



**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
**Autarquia Associada à Universidade de São Paulo**

**Análise de sensibilidade em códigos de desempenho de combustíveis nucleares**

**ANA CAROLINA BORTOLETTO DANTAS**

**Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Reatores**

**Orientador:  
Prof. Dr. Antonio Teixeira e Silva**

**São Paulo  
2021**

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
**Autarquia Associada à Universidade de São Paulo**

**Análise de sensibilidade em códigos de desempenho de  
combustíveis nucleares**

Versão Corrigida  
Versão Original disponível no IPEN

**ANA CAROLINA BORTOLETTO DANTAS**

Dissertação apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do Grau de  
Mestre em Ciências na Área de  
Tecnologia Nuclear - Reatores

**Orientador:**  
**Prof. Dr. Antonio Teixeira e Silva**

**São Paulo**  
**2021**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte

BORTOLETTO DANTAS, A. C. **Análise de Sensibilidade em códigos de desempenho de combustíveis nucleares**. 2021. 74 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Bortoletto Dantas, Ana Carolina

Análise de Sensibilidade em códigos de desempenho de combustíveis nucleares / Ana Carolina Bortoletto Dantas; orientador Antonio Teixeira e Silva. -- São Paulo, 2021.

78 p.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Reatores) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2021.

1. Simulação computacional. 2. Análise de sensibilidade. 3. Quantificação de incertezas. I. Teixeira e Silva, Antonio, orient. II. Título.

## Folha de Aprovação

**Autora:** Ana Carolina Bortoletto Dantas

**Título:** Análise de sensibilidade em códigos de desempenho de combustíveis nucleares.

**Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Reatores.**

**Data:** \_\_\_ / \_\_\_ / \_\_\_\_\_

### Banca examinadora

Prof. Dr.: \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_ Julgamento: \_\_\_\_\_

Prof. Dr.: \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_ Julgamento: \_\_\_\_\_

Prof. Dr.: \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_ Julgamento: \_\_\_\_\_

Prof. Dr.: \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_ Julgamento: \_\_\_\_\_

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Antonio Teixeira e Silva pela atenção e disponibilidade ao me orientar tanto nos trâmites acadêmicos quanto administrativos.

Estendo meus agradecimentos à Dra. Claudia Giovedi e à equipe do LADICON/CTMSP, que me ensinaram e ajudaram muito desde o início da minha iniciação científica.

Agradeço também à Universidade de São Paulo (USP) e ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN-SP) pelo espaço e equipamentos disponibilizados, bem como aos professores da Comissão de Pós-graduação.

Por fim, gostaria de agradecer à Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) pelo financiamento na forma de bolsa, permitindo que eu pudesse me dedicar exclusivamente aos estudos.

## RESUMO

DANTAS, Ana C. B. **Análise de sensibilidade em códigos de desempenho de combustíveis nucleares**. 2021. 78 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

Para o licenciamento de reatores nucleares é essencial que sejam apresentados cálculos e evidência experimental comprovando que sua operação obedece à normas de segurança impostas pelos órgãos reguladores. Este trabalho se propõe a efetuar uma análise de sensibilidade e quantificação de incertezas sobre o código TRANSURANUS adaptado para o uso do revestimento de aço inoxidável AISI-348 em varetas de combustível de um reator PWR, permitindo identificar quais os dados de entrada mais relevantes aos modelos do TRANSURANUS, bem como um intervalo de confiança para os resultados obtidos. A análise foi feita através da amostragem por métodos de Monte Carlo, onde os dados de entrada referentes à geometria e composição da vareta de combustível apresentam uma distribuição normal truncada nas tolerâncias de fabricação. Os valores aleatórios gerados foram usados como dados de entrada do TRANSURANUS e, após múltiplas execuções, os resultados do TRANSURANUS referentes à temperatura central do combustível, pressão interna da vareta e deformação do revestimento foram usados para a obtenção do intervalo de confiança e a realização de uma análise de sensibilidade por decomposição da variância.

Palavras chave: análise de sensibilidade; quantificação de incertezas; intervalo de confiança; desenvolvimento de combustível;

## **ABSTRACT**

DANTAS, Ana C. B. **Sensitivity analysis in nuclear fuel performance codes.** 2021. 78 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

In order for nuclear reactors to be licensed, it is essential that calculations and experimental evidence are shown proving its operation obeys safety regulations imposed by regulatory agencies. The present study proposes the execution of uncertainty and sensitivity analysis on TRANSURANUS code, adapted for the use of stainless steel AISI-348 as the cladding material for a PWR reactor fuel rod, thus allowing which input data are more relevant to the TRANSURANUS models, as well as a confidence interval for the results. The analysis was made through Monte Carlo sampling, where input values related to the geometry and composition of the fuel rod were taken from a normal distribution truncated around fabrication tolerance values. The generated samples were used as TRANSURANUS input data, and after numerous executions of the code, the results pertaining to the fuel center line temperature, fuel rod inner pressure and cladding strains were used to obtain a confidence interval and to make a variance based sensitivity analysis.

Key words: sensitivity analysis; uncertainty analysis; confidence intervals; fuel performance;

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Resultados dos índices de efeitos totais da referência [13] sob condições de contorno distintas.....	18
Figura 2: Comparação de dados experimentais com quantificação de incertezas presente na referência [12].....	20
Figura 3: Representação de uma rampa de potência a ser executada pelo TRANSURANUS .....	22
Figura 4: Pressão interna do gás ao longo da irradiação (a) e distribuição dos resultados finais (b) conforme obtidos pela referência [15].....	24
Figura 5: Distribuições das variáveis de entrada (abaixo), resultados obtidos (esquerda) e interações entre eles (scatterplots) exemplificando os resultados da referência [11].....	28
Figura 6: Exemplos de distribuições normais truncadas (vermelho e azul) quando comparadas com uma distribuição normal (preto).....	31
Figura 7: Histograma dos valores de temperatura máxima obtidos ao longo de 10 simulações, e ajuste de uma gaussiana à distribuição.....	59
Figura 8: Histograma dos valores de pressão máxima obtidos ao longo de 10 simulações, e ajuste de uma gaussiana à distribuição.....	60
Figura 9: Histograma dos valores de deformação máxima obtidos ao longo de 10 simulações, e ajuste de uma gaussiana à distribuição.....	61
Figura 10: Evolução temporal das temperaturas máximas, comparando o caso nominal do reator hipotético com 2000 variações simuladas.....	63
Figura 11: Evolução temporal das pressões máximas, comparando o caso nominal do reator hipotético com 2000 variações simuladas.....	64
Figura 12: Evolução temporal da deformação máxima, comparando o caso nominal do reator hipotético com 2000 variações simuladas.....	64
Figura 13: Comparação entre o caso nominal do reator hipotético e as simulações, região das temperaturas máximas.....	65
Figura 14: Comparação entre o caso nominal do reator hipotético e as simulações, região das pressões máximas.....	66
Figura 15: Comparação entre o caso nominal do reator hipotético e as simulações, região da deformação máxima.....	66



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Índices de Sobol (índices de sensibilidade de 1a ordem) calculados pela referência [12].....	24
Tabela 2: Descrições das variáveis de entrada do TRANSURANUS a serem variadas no experimento.....	31
Tabela 3: Valores nominais, desvios padrões e posições de truncamento para as distribuições das variáveis de entrada.....	33
Tabela 4: Correlações de Spearman referentes ao conjunto de amostras A da Simulação 1.....	38
Tabela 5: Correlações de Spearman referentes ao conjunto de amostras A da Simulação 2.....	39
Tabela 6: Correlações de Spearman referentes ao conjunto de amostras A da Simulação 3.....	39
Tabela 7: Correlações de Spearman referentes ao conjunto de amostras A da Simulação 4.....	40
Tabela 8: Correlações de Spearman referentes ao conjunto de amostras A da Simulação 5.....	40
Tabela 9: Correlações de Spearman referentes ao conjunto de amostras A da Simulação 6.....	41
Tabela 10: Correlações de Spearman referentes ao conjunto de amostras A da Simulação 7.....	41
Tabela 11: Correlações de Spearman referentes ao conjunto de amostras A da Simulação 8.....	42
Tabela 12: Correlações de Spearman referentes ao conjunto de amostras A da Simulação 9.....	42
Tabela 13: Correlações de Spearman referentes ao conjunto de amostras A da Simulação 10.....	43
Tabela 14: Índices de Sensibilidade calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 1.....	44
Tabela 15: Índices de Sensibilidade calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 2.....	44
Tabela 16: Índices de Sensibilidade calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 3.....	45

Tabela 17: Índices de Sensibilidade calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 4.....	45
Tabela 18: Índices de Sensibilidade calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 5.....	46
Tabela 19: Índices de Sensibilidade calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 6.....	46
Tabela 20: Índices de Sensibilidade calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 7.....	47
Tabela 21: Índices de Sensibilidade calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 8.....	47
Tabela 22: Índices de Sensibilidade calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 9.....	48
Tabela 23: Índices de Sensibilidade calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 10.....	48
Tabela 24: Índices de efeitos totais calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 1.....	50
Tabela 25: Índices de efeitos totais calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 2.....	50
Tabela 26: Índices de efeitos totais calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 3.....	51
Tabela 27: Índices de efeitos totais calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 4.....	51
Tabela 28: Índices de efeitos totais calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 5.....	52
Tabela 29: Índices de efeitos totais calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 6.....	52
Tabela 30: Índices de efeitos totais calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 7.....	53
Tabela 31: Índices de efeitos totais calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 8.....	53
Tabela 32: Índices de efeitos totais calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 9.....	54
Tabela 33: Índices de efeitos totais calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 10.....	54

