DAS Departamento de Automação e Sistemas
CTC Centro Tecnológico
UFSC Universidade Federal de Santa Catarina

Derivative-Free Optimization for Automatic Tuning of an Oil Well Simulator

Relatório submetido à Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito para a aprovação da disciplina:
DAS 5501: Estágio em Controle e Automação

Willian de Medeiros Galvani

Florianópolis, Junho de 2017

Derivative-Free Optimization for Automatic Tuning of an Oil Well Simulator

Willian de Medeiros Galvani

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina

DAS 5501: Estágio em Controle e Automação

e aprovada na sua forma final pelo

Curso de Engenharia de Controle e Automação

Prof. Eduardo Camponogara

Fly, you fools!

J. R. R. Tolkien

Resumo

Este trabalho propõe o uso de métodos de otimização sem derivadas na industria de petróelo e gás, para sintonia de simuladores de poçõs de petróleo a partir de dados de poços reais. São analizados dois algoritmos, Nelder-Mead (Simplex) e OrthoMADS. O simulador Utilizado é o Pipesim, e para interface com ele são utilizados Python, Opal e pyWin32. Os métodos são testados de forma a minizar a distancia quadrática entre a curva de um poço real e a do poço simulado. São testadas também variações dos algoritmos. O sistema proposto foi capaz de sintonizar os modelos desejados em tempo aceitável e com boa precisão.

Palavras-chave: otimização sem derivada, poços de petróleo, simulação, sintonia automática

Abstract

This work proposes the use of derivative-free optimization methods in the oil and gas industry, in tuning the oil well simulators to match real oil wells. two algorithms are analized, Nelder-Mead (simplex) and OrthoMADS. The simulator used is Pipesim. Python, pyWin32 and Opal were used to interface with it. The methods are tested by attempting to reduce the quadratic distance between the real well's curve and the simulator's. Some variations of the algorithms are also tested. The proposed system was able to tune the desired in an accutare manner and acceptable time.

Keywords: derivative-free optimization, oil well, simulation, automatic tuning

Lista de ilustrações

Lista de tabelas

Sumário

1 Introdução

1.1 Motivação

Na indústria de petróleo e gás, frequentemente duas ou mais plataformas de produção conectam-se a redes comuns para o escoamento da produção. Este escoamento precisa ser planejado para que as restrições físicas de fluxo e pressão nos nós seja respeitado. Para que estes valores estejam corretos, é necessário controlar os processos de modo a produzir exatamente o necessário em cada estação. Além disso, para que campos de petróleo gerem o maior retorno financeiro possível, os processos devem idealmente estar sempre em um ponto ótimo de performance. A produção em falta ou excesso de determinados componentes pode afetar os componentes do sistema, como bombas e separadores, as interfaces com sistemas auxiliares, como linhas de transporte, além de estressar os sistemas da plataforma ou causar perdas desnecessárias.

Como estes são sistemas complexos e que variam com o tempo, simuladores são utilizados para estimar as respostas do sistema real à condições variadas. Para reproduzir as medidas observadas apropriadamente, estes simuladores devem ser rotineiramente resintonizados pelo engenheiro de processos. Esta sintonia pode ser uma tarefa cansativa e duradoura.

Um simulador bem sintonizado pode ser utilizado para modelagem matemática de novos modelos, desenvolvimento e testes de algoritmos de controle, planejamento de operações, análise de riscos, entre outros.

Como a escala de produção destes sistemas costuma ser grande, até pequenas variações dos modelos reais podem causar impactos consideráveis na produção.

1.2 Objetivos

O objetivo final deste trabalho é o desenvolvimento de uma ferramenta capaz de auxiliar a sintonia de simuladores de fluxo multifásico de petróleo e gás utilizando dados de plantas reais em plataformas offshore. Pretende-se identificar, implementar, e testar métodos de otimização sem derivadas compatíveis para sintonizar tais simuladores. É esperado que a ferramenta seja capaz de aproximar em pouco tempo as curvas de produção de um simulador aos dados coletados em campo. Inicialmente os métodos a serem estudados são o Simplex de Nelder-Mead [1], com uma implementação popria, o OrthoMADs [2], e OrthoMADS com SGTELIB (ultimos dois com a implementação NOMAD [3]). É esperado que o método desenvolvido ajude desenvolver ferramentas de automação para aliviar

a carga sobre o engenheiro do processo, aliviando uma de suas tarefas, e melhorar a produção.

1.3 Estrutura

Este relatório está dividido em quatro seções principais. Na seção 2, é dada uma visão geral dos campos de petróleo e como eles funcionam, explicando a estrutura de uma FPSO, assim como cada um de seus componentes. A medida que os sistema são descritos, as variáveis usadas para os testes serão destacadas. Na seção 3, é dada uma apresentação geral dos conceitos de otimização sem derivada, e são mostrados cada um dos métodos utilizados. Na seção 4, nós apresentamos a estrutura da aplicação, como os componentes se conectam, as configuração e condições dos testes, entradas e saídas, e discussão dos resultados. A seção 5 contém as conclusões dos experimentos.

2 Modelagem e Simulação de Poços de Petróleo e Gás

2.1 Produção em Alto Mar

A produção de petróleo e gás pode ser estruturada em diversos layouts diferentes. Em águas rasas, até 100m, é comum a utilização de Complexos de Águas Rasas, os quais são compostos de diversas plataformas, geralmente conectadas por pontes, cada uma com uma função principal, como acomodações, riser, e geração de energia. Já entre 100 e 500m, é possível utilizar-se de bases de gravidade, grandes estruturas cônicas e ocas de concreto, que tem função tanto estrutural quanto de armazenamento.

Torres articuladas são uma estrutura semelhante às bases de gravidade, mas as base é conectada a plataforma por uma torre articulada, de forma a absorver os impactos de correntes marinhas e ventos.

