



# PUC

INF2102

Projeto Final de Programação

## **Ferramenta para Análise de Incertezas de Reservatórios**

**Vitor Hespanhol Côrtes**

**Orientador.: Hélio Côrtes Vieira Lopes**

Departamento de Informática

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO**

**RUA MARQUÊS DE SÃO VICENTE, 225 - CEP 22451-900**

**RIO DE JANEIRO - BRASIL**

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Descrição do Problema . . . . .	2
1.2	Objetivo . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Descrição Técnica</b>	<b>3</b>
2.1	Criação do Estudo . . . . .	3
2.2	Execução do Estudo . . . . .	4
2.3	Análise dos Resultados . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Tecnologias</b>	<b>5</b>
3.1	Python . . . . .	5
3.2	Scipy . . . . .	5
3.3	PyDOE . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Projeto de Sistema e Documentação</b>	<b>6</b>
4.1	Diagrama de Casos de Uso . . . . .	6
4.2	Diagrama de Classes . . . . .	11
4.3	Diagrama de Sequências . . . . .	12
4.4	Repositório do Sistema . . . . .	14
<b>5</b>	<b>Testes</b>	<b>15</b>
<b>6</b>	<b>Resultados</b>	<b>16</b>
<b>7</b>	<b>Conclusão</b>	<b>18</b>
	<b>Referências</b>	<b>18</b>
	<b>Anexo A Casos de Teste do Sistema</b>	<b>19</b>

# 1 Introdução

Projetos de desenvolvimento da produção no setor de óleo e gás envolvem altos investimentos de capital e possuem intrinsecamente um elevado grau de risco relacionado às incertezas inerentes à atividade de Exploração & Produção (E&P) de petróleo. Tais incertezas vão desde características geológicas; passando pela caracterização dos fluidos presentes no reservatório de petróleo; até às premissas econômicas consideradas.

Um reservatório de petróleo é uma acumulação em subsuperfície que possui porosidade e permeabilidade suficientes para armazenar e permitir a produção dos fluidos contidos nela (óleo, água e/ou gás). Após a descoberta de um reservatório, é necessário definir um plano de drenagem para esta jazida e avaliar a viabilidade econômica do projeto.

Assim, a tomada de decisão em projetos de E&P é fundamentada na previsão do comportamento futuro do reservatório. Para isto é necessária a construção de um modelo numérico de reservatórios de forma a estimar a produção e avaliar a economicidade do projeto ao serem consideradas uma série de condições iniciais, sendo estes os parâmetros de entrada do modelo (figura 1).

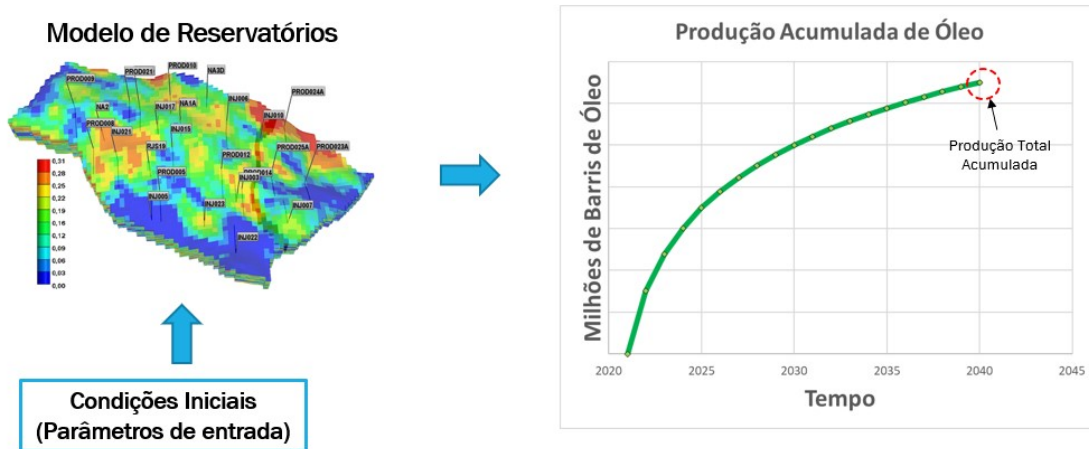


Figura 1: Modelagem e previsão de produção de reservatórios de petróleo

Contudo, é impossível caracterizar com precisão todos os parâmetros de entrada de um sistema dinâmico real, sendo necessário quantificar as incertezas envolvidas, realizando uma análise probabilística da resposta do modelo ao ser submetido a múltiplas combinações dos parâmetros de entrada. Através deste tipo de análise é possível avaliar os riscos e decidir pelo seguimento ou não do projeto (figura 2).

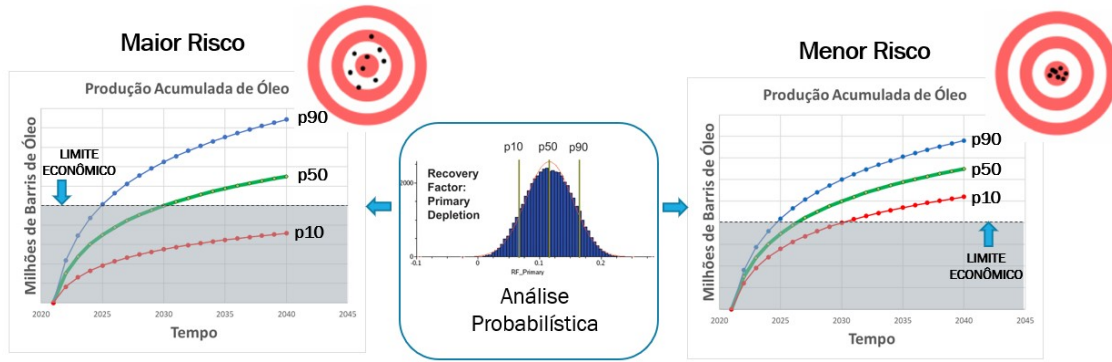


Figura 2: Avaliação de risco de projetos de E&P

## 1.1 Descrição do Problema

A realização de uma análise de incertezas robusta requer a simulação de múltiplos cenários de parâmetros de entrada dos modelos de reservatórios. É prática comum na área definir uma distribuição de probabilidades que contemple as incertezas de cada um dos parâmetros de entrada e, a partir destes, executar um conjunto de simulações de reservatórios de forma a avaliar a resposta de cada um dos modelos [2].

Portanto, este processo pode ser descrito simplificadaamente nas seguintes etapas:

- definição dos parâmetros de entrada e amostragem dos experimentos;
- simulação dos modelos de reservatório; e
- análise dos resultados.

Por se tratarem de múltiplos cenários, é um trabalho dispendioso realizá-lo manualmente, sendo desejável encontrar alternativas auxiliem nesse processo.

