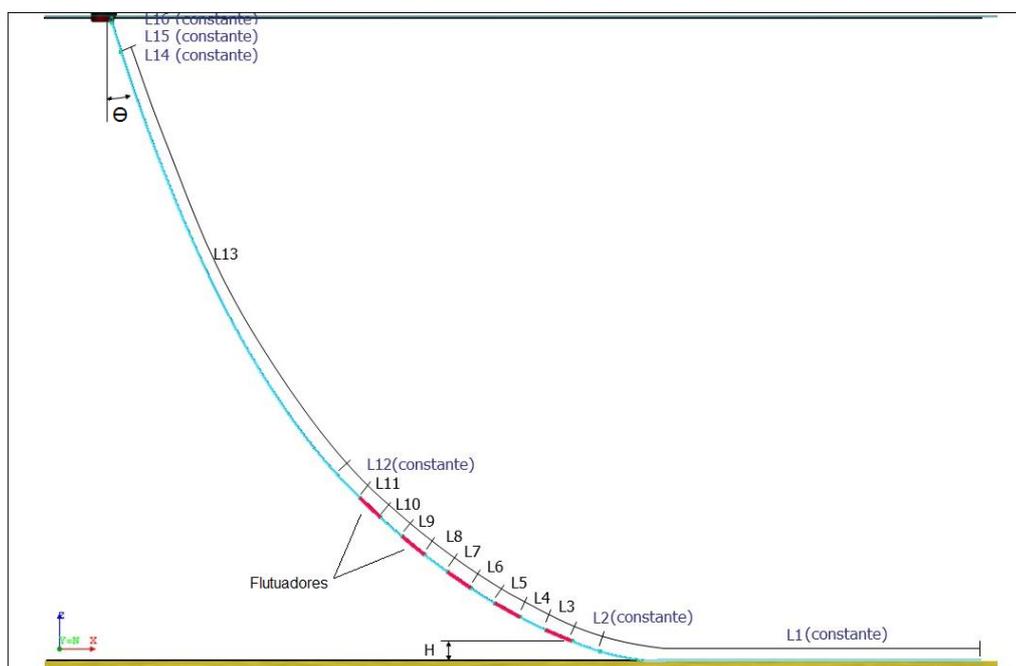


Figura 4.1 – Configuração geométrica do *riser* RCHA

De uma maneira simplificada, os amortecedores hidrodinâmicos podem ser entendidos como materiais de revestimento, de baixa densidade (*coating*) (Figura 4.2.a) e fácil instalação, que, distribuídos em trechos ao longo dos *risers*, são capazes de aliviar o peso total submerso desses trechos.

A composição final do RCHA, ou seja, a quantidade de amortecedores, os comprimentos de cada um (L_f) e os espaçamentos entre eles ($Spac$) (Figura 4.2.b), depende de diversos fatores, tais como a intensidade das condições ambientais (ondas, ventos e correntes), a lâmina d'água na região considerada, as propriedades dos materiais que compõem os *risers*, os custos associados aos amortecedores e ao processo de instalação, dentre outros.

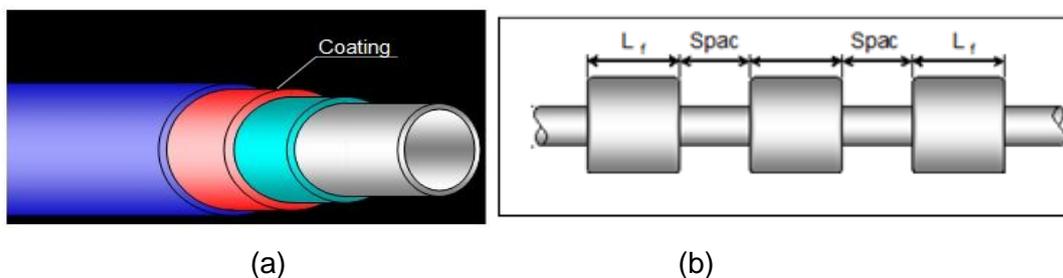


Figura 4.2. Disposição dos flutuadores no *riser* (Anflex, 2013)

Portanto, o grande desafio deste trabalho é usar técnicas de otimização para a obtenção de configurações “ótimas” de *risers* RCHA buscando satisfazer critérios técnicos e econômicos.

4.3

Formulação matemática

Com relação aos critérios técnicos (ou seja, relacionados ao comportamento estrutural), o objetivo deste trabalho é obter configurações geométricas de *risers* RCHA capazes de minimizar a distribuição de esforços solicitantes ao longo de sua estrutura ou, equivalentemente, minimizar o nível de tensões atuantes (por exemplo as tensões de *von Mises*). Por outro lado, sob o ponto de vista econômico, é importante buscar configurações que minimizem o custo total envolvido (por exemplo, os custos dos amortecedores e do processo de instalação) ou, em outras palavras, o objetivo é minimizar os comprimentos dos trechos de amortecedores hidrodinâmicos.

Trata-se portanto de um problema multiobjetivo em que se procura minimizar, simultaneamente, as tensões ao longo do *riser* e os comprimentos dos amortecedores. É importante ressaltar que, o foco do processo de otimização desenvolvido nesse trabalho será a região crítica *TDZ* (onde ocorre o contato entre o *riser* e o fundo do mar) e, portanto, o domínio do problema será o trecho de *riser* compreendido entre a âncora e o seu ponto médio (o que garante que a *TDZ* estará contida nesse domínio).

4.3.1

Definição do problema de otimização

4.3.1.1

Variáveis de projeto

A caracterização de um problema de otimização começa com a definição das variáveis de projeto, uma vez que tanto as funções objetivo quanto as restrições, são definidas em relação a essas variáveis. A não consideração de alguma variável significativa pode prejudicar a qualidade das soluções, pois isto restringe o espaço de busca, limitando o conjunto de soluções da Fronteira de Pareto e, possivelmente, excluindo a solução ótima. Por este motivo, o projetista deve escolher cuidadosamente

as variáveis mais representativas, ou aquelas que, de acordo com sua experiência, são mais importantes na caracterização das respostas ou soluções do problema.

O desenvolvimento deste trabalho, partiu de um modelo de *riser*, proposto por engenheiros da Petrobras. Trata-se de um *riser* em catenária, composto por dezesseis segmentos, onde sua extremidade inferior está conectada à âncora e a superior está conectada à unidade flutuante, conforme mostrado na Figura 4.2.

Os segmentos do *riser*, indicados como flutuadores (ou “Tubo_AH”) na Figura 4.3, representam os amortecedores hidrodinâmicos. Esta figura indica ainda quais as variáveis (comprimentos dos segmentos e ângulo de topo) que poderão ter seus valores modificados durante o processo de otimização.