FPSOs (Floating, Production, Storage and Offloading) são geralmente construídas a partir de navios-tanque, com uma torre giratória na proa ou central aonde são conectadas as tubulações, permitindo que o navio se alinhe livremente ao vento e correntes marítimas. As FPSOs dominam os novos campos de petróleo, já que os novos campos de exploração estão predominantemente em áreas de maior profundidade, e são o foco nesse trabalho.

2.2 Floating Production, Offloading, Storage

Uma FPSO(Floating Production, Storage and Offloading) é uma estrutura utilizada para produção de óleo e gás em grandes profundidades. Trata-se geralmente de um cargueiro modificado, conectado a poços no fundo por risers e umbilicais, e ancorado no fundo do mar.

Estas estruturas são capazes de produzir, estocar, e descarregar óleo de forma autônoma. O gás no entanto costuma ser re-utilizado para a injeção na forma de gas-lift, uma forma artificial de aumentar a produção de poços, tranportado por tubulações, ou liquefeito para o transporte.

No fundo do oceano podem existir um ou mais poços, que são conectados a um manifold centralizando a coleta, que por sua vez conecta-se à FPSO por meio de flowlines e risers.

O gás, por ter sua armazenagem e transporte mais complicados, frequentemente é utilizado para gas-lift, ou escoado por tubulações submarinas, mas estas tubulações

frequentemente tem restrições de fluxo, requerendo certas especificações de composição e pressão, de forma que mais processamento é necessário.

Pequenas quantidades de hidrocarbonetos, em situações especiais, como desestabilização temporária de algum sistema, podem ser queimadas no flare. Embora fosse tradicional o uso continuo do flare no passado, atualmente, por pressões ambientais, eles são utilizados apenas esporadicamente.

- Discuss in the general terms the structure of an offshore oilfield, which consists of subsea oil wells with risers connecting to a production platform.
- Discuss in general terms the surface processing facilities, valves, separator, compressor, flare and exportation.

2.3 Poço de Petróleo

um poço de petróleo é geralmente uma perfuração na superfície terrestre conectando a um reservatório subterrâneo. Primeiramente, é iniciada uma perfuração na superfície utilizando-se brocas. Durante a perfuração, periodicamente o furo precisa ser reforçado, para evitar que todo o poço colapse. Este reforço é composto por cilindros estruturais que são instalados nas paredes externas da perfuração, que podem ser cimentados no exterior. O poço então é finalizado, etapa em que são abertos buracos no envoltório estrutural para a passagem de óleo e gás. Os métodos para criar estes orifícios variam de buracos pré-existentes nos envoltórios a explosões controladas.

Após a conclusão dos orifícios, é bombeado líquido de fraturação para abrir novos canais no reservatório e facilitar o escoamento. O poço então recebe a arvore de natal, composta por um choke, indicador de pressão, e outras valulas, e é conectado a um manifold. Em plataformas submarinas, o poço principal conecta diretamente ao manifold, enquanto poços satélites se conectam por linhas de fluxo multifásico. O manifold então conecta-se ao riser, uma tubulação responsável por transportar os fluidos até a superfície.

O riser, dependendo do tipo de óleo e condições climáticas, pode incluir aquecimento ou diluentes para facilitar o transporte.

Ao chegar a superfície, a mistura vai para um separador, geralmente uma grande estrutura cilíndrica aonde são separadas as diferentes fases do fluxo (gás, óleo e água), basicamente por ação da gravidade e diferença de densidade.

A separação pode ocorrer em diversos estágios, com diferentes pressões, para separar diferentes componentes. A partir deste estágio, o óleo pode ser armazenado e enviado para refinarias por tubulações, ou armazenado no casco e descarregado por navios tanque semanalmente. Já o gás (ó o gááás) não costuma ser armazenado, e tende a ser re-utilizado

ou enviado diretamente por tubulações, após um pre-processamento para se adequar as condições necessárias pela tubulação.

2.4 Gas Lift

A medida que um reservatório é esvaziado, a pressão interna dele abaixa, o que em alguns casos faz com que não haja pressão o suficiente para manter a vazão desejada. Uma solução para este problema é o gas lift, um método para a elevação artificial de fluidos, largamente empregado na indústria do petróleo. Este método consiste na injeção de gás pressurizado nos poços facilitando o deslocamento dos fluidos até a plataforma de produção. Ele funciona tanto pela efeito da energia da expansão do gás injetado, quanto pela diminuição da densidade média do fluido no riser, causada pela mistura de mais gás à mistura que é produzida. Uma característica do processo de gas lift visível neste trabalho é que existe um ponto ótimo de injeção, pois após um certo ponto, adicionar mais gás apenas aumenta a produção do próprio gás, ao invés de produzir mais líquidos. Para a utilização do gas lift são necessários compressores para pressurizar o gás novamente e reinjetá-lo no poço.

- Give a brief presentation about Marlim and/or Pipesim.
- Present some curves of oil wells modeled in Pipesim.

3 Otimização Livre de Derivadas

3.1 Visão Geral

- Motivate the use of derivative-free optimization. Frequentemente em problemas de engenharia os modelos utilizados são aproximações simplificadas da realidade, e em outros casos completamente desconhecidos.

  Métodos de otimização sem derivadas são adequados em casos aonde o modelo matemático é não-explicito, custoso ou as derivadas não estão disponíveis, devido a inexistência do modelo explícito ou presença de ruídos impossibilitando a estimação das derivadas.

  Os métodos de otimização sem derivadas procuram encontrar mínimos computando o menor número possível de pontos do problema, de modo a tentar minimizar também o tempo de execução da otimização.

- Give a general presentation/introduction to derivative-free optimization

3.2 Método do Simplex de Nelder-Mead

Também conhecido como Downhill Simplex Method, ou Amoeba Method, consiste em utilizar um poligono com n+1 vértices em n dimensões que se expande, contraí, ou reflete de modo a se mover em direção ao gradiente da função objetivo.