## 1.2 Objetivo

O projeto proposto consiste de uma aplicação que, a partir de um conjunto de parâmetros de entrada de um modelo de reservatórios, utilize técnicas de *design* de experimentos (DOE) para gerar múltiplos modelos a partir de um template (arquivo texto) informado pelo usuário. Esses modelos então serão submetidos à uma aplicação externa de simulação de reservatórios. Após simulados, as saídas (formatos txt) serão lidas pela aplicação e os resultados serão extraídos para permitir sua análise. Um *workflow* simplificado da solução é apresentado na figura 3.

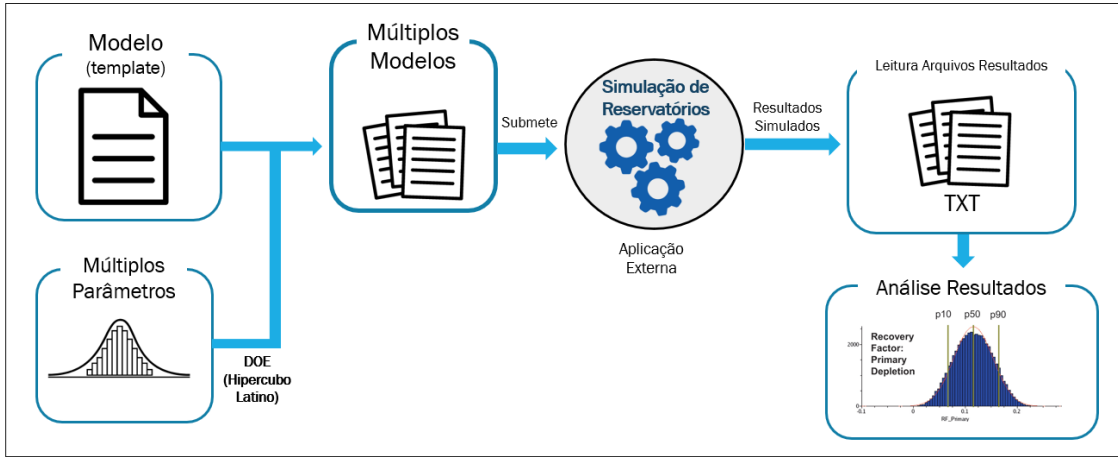


Figura 3: *Workflow* básico da aplicação.

Esta aplicação tem utilidade para qualquer usuário que pretenda realizar a análise de incertezas de reservatórios e necessite executar a simulação de múltiplos modelos. Uma vez que a simulação será executada por uma aplicação externa e o template de entrada será informado pelo usuário, está será uma aplicação flexível a qualquer simulador utilizado, sendo apenas necessário adequar o módulo de leitura dos resultados para o formato específico do simulador.

## 2 Descrição Técnica

O sistema proposto pode ser dividido em três módulos principais, que serão detalhados nas seções a seguir:

- criação do estudo de análise de incertezas;
- construção e simulação dos modelos (execução do estudo); e
- análise dos resultados.

### 2.1 Criação do Estudo

O processo de análise de incertezas se inicia a partir de um modelo de reservatórios base. Este servirá de *template* para a geração dos múltiplos modelos a serem construídos.

É comum avaliar mais de um caso de estudo sobre o mesmo modelo, como por exemplo a perfuração de um novo poço. Então será necessário definir um *template* para cada cenário (com e sem poço).

O especialista deve então definir quais serão os parâmetros incertos que ele deseja avaliar no estudo e as suas respectivas distribuições de probabilidade. Em seguida, deve definir o número de experimentos desejado e adotar uma técnica de amostragem, para gerar a tabela de experimentos.

Devem ser definidos também quais os resultados do modelo de simulação se deseja avaliar no estudo, como por exemplo a produção acumulada de óleo de um reservatório. Estes resultados são tipicamente nomeados ‘funções objetivo’ do estudo.

Assim, este módulo do sistema deve permitir a incorporação dos seguintes itens ao estudo:

- definição o número de amostras;
- criação de parâmetros e inclusão de suas respectivas distribuições;
- criação de casos de estudo e associação de seus respectivos *templates*;
- definição das funções objetivos;
- construção da tabela de experimentos utilizando a técnica de amostragem por hipercubo latino (*Latin Hypercube Sampling* [3]).

Para este projeto, serão implementadas classes que permitam aos parâmetros assumir distribuições uniforme, normal, log-normal e normal truncada. Contudo, a arquitetura será flexível para possibilitar uma fácil incorporação de novas classes de distribuição futuramente, caso desejado.

Nos *templates* dos modelos de reservatórios, haverá *tokens* para a substituição dos parâmetros pelos valores amostrados. Neste caso, adotou-se que os nomes dos parâmetros de estudo devem estar cercados por dois caracteres ‘@’ (ex.: ‘@porosidade@’).

Como funções objetivo, serão implementadas classes que extraiam as produções acumuladas de óleo e água, entre duas datas definidas pelo usuário. Será implementada adicionalmente a opção de se calcular uma função incremental entre dois casos (delta), como por exemplo, caso se deseje avaliar a produção acumulada incremental entre cenários com e sem a entrada em operação de novos poços no reservatório. Da mesma forma, a arquitetura será escalável para incorporar novas funções objetivo futuramente.

Tendo finalizada a configuração do estudo, este módulo irá salvá-la em um arquivo nomeado ‘`study.cls`’.

## 2.2 Execução do Estudo

Após ter todo o estudo definido, este será o módulo responsável pelo carregamento do estudo e em seguida pela construção dos múltiplos modelos a partir dos *templates*. Será responsável também por montar toda a estrutura de diretórios que permitirá a execução da simulação dos modelos.

A simulação de reservatórios será executada em um simulador externo ao sistema, que retornará os resultados. Este módulo então será responsável por extrair os resultados desejados e armazená-los em um formato padronizado para análise.

Para permitir que o sistema seja futuramente escalável para outros tipos de simuladores comerciais, a arquitetura irá considerar uma classe específica que trate da submissão da simulação e extração dos resultados, podendo ser substituída mais facilmente.

Tendo finalizada a execução, este módulo irá salvá-la em um arquivo nomeado ‘`results.cls`’.

## 2.3 Análise dos Resultados

Por fim, tendo os resultados disponíveis este módulo ficará responsável por realizar a análise dos resultados.

As análises que serão implementadas neste projeto serão:

- histogramas das funções objetivo selecionadas pelo usuário, com os percentis P10, P50 e P90;
- *cross-plot* para avaliar correlações entre parâmetros e funções objetivo;

Portanto, o sistema proposto neste projeto irá permitir apenas algumas análises simples sobre os resultados, mas futuramente pretende-se incorporar funcionalidades que tragam maior interatividade para o usuário (*dashboard*).

## 3 Tecnologias

### 3.1 Python

A linguagem de programação selecionada para o desenvolvimento do projeto foi o **Python**. Esta foi escolhida por ser uma linguagem de propósito geral de alto nível, que suporta o paradigma orientado a objetos e possui tipagem dinâmica, tendo como uma de suas principais características permitir a fácil legibilidade do código devido a sua sintaxe concisa. Além disso, dispõe de uma biblioteca padrão com os recursos poderosos, reforçada por módulos e *frameworks* desenvolvidos por terceiros, com vasta documentação e suporte da comunidade de desenvolvedores.