Tabela 34: Média dos Índices de sensibilidade de primeira ordem, calculada sobre os valores das tabelas 14 a 23.....	55
Tabela 35: Média dos Índices de efeitos totais, calculada sobre os valores das tabelas 24 a 33.....	56
Tabela 36: Índices de sensibilidade de 1a ordem corrigidos através da aplicação do teste t. ....	57
Tabela 37: Desvios padrões associados aos índices de sensibilidade de primeira ordem, obtidos a partir da variância entre as simulações.....	57
Tabela 38: Índices de efeitos totais corrigidos através da aplicação do teste t.....	58
Tabela 39: Desvios padrões associados aos índices de efeitos totais, obtidos a partir da variância entre as simulações.....	58
Tabela 40: Soma dos índices de sensibilidade para os modelos do TRANSURANUS.....	59
Tabela 41: Resultados da quantificação de incertezas referentes à temperatura central do combustível.....	62
Tabela 42: Resultados da quantificação de incertezas referentes à pressão interna da vareta.....	63
Tabela 43: Resultados da quantificação de incertezas referentes à deformação do revestimento.....	64
Tabela 44: Comparação entre média e desvio padrão da amostra com média e desvio padrão de uma gaussiana ajustada sobre os histogramas.....	65

# Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Análise de desempenho de combustível.....	11
1.2 O código TRANSURANUS.....	12
1.3 Quantificação de incertezas e análise de sensibilidade.....	13
1.4 Caso estudado.....	14
1.5 Objetivo.....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3 METODOLOGIA.....	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
4.1 Análise de sensibilidade.....	35
4.2 Quantificação de Incertezas.....	59
5 CONCLUSÕES.....	67
6 ATIVIDADES FUTURAS.....	69
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Análise de desempenho do combustível nuclear

Um reator nuclear é um sistema complexo, no qual diversos fenômenos físicos interagem desde a escala atômica até a escala macroscópica das dimensões do reator, de forma que – exceto nos casos mais simples – a realização de previsões teóricas sobre seu funcionamento só é possível por meio do uso de soluções numéricas, as quais são obtidas por meio de *softwares* especializados. Dentre esses, destacam-se os códigos de análise de desempenho do combustível nuclear, que tem por objetivo determinar o comportamento de uma vareta de combustível ao longo do histórico de irradiação, caracterizando esse desempenho através de resultados que avaliam a quantidade de energia produzida, as temperaturas no combustível e no revestimento, a quantidade de gases liberados durante a fissão, as deformações no revestimento e outras informações que dizem respeito à integridade estrutural da vareta de combustível; permitindo avaliar se o combustível cumpre a funcionalidade pretendida (geração de energia) enquanto respeita critérios de segurança estabelecidos.

A primeira barreira que impede os produtos de fissão radioativos de entrarem em contato com o meio ambiente é a própria pastilha de combustível. Quando a pastilha de combustível é trincada durante a operação, os gases de fissão escapam e devem ser contidos pelo revestimento. Assim sendo, os critérios de segurança são escolhidos com o intuito de preservar a integridade de pastilhas e revestimento. De acordo com as normas internacionais referentes ao licenciamento de reatores, uma vareta de combustível nuclear deve ser projetada de tal forma que, durante sua operação normal, a temperatura central das pastilhas não ultrapasse o ponto de fusão do combustível; a pressão interna da vareta seja inferior à do refrigerante de forma a prevenir arrebentamento; e a deformação do revestimento seja inferior a 1% [1].

Os resultados obtidos por códigos de desempenho de combustível devem ser validados por meio de experimentos, porém tais ferramentas computacionais ainda exercem grande importância para agilizar o processo de desenvolvimento de um novo elemento de combustível.

Ao se realizar uma análise de desempenho do combustível, deve-se escolher uma análise conservativa ou uma realista, cada uma apresentando vantagens e desvantagens. Enquanto uma análise conservativa tende a ser preferida por questões de segurança, uma análise realista costuma ser mais interessante do ponto de vista da vida útil do combustível e da geração de energia. No entanto, os processos reais ocorrendo dentro do reator estão sujeitos a variações e incertezas, de forma que para a utilização de uma análise realista é imperativo estabelecer um intervalo de confiança dentro do qual os resultados obtidos sejam válidos.

## 1.2 O código TRANSURANUS

O código de desempenho do combustível escolhido para a realização deste estudo foi o TRANSURANUS, descrito na referência [2]. O TRANSURANUS é um programa de computador desenvolvido pelo Instituto de Elementos Transurânicos, consistindo em uma estrutura mecânico-matemática para análises térmicas e mecânicas do combustível nuclear. O TRANSURANUS se adequa a diversos tipos de varetas de combustível, permitindo selecionar o tipo de reator nuclear, geometria das varetas no elemento combustível (hexagonal ou quadrada), material de combustível e de revestimento, geometria da vareta e pastilhas de  $UO_2$ , modelos de condutividade térmica e condições de contorno utilizadas, como a vazão e a temperatura do refrigerante e características do fluxo de nêutrons. O *software* fornece como resultado as temperaturas nos diversos componentes do sistema, a queima atingida (*burnup*) pela vareta de combustível, a quantidade de gases de fissão liberados, as deformações no revestimento, etc. – permitindo a avaliação dos critérios de segurança descritos na seção anterior. O TRANSURANUS também permite, além da análise de desempenho de um reator um reator operando em estado estacionário, submeter a vareta combustível a

rampas de potência, tanto em condições de operação normal quanto em cenários de acidentes.

Uma análise do acidente nuclear ocorrido em Fukushima em 2011 revelou que a causa da explosão do núcleo e subsequente ejeção de materiais radioativos na atmosfera foi o acúmulo de hidrogênio – um gás altamente explosivo – na crosta formada pela oxidação da liga de zircônio presente neste reator. Durante o terremoto, o sistema de segurança da usina nuclear entrou em ação, desligando o reator, porém o tsunami danificou os geradores responsáveis pela remoção do calor residual, de forma que o acúmulo de hidrogênio e a elevação da temperatura colaboraram para a explosão [3]. Como resultado, iniciou-se um movimento de busca por novos materiais de revestimento que pudessem substituir as ligas de zircônio amplamente utilizadas na atualidade, e que fossem mais resistentes à corrosão e deformação. Uma alternativa considerada de bastante relevância é o uso de ligas à base de ferro, graças à sua maior resistência mecânica [4].

Entre as propriedades materiais incluídas no TRANSURANUS, existe também uma opção para revestimento tipo aço inoxidável AISI-316, o qual foi adotado como material de revestimento de reatores rápidos após a descoberta dos fenômenos de inchamento e fluência por irradiação [5]. A versão do código a ser utilizada neste trabalho foi desenvolvida por Giovedi et al. na referência [6] e apresenta uma expansão do código original ao incluir uma biblioteca de propriedades de materiais para o revestimento tipo aço AISI-348, que apresenta vantagens adicionais em relação ao aço AISI-316 implementado no código original, como por exemplo uma maior resistência a corrosão [6, 7].

### 1.3 Quantificação de incertezas e análise de sensibilidade

Os dados de entrada do TRANSURANUS estão sujeitos a diversos tipos de incertezas: aquelas inerentes aos modelos matemáticos utilizados, uma vez que todo modelo é uma simplificação da realidade; outras referentes aos valores dos parâmetros utilizados no modelo, que podem ser desconhecidos ou sujeitos a variação natural; bem como incertezas referentes às condições de

contorno e aos parâmetros de fabricação. Uma vez que, dentre as possíveis fontes de incerteza, as dimensões das pastilhas e vareta de combustível são parâmetros sobre os quais temos um grande controle (pois podem ser facilmente medidas e peças que não estejam dentro dos limites de tolerância são descartadas) este trabalho se concentrará na investigação dos efeitos causados pelas incertezas de fabricação da vareta de combustível.

O processo pelo qual se determina uma variância e intervalo de confiança para os resultados de um modelo matemático é chamado quantificação de incertezas. Para a realização de uma quantificação de incertezas, deve-se identificar os dados de entrada incertos e as distribuições que melhor os representam. Uma análise estatística é realizada sobre esses dados, selecionando-os aleatoriamente de acordo com as distribuições e aplicando-os ao modelo. Ao final, é analisada a distribuição dos resultados, e são extraídas quantidades de interesse, como média e variância.

Outro estudo de interesse para a análise do projeto do reator é a análise de sensibilidade, na qual é determinada a importância relativa de cada dado de entrada considerado incerto. A análise de sensibilidade pode ser feita de maneira local, variando-se um parâmetro de cada vez, ou global, por métodos semelhantes aos descritos para a quantificação de incertezas. Este trabalho é focado na análise de sensibilidade global utilizando métodos de decomposição de variância, que – como o nome indica – decompõem a variância dos resultados atribuindo porcentagens dela a cada um dos dados de entrada variados. Ao realizar uma análise de sensibilidade deste tipo é possível determinar quais parâmetros exercem influência maior sobre o modelo, permitindo a tomada de decisões de pesquisa, como por exemplo investir no controle de uma variável com o intuito de diminuir a variância sobre o resultado. No caso dos parâmetros de fabricação, isso é feito na prática ao se escolher tolerâncias de fabricação menores.