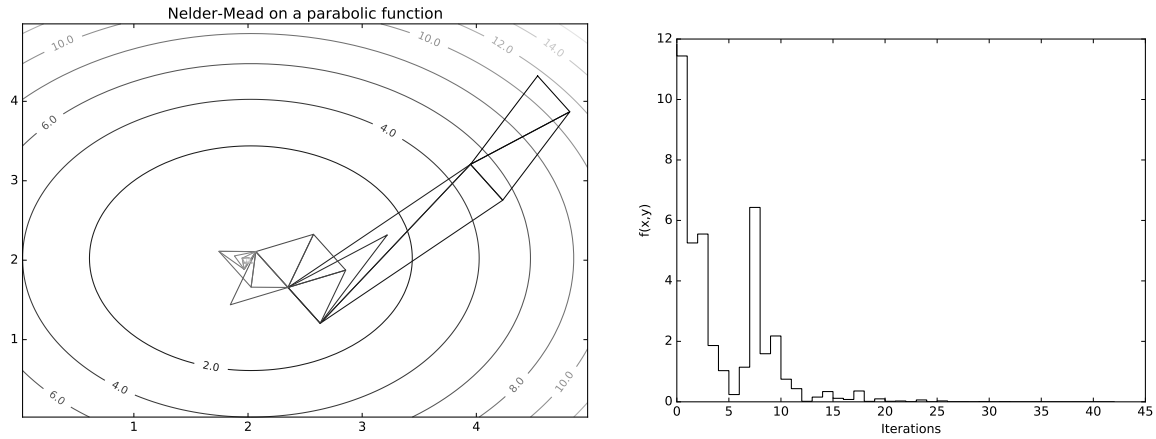
Um exemplo da execução do algoritmo de Nelder-Mead pode ser visto na figura 1. A partir de um ponto inicial, o simplex se locomove como uma ameba até encontrar um ponto de mínimo.

3.3 OrthoMADS

Os métodos MADS (Mesh Adaptative Direct Search) são uma classe de métodos baseados ...

A cada iteração k são executados dois passos de busca, Search e Poll, analisando a feasibility e valor da função. O objetivo de cada nova iteração é encontrar um ponto $f(x) < f(x_k)$, aonde x_k é o melhor ponto encontrado até a iteração atual.

As buscas são feitas sempre em uma grade, definida por:



(a) Passos do Nelder-Mead (b) Nelder-Mead aplicado em um parabolóide.

Figura 1 – Demonstração do Nelder-Mead

Algorithm 1 Nelder-Mead's Downhill Simplex

Require: $X = (x_1, ..., x_{n+1})$ pontos de teste:
while Não Convergiu **do**
  ordenar X; $(f(x_1) \leq f((x_2) \leq \cdots \leq f(x_{n+1}))$
  Calcular o centroide x_0 de $(x_1, ..., x_{n+1})$
  Calcular x_r refletido: $x_r = x_0 + \alpha(x_0 - x_{n+1})$
(Reflecção)
  if $f(f(x_1) < f(x_r) < f(x_n)$ **then**
    $x_{n+1} \leftarrow x_r$
    Continue
  end if
(Expansão)
  if $f(f(x_r) < f(x_1)$ **then**
    Calcular ponto expandido $x_e = x_0 + \gamma(x_r - x_0)$
    if $f(x_e) < f(x_r)$ **then**
      $x_n \leftarrow x_e$
    else
      $x_n \leftarrow x_r$
    end if
    Continue
  end if
(Contração)
  Computar o ponto contraído $x_c = x_0 + \rho(x_{n+1} - x_0)$
  if $f(x_c) < f(x_{n+1})$ **then**
    $x_{n+1} \leftarrow x_c$
    Continue
  end if
(Encolhimento)
  $x_i \leftarrow x_1 + \sigma(x_i - x_1), i = 2 \ldots n + 1$
end while

$M_k = \{x + \Delta_k^m Dz : x \in V_k, z \in \mathbb{N}^{nD}\} \subset \mathbb{R}^n$ Aonde M_k é o conjunto de pontos da grade, x é o ponto mínimo atual, Δ_k^m é o parametro de tamanho da malha, D é uma matrix $\mathbb{R}^{n \times n_D}$ composta por n_D direções que definem um conjunto gerador position no $\mathbb{R}^n$. Para o OrthoMads e LtMads, D é simplesmente definida como $[I_n - I_n]$ aonde I_n é a matriz identidade de dimensões n.

O passo search pode ser qualquer tipo de heurística que escolha um ponto mais adequado da malha para tentar acelerar a convergência.

O passo poll é a parte mais importante do método, que garante sua convergência. A cada iteração k os pontos a serem utilizados são definidos por:

$$P_k = \{x_k + \Delta_k^p d : d \in D_k\} \subset M_k$$

Aonde x_k é o ponto atual e cada coluna de D_k é formada por combinações inteiras das colunas de D de forma a criar um conjunto gerador positivo. Δ_k^p é o *parametro de tamanho de poll*.

Ambos LtMads e OrthoMads utilizam um parametro ℓ_k chamado de *indíce de malha* para atualizar os parametros de tamanho de poll e search de acordo com esta lógica:

$$\Delta_k^p = 2^{-\ell k} \text{ e } \Delta_k^m = min\{1, 4^{-\ell_k}\} \tag{3.1}$$

A cada nova iteração, se em uma iteração um novo *incumbente* não é encontrado, ela é dita mal sucedida, e $\ell_{k+1} \leftarrow \ell_k + 1$ (reduzindo Δ_k^m e Δ_k^p), por outro lado, se for encontrado um novo *incumbente*, a iteração é dita bem sucedidade, e $\ell_{k+1} \leftarrow \ell_k - 1$ (aumentando Δ_k^m e Δ_k^p). Devido a 3.1, no caso de uma iteração mal-sucedida o parametro de poll diminui mais rápido que o de malha, de modo a permitir o uso de muitos mais pontos, refinando a malha.