Apesar de ser uma linguagem interpretada, o que poderia representar um menor desempenho computacional, para este projeto considera-se que os benefícios de enfatizar a importância do esforço do programador superam os possíveis prejuízos, uma vez haverá uma alta carga de processamento de textos e há bibliotecas otimizadas que auxiliam algumas tarefas específicas como o *design* de experimentos, métodos estatísticos etc.

### 3.2 Scipy

O **SciPy** (<https://scipy.org/>) é uma biblioteca *open-source* disponível em **Python**, que dispõe de diversas rotinas aplicadas à modelagem e à solução de problemas científicos, dentre os quais otimização, álgebra linear, estatística, FFT, integração, além de outras aplicações matemáticas e de engenharia.

Para este projeto, foram utilizadas as ferramentas do sub-pacote *stats* para a modelagem da distribuição de probabilidades dos parâmetros de entrada do modelo de reservatórios.

### 3.3 PyDOE

O PyDOE (<https://pythonhosted.org/pyDOE/>) é uma biblioteca disponível em Python desenvolvida para auxiliar cientistas, engenheiros e estatísticos a construir um *design* de experimentos adequado para a solução de um problema.

Dentre os vários métodos incluídos no pacote, a amostragem por hipercubo latino está disponível e será utilizada para amostrar a tabela de experimentos que guiará a construção dos múltiplos modelos de reservatórios.

## 4 Projeto de Sistema e Documentação

O projeto do sistema será inspirado no padrão *Facade* (figura 4), com algumas adaptações. Este é um padrão do tipo estrutural, sendo indicado para sistemas complexos que possuem um grande número de classes independentes. Este padrão provê uma interface simplificada ao usuário, escondendo as complexidades de um sistema maior. Tipicamente, envolve uma única classe agrupadora, a qual delega chamadas do cliente aos objetos dos subsistemas que efetivamente implementam as funcionalidades necessárias.

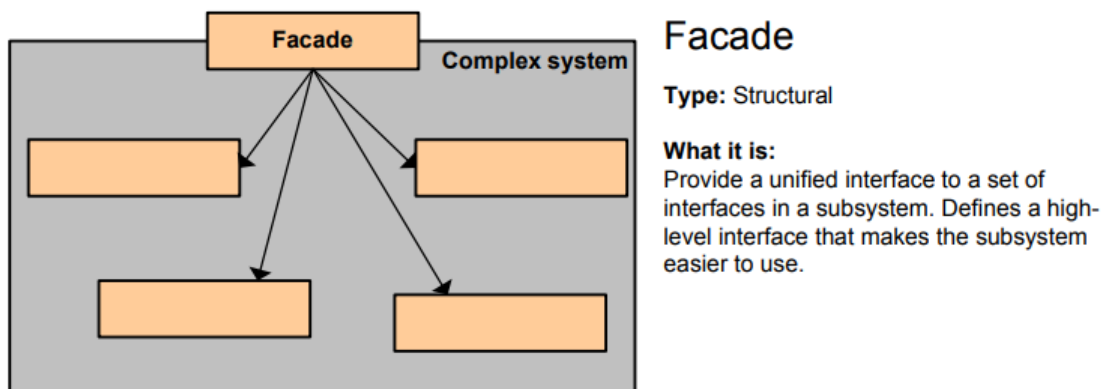


Figura 4: Padrão de projeto *Facade* [1].

### 4.1 Diagrama de Casos de Uso

A figura 5 mostra a estrutura e relacionamentos dos casos de uso do sistema. A mesma apresenta o cenário, os casos de uso, os atores e seus relacionamentos. Os atores do sistema são os seguintes:

- Usuário: especialista que deseja realizar a análise de incertezas (em geral, engenheiros de reservatórios).



- Simulador de Reservatórios Externo: *software* especializado que irá executar as simulações criadas e submetidas pelo sistema, retornando os respectivos resultados.

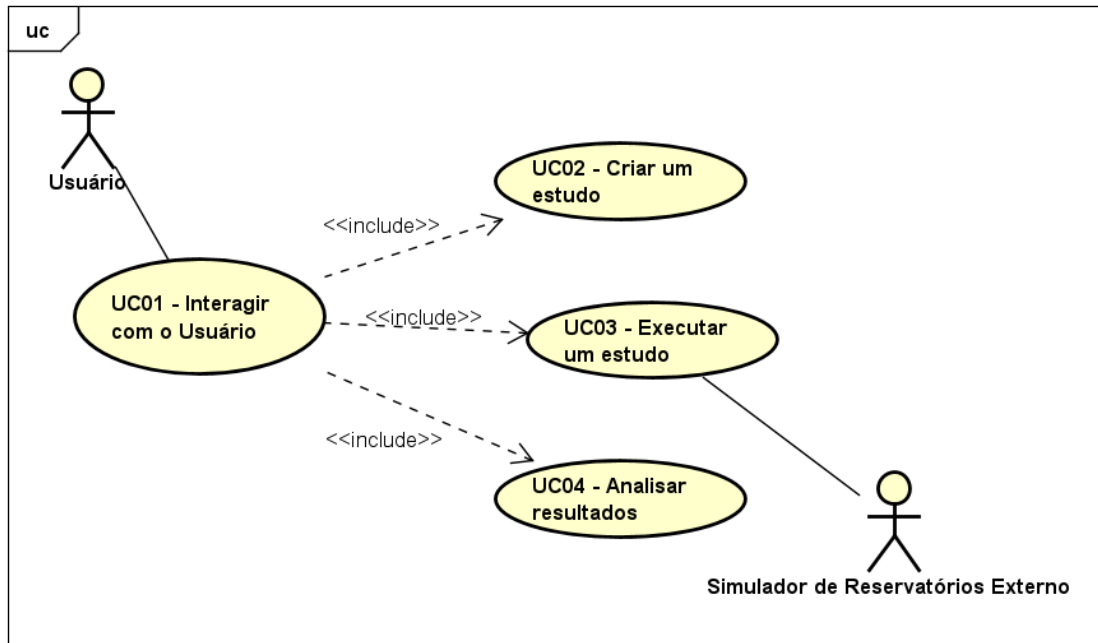


Figura 5: Diagrama de casos de uso do sistema.

Cada um dos casos de uso foi especificado e sua descrição (objetivo, regras de negócio, fluxos principal e alternativo etc) é apresentada nas tabelas 1, 2, 3 e 4.