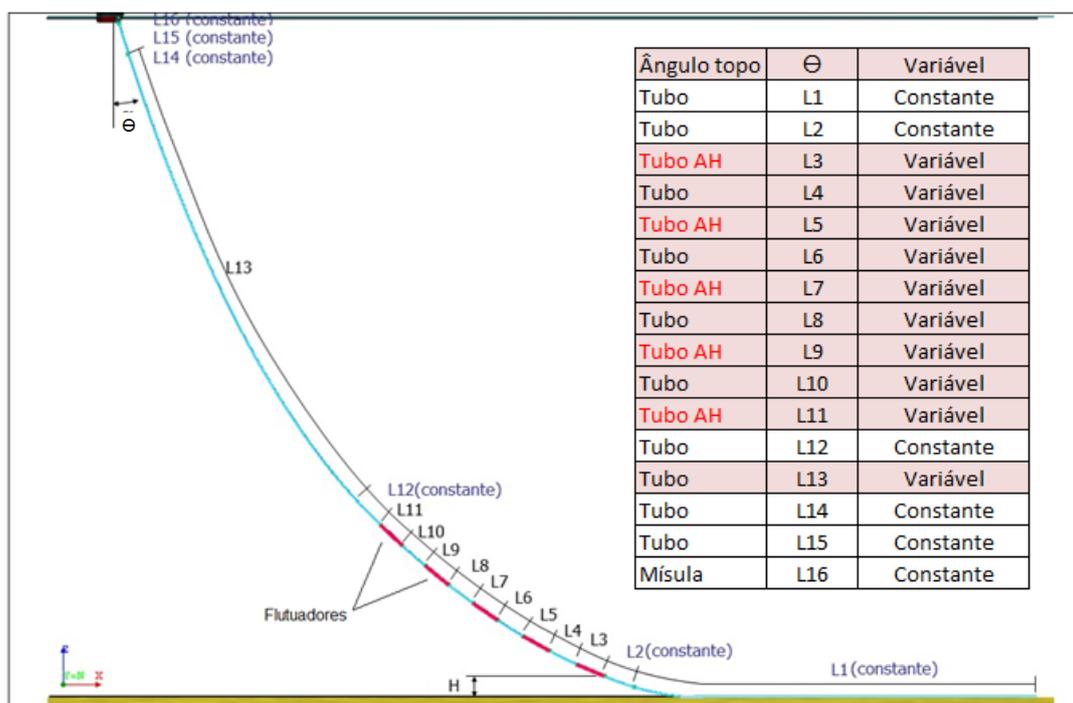


Figura 4.3 – Variáveis de entrada da configuração RCHA

Para este estudo, serão consideradas as seguintes variáveis de projeto:

1. Θ : ângulo de topo (*Ang_Top*);
2. L3: comprimento do segmento 3 (material “Tubo AH”);
3. L4: comprimento do segmento 4 (material “Tubo”);
4. L5: comprimento do segmento 5 (material “Tubo_AH”);
5. L6: comprimento do segmento 6 (material “Tubo”);
6. L7: comprimento do segmento 7 (material “Tubo_AH”);

7. L8: comprimento do segmento 8 (material “Tubo”);
8. L9: comprimento do segmento 9 (material “Tubo_AH”);
9. L10: comprimento do segmento 10 (material “Tubo”);
10. L11: comprimento do segmento 11 (material “Tubo_AH”);
11. L13: comprimento do segmento 13 (material “Tubo”);

4.3.1.2

Funções objetivo

O problema proposto neste trabalho consiste na minimização da variação de amplitude (diferença entre os valores máximos e mínimos) das tensões de *von Mises* avaliadas ao longo *riser* no intervalo de 0 a $L/2$ (onde, nesse intervalo, se localiza a região crítica *TDZ*), assim como a minimização dos comprimentos dos amortecedores. Portanto, a escolha desses objetivos foi baseada em dois critérios: um critério técnico, ou estrutural, associado à distribuição de tensões ao longo do *riser*, e um critério econômico, ou referente ao custo do material, diretamente associado aos comprimentos dos trechos com amortecedores. Como se pode observar, esses objetivos são conflitantes, uma vez que, aumentando-se os comprimentos dos amortecedores, normalmente ocorre uma redução nos valores das tensões atuantes, indicando que se trata de um problema multiobjetivo.

O problema de otimização da configuração do *riser* RCHA é estudado segundo três abordagens:

i. Minimização da maior variação de amplitude das tensões de *von Mises* ao longo do *riser* (problema mono-objetivo ou *SOOP*). Esta variação, representada por “ ΔVME ” é definida como a diferença entre a tensão máxima e mínima ocorrida em um ponto específico do *riser*, ou seja:

$$f_{obj\ i} = maior\ \Delta VME = maior\ (VME\ max - VME\ min) \quad (4.1)$$

ii. Minimização do comprimento dos trechos de amortecedores (problema mono-objetivo ou *SOOP*). O comprimento total dos amortecedores corresponde à soma de todos os trechos de flutuadores (L_{tf}) cujo material é do tipo “Tubo_AH”. Dessa maneira, a função objetivo é definida como:

$$f_{obj\ ii} = L_{tf} = L_3 + L_5 + L_7 + L_9 + L_{11} \quad (4.2)$$

iii. Minimização das variações de amplitude das tensões de *von Mises* e dos comprimentos dos amortecedores (problema multiobjetivo ou *MOOP*). Nesse caso, a função objetivo pode ser dada como:

$$f_{obj\ iii} = [f_{obj\ i} , f_{obj\ ii}] \quad (4.3)$$

4.3.1.3

Restrições

Cada configuração gerada ao final do processo de otimização deve atender a certas restrições (ou critérios de engenharia) para que sejam consideradas soluções viáveis. As configurações intermediárias, geradas durante os passos de otimização mas que não satisfaçam esses critérios são eliminadas no processo. No presente trabalho, as restrições consideradas se baseiam em critérios operacionais e estruturais. Como restrição operacional, define-se a altura mínima (H) do *riser* (Figura 4.4). Esta restrição é importante no sentido de evitar que algum trecho de *riser* com flutuadores possa tocar no fundo do mar. Como restrição estrutural, é adotado o fator de utilização da norma *DNV-OS-F201*, segundo a qual, as tensões atuantes devem ter valores inferiores às tensões admissíveis, ou seja, os valores do coeficiente *DNL*, avaliados ao longo do *riser*, devem ser inferiores a "1", ou seja:

$$DNL = \frac{Von\ Mises}{Tensão\ Admissível} < 1 \quad (4.4)$$

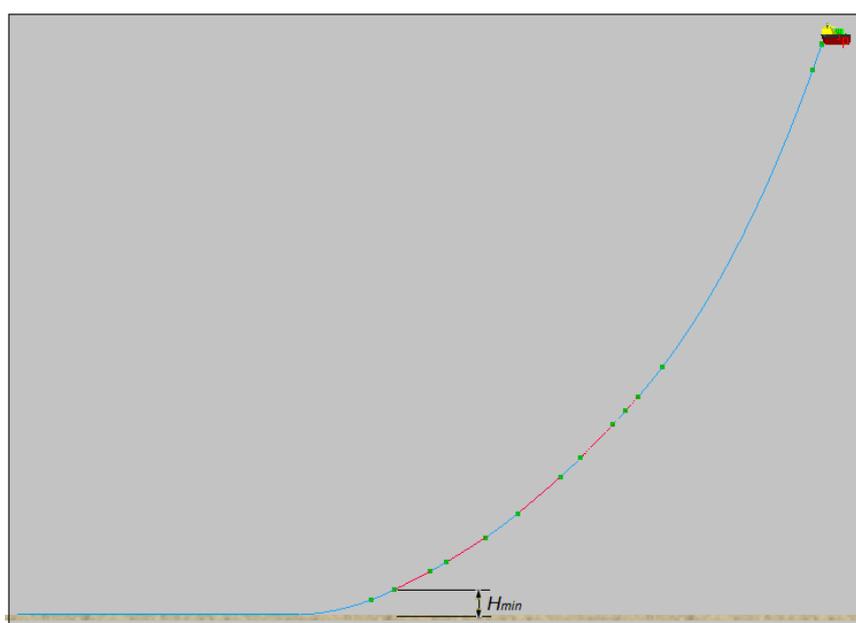


Figura 4.4 – Altura mínima (H) do primeiro trecho com amortecedores.

4.4

Implementação computacional

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados dois programas computacionais: um responsável pela análise estrutural dinâmica do *riser* (determinação dos deslocamentos, esforços e tensões ao longo do tempo) e outro responsável pelo processo de otimização. Para análise dinâmica foi utilizado o programa Anflex (Mourelle, 2001), desenvolvido pela Petrobras, e que tem como objetivo principal a realização de análises não lineares, estáticas e dinâmicas, nos domínios do tempo e da frequência. O Anflex é baseado no método dos elementos finitos e o análise estrutural do *riser* é global. Para o processo de otimização, foi utilizado o modeFRONTIER (modeFRONTIER, 2011), que consiste em um programa de otimização multidisciplinar no qual estão incorporados diversos métodos de otimização e que também permite o acoplamento com outros programas, por meio de *scripts*. Na área de *offshore*, este programa já foi utilizado, com sucesso, para a otimização de configurações de *risers* (ver, por exemplo, Andrade et al. (2010) e Martins (2011)). Neste trabalho, o Anflex está acoplado ao modeFRONTIER. A Figura 4.5 ilustra a sequência do processo de otimização acoplando os dois programas.

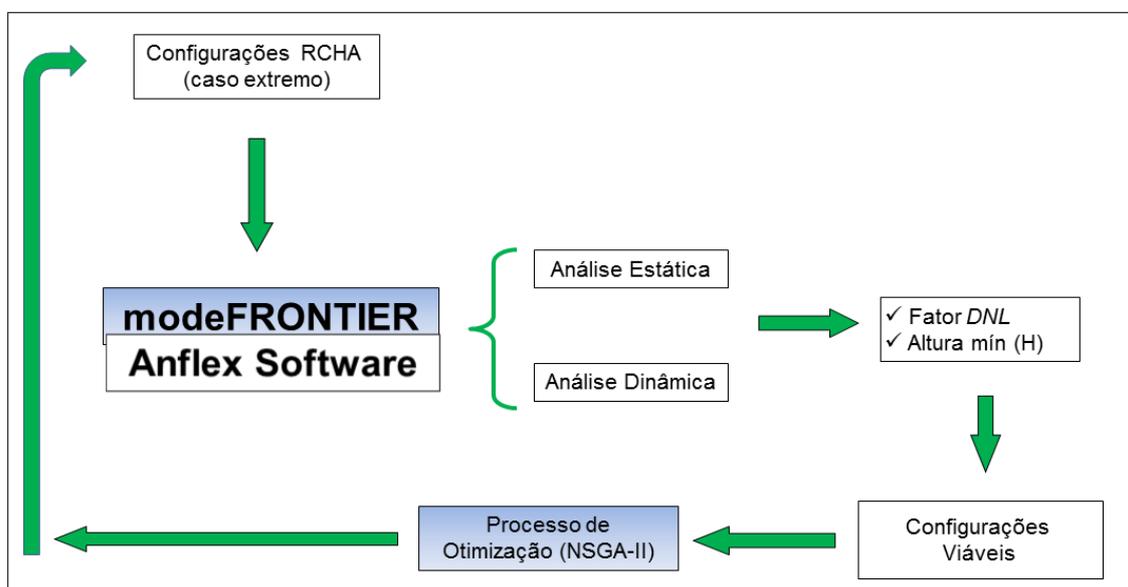


Figura 4.5 – Esquema gráfico do processo de otimização

É importante ressaltar que o processo de otimização é feito a partir da interface gráfica do programa modeFRONTIER, o qual é explicado detalhadamente nas seções seguintes.

4.4.1

Modelagem do problema de otimização

Os principais componentes do fluxo de otimização (também conhecido como *workflow*) desenvolvido no programa modeFRONTIER estão ilustrados, de forma simplificada, na Figura 4.6.