A diferença entre o OrthoMads e LtMads se dá na geração da base D_k. O LtMads utiliza uma matriz triangular inferior para a geração da base, fazendo permutações entre os elementos e completando ela em uma base maximal ou minimal, sem garantir ortogonalidade entre as direções, de modo que os ângulos entre as direções podem ser grandes, causando grandes cones de espaço não explorado. Já o OrthoMads utiliza uma base maximal definida por $[H_k - H_k]$, aonde as colunas de H_k formam um base ortogonal de $\mathbb{R}^n$. Além disso, os as direções de D_k são inteiras, de modo que os pontos gerados estão automaticamente contidos na malha definida por $D = [I_n - I_n]$.

Para a geração de D_k, o OrthoMads utiliza a sequencia pseudo-aleatoria de Halton, que cobre mais uniformemente o espaço que uma sequência aleatória real, para gerar vetores u_t.

A saída da sequência de Halton, no entanto, não respeita as restrições impostas pela malha. É necessário arrondar, escalar, e rotacionar o vetor u_t. O indíce ℓ é utilizado para transformar a direção u_t na *direção ajustada de Halton* $q_{t,\ell} \in \mathbb{Z}^n$, uma direção cuja norma é próxima a a $2^{\frac{|\ell|}{2}}$

HERE, BLACK MAGIC IS USED TO MAKE THE VECTOR ALIGN TO THE MESH.

Para definir $q_{t,\ell}$, primeiramente são definidas duas funções baseadas na t-ésima direção de Halton u_t:

$$q_t(\alpha) = \text{round}\left(\alpha \frac{2u_t - e}{||2u_t - e||}\right) \in \mathbb{Z}^n \cap \left[-\alpha - \frac{1}{2}, \alpha + \frac{1}{2}\right]^n$$

Aonde *round* é a operação arrendodar para cima ($round(0,5) = 1$, $round(-0,5) = -1$) e $\alpha \in \mathbb{R}_+$ é um fator de escala.

Desta forma, temos um problema de otimização, precisamos encontrar um $\alpha_{t,\ell}$ tal que $||q_t(\alpha_{t,\ell})$ seja o mais próximo possível de $2^{\frac{|\ell|}{2}}$ sem ultrapassá-lo.

$$\begin{aligned} \alpha_{t,\ell} \in \underset{\alpha in \mathbb{R}_+}{argmax} & ||q_t(\alpha)|| \\ \text{s.t.} & ||q_t(\alpha)|| \leq 2^{\frac{|\ell|}{2}} \end{aligned}$$

O problema pode ser resolvido facilmente, já que que os degraus da função $||q_t(\alpha)||$ acontecem em todos os α no conjunto

$$\left\{ \frac{(2j+1)||2u_t - e||}{2|u_t^i - e|} : i = 1, 2, \ldots, n, j \in \mathbb{N} \right\}$$

De forma que o problema pode ser solucionado varrendo os pontos do conjunto.

Com um vetor normalizado e na malha, $q \in \mathbb{Z}^n$, é necessário transformá-lo em uma base ortonormal de $\mathbb{R}^n$. Para isto é utilizada a transformação de Householder:

$$H = ||q^2||(I_n - 2vv^T), \ \ onde\ v = \frac{q}{||q||} \tag{3.2}$$

Aonde H é uma base ortonormal gerada a partir de q.

Com a base ortonormal criada, podemos utilizar o algoritmo 2, comum ao LtMads e OrthoMads.

ALGO MAIS DEVE SER ESCRITO AQUI, MAS OQ?

Algorithm 2 OrthoMads

[0] Inicialização
$x_0 \in \Omega, \ell_0 \leftarrow 0, k \leftarrow 0, t_0 \leftarrow p_n$
while Não Convergiu **do**
(ITERAÇÃO k)
    Search (opcional)
    Avalia f em um conjunto finito $S_k \subset M_k$
    POLL
    if o tamanho do parametro POLL é o menor até então ($\Delta_k^p = \min\{\Delta_j^p : j = 0, 1, \ldots, k\}$) **then**
        $t_k \leftarrow \ell_k + t_0$
    else (Já foram considerados tamanhos menores)
        $t_k \leftarrow 1 + \max\{t_j : j = 0, 1, \ldots, k-1\}$
    end if
    Computa $u_{tk}, q_{tk}\ell_k$ and $D_k = \begin{bmatrix} H_{tk} & -H_{tk} \end{bmatrix}$
UPDATES
    if A iteração foi bem sucedida (se existe um $x_s \in S_k$ ou $x_p \in P_k$ tal que $f(x_s) < f(x_k)$ ou $f(x_p) < f(x_k)$ **then**
        $x_{k+1} \leftarrow x_s$ or x_p
        $\ell_{k+1} \leftarrow \ell_k - 1$
    else(iteração falhou)
        $x_{k+1} \leftarrow x_k$
        $\ell_{k+1} \leftarrow \ell_k + 1$
    end if
    $k \leftarrow k + 1$
end while

4 Ferramentas

4.1 O Simulador Pipesim

Sistemas de produção de petróleo são sistemas nos quais se deseja sempre produzir o máximo possível e de forma segura. O PIPESIM, da Schlumberger, é um simulador de fluxo multifásico em regime permanente que pode ser utilizado tanto para o projeto como para planejamento de operações em campos de petróleo. Ele permite que sejam simuladas situações alternativas de forma mais rápida e segura que testes reais. É possível simular desde um único poço, como no projeto atual, até uma complexa rede de produção como as em uso pela Petrobras.

4.2 Python

O Python é uma linguagem de alto nível, interpretada, de desenvolvimento rápido muito utilizada para prototipação e na academia. Suas faciliades, como Jupyter Notebook [4], um ambiente que facilita a criação de documentos com códigos e análise de dados, e o Matplotlib [5], uma biblioteca que a torna quase tão poderosa quando o MatLab para visualização de dados, a tornaram muito utilizada também na academia.

Python tem como filosofia de design a legibilidade do código (foi escolhido o uso de espaços no lugar de chaves pra delimitação de blocos de código) e uma linguage e facilita a expressão de conceitos complexos em poucas linhas de código do que, por exemplo, em Java ou C++. A linguagem expõe estruturas e conceitos complexos em outras linguagens de forma facíl e intuitiva de utilizar.