Nome:	Interagir com o usuário (UC01)
Atores:	Usuário
Objetivo:	Permitir ao usuário acessar o sistema através de uma interface centralizada.
Trigger:	O ator inicializa o sistema
Fluxo Principal:	<p>1. O usuário inicializa o sistema;</p> <p>2. O sistema deve permitir ao usuário selecionar as seguintes funções <b>[RN1]</b>:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- criar um estudo ('Create Study');</li> <li>- executar um estudo ('Run Study');</li> <li>- analisar resultados um estudo ('Analyse Data').</li> </ul> <p>2. O ator seleciona uma das opções disponíveis. <b>[A1][A2][A3]</b></p> <p>4. O caso de uso é encerrado.</p>
Fluxo Alternativo:	<p><b>[A1]</b> Usuário selecionou a opções 'Create Study', representado pelo caso de usos UC02. Após finalizado, retorna para o passo 3 do Fluxo principal.</p> <p><b>[A2]</b> Usuário selecionou a opções 'Run Study', representado pelo caso de usos UC03. Após finalizado, retorna para o passo 3 do Fluxo principal.</p> <p><b>[A3]</b> Usuário selecionou a opções 'Analyse Data', representado pelo caso de usos UC03. Após finalizado, retorna para o passo 3 do Fluxo principal.</p>
Regras de Negócio:	<b>[RN1]</b> A interface deve ser em inglês.

Tabela 1: Especificação do caso de uso UC01

Nome:	Criar um estudo (UC02)
Atores:	Usuário
Objetivo:	Construir estudo de análise de incertezas definindo casos, parâmetros, funções objetivo e tabela de experimentos.
Trigger:	O ator seleciona a opção ‘Create Study’
Fluxo Principal:	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. O ator informa a pasta onde o estudo será salvo (path).</li> <li>2. O ator informa o nome do estudo.</li> <li>3. O ator informa o número de experimentos (sample size).</li> <li>4. O sistema deve permitir ao usuário selecionar as seguintes funções: <ul style="list-style-type: none"> <li>- atualizar o número de experimentos;</li> <li>- adicionar/remover casos <b>[RN1]</b>;</li> <li>- adicionar/remover parâmetros <b>[RN2]</b>;</li> <li>- adicionar/remover função objetivo <b>[RN3][RN4]</b>;</li> <li>- listar configuração do estudo;</li> <li>- salvar estudo <b>[RN5]</b>; e</li> <li>- sair.</li> </ul> </li> <li>5. O ator seleciona uma das opções disponíveis. <b>[A1][A2]</b></li> <li>6. O caso de uso é encerrado.</li> </ol>
Fluxo Alternativo:	<p><b>[A1]</b> Usuário selecionou quaisquer das opções, exceto ‘sair’. Ao final da execução, o sistema retorna ao passo 4 do Fluxo Principal.</p> <p><b>[A2]</b> Usuário selecionou opção ‘sair’. O sistema segue para o passo 6 do Fluxo Principal.</p>
Regras de Negócio:	<p><b>[RN1]</b> Sistema deve limitar a 2 casos por estudo.</p> <p><b>[RN2]</b> Parâmetros podem ter distribuição uniforme, normal, log-normal ou normal truncada.</p> <p><b>[RN3]</b> Sistema deve permitir selecionar as produções acumuladas de óleo e/ou de água acumuladas entre duas datas definidas pelo usuário.</p> <p><b>[RN4]</b> Sistema deve permitir ao usuário criar uma função objetivo que avalie o ganho incremental (delta) entre 2 casos.</p> <p><b>[RN5]</b> Ao selecionar salvar estudo, tabela de experimentos (DOE) também deve ser criada, através da técnica Latin Hypercube Sampling (LHS) .</p>

Tabela 2: Especificação do caso de uso UC02

Nome:	Executar um estudo (UC03)
Atores:	Usuário, Simulador de Reservatórios Externo
Objetivo:	Executar todos os experimentos (simulações de reservatório) definidos no estudo e salvar seus resultados.
Trigger:	O Usuário seleciona a opção 'Run Study'
Fluxo Principal:	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. O Usuário informa a pasta onde foi salvo estudo estudo que deseja executar (path/nome do estudo). <b>[A1][A2]</b></li> <li>2. Salva resultados.</li> <li>3. O caso de uso é encerrado.</li> </ol>
Fluxo Alternativo:	<p><b>[A1]</b> Se caminho for válido:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. carrega estudo;</li> <li>2. Submete todas as simulações do estudo ao ator 'Simulador de Reservatórios Externo'. Este irá executar a simulação e retorná os resultados <b>[RN1]</b>; e</li> <li>3. o sistema segue para o passo 2 do Fluxo Principal.</li> </ol> <p><b>[A2]</b> Se caminho for inválido, informa ao usuário. O sistema segue para o passo 3 do Fluxo Principal.</p>
Regras de Negócio:	<b>[RN1]</b> Ao término de cada simulação, deve ser mostrada na interface que esta foi finalizada.

Tabela 3: Especificação do caso de uso UC03

Nome:	Analisar resultados (UC04)
Atores:	Usuário
Objetivo:	Realizar análise dos resultados do estudo.
Trigger:	O ator seleciona a opção ‘Analyse data’
Fluxo Principal:	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. O ator informa a pasta onde o estudo foi executado (path/nome do estudo).</li> <li>2. O sistema permite ao usuário selecionar as seguintes análises: <ul style="list-style-type: none"> <li>- gerar histograma da função objetivo;</li> <li>- gerar crossplot;</li> </ul> </li> <li>3. O ator define configurações da análise. <b>[A3][A4]</b></li> <li>4. O sistema mostra resultado.</li> <li>5. O caso de uso é encerrado.</li> </ol>
Fluxo Alternativo:	<p><b>[A1]</b> Se caminho for válido, carrega resultados e o sistema segue para o passo 2 do Fluxo Principal.</p> <p><b>[A2]</b> Se caminho for inválido, informa ao usuário. O sistema segue para o passo 5 do Fluxo Principal.</p> <p><b>[A3]</b> Se foi selecionado o histograma, o sistema permite escolher a função objetivo desejada e número de bins <b>[RN1]</b>. Ao final, o sistema segue para o passo 4 do Fluxo Principal</p> <p><b>[A4]</b> Se foi selecionado o crossplot, o sistema permite escolher os parâmetros que serão apresentados nos eixos horizontal e vertical, além das funções objetivo que irão controlar o tamanho e a cor dos marcadores <b>[RN2]</b>. Ao final, o sistema segue para o passo 4 do Fluxo Principal.</p>
Regras de Negócio:	<p><b>[RN1]</b> No histograma devem ser apresentados os percentis P10, P50 e P90, além de um box plot e pontos representativos de cada modelo.</p> <p><b>[RN2]</b> No crossplot deve ser mostrada uma linha de tendência linear e violin plots nos eixos do gráfico.</p>

Tabela 4: Especificação do caso de uso UC04

## 4.2 Diagrama de Classes

Especificados os casos de uso, o sistema então foi projetado de forma a atender todos os requisitos. Foi criada uma classe responsável por servir de interface para usuário (classe IUA). Dentre as demais classes, foram criadas três para representar as principais atividades:

- classe **Study**: responsável por montar o estudo desejado;
- classe **Scheduler**: responsável por executar estudo; e
- classe **Analysis**: responsável por avaliar resultados;

Outras classes foram criadas para atender propósitos específicos. A figura 6 apresenta o diagrama completo com todas as classe do sistema.