#### 1.4 Caso estudado

O caso padrão a ser examinado com o TRANSURANUS consiste em um reator PWR hipotético projetado com base em reatores de uso comercial, tendo como principal diferença a utilização de aço AISI-348 como material do revestimento da vareta de combustível. As varetas são preenchidas por uma coluna de pastilhas de dióxido de urânio e pressurizadas por gás hélio. O regime de irradiação a ser aplicado faz uso das capacidades do TRANSURANUS para o cálculo de rampas de potência: o reator é mantido funcionando a 30% de sua potência nominal durante a maior parte da irradiação, exceto durante alguns ciclos em que é forçado a aumentar a produção de energia de forma abrupta, sendo elevado à potência máxima num intervalo de 60 segundos e nela permanecendo por 10 dias, para então voltar aos 30% de potência em 30 segundos. Esse ciclo é repetido cinco vezes no início da vida da vareta de combustível, onde foi observado que as temperaturas são mais elevadas durante os picos de potência, e em seguida foi mantido nas condições de irradiação do estado estacionário a 30% de potência, por 26400 horas (equivalente a 3 anos).

#### 1.5 Objetivo

Este trabalho tem por objetivo encontrar os intervalos de confiança dos resultados obtidos utilizando o código do TRANSURANUS através de uma análise de incertezas, determinando assim o valor esperado e os desvios padrões para as quantidades de interesse: temperatura na linha central do combustível, pressão interna da vareta de combustível e deformação do revestimento. Uma vez que o TRANSURANUS não fornece a deformação total do revestimento, apenas seus componentes, a deformação considerada será a deformação por fluência (*creep strain*). Em posse dessas quantidades, é possível determinar se o conjunto de variações esperado em cada um dos resultados se adequa às normas de segurança do projeto.

Também há interesse em realizar uma análise de sensibilidade por meio de decomposição da variância, de forma a associar quais as variáveis de entrada do código que, quando variadas, têm maior impacto sobre os resultados

considerados. Por meio da decomposição da variância pretende-se também identificar a existência de efeitos de segunda ordem relacionados à combinação de dados de entrada.

A geração de um intervalo de confiança para os resultados da simulação permitirá sua utilização de forma mais segura, permitindo determinar se mesmo combinações de fatores que gerem casos extremos estão dentro de valores especificados para o projeto. O conhecimento de quais variáveis de entrada exercem maior influência sobre a variância permitirá também decidir em quais aspectos se deve investir para ter um controle mais preciso dos resultados.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apesar de não se tratar de um texto específico da área de reatores nucleares, a referência [8] apresenta de forma razoavelmente abrangente os conceitos a serem considerados neste estudo, os quais são abaixo apresentados.

Uma vez que todo modelo é uma representação abstrata e imperfeita da realidade, todo resultado obtido por meio de um dado modelo está sujeito a imprecisão. É vantajoso quantificar fontes de incerteza para tornar possível a tomada de decisões que permitam a redução de erros no resultado. Neste capítulo são tratadas maneiras de identificar, quantificar e comunicar incertezas em resultados de modelos. São explicadas também diversas fontes de incerteza: quando a representação da realidade é imperfeita, a incerteza é chamada estrutural; conhecimento imperfeito sobre as variáveis é chamada incerteza paramétrica; e certos sistemas estão sujeitos a incertezas decorrentes de variações naturais.

Duas formas de análise são discutidas para quantificar o erro do resultado de um modelo: a análise de incertezas, que trata de averiguar a distribuição dos resultados do modelo, podendo estimar a média e o desvio padrão, estabelece um intervalo de confiança e determinar a probabilidade do resultado ultrapassar um valor limite; e a análise de sensibilidade, que se ocupa de ilustrar a influência de parâmetros nos resultados, permitindo guiar a pesquisa e desenvolvimento de novos modelos.

Por último, a referência [8] apresenta diversas definições de índices de sensibilidade – uma quantificação do grau de influência de determinado dado de entrada sobre o resultado – apresentando as principais vantagens e desvantagens de se quantificar as incertezas por determinado método. Para modelos complexos, como as equações diferenciais utilizadas na representação de um reator nuclear, o cálculo de índices de sensibilidade por métodos analíticos

é inviável. Alguns índices são propostos baseados na variação de parâmetros individuais, mas estes não cumprem o objetivo deste estudo de analisar o comportamento dos resultados ao longo de todo o espaço de parâmetros. Assim sendo, os métodos de interesse descritos na referência [8] são o “design fatorial fracionado” e amostragem por métodos de Monte Carlo, os quais são explicadas em maior detalhe na referência [9].

Seja o modelo estudado uma função tal que  $F(x_1, x_2, \dots, x_k) = Y$ .

Num design fatorial, são assumidos  $S$  valores possíveis para uma variável  $x_i$ , de forma que num modelo fatorial completo o modelo seria aplicado  $S^k$  vezes. A vantagem de montar o experimento desta maneira é que o analista pode calcular a média de  $Y$  para cada patamar de cada  $x_i$ , porém o número de simulações necessárias nem sempre é conveniente. Dessa forma, é escolhido o design fatorial fracionado, que reduz o número de simulações ao mesmo tempo em que garante que cada parâmetro ou combinação de parâmetros será computado o mesmo número de vezes. Por exemplo: num modelo com  $k=5$  em que se queira analisar três patamares (mínimo, máximo e média, por exemplo) de cada variável  $x_i$ , um design fatorial total teria  $3^5 = 243$  simulações. Num experimento fatorial fracionado poderiam ser escolhidas um subconjunto dessas simulações tal que cada patamar de cada  $x_i$  apareça 3 vezes – o que pode ser feito com apenas 9 simulações escolhidas cuidadosamente, utilizando os métodos adequados para garantir que as combinações escolhidas continuam tendo representatividade estatística.

Já em uma amostragem por métodos de Monte Carlo, em vez de  $S$  valores discretos para uma variável  $x_i$ , temos sua distribuição, sendo escolhidas  $N$  amostras de cada variável e executando-se a simulação  $N$  vezes [9].

Um exemplo de estudo realizado utilizando o design fatorial é o da referência [10], que busca determinar as incertezas na liberação de gás de fissão, uma vez que essa grandeza afeta o inchamento das pastilhas de combustível e a subsequente interação entre combustível e revestimento; além da composição do gás de enchimento da vareta, alterando a condutividade térmica da folga pastilha-revestimento (*gap*); de forma que a confiabilidade dos cálculos

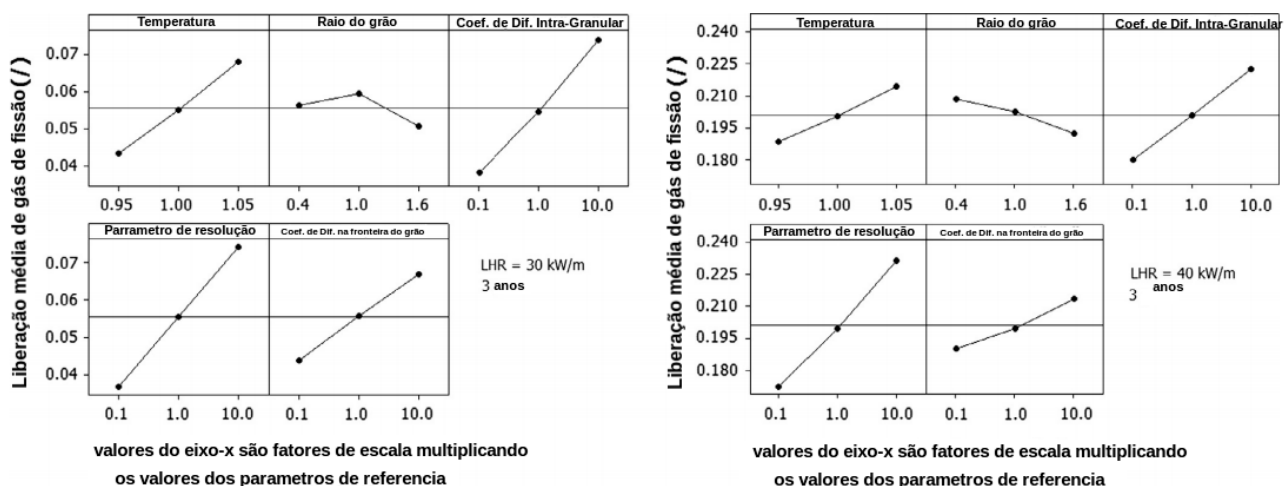
termomecânicos depende da confiabilidade da modelagem do comportamento do gás de fissão.

Parte da dificuldade em se reduzir a incerteza da liberação de gás se deve ao fato que as grandezas relacionadas – como coeficiente de difusão intra-granular e nas fronteiras entre grãos, raio do grão na pastilha de combustível, entre outros – são difíceis de serem medidos e possuem, portanto, incertezas elevadas que se propagam para a liberação de gás.

A análise de sensibilidade foi realizada na simulação de uma única pastilha combustível, escolhendo-se 3 patamares para cada uma das cinco entradas consideradas incertas e simulando todas as 243 combinações possíveis em 15 condições de contorno distintas (combinações de 3 períodos de irradiação e 5 valores da taxa de potência linear). Foi realizada também uma análise de incerteza simulando o desempenho de uma vareta inteira, e os resultados dessa simulação foram comparados com dados do experimento de irradiação GE7 do programa Risø-3.