A Linguagem surgiu em 1991 [6], e segundo o Tiobe [7] é a quarta linguagem de programação mais popular atualmente.

Sua facilidade de uso, expêriencia prévia, disponibilidade de ferramentas, e facilidades de visualização de dados foram decisivos para a sua escolha para este trabalho.

4.3 Interface Python e OpenLink

Para interfaceamento do Pipesim com outros softwares, a Schlumberger disponibiliza uma API (Application Programming Interface) chamada OpenLink, idealizada para programação em C++, VBA, ou Visual Basic. Esta pode ser utilizada para interação programática com o Pipesim, habilitando a configuração de novos poços, alteração de po-

ços existentes, análises, simulações, e automação de simulações. Com essa API, é possível variar os parametros do poço e avaliar as curvas características.

Utilizando-se a biblioteca de Python pyWin32, é possível comunicar-se com a API, mas apenas em versões do Windows de 32 bits. Apesar de algumas peculiaridades no tratamento de arrays e outros tipos de dados, esta biblioteca permite o uso da API em uma linguagem de desenvolvimento mais rápido[citation needed] e com grandes facilidades de análise de dados [citation needed].

4.4 NOMAD

Para utilização do orthoMADS, foi escolhida a ferramenta NOMAD [3], uma implementação em C++ do orthoMADS desenvolvida pelo GERAD [8], um centro de pesquisa multi-universidades canadenses para a solução de problemas de otimização sem-derivadas com problemas caixa-preta, aonde não se conhece o modelo explícito do problema. Bastando fornecer uma função objetivo e restrições, a ferramenta é capaz de encontrar um ponto ótimo para o problema. Ela também disponibiliza variações do algorítmo (como 2n ou n+1 bases) e a possibilidade de paralelismo (consultar mais que um ponto de forma concorrente).

4.5 Opal

Para o uso do NOMAD com o Python, era sugerido, até o começo destes trabalhos, o uso da ferramenta Opal [9] (A Framework for Optimization of Algorithms). Uma interface open-source de alto nível para a interface de Python com o NOMAD. Este framework dá a liberdade para configurar todos os parametros de otimização do NOMAD e também é capaz de paralelismo.

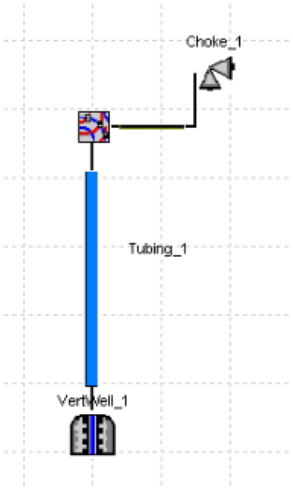
No entanto ele suporta apenas Python 2.7 que está para ser aposentado em 2020 [10], de modo que foi necessário portá-lo para Python 3 [11], contribuição que deve ser enviada para os repositórios originais assim que finalizada.

É interessante ressaltar também que a partir da versão 3.8.0 do NOMAD, foi implementada um interface própria em Python (novamente Python2.7) que deve ser analisada para uso em trabalhos futuros.

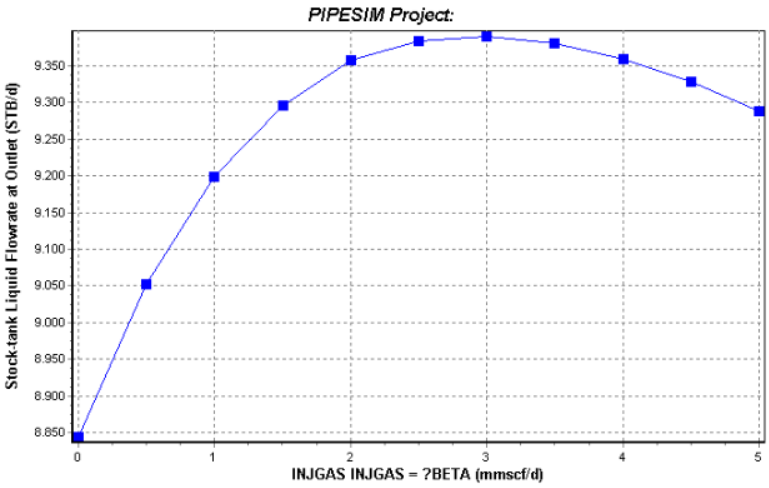
O Opal é um framework complexo, que embora seja utilizado atualmente apenas para o uso do NOMAD, contém a base para implementação de outros solvers genéricos, suporte a paralelismo, e a outras plataformas, como Sun Grid Engine e Symmetric Multiproccessing (SMP).

5 O Problema de Sintonia

A sintonia de simuladores de poços de petróleo costuma ser feita a partir de dados experimentais. A partir de testes de campo, adquirem-se pontos de testes do sistema real. Os pontos reais são utilizados como referência para que o operador varie o parâmetros de forma a encontrar o modelo que melhor represente os dados coletados. Para os testes neste trabalho, primeiramente foi configurado um único poço de petróleo, com uma estrutura simples e que pode ser visto na figura 2a. A seguir foram escolhidos dados arbitrariamente para compor a curva "real"de produção (figura 2b). Neste Experimento a curva sintonizada foi a de fluxo de líquido (Barris padrões por dia) por gás injetado (milhões de pés cúbicos padrões por dia), no entanto é possível utilizar outras curvas, ou ainda mais que uma, para a sintonia. Escolheu-se a pressão estática do reservatório como sendo 4000 psi absoluto, e um índice de produtividade liquido de 25 STDB/d/psi(Barris padrões por dia por pressão estática). Desta forma a figura 2b demonstra o poço "real"a ser sintonizado.



(a) Setup do poço de petróleo.



(b) Curva "real"do poço de petróleo.

Figura 2 – Configuração e curva do poço do experimento 1.