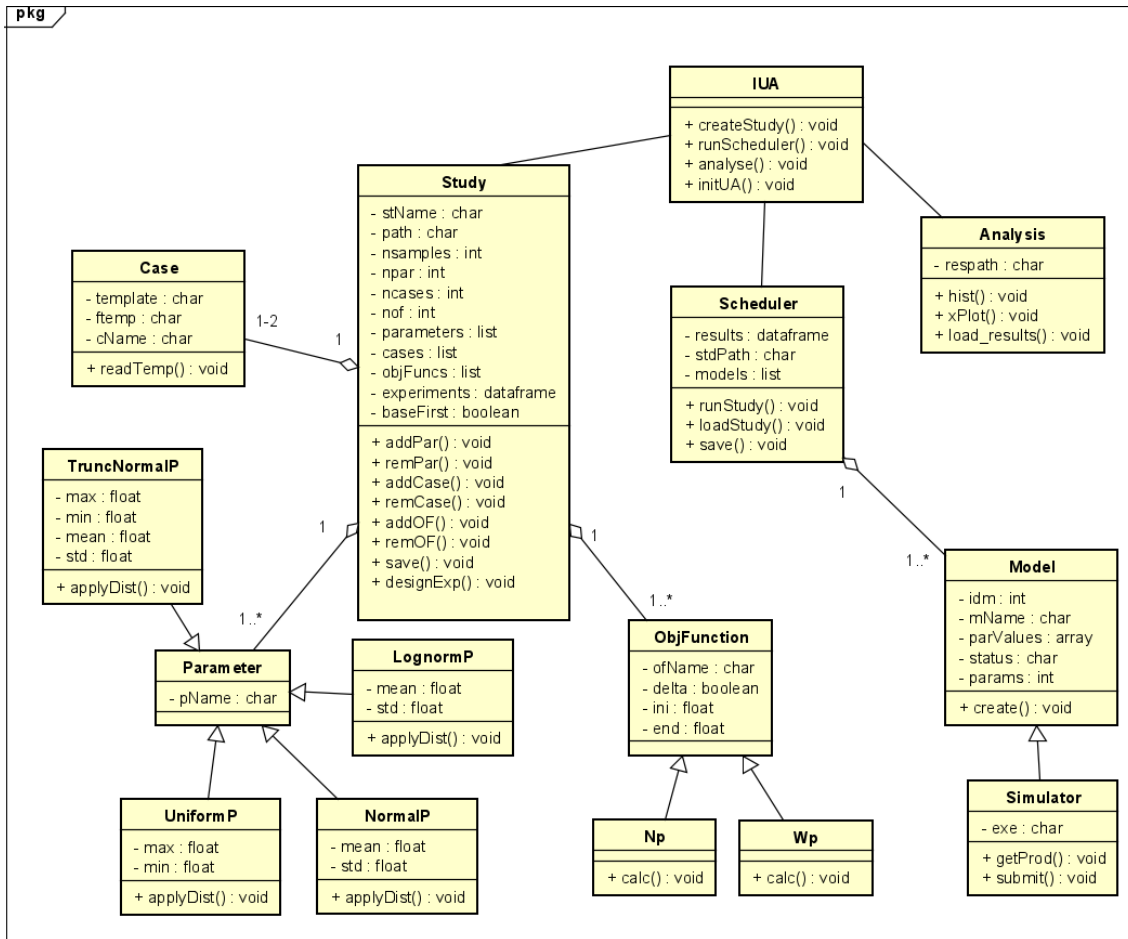


Figura 6: Diagrama de classes do sistema.

### 4.3 Diagrama de Sequências

De forma a melhor compreender como objetos e componentes interagem uns com os outros para concluir um processo, foram construídos os diagramas de sequência para as atividades criar estudo, executar estudo e analisar resultados, sendo apresentados nas figuras 7, 8 e 9, respectivamente.

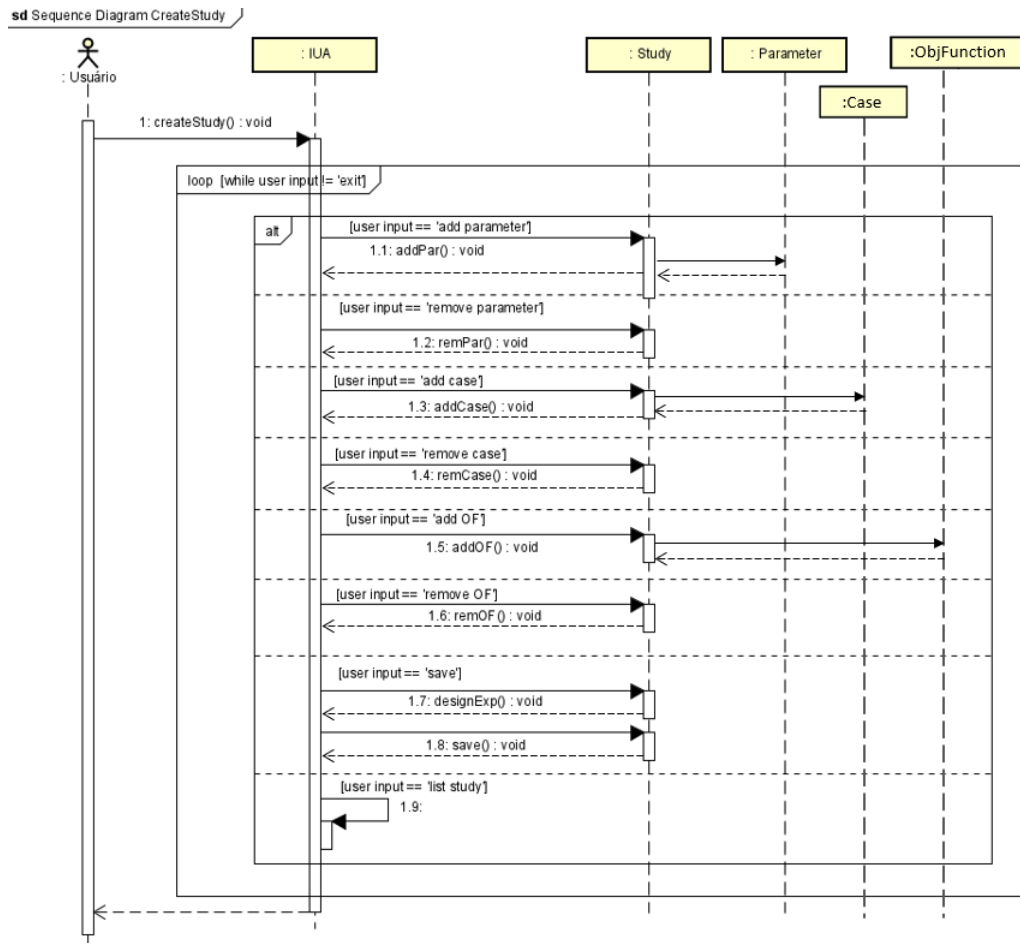


Figura 7: Diagrama de sequência para criação de um estudo.