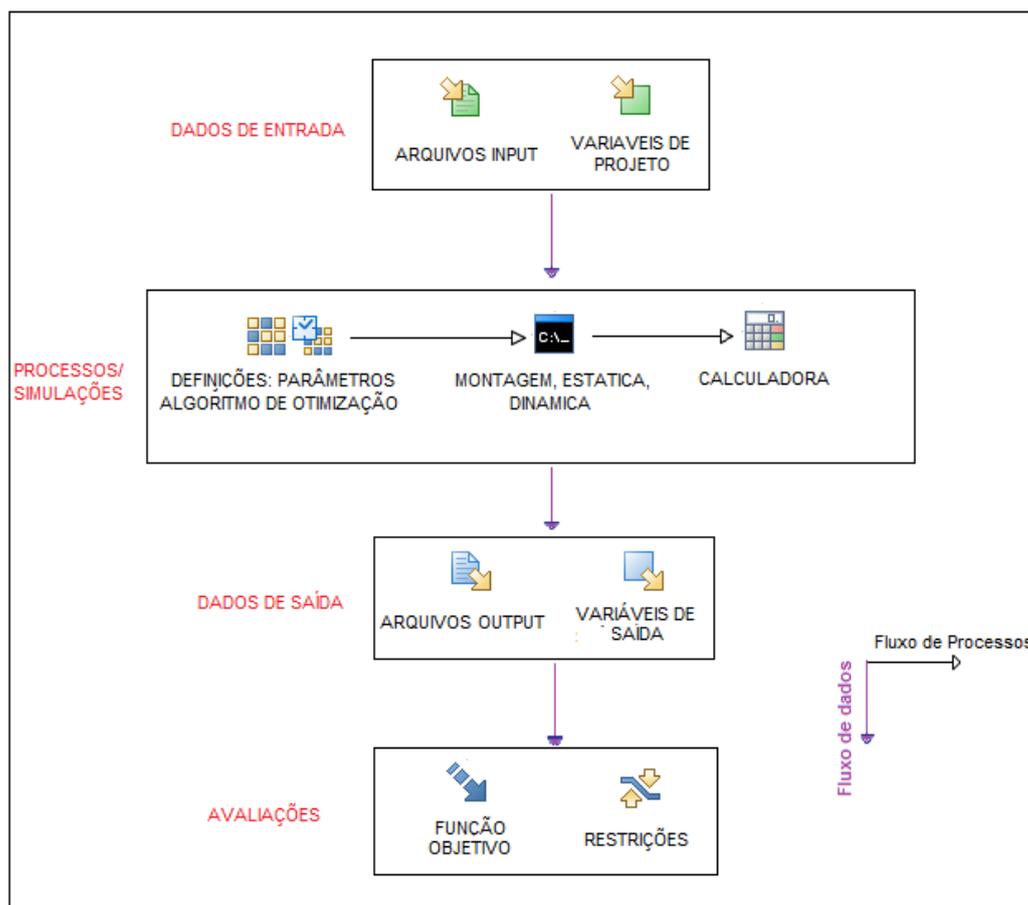


Figura 4.6 – Esquema simplificado do fluxo de otimização no modeFRONTIER.

4.4.1.1

Fluxo de otimização (*workflow*)

A modelagem do problema de otimização é definida por dois fluxos principais: o de dados e o de processos. O fluxo de dados, que nesse exemplo ocorre de cima para baixo, inicia-se com a definição das variáveis de projeto necessárias para o cálculo do equilíbrio de cada configuração, o qual é realizado pelo programa Anflex, acoplado ao modeFRONTIER. Após a simulação da configuração do *riser*, o fluxo de dados segue com a obtenção dos valores das respostas de interesse (ou dados de saída), verificação das restrições e, finalmente, avaliação da função objetivo. Em geral, o fluxo

de dados é a sequência lógica que um programa segue para obtenção das respostas de interesse a partir dos dados de entrada.

O fluxo de processos, que nesse exemplo ocorre da esquerda para a direita, é a sequência lógica de um processo de otimização que se inicia com a definição dos parâmetros de análise de otimização e continua com a busca do ponto mínimo (ou máximo), a partir dos pontos ou respostas de interesse calculadas no fluxo de dados, até que seja atingido um critério de convergência. Neste estudo, o fluxo se inicia com a definição do método de otimização (neste trabalho foi escolhido o algoritmo genético NSGA-II) e seus respectivos parâmetros. Em seguida, é realizada a análise dinâmica do *riser* (neste trabalho, esta etapa compreende uma análise estática seguida de uma análise dinâmica. Vale ressaltar que, além dessas simulações, outras poderiam ser incluídas aqui, como por exemplo, a análise de fadiga). Uma vez que o fluxo de processos é concluído, as configurações do *riser* são arquivadas em um banco de dados e submetidas ao processo iterativo de otimização, até que o critério de convergência, definido no início do fluxo de processos, seja alcançado.

Com a finalidade de apresentar com mais detalhes a modelagem de um problema de otimização a partir da interface do modeFRONTIER, a Figura 4.7 mostra o fluxo de otimização de um problema simples no qual se deseja minimizar as tensões ao longo de um *riser* variando-se unicamente o seu ângulo de topo, ou seja, deseja-se encontrar o ângulo de topo do *riser* para o qual as tensões ao longo do seu comprimento sejam mínimas.

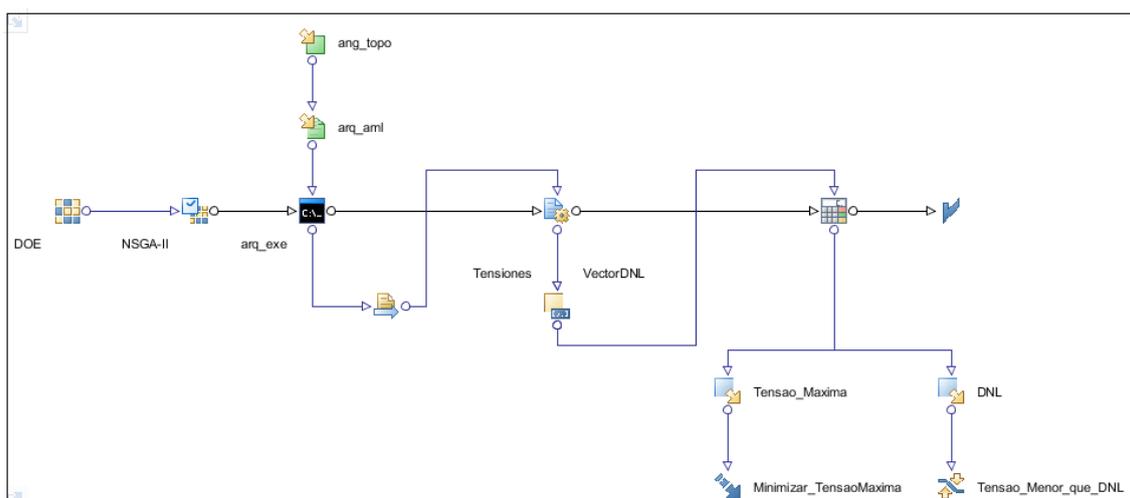


Figura 4.7 – Fluxo de otimização das tensões em função do ângulo de topo

(a) Fluxo de dados

Dados de entrada

A primeira parte da construção do fluxo de dados consiste na definição dos dados de entrada, que podem ser definidos como valores constantes, variáveis ou como uma expressão em função dos demais dados de entrada. É importante destacar que apenas os parâmetros definidos como variáveis são considerados como parte ativa do problema de otimização e, portanto, são incluídos no *workflow*. Os dados constantes são utilizados apenas na construção do modelo a ser simulado e geralmente não são incluídos no *workflow* de otimização. Para cada uma das variáveis é definido um intervalo de variação. Para este exemplo, o dado de entrada é o ângulo de topo e o intervalo de variação se dá entre 6 e 20 graus com relação à vertical (Figura 4.8). Para os demais dados de entrada considerados como constantes, tais como as propriedades físicas e geométricas do *riser*, não são necessárias suas definições no *workflow*.

