



OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE UM MODELO DE BOMBA EM SISTEMAS DE BOMBEIO CENTRÍFUGO SUBMERSO

Ana Carla Costa Andrade¹, André Laurindo Maitelli², Carla Wilza Souza de Paula Maitelli³

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Laboratório de Automação em Petróleo (LAUT),
Departamento de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo.

E-mail: ana.carla@chaparral.com.br

² Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Laboratório de Automação em Petróleo (LAUT),
Departamento de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo.

E-mail: maitelli@dca.ufrn.br

³ Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Laboratório de Automação em Petróleo (LAUT),
Departamento de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo.

E-mail: carlamaitelli@gmail.com

RESUMO

Uma das diversas técnicas aplicadas aos processos de produção e exploração de petróleo é a elevação artificial, que utiliza equipamentos a fim de reduzir a pressão de fluxo no fundo do poço, promovendo um diferencial de pressão, resultando num aumento de vazão. A escolha do método de elevação artificial depende de uma análise de diversos fatores como custos iniciais de instalação, manutenção e condições existentes no campo produtor. O método de Bombeio Centrífugo Submerso (BCS) mostra-se bastante eficiente quando a finalidade é produzir altas vazões de líquido, tanto em ambientes terrestres como marítimos, em condições adversas de temperatura e na presença de fluidos viscosos. Por definição, o BCS é um método de elevação artificial em que um motor elétrico de subsuperfície transforma a energia elétrica em mecânica e uma bomba centrífuga de múltiplos estágios sobrepostos, formada por um impelidor e um difusor, converte a energia mecânica do motor em energia cinética sob a forma de velocidade, elevando o fluido à superfície. O objetivo desse trabalho é a implementação do método de otimização dos poliedros flexíveis, conhecido como Método *Simplex* Modificado (MSM), aplicado ao estudo da influência na modificação dos parâmetros de entrada e saída no canal do impelidor de uma bomba centrífuga de um sistema (BCS). Com os resultados obtidos na aplicação do método de otimização na modificação dos parâmetros angulares da bomba, os dados resultantes das simulações apresentaram valores do *Head* (altura de elevação) otimizados de forma satisfatória na busca de uma solução ótima.

Palavras-chave: Elevação Artificial, Bombeio Centrífugo Submerso, Otimização, Simulação.

1. INTRODUÇÃO

Uma das diversas técnicas ou metodologias utilizadas nos processos de produção e exploração de petróleo é a

elevação artificial, que utiliza de meios artificiais para elevar o fluido da formação até a superfície. A escolha do método de elevação depende de uma análise precisa do projeto e de fatores como custos



iniciais de instalação, manutenção dos equipamentos de subsuperfície e superfície, condições existentes no campo produtor.

O método de elevação artificial utilizado para o desenvolvimento do trabalho é o Bombeio Centrífugo Submerso (BCS), que apresenta diversas aplicações na indústria do petróleo, seu desempenho está diretamente relacionado ao funcionamento da bomba centrífuga, considerada o coração do sistema, motivo pelo qual a importância do estudo e das pesquisas relacionados à área.

No funcionamento de um sistema BCS, alguns fatores interferem no modo de operação da bomba, afetando o desempenho da mesma, podendo até resultar na diminuição do processo de produção. Sendo assim, é importante um estudo para a previsão de falhas e baixo desempenho na utilização do método de elevação a ser utilizado.

Neste trabalho será realizada a otimização dos parâmetros de projetos para bombas centrífugas, que tem por finalidade operar por BCS, utilizando para a otimização o método dos poliedros flexíveis na busca de uma melhor solução.

As bombas centrífugas ou turbo-bombas são componentes essenciais do método de elevação por Bombeio Centrífugo Submerso, constituídas de múltiplos estágios sobrepostos como observado na Figura 1.1, com a função de impulsionar o fluido, em consequência da rotação de um eixo móvel acoplado um disco (rotor ou impelidor), dotado de pás (palhetas ou hélice) juntamente com uma parte fixa (difusor ou estator) conforme Figura 1.2, orientando o fluido recebido e o encaminha pela periferia devido à ação de descarga da força centrífuga, daí o seu nome mais usual.