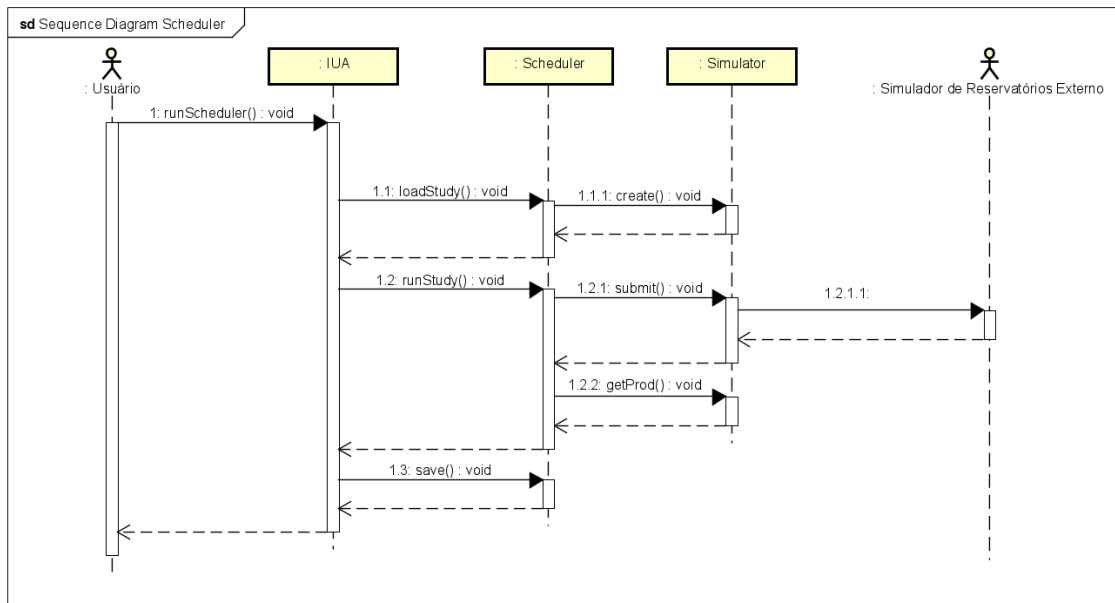


Figura 8: Diagrama de sequência para execução de um estudo.

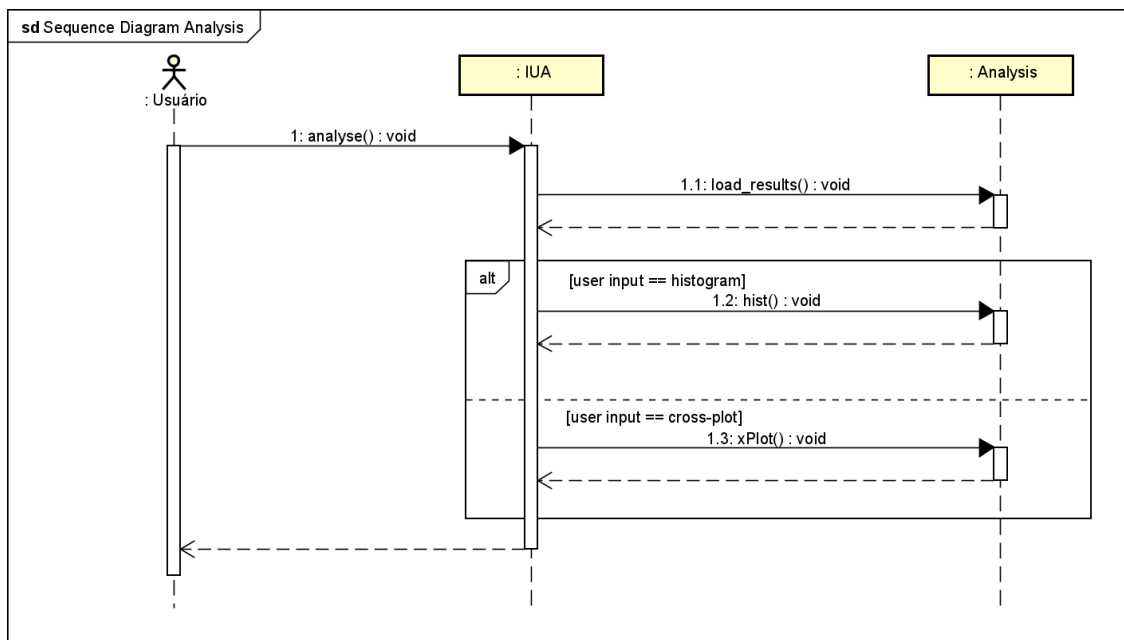


Figura 9: Diagrama de sequência para a análise dos resultados.

#### 4.4 Repositório do Sistema

O sistema foi disponibilizado no repositório [https://github.com/vhespanhol/uaa\\_inf2102](https://github.com/vhespanhol/uaa_inf2102). Este está organizado na seguinte estrutura :



```

UAA
├── classes
│   ├── analysis.py
│   ├── case.py
│   ├── iua.py
│   ├── model.py
│   ├── objfunction.py
│   ├── parameter.py
│   ├── scheduler.py
│   ├── study.py
│   └── toolkit/tools.py
├── test
├── project
│   └── reservoir
├── README.md
├── UAA.ipynb
└── test.ipynb

```

Dentre elas podem ser destacadas:

- diretório **classes**: contém os arquivos para cada classe do sistema;
- diretório **project/reservoir**: contém o template do modelo de reservatórios que será utilizado durante a execução do sistema; e
- arquivo **UAA.ipynb**: *notebook* com a inicialização da interface para uso.

## 5 Testes

Para realizar a verificação e a validação do sistema, foi elaborado um plano de testes. Este foi dividido em duas etapas:

- testes unitários de métodos específicos: validar componentes importantes do sistema, como por exemplo o cálculo correto das funções objetivo, criação da tabela de experimentos etc.
- testes gerais do sistema: avaliar a operação conjunta dos componentes e a interação com o usuário.

A tabela 5 apresenta os casos de teste básicos e seus resultados esperados e obtidos. Esta etapa foi automatizada e pode ser verificada em **test.ipynb**.

Os casos de teste do sistema são apresentados no anexo A. A execução dos testes de sistema é apresentada em **test/test\_interface.html**.