Utilizando-se os resultados do experimento com projeto fatorial foram calculados os índices de efeitos principais, e a comparação desses índices mostra o coeficiente de difusão intra-granular e parâmetro de resolução como os fatores que mais influenciam a liberação de gás, enquanto a influência do tamanho do grão apresenta um comportamento não linear, como visto na Figura 1:

**Figura 1: Resultados dos índices de efeitos totais da referência [10] sob condições de contorno distintas.**



**Fig. 5. Efeitos principais dos parâmetros sobre liberação de fissão calculada para uma irradiação de 3 anos e LHR = 30 kW/m (esq.) e 40 kW/m (dir)**

Os resultados obtidos mantêm uma incerteza de ordem 2 para a liberação de gás, um valor comum nos códigos atuais, sendo que para situações de baixa queima a incerteza pode ser ainda mais alta. A partir da análise de sensibilidade foi determinada a necessidade de caracterizar melhor o coeficiente de difusão intragranular e o parâmetro de resolução de forma a diminuir a incerteza sobre o resultado final. De forma análoga, o tamanho do grão se mostrou um fator determinante sobre o inchamento da pastilha, chegando-se à conclusão que um modelo melhor do crescimento de grão é necessário para uma previsão mais segura dos resultados.

Outro aspecto de importância vital para a utilização de códigos de desempenho de combustível se refere à incerteza sobre a temperatura calculada. As temperaturas do combustível e do revestimento afetam diretamente modelos termomecânicos de condução de calor, dilatação térmica, e assim por diante; de forma que a incerteza sobre a temperatura a cada passo da simulação se propaga para cada uma dessas grandezas. A referência [11] realiza uma análise de incerteza sobre a temperatura central do combustível, determinando um intervalo de confiança, e efetuando também uma análise de sensibilidade por meio do uso de índices de Sobol.

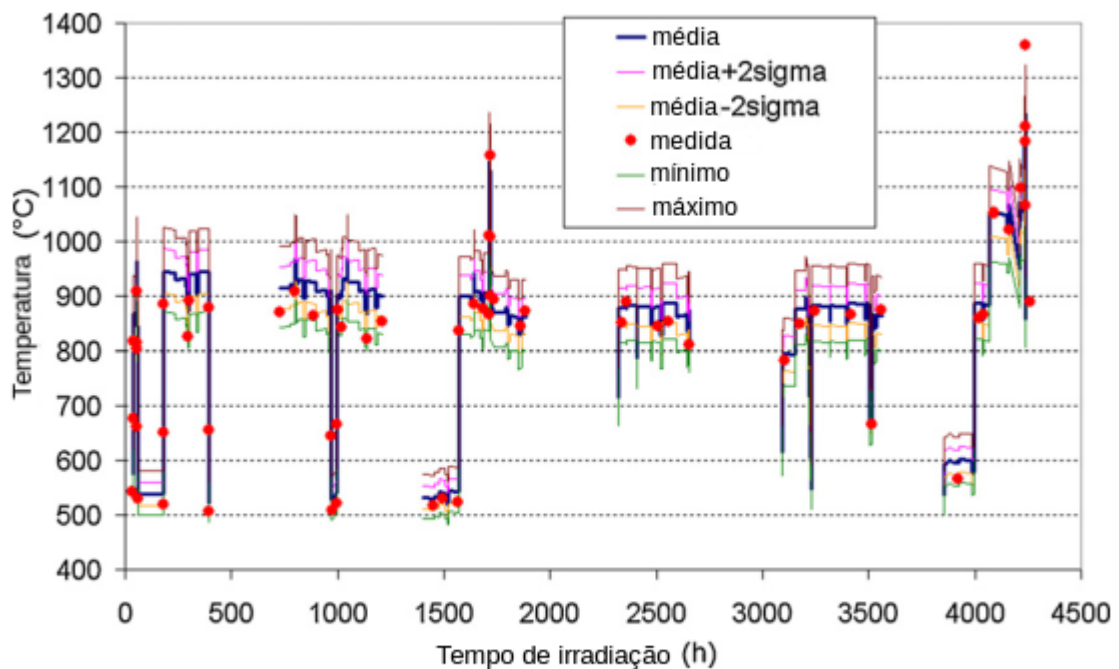
Foram realizados dois experimentos, um de queima baixa referente a um regime estacionário e o outro de queima alta referente a um regime transiente. Foram considerados como dados de entrada incertos a condutividade térmica, a geometria da pastilha, a taxa de potência linear, e a transferência de calor entre combustível e revestimento. De acordo com a literatura e opiniões de especialistas cada uma dessas variáveis é modelada como uma distribuição gaussiana ou uniforme, e podem ser consideradas independentes ou receber uma aproximação que represente as correlações.

A análise é realizada por meio do acoplamento de um código de desempenho de combustível e um *software* que fornece a estrutura para a análise de dados. Para a referência [11], eles são respectivamente os *softwares* METEOR V2 e URANIE. O URANIE permite desenvolver o experimento,

escolhendo o método de abordagem, distribuições e quantidade de amostras. As amostras geradas são usadas na execução do METEOR e o URANIE coleta os resultados de interesse – no caso, a temperatura central do combustível a cada intervalo de tempo – permitindo sua análise posterior.

As quantidades calculadas nessa simulação foram as médias da temperatura central do combustível a cada intervalo de tempo, bem como sua variância. Esse resultado foi comparado com medições do experimento GRIMOX2, equivalente ao caso de baixa queima em estado estacionário, apresentado na Figura 2.

**Figura 2: Comparação de dados experimentais com quantificação de incertezas presente na referência [11]**



**Fig. 8.** Dispersão das simulações de Monte-Carlo (GRIMOX2)

Quanto à análise de sensibilidade, a variação correspondente ao parâmetro de entrada  $x_i$  é dada pela variância do valor esperado de  $Y$  dado um  $x_i$  fixo. O índice  $S_i$  de primeira ordem é dado pela razão entre a variância  $V_i$  e a variância total, conforme descrito pela Equação 1:

$$S_i = \frac{V(E(Y/X_i))}{V(Y)} \quad (1)$$

O problema dessa abordagem é que ela requer um grande número de amostras para um resultado preciso, o que por sua vez requer múltiplas execuções do código, sendo custoso em termos de tempo. Uma alternativa, então, é o uso de um modelo substituto que gerará mais amostras com um custo computacional menor. Essa foi a abordagem escolhida, com os índices de Sobol sendo calculados pelo “método da força bruta” para 4 momentos diferentes de forma a mostrar que a importância de cada variável muda ao longo da irradiação. Os resultados são exibidos na tabela 1. Nota-se que a soma dos índices de primeira ordem se aproxima da unidade, o que mostra que efeitos de segunda ordem não são relevantes no modelo utilizado pelo METEOR.

**Tabela 1: Índices de Sobol (índices de sensibilidade de 1ª ordem) calculados pela referência [11]**

**Tabela 3**

índices de Sobol para o caso GRIMOX2

Modelo	Índices de Sobol de 1a ordem			
	t = 729h	t = 1715h	t = 3206h	t = 4239h
Taxa linear de calor (LHR)	0.33	0.34	0.26	0.26
Cond. térmica do combustível novo	0.42	0.38	0.42	0.41
Transferência térmica pelo gap	0.17	0.17	0.15	0.14
Relocação dos fragmentos de combustível	0.06	0.07	0.13	0.12
Distribuição radial de potencia	0.00	0.01	0.02	0.03
Raio interno das pastilhas de combustível	0.00	0.00	0.00	0.00
$\sum S_i$	0.98	0.97	0.98	0.96

A comparação da análise de incertezas com o experimento mostrou um resultado satisfatório, com os dados experimentais se enquadrando dentro da incerteza de  $2\sigma$ . Já a análise de sensibilidade demonstrou que os fatores mais influentes no modelo são a taxa linear de calor e a condutividade térmica do combustível. Enquanto os métodos utilizados não permitem a diminuição da incerteza sobre a taxa de calor, a tomada de mais dados quanto à condutividade térmica permitiria reduzir a incerteza sobre o resultado final.

De forma análoga à referência [11], a referência [12] utiliza o acoplamento de um código de desempenho de combustível (BISON) e uma estrutura para análise de dados (DAKOTA) para a realização de uma análise de



incertezas, com um modelo substituto sendo aplicado para a realização da análise de sensibilidade.

A referência [12] fez um estudo um pouco mais amplo, considerando um total de treze dados de entrada incertos modelados como distribuições gaussianas e avaliando seus efeitos sobre cinco resultados: temperatura central do combustível, percentagem de liberação de gás de fissão, abertura da folga pastilha-revestimento, temperatura do revestimento e diâmetro do revestimento, este último tomado ao longo de 10 pontos, fazendo com que a contagem final seja de 14 valores de saída.

Para a análise de sensibilidade, foram utilizados diferentes modelos substitutos, como regressão e expansão em polinômios caóticos. Aos dados obtidos por esses modelos foram aplicadas a correlação de *ranking* de Spearman e a decomposição de variância, permitindo a comparação de resultados. Os dados de entrada foram considerados “importantes” na medida em que apresentam grande influência sobre um ou mais resultados. Ao final do estudo, as entradas consideradas de maior importância foram as condutividades térmicas do combustível e do revestimento, abertura inicial da folga, coeficiente de expansão térmica do combustível e fator de potência do sistema.

O custo computacional da análise de sensibilidade é uma preocupação real e, muitas vezes, um impedimento para sua realização.

Na referência [13], por exemplo, discute-se a possibilidade de realização de análise de sensibilidade, porém apenas uma análise de incerteza é feita. O estudo teve por objetivo qualificar conceitos inovadores de reatores rápidos resfriados a gás. Isso foi feito comparando-se duas configurações de núcleo, uma típica de reatores rápidos resfriados por metal líquido, e outra um “núcleo de demonstração” baseado nos GFR (*gas-cooled fast reactor*).