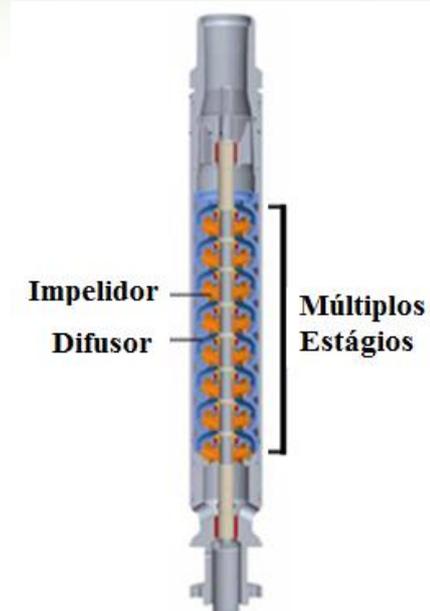


Figura 1.1: Múltiplos estágios da bomba centrífuga utilizada em sistemas de BCS.

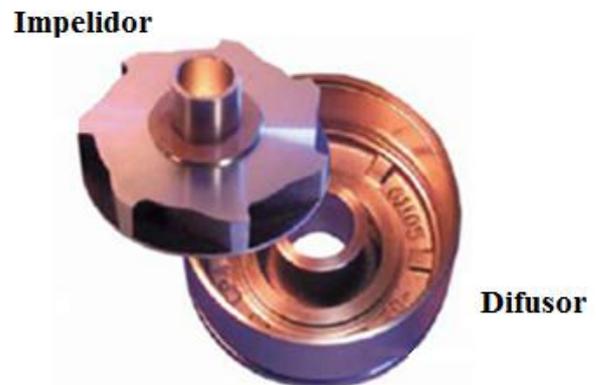


Figura 1.2: Componentes de um estágio de uma bomba centrífuga, impelidor e difusor.

Tanto a forma quanto o tamanho do impelidor e difusor são responsáveis por determinar a vazão a ser bombeada, como também o número de estágios e a altura de elevação (*Head*) da bomba. Entretanto, torna-se essencial um estudo das partes constituintes do sistema, como o efeito do tamanho das pás e os ângulos de inclinação das mesmas, tanto no impelidor, como no difusor. Desta forma, alguns autores desenvolveram trabalhos relacionados à análise do escoamento no



interior das bombas centrífugas como também, no processo de otimização de parâmetros de um modelo geométrico, a fim de melhorar o próprio desempenho da bomba, cuja consequência do processo, ajuda na prevenção de falhas no modo de operação dos equipamentos, evitando desgastes dos mesmos e custos inesperados com uma possível paralisação do sistema e da produção.

Para tornar o desempenho do sistema BCS mais eficiente, foram estudadas maneiras específicas de implementar um algoritmo que permita a otimização geométrica da bomba, objetivando soluções ótimas a partir de um critério de desempenho estabelecido.

Os algoritmos numéricos são essencialmente utilizados em soluções de problemas de otimização, sendo classificados como métodos de programação matemática. Sendo assim, podem ser classificados da seguinte maneira (SILVA, s.d.):

Métodos de programação matemática

- Programação linear;
- Métodos baseados em teoria de aproximações como propagação linear sequencial - PLS ou *SLP*;
- Programação quadrática sequencial - PQS ou *SQP*;
- Programação não-linear (para solução de problemas de otimização sem restrição e com restrição).

Métodos probabilísticos

- Quando se referem á algoritmos genéticos dentre outro métodos.

Comumente, métodos de otimização são utilizados em situações difíceis de trabalhar com modelos analíticos, objetivando uma precisão na solução de problemas complexos. Desta

forma, alguns pesquisadores buscam desenvolver métodos que atendam os seguintes aspectos:

- **Eficiência** - resolver o mesmo problema com menor esforço;
- **Robustez** - resolver uma variedade maior de problemas.