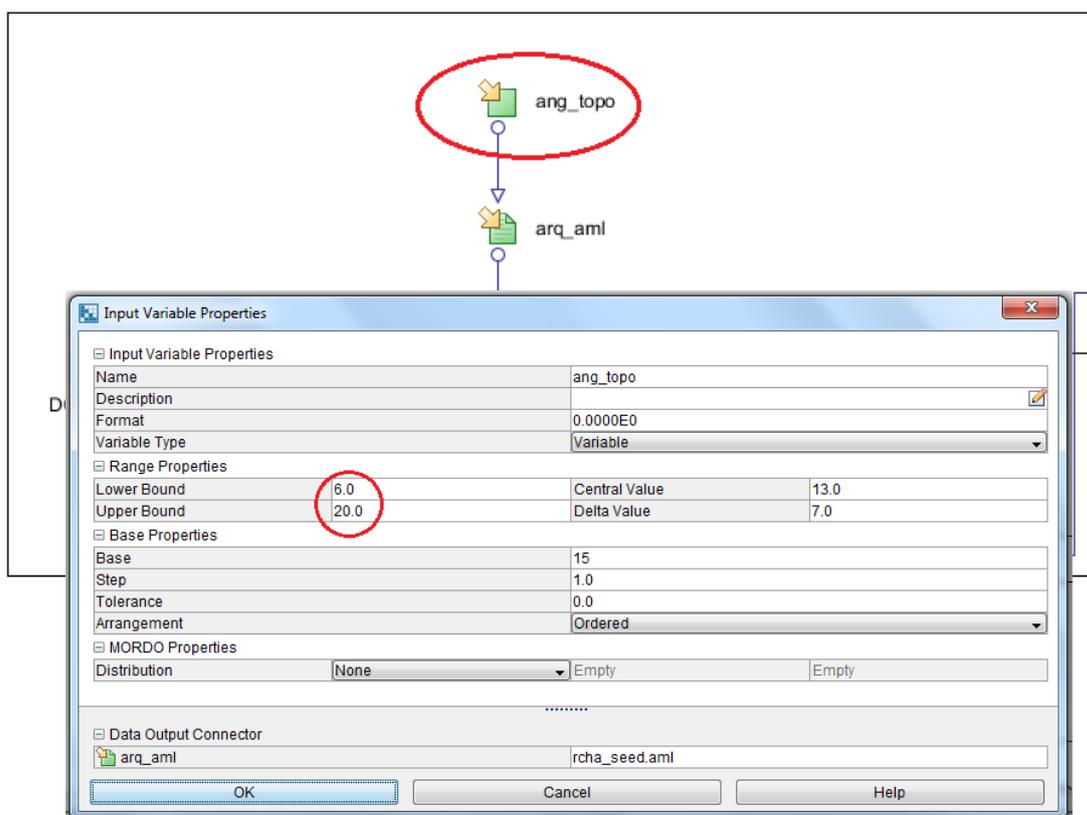


Figura 4.8 – Dados de entrada do fluxo de dados

Os dados de entrada são definidos no fluxo por meio de nós chamados *input variable node*. Esses nós identificam os parâmetros de projeto que estão escritos em um arquivo de “*input*” do Anflex (ver Figura 4.9).

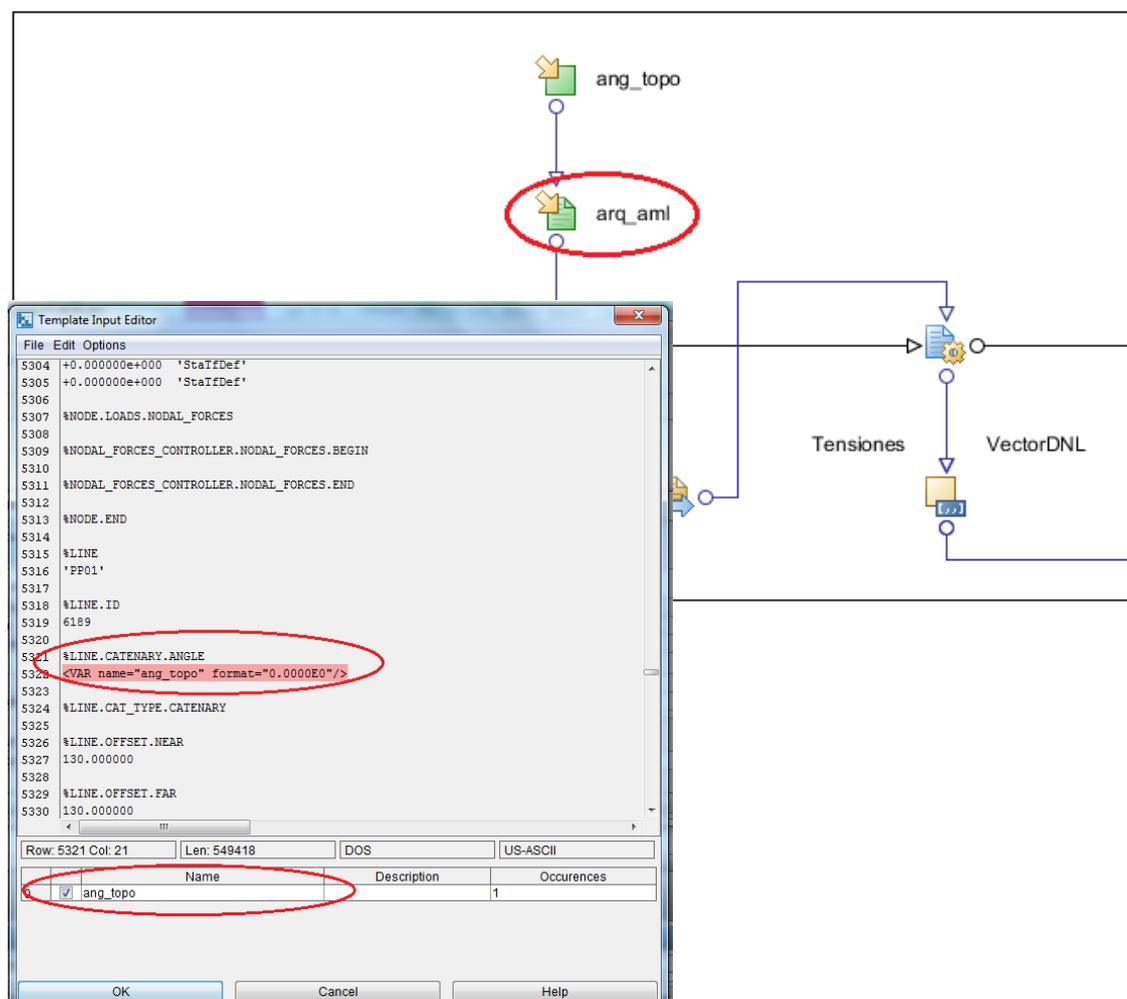


Figura 4.9 – Arquivo “*input*” do Anflex.

Dessa maneira, as configurações do *riser* são avaliadas a partir das variáveis e de seus intervalos de variação, os quais definem o espaço de busca. É importante destacar que a definição dessas variáveis tem grande influência na busca das soluções. Nesse sentido, deve-se evitar a caracterização de variáveis não significativas, assim como intervalos de variação muito grandes, pois um espaço de busca muito grande implica em um maior número de avaliações para cobri-lo, diminuindo assim a eficiência computacional do método. Por outro lado, a não

caracterização de variáveis significativas ou a definição de intervalos pouco representativos para essas variáveis pode diminuir a qualidade das soluções.