Em todos os testes, os parâmetros SP (pressão estática) e Liq PI (Índice de produção de líquido) foram iniciados respecticamente em 3000 (psi) e 15 (STDB/d). A interface OpenLink foi utilizada para modificar os parâmetros e ler uma nova curva de fluxo de liquido por injeção de gás, a distância quadrática entre as duas curvas foi utilizada como o erro na otimização.

6 O Experimento de Sintonia Sem Ruído

Foram realizados três experimentos de sintonia de curva, e utilizadas três abordagens diferentes para a sintonia. Primeiramente foi utilizado o orthoMADS, com a implementação NOMAD, em seguida, foi utilizado novamente o NOMAD, mas com surrogate model calculado pela SGTELIB, e finalmente, uma implementação do Nelder-Mead Simplex. Os resultados então são comparados quanto a número de avaliações e acurácia do resultado.

Os experimentos foram realizados em uma máquina virtual VirtualBox, rodando em um Xeon 2665, e utilizando dois núcleos.

6.1 Setup para sintonia de curva com o orthoMADS

Para a sintonia com o orthoMADS, foi utilizada o framework OPAL (A Framework for Optimization of Algorithms), interface python para o solver NOMAD. A implementação com o OPAL utiliza dois arquivos, "well_declaration.py"e "well_optimize.py".

O arquivo "well_declaration.py"expõe os componentes do problema:

- Nome do algoritmo:

```
# Define Algorithm object.
tuning = Algorithm(name='TUNING', description='Well Tuning')
```

- Comando utilizado pelo solver para avaliar a função:

```
tuning.set_executable_command('python pipesim_run.py')
```

- As variáveis de decisão:

```
static_pressure = Parameter(kind='real',
                            default=sp,
                            bound=(2000, 7000),
                            name='sp',
                            description='Static Pressure')
liq_pi = Parameter(kind='real',
                   default=pi,
                   bound=(15, 35),
                   name='pi',
                   description='Liq PI')

FD.add_param(static_pressure)
FD.add_param(liq_pi)
```

- E o erro:

```
error = Measure(kind='real', name='ERROR', description='Curve
    quadratic error')
FD.add_measure(error)
```

Já no arquivo "well_optimize", são declaradas estruturas auxiliares:

- É instanciado o solver:

```
def get_error(parameters, measures):
    return sum(measures["ERROR"])

data = ModelData(FD)
struct = ModelStructure(objective=get_error)  # Unconstrained
model = Model(modelData=data, modelStructure=struct)

NOMAD = NOMADSolver()
```

- São impostas as seguintes restrições ao solver do NOMAD:

```
F_TARGET = 0.1
```

De modo a limitar o tamanho mínimo da malha, e terminar a simulação quando a função custo chegar a um valor abaixo de 0.1

- E é inicilizada a otimização:

```
NOMAD.solve(blackbox=model)
```

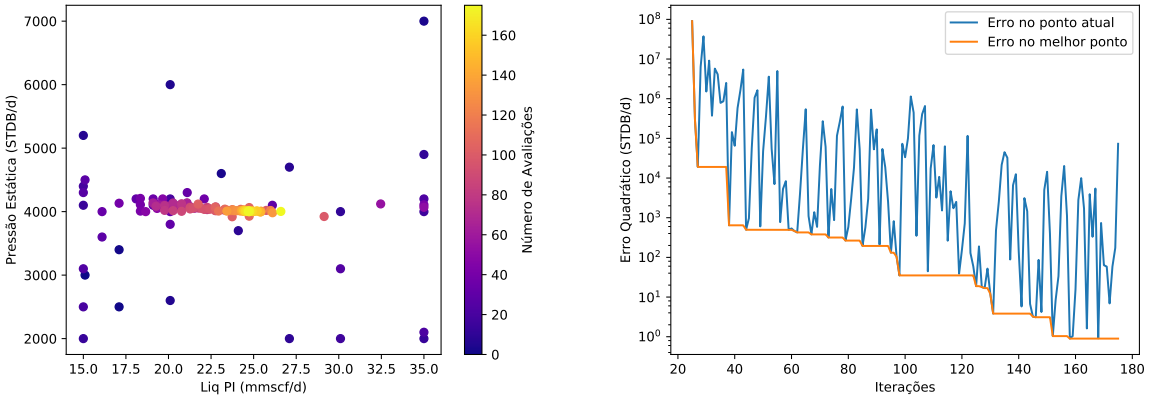
6.2 Resultados da Sintonia de Curva com o orthoMADS

Em 525 segundos (8:45 minutos) e com de 206 avaliações de caixa preta. O NOMAD convergiu para SP=4000.691, PI = 24.9544, com a função custo em 0.0757. A parada se deu pelo F_TARGET. A performance do algoritmo pode ser vista na figura 3.

6.3 A Surrogate Lib

Durante a realização desses experimentos, o NOMAD foi atualizado e recebeu uma ferramenta auxiliar, uma biblioteca que tenta aproximar a função a partir dos pontos já utilizados, para utilização no passo "search"do algoritmo. Esta biblioteca faz com que o algoritmo, a cada iteração, tente adivinhar a melhor direção para avançar, ao invés de progredir aleatoriamente.

Para o cálculo do modelo substituto, são possíveis nove tipos de modelos, que podem ser vistos na documentação, além de onze tipos possíveis de núcleos. Neste trabalho



(a) Pontos escolhidos pelo NOMAD.

(b) Erro nos pontos avaliados.

Figura 3 – NOMAD aplicado ao experimento 1.

foram utilizadas as opções padrão do NOMAD, um modeo PRS (Polynomial Response Surface) de ordem 2.

6.4 Setup Para Sintonia de Curva Com a Surrogate Lib

Um contra-tempo quanto a SGTELIB, como é chamada a biblioteca, é que ela está embutida nos binários do NOMAD, e, por algum erro, os binários para windows foram compilados com uma versão antiga do Microsoft Visual Studio, de forma que é necessário recompilar não apenas o sgtelib (o que pode ser feito com o mingW sem grandes mudanças), mas todo o NOMAD, necessitando a instalação de aproximadamente 4Gb do Visual Studio.