Os diversos métodos de otimização existentes podem ser classificados quanto ao tipo: direto e indireto. No método direto, utilizam apenas o valor da função objetivo a ser maximizada ou minimizada sem empregar o gradiente. Como exemplo de utilização pode ser citado o método de busca direta, método dos poliedros flexíveis e o método de busca aleatória. Quanto ao método indireto, trabalha com funções conhecidas, de forma a extrair o gradiente das mesmas, por exemplo, como no método de Newton, método do gradiente conjugado, dentre outros.

Os métodos de otimização numérica possuem vasta aplicação quando referem-se à implementação de sistemas incorporando técnicas de inteligência artificial. Alguns exemplos podem ser citados como: aplicações em redes neurais artificiais, ajuste adaptativo de controladores nebulosos, utilização de otimização da produção em sistemas supervisionados por estações inteligentes e várias outras aplicações (ARAÚJO, 2012).

Como escolha do método a ser implementado neste trabalho, optou-se pelo método dos poliedros flexíveis, popularmente conhecido como Método *Simplex Downhill*, adaptado e caracterizado por ser um método de busca multidimensional o qual não utiliza o gradiente da função objetivo (NELDER, 1965). Consequentemente, as modificações do método *simplex* originaram duas formas principais (ARAÚJO, 2013):



- Método *simplex* básico (MSB);
- Método *simplex* modificado (MSM).

1.1. Método *simplex* básico (MSB)

Segundo a literatura, o método *simplex* tornou-se limitado, pois, devido aos poliedros serem rígidos, permitindo apenas a reflexão dos poliedros anteriores, muitas vezes se tornava inviável obter o ótimo da função objetivo. Como solução para o problema, Nelder (1965) propôs o surgimento do método dos poliedros flexíveis (SANDRINI, 2005).

Para se entender o funcionamento do método dos poliedros flexíveis (MSM), deve-se ter um prévio conhecimento quanto ao método *simplex* básico (MSB).

No método básico, a ideia principal é fazer com que uma figura com uma representação geométrica regular *simplex* possa se modificar em busca do mínimo de uma função objetivo $J(w)$ (ARAÚJO, 2013).

O método *simplex* é caracterizado por possuir uma figura geométrica em n dimensões, constituído de $(n+1)$ pontos, no qual cada dimensão corresponde a uma variável a ser otimizada. Um *simplex* em duas dimensões é um triângulo, em três dimensões é um tetraedro e assim sucessivamente. O método pode ser estendido para maiores dimensões, havendo possibilidade de ser aplicado para a otimização de qualquer número de variáveis.

De acordo com os $n+1$ pontos, a função objetivo é avaliada em cada um dos vértices do poliedro, onde o pior vértice determinado passa a ser aquele que obtiver o pior retorno associado à função objetivo $J(w)$. Durante cada iteração, uma nova solução passa a ser gerada, projetando o pior vértice, passando pelo centroide dos outros vértices, encontrando então um novo ponto, descartando-se o novo vértice projetado. Devem-se repetir todos essas

etapas para novos vértices encontrados, até obter como resposta uma solução satisfatória Figura 1.3.

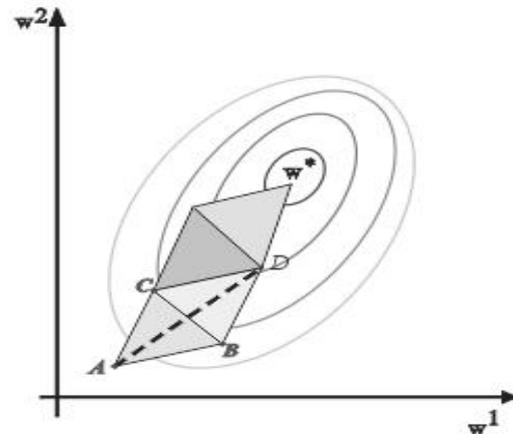


Figura 1.3: Representação gráfica do funcionamento do método *simplex* básico (MSB) de duas variáveis.