As variáveis consideradas fontes de incerteza foram a abertura inicial da folga, liberação de gás de fissão, inchamento do combustível, condutividade térmica do combustível e condutividade do gás de preenchimento. Esses parâmetros foram caracterizados pela provável distribuição e intervalos de incerteza, e então amostrados por métodos de Monte Carlo.

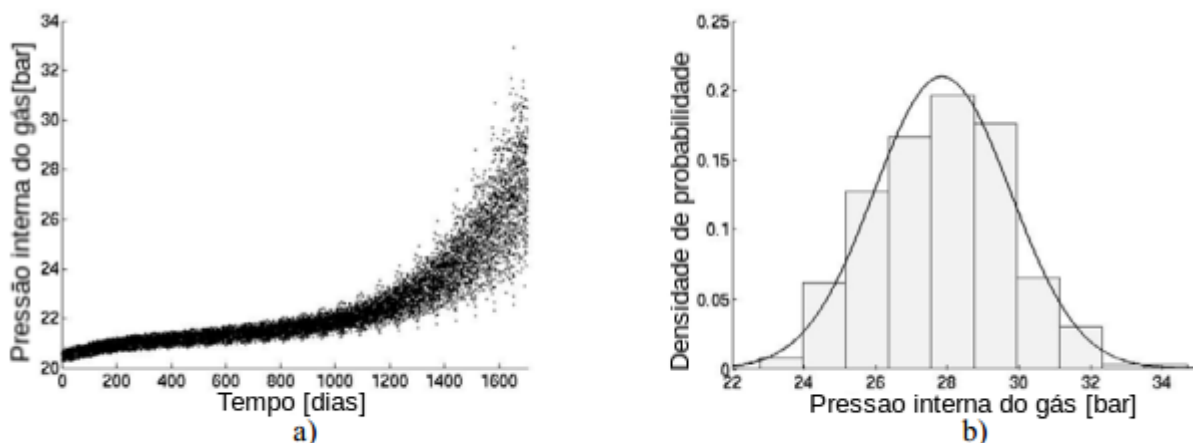
Para determinar o número de amostras necessárias, foi utilizado o método de Wilks (Equação 2), que relaciona uma porcentagem dos resultados ( $\beta$ ) a ser encontrada dentro de um intervalo de confiança de  $\alpha$  por cento.

$$1 - \alpha^n - n(1 - \alpha)\alpha^{n-1} \geq \beta \quad (2)$$

Para  $\beta = 95\%$  e  $\alpha = 95\%$ , o número mínimo de amostras necessário é de 93, sendo que durante o estudo houve a disponibilidade de se tomar 500 amostras.

As saídas consideradas foram a liberação de gás de fissão, pressão interna do gás, abertura da folga e temperatura central do combustível. Ao final da propagação de incertezas os resultados dessas saídas foram considerados como tendo uma distribuição normal, e gaussianas foram ajustadas aos histogramas dos resultados (Figura 3). Por meio dos resultados das simulações é possível ver que condições de operação normais são mantidas ao longo de toda a irradiação: todas as simulações afirmam que não ocorre interação entre pastilha e revestimento, e não há deformação plástica do revestimento.

**Figura 3: Pressão interna do gás ao longo da irradiação (a) e distribuição dos resultados finais (b) conforme obtidos pela referência [13]**



**Figura 2: Pressão interna do gas: a) evolução temporal e b) densidade de probabilidade ao final**

Outro artigo que ressalta a aplicação de análises de incerteza na segurança do reator é a referência [14], um estudo iniciado pelo Laboratório

Nacional do Idaho para ajudar na transição dos critérios atuais de segurança de reatores para um critério mais conservativo.

No estudo, 18 parâmetros foram considerados incertos e independentes entre si, e a simulação considerou a queima de um elemento de combustível de 17 x 17 varetas até a queima de 60 GWd/MT. As saídas consideradas de interesse foram a temperatura central do combustível e condutância da folga pastilha-revestimento. A análise de sensibilidade foi realizada por diversos métodos: para permitir a visualização dos resultados foram plotados gráficos de dispersão utilizando o *ranking* dos dados de entrada e saída; também foram calculados os coeficientes de correlação de Pearson e Spearman, bem como coeficiente de correlação parcial.

A importância de um dado de entrada foi definida da seguinte maneira: ao longo do tempo, os coeficientes de correlação eram calculados para cada variável, e baseado neles era feita uma classificação das variáveis que mais afetavam o resultado em um dado tempo. Ao final da simulação, junto a cada variável é exibida a classificação mais alta que ela teve ao longo da simulação. Dessa forma, mais que um fator pode ter a posição 1, mas têm-se a garantia de não desconsiderar um parâmetro cuja importância é evidente no início da simulação, mas não ao final. Usando-se essa definição, alguns dos fatores considerados mais relevantes para a temperatura central do combustível foram: condutividade térmica do combustível, potência linear, coeficiente de difusão intra-granular, densidade do combustível e condutividade térmica do revestimento.

O estudo na referência [15] tem como base o *benchmark* de modelagem de incertezas criado pelo Comitê de Ciências Nucleares da Agência de Energia Nuclear (NEA) como uma série de exercícios de modelagem, especificando regiões específicas para simulações e provendo uma metodologia para análise de incertezas. Diversas fontes de incertezas são listadas, inclusive aquelas causadas pela escolha de nós na discretização do problema, as pertinentes ao modelo e as pertinentes às condições de contorno e à fabricação dos componentes do sistema.

Dentre as fontes de incertezas listadas, quatro condições de contorno foram consideradas incertas para todos os testes executados, e cada caso contou com um pequeno conjunto de incertezas de fabricação. Os valores e distribuições considerados foram todos com base no *benchmark*. A saída de interesse é o valor da temperatura central do combustível, e após a execução das simulações foi gerada uma matriz de correlações parciais entre cada variável de entrada e os resultados, revelando que os parâmetros com maior influência sobre a temperatura são: espessura de folga entre combustível e revestimento, densidade do combustível, potência do núcleo e temperatura inicial do refrigerante.

Por último, a análise de sensibilidade permite identificar interações de segunda ordem entre as entradas. Um estudo bastante completo sobre o assunto foi realizado pelos pesquisadores do Centro de Pesquisas Técnicas da Finlândia e publicado na referência [16]. Nele, foi realizada a análise de incertezas e de sensibilidade por meio de uma extensa amostragem por Monte Carlo, sendo que para processar a enorme quantidade de dados gerados foi utilizado um *cluster* de processadores. As técnicas escolhidas para a análise de sensibilidade foram os coeficientes de Spearman e a decomposição da variância de Sobol.

Num modelo perfeitamente aditivo, a soma dos quadrados dos coeficientes de Spearman deveria ser 1. Uma vez que o resultado obtido é inferior à unidade, vê-se que efeitos de ordens superiores estão presentes, os quais não são explicados pela correlação de Spearman.

Uma forma de medir as interações entre as entradas é comparar os valores dos índices de efeitos principais obtidos por meio da decomposição da variância (Equação 1) com os índices de efeitos totais, por definição:

$$S_{T_i} = 1 - \frac{V(E(Y/X_{(i)}))}{V(Y)} \quad (3)$$

Onde  $X_{(i)}$  representa “todos os X exceto  $X_i$ ”.

Como o cálculo pelas fórmulas 1 e 3 – frequentemente chamado “método da força bruta” – é extremamente custoso, são empregadas técnicas discutidas na referência [9] para tornar o cálculo mais eficiente, bem como recursos adicionais para a remoção de correlações acidentais.

Uma vez de posse desses resultados, a comparação entre os índices de efeitos totais e os índices de primeira ordem permite constatar – se estes forem consideravelmente menores do que aqueles – que as interações de segunda ordem são relevantes.

No total, foram consideradas 21 variáveis de entrada com distribuições normais truncadas nos percentis de 2,5% dos dois lados. Os resultados considerados foram a temperatura máxima do combustível, a temperatura média do revestimento, a pressão interna da vareta, a média da abertura e a condutividade da folga ao longo da vareta, a deformação radial no revestimento e a tensão tangencial. O estudo se propôs também a observar a incerteza dos resultados em função da queima.