Na versão final do sistema, ambos os conjuntos de casos de teste foram completados com sucesso.

class	method	descrição	Resultado esperado	Resultado obtido	Status	par1	par2	par3
Case	readTemp	caminho válido para template	Nenhuma mensagem	<i>null</i>	ok	caso0	model.dat	<i>null</i>
Case	readTemp	caminho inválido para template	Mensagem de erro	Error 4: File/Path not found	ok	caso0	asdfadf	<i>null</i>
Np	calc	Cálculo do Np para data inicial zero	30000	30000	ok	of1	0	120
Np	calc	Cálculo do Np para data inicial não nula	475460	475460	ok	of2	120	3270
Np	calc	Data inicial maior que final	Mensagem de erro	Error 5: Invalid date.	ok	of3	3720	120
Np	calc	Data não simulada	Mensagem de erro	Error 5: Invalid date.	ok	of4	0	1000000
Wp	calc	Cálculo do Wp para data inicial zero	0	0	ok	of1	0	120
Wp	calc	Cálculo do Wp para data inicial não nula	312040	312040	ok	of2	120	3270
Wp	calc	Data inicial maior que final	Mensagem de erro	Error 5: Invalid date.	ok	of3	3720	120
Wp	calc	Data não simulada	Mensagem de erro	Error 5: Invalid date.	ok	of4	0	1000000
Study	designExp	Número de parâmetros 1 e amostras válido	Gerar DOE	DOE gerado corretamente	ok	std1	5	1
Study	designExp	Número de parâmetros válido e amostras 1	Gerar DOE	DOE gerado corretamente	ok	std2	1	5
Study	designExp	Número de parâmetros e amostras válido	Gerar DOE	DOE gerado corretamente	ok	std3	5	5
Study	designExp	Número de parâmetros zero	lista vazia	lista vazia	ok	std4	5	0
Study	designExp	Número de amostras zero	erro	erro	ok	std5	0	5
Study	designExp	Número de parâmetros negativo	erro	erro	ok	std4	5	-1
Study	designExp	Número de amostras negativo	erro	erro	ok	std5	-1	5

Tabela 5: Casos de testes unitários de métodos específicos e seus resultados.

## 6 Resultados

Finalizados os testes, o sistema encontra-se operacional foi montado um estudo para avaliar o ganho de se incluir um poço injetor adicional ao reservatório. Foram consideradas 100 amostras para o estudo e três parâmetros incertos foram avaliados:

- Saturação de água irreduzível ( $S_{wi}$ ): distribuição normal truncada.
- Saturação de óleo residual ( $S_{or}$ ): distribuição normal truncada.
- Permeabilidade relativa à água ( $k_{rwmax}$ ): distribuição uniforme.

Ao final, todas as simulações foram executadas com sucesso e foi possível avaliar o ganho incremental do poço. Na figura 10 pode-se verificar que o ganho esperado é de 4.1 milhões de barris de óleo (P50).

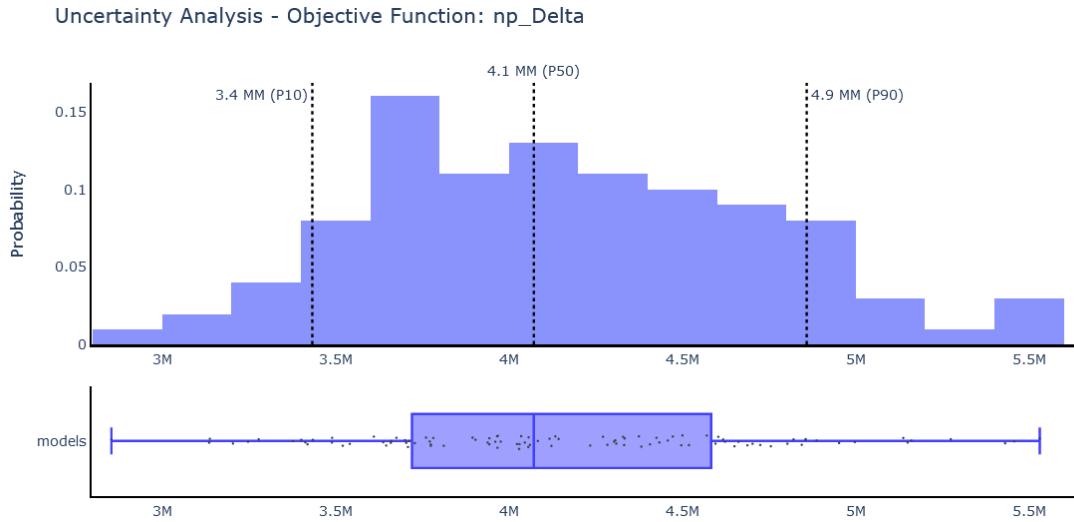


Figura 10: Histograma do ganho incremental acumulado de óleo com a perfuração de um novo poço injetor.

Uma possível análise do comportamento do reservatório perante os parâmetros incertos é apresentado na figura 11, que mostra o crossplot entre dois parâmetros do modelo selecionados pelo usuário (sor e krwmax). O tamanho dos marcadores representa a produção acumulada de água e as cores a produção acumulada de óleo. Percebe-se que a produção de água aumenta quando a permeabilidade máxima à água (krwmax) e a saturação de óleo residual (sor) aumentam, um resultado que é esperado.

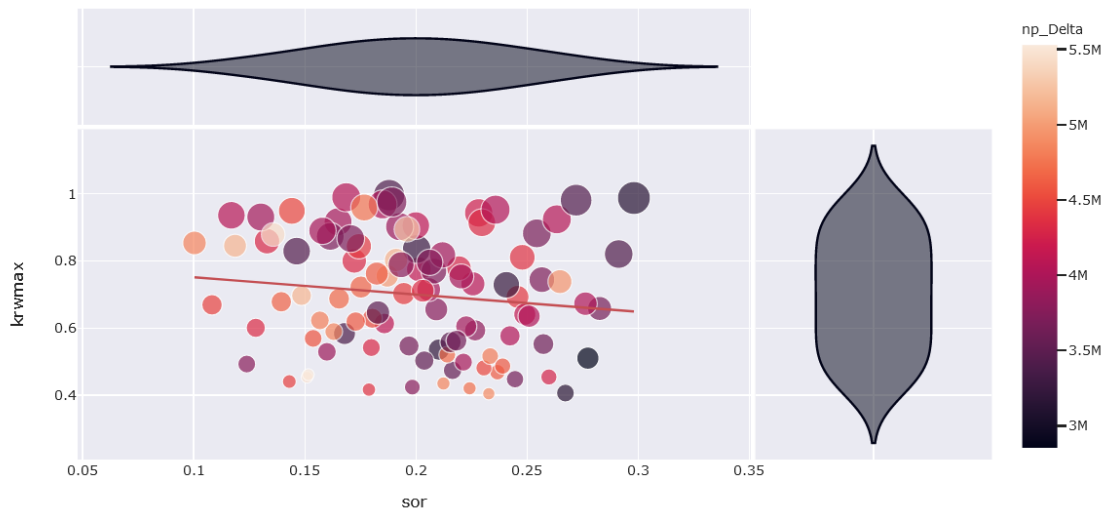


Figura 11: Crossplot correlacionando parâmetros com função objetivo.