Cálculo de equilíbrio do *riser*

Neste instante, o programa Anflex é responsável pela simulação numérica do *riser* (determinação dos deslocamentos, esforços e tensões ao longo do tempo). Este programa é acoplado ao modeFRONTIER por meio de *scripts*, conforme mostrado na Figura 4.10. Esses *scripts* indicam, dentre outras coisas, a pasta onde se localiza o arquivo executável do programa Anflex.

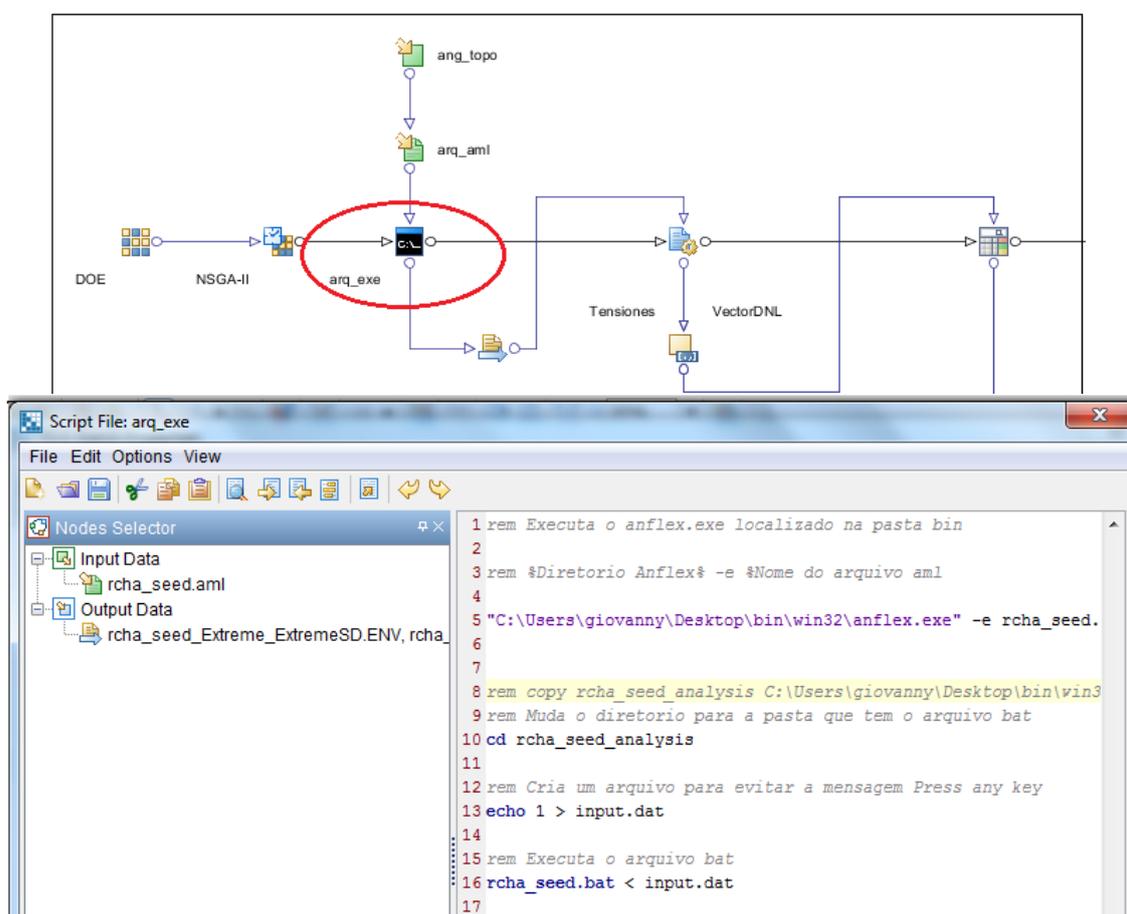


Figura 4.10 – Script usado para o acoplamento do Anflex e do modeFRONTIER.

Variáveis de saída

Após realizadas as simulações do *riser*, são geradas as variáveis de saída, as quais representam as respostas de interesse de cada simulação. Essas variáveis são

extraídas do arquivo “*output*”, gerado pelo Anflex, o qual fica contido no nó do fluxo de dados chamado *output file node* (Figura 4.11). Para este caso, as variáveis de saída de interesse são: a maior tensão atuante no *riser* e o maior fator *DNL* (que corresponde ao fator de segurança da norma *DNV*).