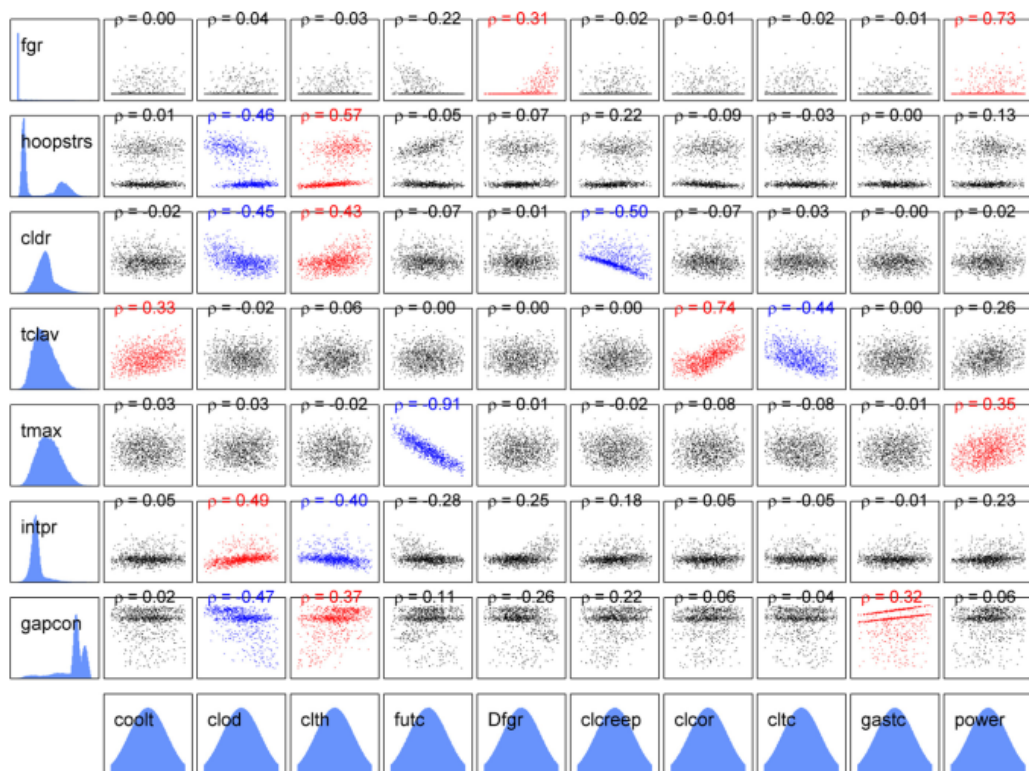
Os resultados obtidos mostraram que – apesar de variações referentes a cada quantidade analisada – de forma geral as propriedades do refrigerante são mais importantes no início, e as incertezas de fabricação da vareta ao longo do início e meio da irradiação, mas em queimas maiores quem domina é a condutividade térmica e a expansão térmica. O cálculo dos coeficientes de Spearman ao longo do tempo revela uma soma quadrática cada vez mais distante da unidade, mostrando que a importância das interações entre variáveis de entrada aumenta com a queima.

A aditividade ou não do modelo está, é claro, relacionada com o código de desempenho de combustível utilizado, no caso da referência [16], o FRAPCON. Para este, vê-se que o modelo da temperatura central do combustível é aditivo, enquanto coeficiente de difusão dos gases de fissão e condutividade térmica mostram não-aditividade, com uma diferença de 0,15 entre os índices totais e os de primeira ordem.

Por último, ao colocar os resultados de cada saída considerada em um histograma, foi possível ver o comportamento de suas distribuições, encontrando por vezes distribuições com dois picos, cada um correspondente a um regime atingido durante a simulação, por exemplo a presença ou não de interação entre pastilha de combustível e revestimento, que muda drasticamente o comportamento do modelo. Essas distribuições, bem como a influência de alguns

dos dados de entrada sobre cada saída, na forma de gráficos de dispersão, podem ser vistos na Figura 4, onde as distribuições na base da figura representam os valores dos parâmetros de entrada, e as distribuições à esquerda correspondem aos resultados obtidos. Os gráficos de dispersão no cruzamento de linhas e colunas exemplificam a influência e cada dado de entrada sobre cada resultado, sendo que os gráficos onde os pontos não apresentam uma tendência definida indicam uma influência menor.

**Figura 4: Distribuições das variáveis de entrada (abaixo), resultados obtidos (esquerda) e interações entre eles (scatterplots) exemplificando os resultados da referência [16]**



### 3 METODOLOGIA

O primeiro passo consistiu na busca por valores nominais aceitáveis para o reator PWR hipotético que é o alvo deste estudo, e intervalos realistas para as variáveis de entrada a serem consideradas incertas. O estudo de modelos de arquivos de entrada do TRANSURANUS, bem como de outras referências dedicadas à análise de sensibilidade, permitiu escolher treze variáveis de entrada relacionadas à fabricação da vareta de combustível, descritas na Tabela 2 e Figura 5.

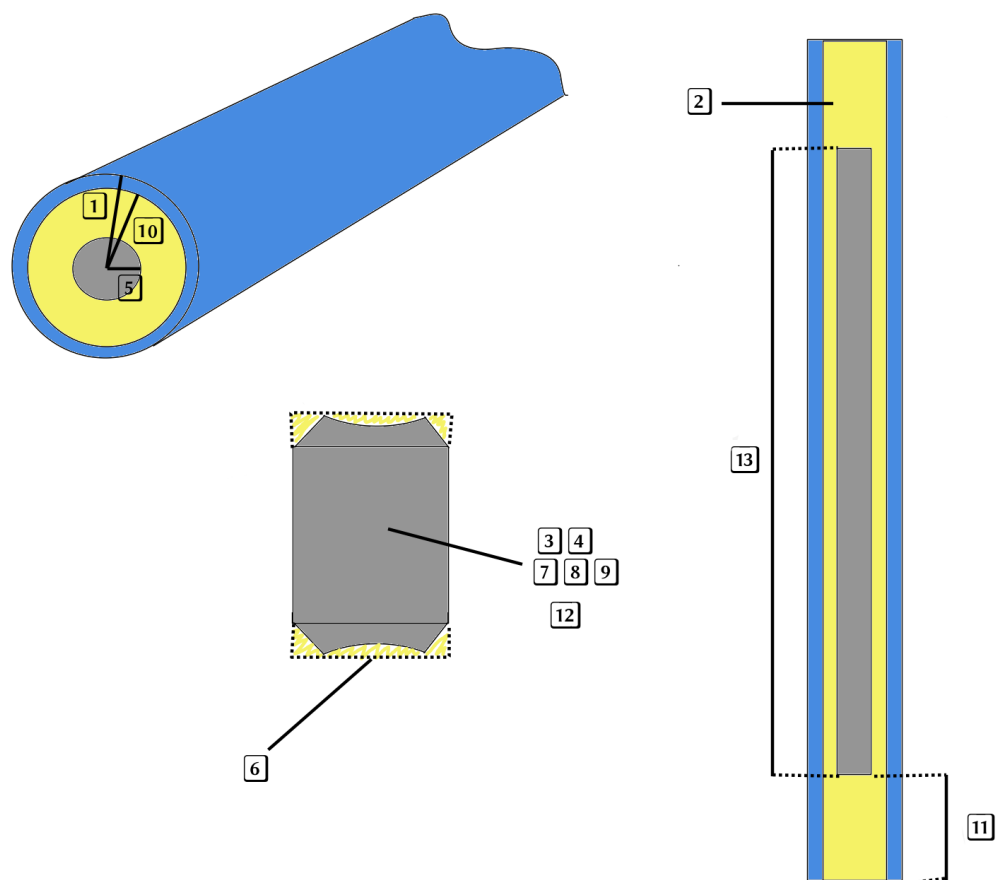
**Tabela 2: Descrições das variáveis de entrada do TRANSURANUS a serem variadas no experimento. Numeração corresponde a imagens da Figura 5.**

Posição na Figura	Variável do Transuranus	Significado físico
1	RAH	raio externo do tubo de revestimento
2	pi0ein	pressão inicial do gás de enchimento
3	enri35	porcentagem de enriquecimento do U-235
4	ozum0	taxa de átomos de O para átomos de metal (no caso, urânio)
5	RAB	raio externo da pastilha de combustível
6	prodis	taxa entre o volume da concavidade e volume da pastilha
7	korngr	diâmetro local do grão
8	por000	porosidade média de fabricação
9	denpor	porosidade mínima ao final da densificação
10	RIH	raio interno do revestimento
11	uplvg	volume do plenum inferior
12	openpor	fração da porosidade aberta na pastilha
13	hhrate*	comprimento ativo da vareta*

(\*hhrate na verdade não é uma variável do código, mas um fator a ser multiplicado pela variável hhref, que é um vetor descrevendo os segmentos da vareta de combustível entre as grades espaçadoras. O *script* foi implementado

com o uso desse fator multiplicativo por comodidade, pois a alteração de todos os elementos de href seria mais complicada.)

**Figura 5: Representação esquemática de uma vareta de combustível, indicando as variáveis de entrada referentes ao revestimento (azul), geometria e composição da pastilha de dióxido de urânio (cinza) e informações sobre o preenchimento da vareta (amarelo).**



À semelhança das referências [14] e [16], decidiu-se considerar a incerteza das variáveis de fabricação como distribuições normais em torno dos valores nominais, truncados nos limites de projeto.

Uma variável aleatória contínua  $X$  tem distribuição normal truncada em  $[a,b]$  com os parâmetros  $\mu, \sigma^2$  se sua função densidade de probabilidade for dada por



$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \\ \frac{G(b) - G(a)}{G(b) - G(a)}, \text{ se } a \leq x \leq b; \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (4)$$

Onde

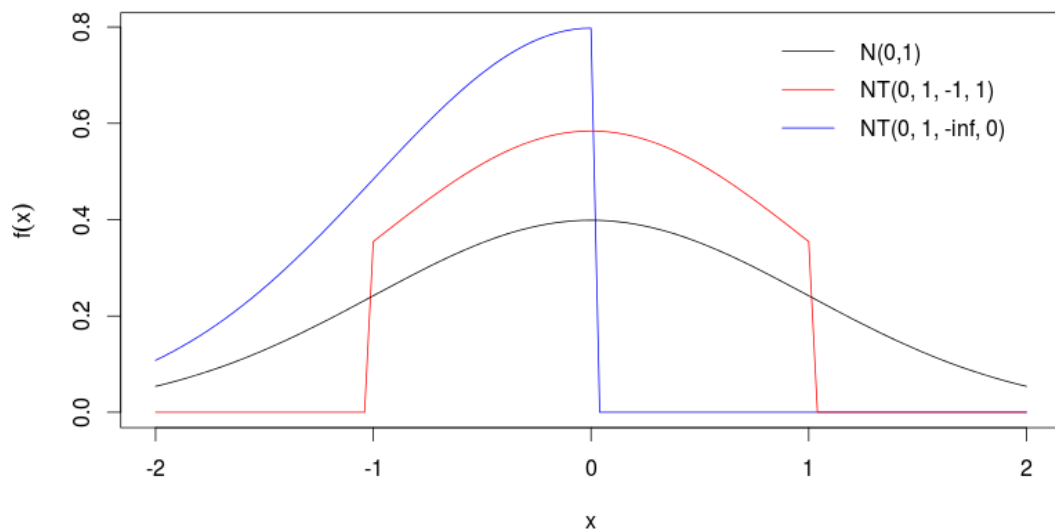
$$G(y) = \int_{-\infty}^y g(z) dz$$

e

$$g(y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Podendo ser truncada um limite superior, inferior, ou ambos, como exemplificado na Figura 6 [17].