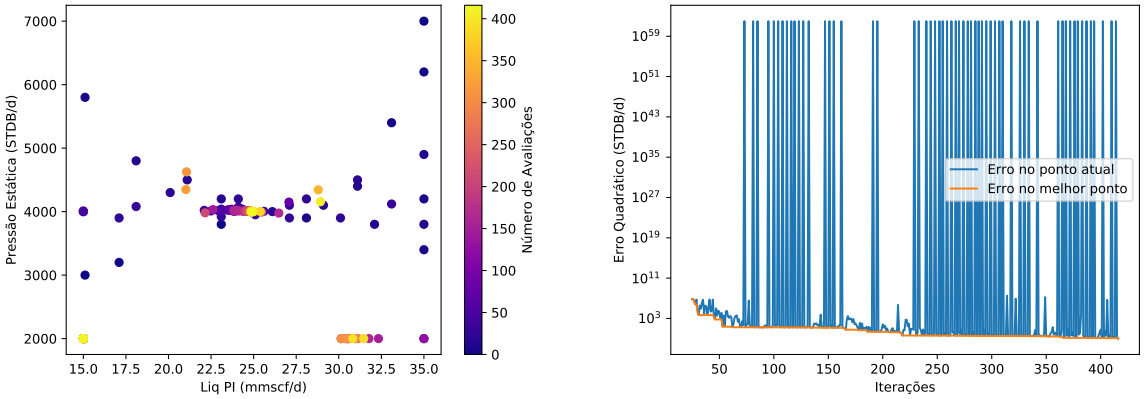
Após sua recompilação, bastou substituir o binário antigo pelo novo, é inserir nos parâmetros do NOMAD para o uso da SGTELIB, com seus valores padrõess:

```
1 NOMAD.set_parameter(name="MODEL_SEARCH", value="SGTELIB")
```

Para que ele passasse a utilizar o SGTELIB no local do seu SEARCH baseado em modelo quadrático.

6.5 Resultados da Otimização Com a Surrogate Lib

A execução demorou 1374 segundos (22:27 minutos) e necessitou de 417 avaliações de função de caixa preta. O Nomad novamente convergiu, desta vez para os valores:



(a) Pontos escolhidos pelo NOMAD.

(b) Erro nos pontos avaliados.

Figura 4 – NOMAD aplicado ao experimento 1 com SGTELIB.

$$SP = 4001.389$$
$$LiqPI = 24.905$$
$$Custo = 0.09986.$$

é possível notar, no entanto, que com o SGTELIB, em muitos pontos o erro quadrático saturou em 10^{64}. Nota-se também que pontos longe do ótimo foram avaliados perto da convergência (pontos claros no canto inferior esquerdo), o que pode significar que existe um problema com a SGTELIB, ou que o modelo utilizado não é o ideal.

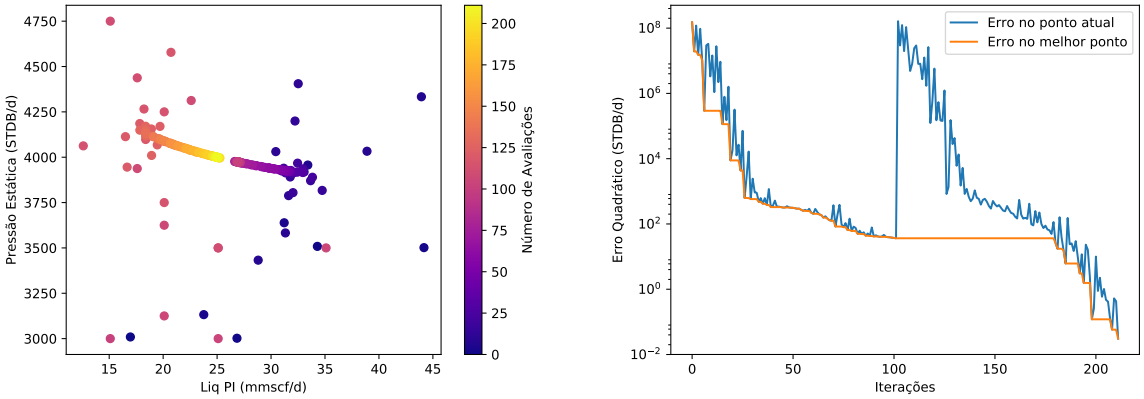
6.6 Setup da Otimização com Nelder-Mead Simplex

Para o teste com o Simplex de Nelder-Mead, foi utilizada uma implementação popria, baseada no algoritmo 1, e como ele não é facilmente paralelizável, não houveram preocupações com paralelismo. os limites utilizados foram os mesmos dos casos anteriores:

$$15 < pi < 35 \tag{6.1}$$
$$2000 < sp < 7000 \tag{6.2}$$

Como o simplex utiliza uma estrutura n-dimensional para a busca, são necessários n+1 pontos iniciais, por este motivo um triângulo foi expandido arbitrariamente a partir do ponto inicial, de modo que no começo do algoritmo, o simplex inicial seja grande. As restrições foram aplicadas somando-se um peso adicional a função custo.

Os resultados podem ser vistos nas figuras 5 e 6. Nota-se que a solução foi mais rápida, com 212 iterações em 133 segundos (2:13 minutos). No entanto, o método de



(a) Pontos escolhidos pelo Nelder-Mead. (b) Erro nos pontos avaliados.

Figura 5 – Nelder-Mead aplicado ao experimento 1.