1.2. Método dos poliedros flexíveis

O método *simplex* modificado (MSM), ou seja, o método dos poliedros flexíveis permite obter o melhor vértice de forma mais precisa. É composto por operações como: reflexão, expansão, redução e contração, que possibilita alterar não só o tamanho, mais também a forma do *simplex*, ao ser modificada uma possível variável que determina o tamanho da reflexão Figura 1.4 (Araújo, 2013).

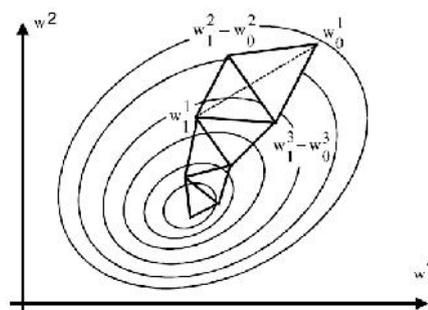


Figura 1.4: Imagem representativo do método *simplex* modificado (MSM).



Conforme Maitelli e Carvalho (s.d.), a ideia principal do método (MSM) é deformar a cada iteração um poliedro, de forma que este caminhe em uma direção descendente.

2. METODOLOGIA

2.1. Etapas para o desenvolvimento da geometria

Na fase inicial do trabalho, as características geométricas reais da bomba (impelidor e difusor) foram obtidas através de uma inspeção manual e a mesma foi desenhada no AUTOCAD®, com base nas normas de desenho mecânico. A seguir, foram estudadas as etapas relacionadas ao desenvolvimento da geometria da bomba e posteriormente, as fases necessárias para o processo das simulações.

2.2. Geometria no modelo CAD

Utilizando o programa AUTOCAD®, foram obtidas medidas referentes à geometria original da bomba, considerando alguns parâmetros essenciais, tais como, ângulos de entrada e saída do impelidor e espessura da pá. Parâmetros esses que definem o escoamento no interior dos canais da bomba do impelidor e do difusor, como podem ser visto nas Figuras 2.1 e 2.2, respectivamente.

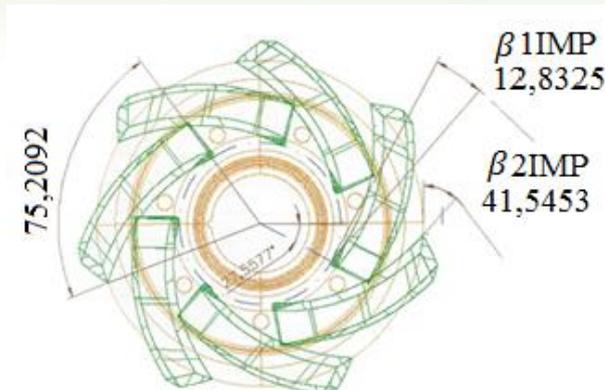


Figura 2.1: Geometria no formato CAD do impelidor de sistema BCS.

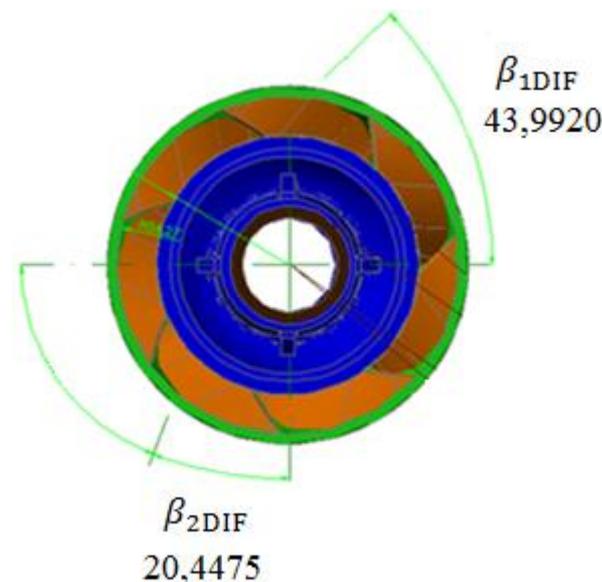


Figura 2.2: Geometria no formato CAD do difusor de sistema BCS.