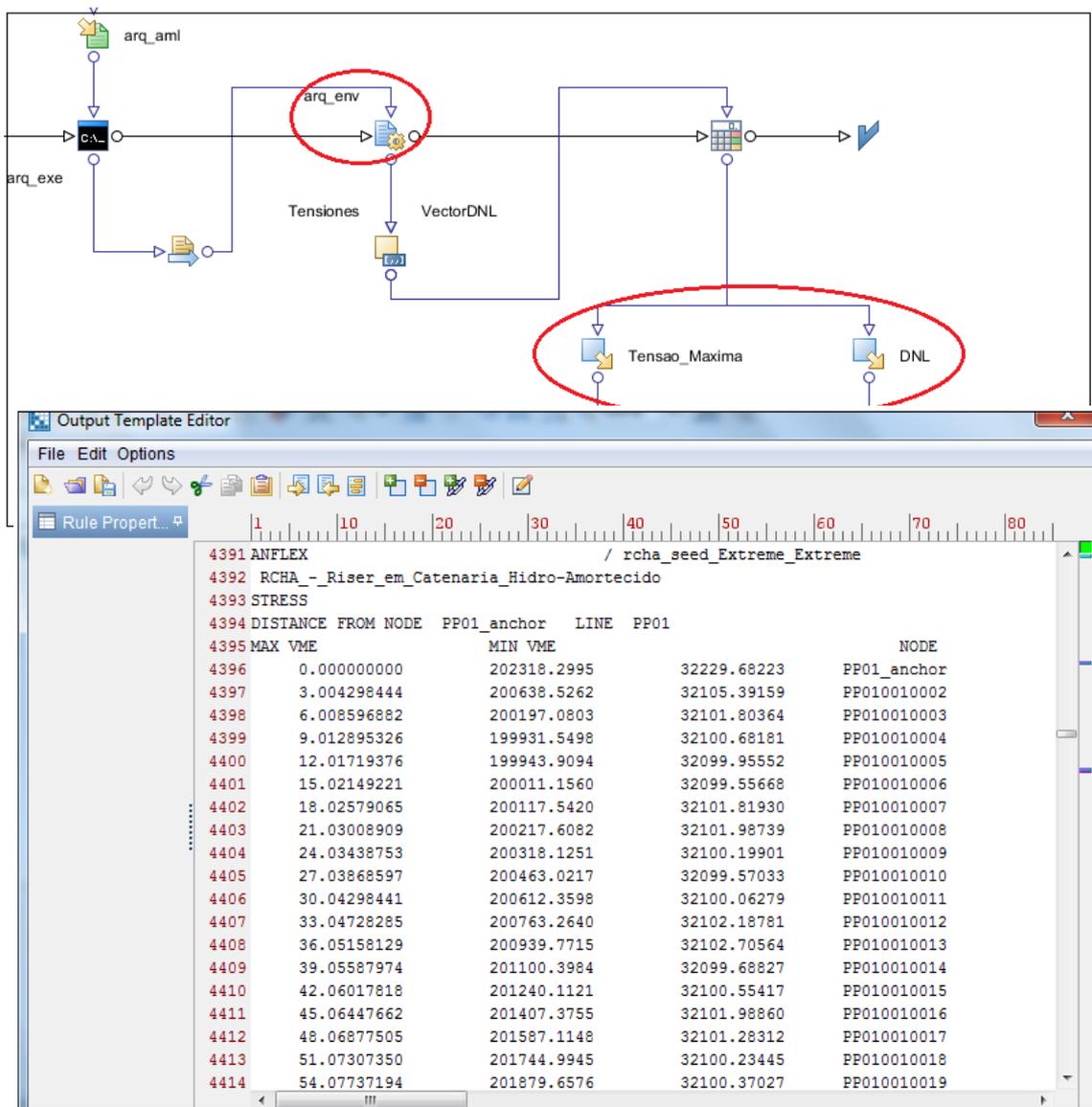


Figura 4.11 – Arquivo “*output*” gerado pelo Anflex

Objetivos e restrições

Os objetivos e as restrições impostas ao problema e ser otimizado são indicados no *workflow* a partir das variáveis de saída (Figura 4.12). Para este exemplo, a função objetivo corresponde a minimizar a maior tensão atuante no *riser*. Quanto à restrição, define-se que o fator *DNL* deve ser menor do que “1”.

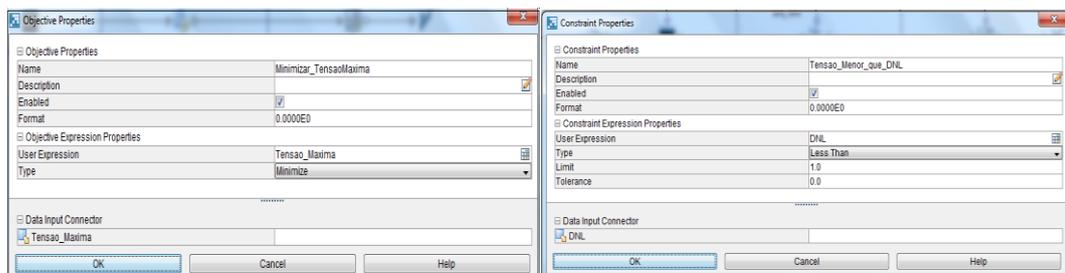
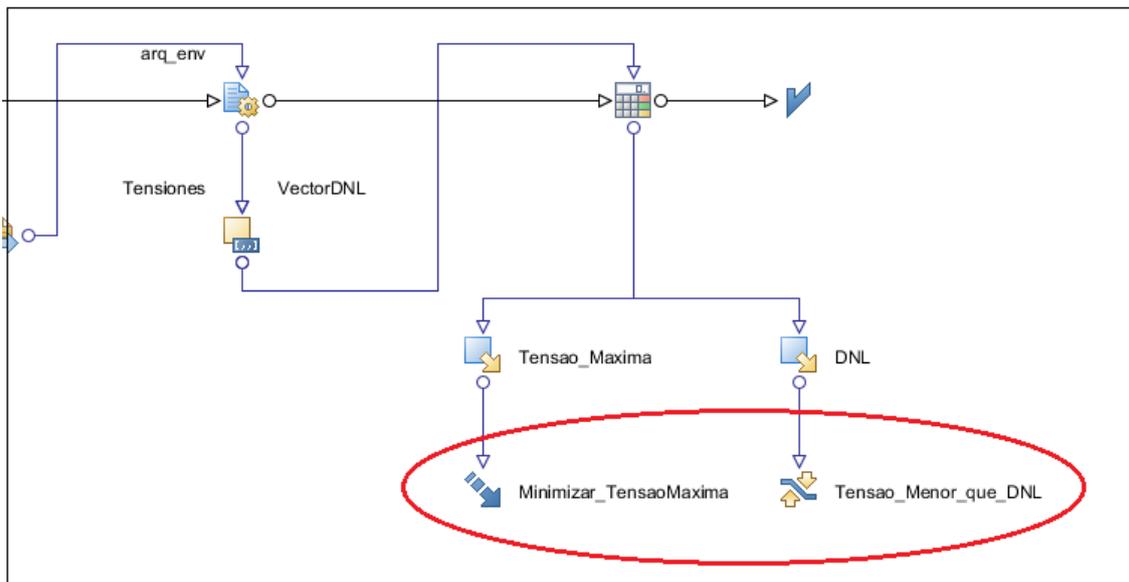


Figura 4.12 – Definição dos objetivos e restrições no fluxo do modoFRONTIER.

O fluxo de dados termina com a definição dos objetivos e das restrições do problema de otimização. A seguir, são apresentados alguns detalhes sobre o fluxo de processos.

(b) Fluxo de processos

O fluxo de processos tem início com a definição do algoritmo de otimização e seus respectivos parâmetros. Para este trabalho, adota-se o algoritmo genético NSGA-II (*elitist non-dominated sorting genetic algorithm*) e selecionam-se os seguintes parâmetros de otimização: a quantidade de gerações ou populações, a probabilidade de cruzamento e a probabilidade de mutação (Figura 4.13).