**Figura 6: Exemplos de distribuições normais truncadas (vermelho e azul) quando comparadas com uma distribuição normal (preto).**



Os valores utilizados são dados na Tabela 3:

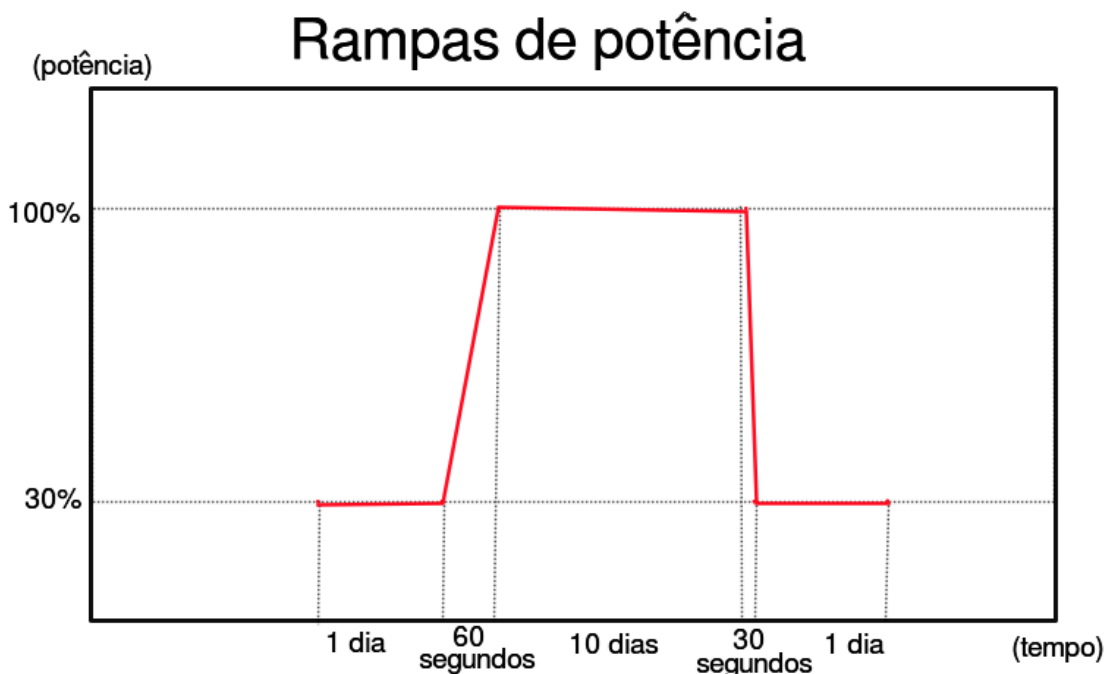
**Tabela 3: Valores nominais, desvios padrões e posições de truncamento para as distribuições das variáveis de entrada.**

<b>Variável</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Unidade</b>
RAH	4,9	0,025	4,875	4,925	mm
pi0ein	2,76	0,35	2,41	2,76	MPa
enri35	4,3	0,04	4,26	4,34	--
ozum0	2	0,02	2	2,02	--
RAB	4,245	0,005	4,24	4,25	mm
prodis	0,018	0,00214	0,01006	0,02979	--
korngr	0,0061	0,008	0,004	0,025	mm
por000	0,06	0,009	0,051	0,069	--
denpor	0,0381	0,008	0,027	0,055	--
RIH	4,3	0,02	4,28	4,32	mm
uplvg	210,1	68,99	73,054	349,014	mm <sup>3</sup>
openpor	0,04	0,04	0	0,04	--
hhrate	1	0,01	1	1,0106	--

Entre as funcionalidades mais úteis do TRANSURANUS consta a capacidade de avaliar o comportamento do combustível nuclear em regime de transientes de potência. O caso do TRANSURANUS executado é um em que a potência é rapidamente elevada e, após alguns dias de operação em potência máxima, ela é reduzida drasticamente. Este ciclo, exemplificado na Figura 7, é repetido cinco vezes, período durante o qual a queima de combustível é mais intensa e os maiores valores de temperatura são alcançados.

Para a execução das rampas de potência descritas, os valores da temperatura do refrigerante e fluxo de nêutrons do núcleo também são alterados para refletir uma situação mais realista.

**Figura 7: Representação de uma rampa de potência a ser executada pelo TRANSURANUS**



Enquanto o TRANSURANUS é o código que realiza a análise de desempenho do combustível, as análises estatísticas são controladas por sequências de comandos do GNU Octave. O GNU Octave é uma linguagem computacional de alto nível voltada para cálculo numérico, tipicamente utilizada para resolução de equações, sistemas de álgebra linear, análises estatísticas e outros experimentos numéricos. A versão utilizada conta também com uma interface gráfica para edição de código. O GNU Octave foi escolhido por suas capacidades computacionais, bem como por ser um *software* livre. [18]

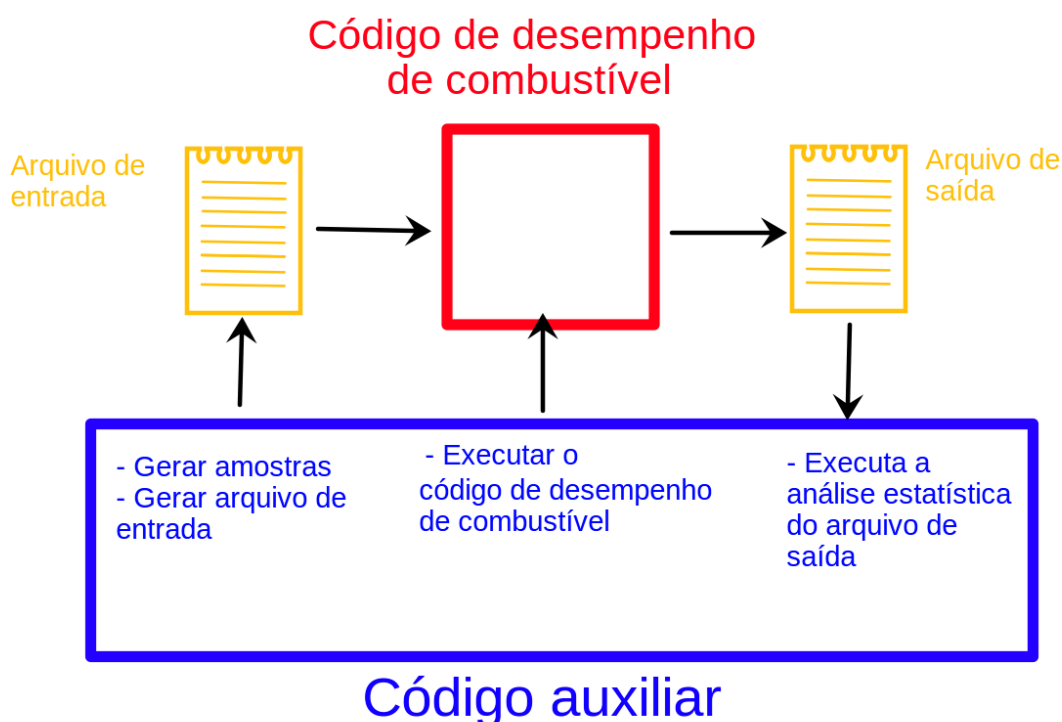
Um *script* do GNU Octave foi escrito para gerar amostras das variáveis de acordo com os valores da Tabela 3. O método de amostragem escolhido foi o *Latin Hypercube Sampling* (LHS), considerado superior à amostragem de Monte Carlo comum por estratificar o espaço amostral, tirando uma amostra aleatória de cada camada. Isso evita aglomerações de amostras que poderiam surgir em um

método completamente aleatório, dando mais uniformidade à amostra e garantindo uma convergência melhor [9].

As amostras geradas pelo GNU Octave são salvas em planilhas onde cada coluna representa uma variável de entrada, e as N linhas representam a quantidade de casos a serem executados pelo TRANSURANUS.

Este processo de acoplamento entre os códigos do TRANSURANUS e do GNU Octave é semelhante ao utilizado nas referências [11] e [12], e está esquematizado na Figura 8.