2.3. Geometria no formato ANSYS® CFX®

Como etapa seguinte à definição da geometria em 3D no formato CAD (*Computer-Aided Design* - Desenho Assistido por Computador), através do módulo *BladeGen* do CFX®, foram usadas dimensões anteriormente obtidas no formato CAD, com a ideia de criar o modelo para os perfis meridionais tanto do impelidor quanto do difusor, permitindo definir os ângulos e espessura das pás,



resultando em uma geometria tridimensional dos parâmetros inseridos. Nessa fase de definição dos ângulos foram executadas as modificações necessárias na entrada e saída dos canais do impelidor, etapas fundamentais para o desenvolvimento do trabalho. Ainda nessa fase de criação da geometria no perfil meridional, foi utilizada a geometria da bomba diferenciada com seus pontos alongados, a fim resultados mais eficientes necessários na simulação para obtenção de um valor de *Head* que venha apresentar um resultado mais próximo do *Head* do fabricante.

2.4. Implementação do método de otimização no MATLAB®

A aplicação do método *Simplex* modificado (MSM) foi através do algoritmo implementado computacionalmente em ambiente MATLAB®.

Inicialmente foram dados os pontos iniciais de entrada [x_1, x_2, x_3], sendo que cada valor de entrada possui obrigatoriamente um valor β_{1IMP} e β_{2IMP} . A partir desses pontos iniciais de entrada já estabelecidos anteriormente, um valor de *Head* simulado torna-se necessário como condição para obtenção da função objetivo, implementada no algoritmo dos poliedros para a busca da melhor solução.

Foi utilizada a seguinte notação como etapa de classificação para comparar e testar os pontos: *B* (melhor ponto), *G* (bom ponto) e *W* (pior ponto).

A função objetivo $J(\beta_{1IMP}, \beta_{2IMP})$ tem relação ao *Head* obtido mediante as simulações realizadas em variadas vazões, objetivando um resultado do *Head* cada vez mais próximo do ponto pertencente à curva característica em determinada vazão específica. Inicialmente, esse cálculo da função objetivo teve como referência uma vazão fixa na procura de um ponto ótimo, no

qual ao ser obtido esse ponto, foi aplicado nas demais vazões, sempre na busca de um valor de *Head* que minimize a diferença quando comparado ao *Head* do fabricante.

Para um melhor entendimento na obtenção da função objetivo, o fluxograma mostrado a Figura 2.3, utiliza *softwares* distintos MATLAB® e ANSYS® CFX® no processo de otimização dos parâmetros da bomba através dos parâmetros β_{1IMP} e β_{2IMP} .

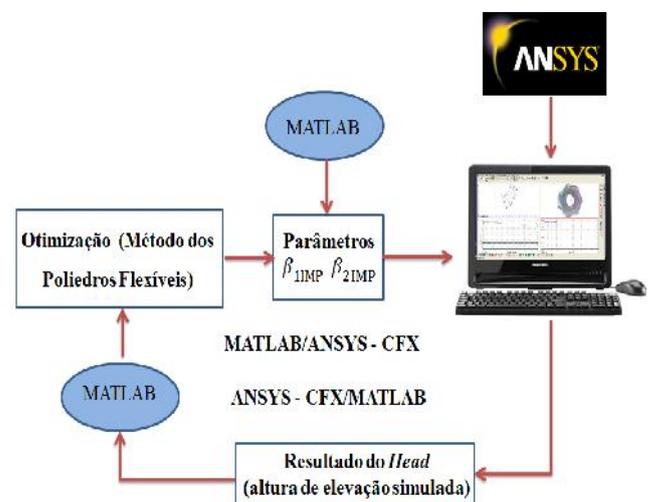


Figura 2.3: Fluxograma do processo de otimização dos parâmetros da bomba utilizando *softwares* distintos.

A implementação do método de otimização, foi através do software MATLAB®, cuja lógica aplicada no desenvolvimento do algoritmo busca o melhor vértice como solução do problema, utilizando as operações de (reflexão, expansão, contração e redução), que compõe o método dos poliedros.