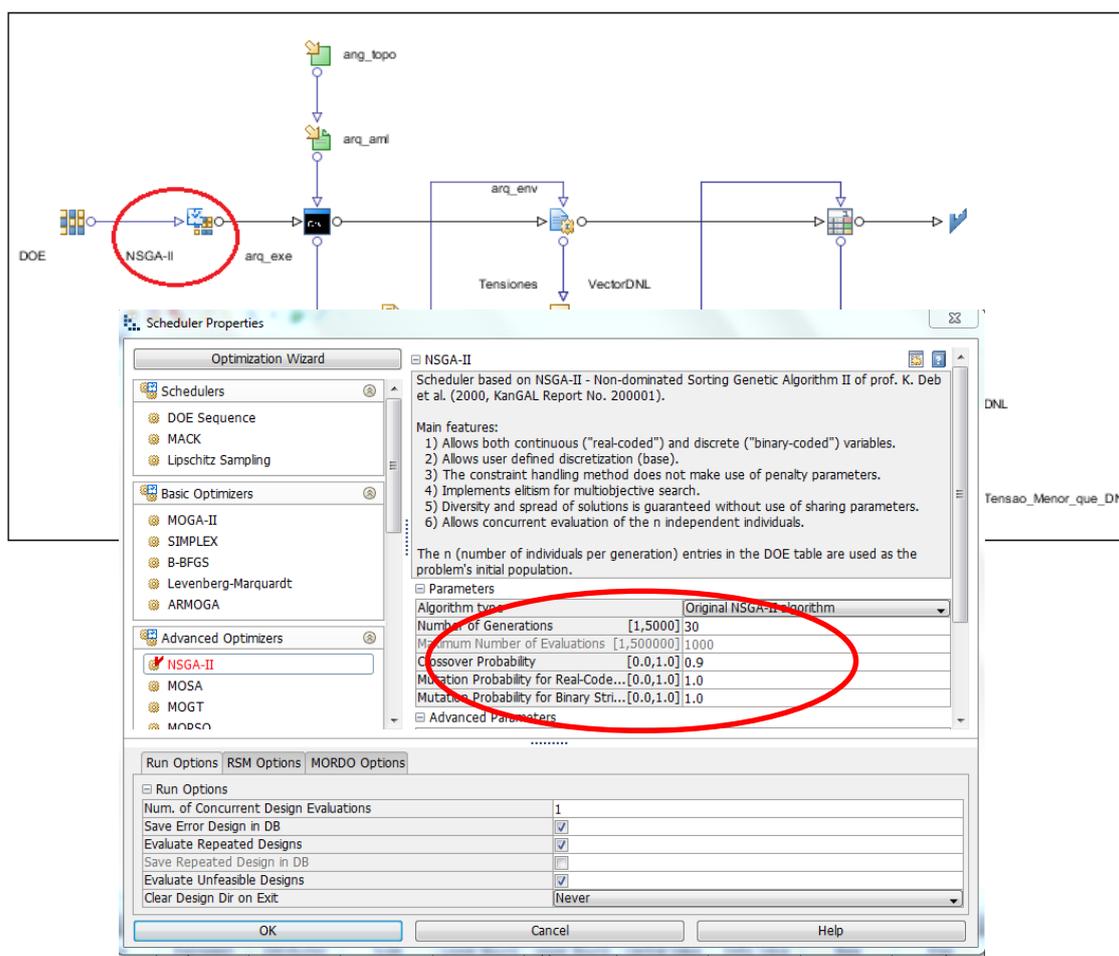


Figura 4.13 – Parâmetros de otimização do algoritmo genético NSGA-II

Após a definição dessas informações relacionadas com o algoritmo de otimização, a próxima etapa consiste na análise dinâmica do *riser*, pelo programa Anflex, conforme explicado anteriormente. O fluxo de processo termina quando, após a análise dinâmica do *riser*, é realizada a etapa de otimização a partir da função objetivo definida no fluxo de dados. É importante ressaltar que, devido ao fato do programa Anflex calcular todas as tensões ao longo do comprimento do *riser*, foi necessário introduzir uma “calculadora” no fluxo de processos com o objetivo de buscar o valor da maior da tensão atuante, o qual corresponderá ao valor a ser minimizado (Figura 4.14).

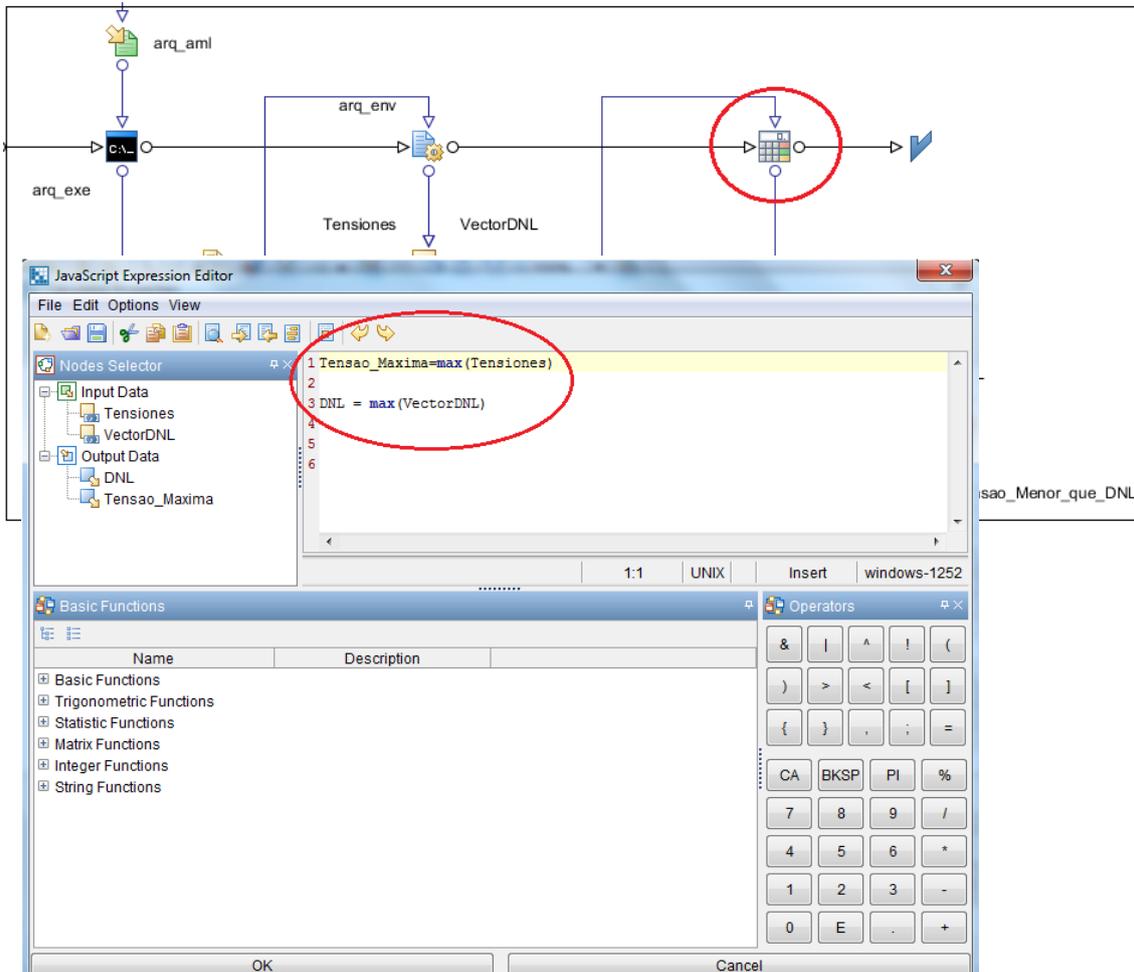


Figura 4.14 – “Calculadora” para determinar a maior tensão ao longo do *riser*.