Todas as etapas para realização deste estudo estão no arquivo 'UAA.ipynb', disponível no repositório.

## 7 Conclusão

O sistema desenvolvido neste trabalho pode ser considerado eficaz em auxiliar na implementação de um estudo de análise de incertezas de ponta a ponta: desde a amostragem dos parâmetros, *design* de experimentos, montagem dos modelos, submissão das simulações a uma aplicação externa, até a leitura e análise dos resultados.

Adicionalmente, a arquitetura proposta para a construção do sistema possui flexibilidade suficiente para permitir futuras melhorias, possibilitando facilmente a inclusão de novas classes que permitam adotar parâmetros com distribuições de probabilidade diferentes, novas funções objetivo, uso de outros simuladores de reservatório ou incluir novas ferramentas de análise.

## Referências

- [1] GAMMA, E., HELM, R., JOHNSON, R., VLISSIDES, J., AND PATTERNS, D. *Elements of reusable object-oriented software*, vol. 99. Addison-Wesley Reading, Massachusetts, 1995.
- [2] LEPINE, O., BISSELL, R., AANONSEN, S., PALLISTER, I., AND BARKER, J. Uncertainty analysis in predictive reservoir simulation using gradient information. *SPE Journal* 4, 03 (1999), 251–259.
- [3] MCKAY, M. D. Latin hypercube sampling as a tool in uncertainty analysis of computer models. In *Proceedings of the 24th conference on Winter simulation* (1992), pp. 557–564.

## Anexo A Casos de Teste do Sistema

As tabelas 6, 7 e 8 apresentam os casos de teste do sistema realizados.

Caso de Uso	Cenário	Resultado esperado	Status do teste
Interface	Selecionar opção diferente das possíveis	Fechar Programa	ok
Criar Estudo	Usuário insere caminho inválido para estudo	Error: Invalid path.	ok
Criar Estudo	Usuário insere caminho válido	Continua	ok
Criar Estudo	Usuário insere número de amostras inválido	Mostra mensagem (Error 7: Value must be integer). Permite usuário atualizar o numero de amostras pela opção '0'.	ok
Criar Estudo	Adicionar Caso. Caminho do template invalido.	Mostra mensagem: Error 4: File/Path not found.	ok
Criar Estudo	Adicionar Caso. Caminho do template válido.	Case <nome> sucessfully added.	ok
Criar Estudo	Adicionar Caso. Caminho do template válido. Nome do caso já utilizado.	Error 1: name already used.	ok
Criar Estudo	Remover caso	Case <nome> sucessfully removed.	ok
Criar Estudo	Remover parâmetro cujo nome não existe	Error 2: name not found.	
Criar Estudo	Inserir mais de 2 casos.	Não permite. Mensagem> Error 3: Number of Cases greater than 2.	ok
Criar Estudo	Adicionar parâmetro uniforme	Parameter <nome> sucessfully added.	ok
Criar Estudo	Adicionar parâmetro normal	Parameter <nome> sucessfully added.	ok
Criar Estudo	Adicionar parâmetro lognormal	Parameter <nome> sucessfully added.	ok

Tabela 6: Casos de testes do sistema e seus resultados (1/3).

Caso de Uso	Cenário	Resultado esperado	Status do teste
Criar Estudo	Adicionar parâmetro truncnormal	Parameter <nome> sucessfully added.	ok
Criar Estudo	Adicionar parâmetro com nome já utilizado	Mensagem: Error 1: name already used.	ok
Criar Estudo	Remover parâmetro existente	Parameter <nome> sucessfully removed.	ok
Criar Estudo	Remover parâmetro cujo nome não existe	Error 2: name not found.	ok
Criar Estudo	Adicionar função objetivo Np	Objective Function <nome> sucessfully added.	ok
Criar Estudo	Adicionar função objetivo Wp	Objective Function <nome> sucessfully added.	ok
Criar Estudo	Adicionar função objetivo com nome já utilizado	Error 1: name already used.	ok
Criar Estudo	Remover função objetivo	Objective Function <nome> sucessfully removed.	ok
Criar Estudo	Remover função objetivo cujo nome não existe	Error 2: name not found.	ok
Criar Estudo	Mostrar configuração do estudo (opção 7).	Mostra path, nome do estudo, número de amostras e listas dos nomes dos parâmetros, casos e funções objetivo.	ok
Criar Estudo	Salva estudo, houver erro no design de experimentos (DOE).	Study Incomplete. Please review before saving.	ok
Criar Estudo	Salva estudo, sem erros.	Study Saved!!!	ok
Criar Estudo	Seleciona opções não listadas (0-8)	Mostra opções de seleção novamente	ok
Criar Estudo	Seleciona opção '99' (EXIT)	Fechar Programa	ok
Executar Estudo	Usuário informa pasta estudo inexistente.	"Error 4: File/Path not found. Scheduler Error. Please review study."	ok
Executar Estudo	Pasta estudo existe, mas não há arquivo 'study.cls'	Scheduler Error. Please review study.	ok

Tabela 7: Casos de testes do sistema e seus resultados (2/3).

Caso de Uso	Cenário	Resultado esperado	Status do teste
Executar Estudo	Arquivo 'study.cls' encontrado, mas estudo possui configuração inconsistente (nome de parâmetros não presentes no template do caso)	Scheduler Error. Please review study.	ok
Executar Estudo	Arquivo 'study.cls' encontrado, mas há erro durante a simulação.	Scheduler Error. Please review study.	ok
Executar Estudo	Pasta com estudo válido.	Modelos serão gerados e ao final da simulação de cada uma mensagem será mostrada. Exemplo: Study is ready.   Model proj_ok_c1_00001.dat: Simulation done.   Results saved!	ok
Executar Estudo	Usuário informa pasta estudo inexistente.	Results Error. Please review study.	ok
Executar Estudo	Pasta estudo existe, mas não há arquivo 'results.cls'	Results Error. Please review study.	ok
Executar Estudo	Pasta com arquivo 'results.cls'	Mostra opções de histograma ou crossplot	ok
Executar Estudo	Pasta com arquivo 'results.cls'. Seleciona Histograma. Usuário insere opção diferente das mostradas na tela.	Results Error. Please review study.	ok
Executar Estudo	Pasta com arquivo 'results.cls'. Seleciona Histograma. Usuário insere opção válida.	Histograma apresentado.	ok
Executar Estudo	Pasta com arquivo 'results.cls'. Seleciona cross-plot. Usuário insere opção diferente das mostradas na tela.	Results Error. Please review study.	ok
Executar Estudo	Pasta com arquivo 'results.cls'. Seleciona cross-plot. Usuário insere opção válida.	Cross-plot apresentado.	ok

Tabela 8: Casos de testes do sistema e seus resultados (3/3).