O desenvolvimento da lógica de implementação do método de otimização pode ser observada na Figura 2.4, descrita de acordo com as etapas do algoritmo que o compõe (MATHEWS, 2004).

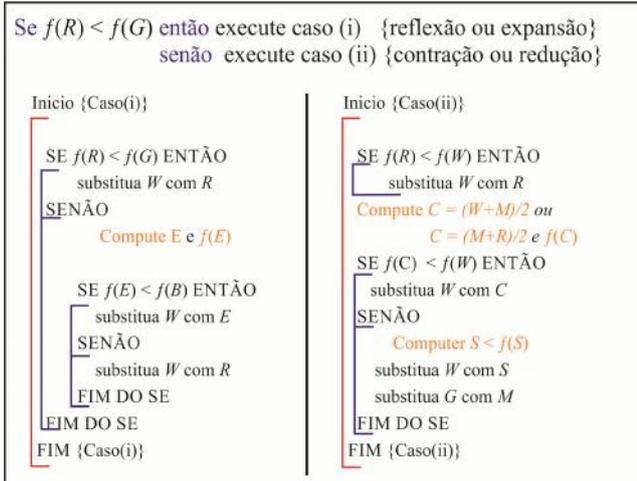


Figura 2.4: Lógica do algoritmo implementado conforme o método *Simplex* modificado (MSM).

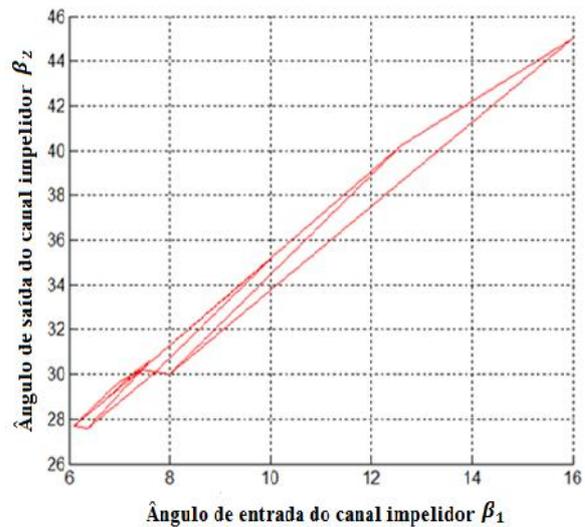


Figura 3.1: Sequência de triângulos convergindo para o ponto ótimo de acordo com o Método dos poliedros flexíveis.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Implementação do método dos poliedros flexíveis na otimização

A fase de implementação do método dos poliedros flexíveis no cálculo dos ângulos de inclinação da pá na entrada e na saída dos canais da geometria do impelidor, foi necessária para buscar o melhor ponto de operação da bomba centrífuga submersa quando comparado ao *Head* da curva do fabricante.

Através do método de otimização dos poliedros flexíveis, pode ser observado a partir da Figura 3.1, o processo de formação dos poliedros, ou melhor, triângulos, nos estágios do processo de otimização inicial até o ponto ótimo, executando as operações de reflexão, expansão, contração e redução.

Ainda analisando os resultados apresentados, a implementação do método dos poliedros flexíveis mostrou uma eficiência satisfatória na resolução do problema de otimização dos parâmetros β_{1IMP} e β_{2IMP} , comprovando ser um método direto na busca de uma solução ótima e facilmente implementado.

3.2 Análise dos resultados das simulações

Através do programa comercial o ANSYS® CFX® 11.0, simulações foram implementadas para um modelo geométrico em 3D, nos canais de um estágio de uma bomba de sistema BCS utilizando fluido como água.

Nessa etapa de simulações com o modelo computacional, dados geométricos da bomba foram modificados, a fim de obter resultados da altura de elevação cada vez mais próximos da melhor região de operação da bomba, e comparados com as curvas características fornecidas pelo fabricante.

Para os primeiros testes, houve um limite de iterações, no qual cada simulação resultou em um tempo aproximado de 30 minutos. Nessa fase, foram necessárias diversas modificações, com o objetivo de buscar valores otimizados do ângulo de entrada e ângulo de saída do canal impelidor, sendo indispensáveis novas simulações nesse processo de otimização.