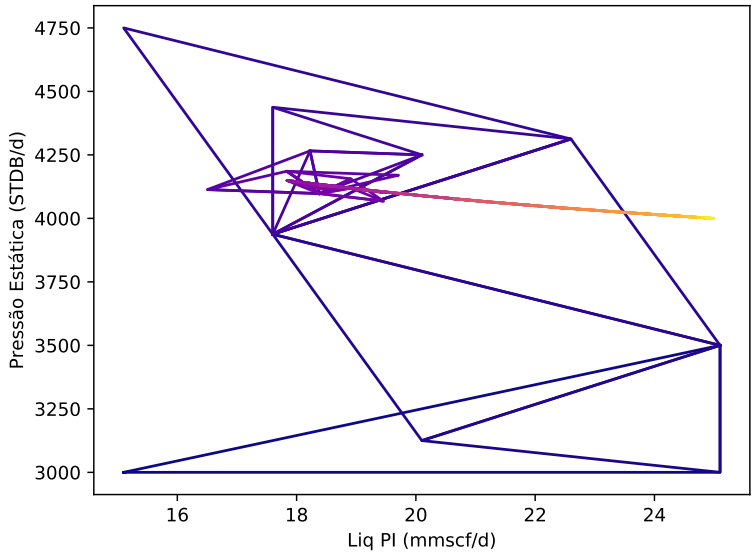


Figura 6 – Simplexes utilizados pelo Nelder-Mead.

Nelder e Mead não tem as mesmas características de convergência que os os métodos MADS. É interessante comentar a o caso da figura 5, aonde é possível notar que o simplex primeiramente contraiu-se por um lado, gerando a parte roxa, depois contraiu-se do outro, até chegar ao ponto ótimo.

6.7 Discussão

É possível notar, pela figura 7 que o Nelder-Mead, embora tenha utilizado um numero semelhante de iterações que o orthoMADS, foi aproximadamente quatro vezes mais rápido. É possível que isso se dê pelo fato de que o OPAL, embora utilize varias threads, talvez não faça um gerenciamento ideal do processador, e sim faça um "busy

Tabela 1 – Tempo de execução e numero de iterações por algoritmo

	Tempo	Iterações
OrthoMADS	525	206
OrthoMADS + SGTELIB	1374	417
Nelder-Mead	133	212

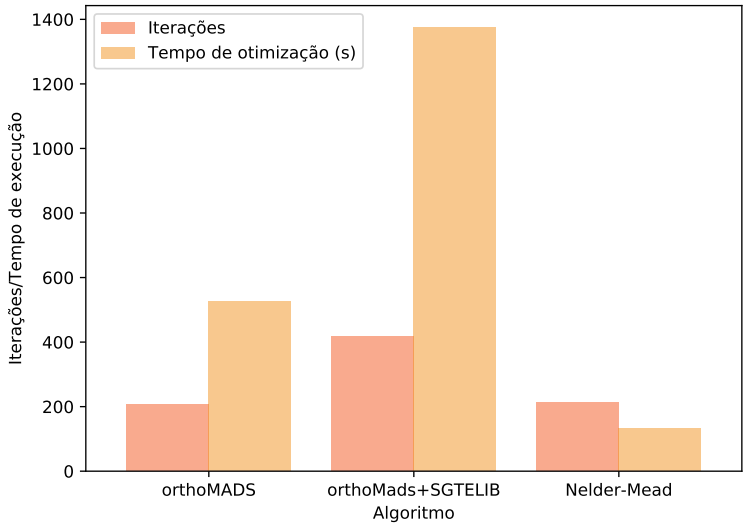


Figura 7 – Comparação entre tempos de execução e número de iterações entre os três experimentos.

wait", que é quando um processo espera um sinal (no caso o fim de uma thread) sem liberar o processador para outras threads. Embora exista a suspeita do problema, não foi possível localizá-lo no código fonte.

Outra possível interpretação é que a diferença seja devido ao overhead no NOMAD. Todas suas iterações envolvem o disparo de novos processos do Python, que por sua vez disparam o processo do Pipesim, além da escrita e leitura de diferentes arquivos para a comunicação entre os processos.

7 O Experimento de Sintonia Com Ruído

Para testar a robustez dos métodos, foi introduzido um ruído de medição nas variáveis. O valor escolhido foi uma distribuição normal de 5% da variável medida e média nula. Para o novo sistema de medição, foram repetidos os experimentos.

foram feitas 3 execuções de cada algoritmo: tempo iteracoes custo tempo iteracoes custo tempo iteracoes custo orthomads: 503 196 200 594 230 2700 sgtelib: 657 220 685 656 233 347 nelder-mead:

Referências

1 SINGER, A.; NELDER, J. Nelder-mead algorithm. *Scholarpedia*, v. 4, n. 7, p. 2928, 2009. Citado na página 9.

2 ABRAMSON, M. A. et al. Orthomads: A deterministic MADS instance with orthogonal directions. *SIAM Journal on Optimization*, v. 20, n. 2, p. 948–966, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1137/080716980>. Citado na página 9.

3 ABRAMSON, M. et al. *The NOMAD project*. Disponível em: <https://www.gerad.ca/nomad/>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 20.

4 JUPYTER. Disponível em: <http://jupyter.org/>. Citado na página 19.

5 MATPLOTLIB. Disponível em: <https://matplotlib.org/>. Citado na página 19.

6 THE History of Python. Disponível em: <http://python-history.blogspot.com.br/2009/01/brief-timeline-of-python.html>. Citado na página 19.

7 TIOBE. Disponível em: <http://www.tiobe.com/tiobe-index/>. Citado na página 19.

8 GERAD. Disponível em: <https://www.gerad.ca/en>. Citado na página 20.

9 DANG, C. K. *Optimization of algorithms with the OPAL framework*. Tese (Doutorado) — ProQuest Dissertations Publishing, 2012. Citado na página 20.

10 PYTHON 2.7 Release Schedule. Disponível em: <http://legacy.python.org/dev/peps/pep-0373/>. Citado na página 20.

11 PYTHON3 Opal Port. Disponível em: <https://github.com/Williangalvani/opal/tree/python3>. Citado na página 20.

Apêndices

APÊNDICE A – Revisão de Probabilidade

Anexos

ANEXO A – Title of Appendix A