A Figura 3.2 apresenta os resultados das condições de simulações com vazões



específicas (600,00; 800,00; 900,00; 1.000,00; 1.112,91; 1.200,00 e 1.400,00 m³/d). A partir de uma análise das curvas apresentadas, os resultados das simulações mostraram uma eficiência aceitável a partir do referencial adotado, curva do fabricante.

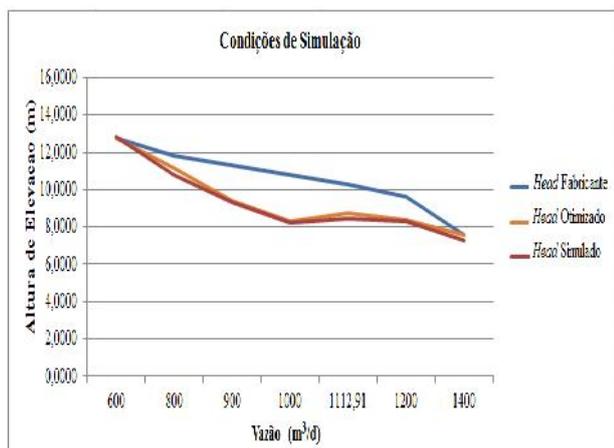


Figura 3.2: Curvas comparativas do *Head* para diversas vazões.

4. CONCLUSÕES

Dentre as etapas importantes no desenvolvimento do trabalho destacam-se a fase de implementação do método dos poliedros flexíveis na otimização, como também a etapa de geração de uma geometria mais aprimorada da bomba, fundamental no processo de criação das malhas do impelidor e difusor que resultaram num melhor desempenho da mesma. Com isso, a curva característica de altura de elevação simulada foi obtida e comparada com os dados do fabricante. Quanto aos resultados obtidos utilizando o programa comercial ANSYS[®] CFX[®] a fim de desenvolver simulações para descrever a influência das modificações das variáveis típicas da bomba, pode-se concluir que houve um determinado desempenho quanto aos dados obtidos utilizando a geometria da bomba alongada com os ângulos otimizados. Através dos resultados apresentados, na fase de implementação do método de

otimização, os poliedros flexíveis comprovou ser um método facilmente utilizado com obtenção dos resultados de forma eficiente, visto que, utiliza apenas o valor da função objetivo sem empregar o gradiente.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Automação em Petróleo (LAUT/UFRN), com o apoio do Programa de Recursos Humanos (PRH-PB 220/UFRN).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, Fábio Meneghetti Ugulino de. **Introdução aos métodos de otimização numérica**. Apostila do Curso de Engenharia de Computação e Automação Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Centro de Tecnologia - Departamento de Computação e Automação, 2012.

ARAÚJO, Fábio Meneghetti Ugulino de. **Controle inteligente**. 2013. 4 slides: color.

MAITELLI, André Laurindo; CARVALHO, Fábio Câmara Araújo. **Programa computacional interativo para simulação e otimização de controladores PID**, [s.d.]. Disponível: <http://www.kmbusiness.net/images/coben_pid.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2014.

MATHEWS, John Henry; FINK, Kurtis. **Numerical methods using Matlab**. New Jersey, USA: Prentice-Hall, v. 8, p. 430 – 6, 2004.

NELDER, John; MEAD, Roger. **A Simplex method for function minimization**. The Computer Journal, v.7, p.308-13,1965. Disponível: <<http://comjnl.oxfordjournals.or>



g/content/7/4/308.full.pdf+html>. Acesso em : 09 set. 2013.

SANDRINI, Vanessa Soares. **Um estudo da otimização da geometria de um pára-quedas simplificado**. 2005. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Programa de Pós-Graduação em Matemática Aplicada, Porto Alegre, 2005.

SILVA, Emílio Carlos Nelli. **Otimização em engenharia mecânica**: métodos numéricos aplicados em problemas de otimização de engenharia. Apostila do Curso de Engenharia Mecânica. Escola Politécnica da USP, [s.d.].