**Figura 8: Representação esquemática do acoplamento entre os códigos de desempenho de combustível e de análise estatística.**



Como discutido na seção anterior, o cálculo dos índices de sensibilidade utilizando o método da decomposição da variância não seria prático utilizando-se as Equações (1) e (3). O método proposto por Saltelli et al. na

referência [9] propõe tomar dois conjuntos de amostras onde as k colunas correspondem aos fatores a serem variados, e uma recombinação específica dos dois conjuntos permite o cálculo dos índices de sensibilidade com um total de  $N(k+2)$  execuções do código. Para a obtenção do índice de sensibilidade referente ao dado de entrada  $x_i$  a coluna i do conjunto de amostras B é substituído pela coluna i do conjunto de amostras A, e o código é executado para todos os elementos do conjunto recombinado  $C_i$ . Tomando-se os vetores de resultados de A e  $C_i$  os índices de sensibilidade são obtidos por meio da Equação (5):

$$S_i = \frac{y_A \cdot y_{C_i} - f_0^2}{y_A \cdot y_A - f_0^2} = \frac{(1/N) \sum_{j=1}^N y_A^{(j)} y_{C_i}^{(j)} - f_0^2}{(1/N) \sum_{j=1}^N (y_A^{(j)})^2 - f_0^2} \quad (5)$$

Onde:

$$f_0^2 = \left( \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_A^{(j)} \right)^2$$

De forma análoga, os índices de efeitos totais descritos pela equação (3) podem ser dados por:

$$S_{T_i} = 1 - \frac{y_B \cdot y_{C_i} - f_0^2}{y_A \cdot y_A - f_0^2} = 1 - \frac{(1/N) \sum_{j=1}^N y_B^{(j)} y_{C_i}^{(j)} - f_0^2}{(1/N) \sum_{j=1}^N (y_A^{(j)})^2 - f_0^2} \quad (6)$$

Como qualquer método estatístico, o sucesso de sua aplicação depende da escolha de um N suficientemente grande.

Para este trabalho, decidiu-se tomar  $N=2000$ . Como forma de determinar a adequação desse número, o experimento foi repetido dez vezes, de modo que a comparação dos índices obtidos a cada simulação permitem determinar se as variações encontradas são apenas flutuações estatísticas ou indicativo de um número insuficiente de amostras.

Outro critério utilizado para avaliar a qualidade dos índices de sensibilidades obtidos pelo método Saltelli é compará-los com os resultados da

correlação de Spearman, como na referência [16]. Os índices de sensibilidade são calculados a partir de recombinações de amostras dos conjuntos A e B, enquanto as correlações de Spearman foram tomadas apenas sobre os resultados do conjunto A. Dessa forma, é possível uma comparação qualitativa de quais variáveis de entrada são mais influentes sobre cada um dos resultados considerados (os critérios de segurança descritos anteriormente: temperatura central da pastilha de combustível, pressão interna da vareta e deformação do revestimento). Também é possível avaliar o que cada um dos métodos tem a dizer sobre a linearidade do modelo, uma vez que a soma dos  $S_i$  e a soma quadrática dos  $\rho_i$  devem se aproximar da unidade para um modelo linear.

Para a execução destes cálculos foi criado um segundo *script* do GNU Octave, responsável por substituir no arquivo de entrada do TRANSURANUS os valores das planilhas de amostras A e B, bem como das combinações  $C_i$ , executar o TRANSURANUS e salvar os vetores de resultados. Esse script foi executado separadamente para cada uma das dez simulações executadas.

Um último *script* foi escrito com o intuito de tomar os vetores de resultados e efetuar o cálculo das correlações e índices de sensibilidade, tanto de primeira ordem como de efeitos totais. Os resultados de cada simulação são salvos em uma planilha, e por fim alguns cálculos adicionais são efetuados: a média dos índices encontrados, um teste t para determinar os casos em que essa média é estatisticamente igual a zero, e uma comparação entre os índices de efeitos totais e os índices de sensibilidade de primeira ordem para determinar se são iguais.

Nesta última etapa estão inclusos também os cálculos da quantificação de incertezas: os vetores de resultados de cada uma das simulações são unidos, gerando um vetor de  $10 \cdot N$  amostras, o qual é usado para gerar uma média e desvio padrão, apresentar um histograma e calcular um intervalo de confiança. De acordo com os cálculos das referências [13] e [15] utilizando a fórmula de Wilkins (Equação 1), qualquer valor acima de 93 amostras são suficientes para garantir que 95% dos resultados se encontram no intervalo de 95% de confiança, de

forma que a quantidade de amostras, apesar de discutível para a análise de sensibilidade, é considerada adequada para a quantificação de incertezas.

Por último, uma análise é realizada para verificar se a distribuição dos resultados, visualizada por meio do histograma, se encaixa na previsão teórica de uma distribuição normal – a qual, dadas as distribuições truncadas dos dados de entrada, deve estar truncada também. Essa análise é realizada ajustando-se uma gaussiana aos pontos obtidos tomando-se o centro dos intervalos do histograma e o número de contagens em cada intervalo. A distribuição normal é considerada adequada para o intervalo de dados considerado se os valores de média e desvio padrão obtidos pelo ajuste forem compatíveis com a média e desvio padrão dos resultados da quantificação de incertezas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Análise de sensibilidade

Ao final dos dez conjuntos de simulações, os índices de sensibilidade e correlações foram calculados. Nas tabelas de correlação, exibidas na Tabela 4, os índices obtidos foram coloridos de forma que os valores absolutos mais próximos da unidade apresentassem um tom de verde mais intenso, facilitando a visualização de quais os fatores mais influentes.

Considerando que treze fatores foram variados, se todos tivessem igual importância, os índices de primeira ordem correspondentes seriam todos inferiores a 8%. Assim, foram considerados “importantes” índices acima de 10%.

**Tabela 4: Correlações de Spearman referentes ao conjunto de amostras A da Simulação 1**

Correlacao de Spearman			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	0,0323	0,0243	-0,5458
pi0ein	-0,0133	0,9587	-0,5120
enri35	-0,0005	-0,0074	0,0065
ozum0	0,0135	0,0140	-0,0124
rab	-0,1967	-0,0572	0,0212
prodis	0,0101	0,1355	-0,0418
korng	-0,0009	0,0031	0,0027
por000	0,5251	-0,0036	0,3214
denpor	-0,4406	0,0419	-0,4538
rih	0,6509	0,2468	0,3009
uplvg	-0,0416	0,0104	-0,0476
openpor	0,0006	0,0209	-0,0161
hhrate	0,0053	-0,0340	0,0361
<b>R<sup>2</sup></b>	0,9354	1,0059	0,9661



**Tabela 5: Correlações de Spearman referentes ao conjunto de amostras A da Simulação 2**

Correlacao de Spearman			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	-0,0121	0,0059	-0,5520
pi0ein	-0,0334	<b>0,9593</b>	-0,5210
enri35	0,0095	-0,0283	0,0003
ozum0	0,0138	-0,0077	0,0069
rab	-0,1854	-0,0422	0,0023
prodis	0,0461	0,1140	-0,0298
korng	0,0192	0,0462	-0,0207
por000	<b>0,5328</b>	-0,0284	0,3257
denpor	-0,4403	0,0690	-0,4721
rih	<b>0,6530</b>	0,2427	0,3261
uplvg	-0,0407	-0,0179	-0,0589
openpor	-0,0386	-0,0201	-0,0159
hhrate	0,0027	0,0202	-0,0161
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0,9458</b>	<b>1,0036</b>	<b>1,0168</b>

**Tabela 6: Correlações de Spearman referentes ao conjunto de amostras A da Simulação 3**

Correlacao de Spearman			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	0,0239	-0,0042	-0,5387
pi0ein	-0,0123	<b>0,9613</b>	-0,4808
enri35	-0,0121	0,0593	-0,0299
ozum0	-0,0188	-0,0312	-0,0011
rab	-0,1539	-0,0305	0,0267
prodis	-0,0320	0,0951	-0,0989
korng	-0,0137	0,0299	-0,0444
por000	<b>0,5464</b>	-0,0149	0,3477
denpor	-0,4558	-0,0266	-0,4201
rih	<b>0,6483</b>	0,1880	0,3496
uplvg	0,0011	0,0111	-0,0070
openpor	0,0256	0,0190	0,0248
hhrate	0,0027	0,0066	0,0145
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0,9533</b>	<b>0,9762</b>	<b>0,9552</b>

**Tabela 7: Correlações de Spearman referentes ao conjunto de amostras A da Simulação 4**

Correlacao de Spearman			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	0,0057	0,0028	-0,5503
pi0ein	-0,0216	0,9592	-0,5034
enri35	0,0332	0,0330	-0,0037
ozum0	0,0093	-0,0010	0,0075
rab	-0,1708	-0,0533	0,0261
prodis	0,0081	0,1178	-0,0522
korng	0,0172	0,0022	0,0243
por000	0,5499	0,0163	0,3216
denpor	-0,4327	0,0403	-0,4539
rih	0,6595	0,1964	0,3493
uplvg	0,0212	0,0466	-0,0231
openpor	0,0267	0,0077	0,0141
hhrate	-0,0139	-0,0299	0,0121
<b>R<sup>2</sup></b>	0,9571	0,9814	0,9926

**Tabela 8: Correlações de Spearman referentes ao conjunto de amostras A da Simulação 5**

Correlacao de Spearman			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	0,0423	-0,0122	-0,5393
pi0ein	0,0385	0,9589	-0,4728
enri35	0,0166	0,0300	0,0140
ozum0	0,0213	-0,0191	0,0261
rab	-0,1721	-0,0837	0,0422
prodis	-0,0201	0,0915	-0,0586
korng	-0,0148	0,0053	-0,0601
por000	0,5543	0,0097	0,3299
denpor	-0,4384	0,0027	-0,4346
rih	0,6418	0,2554	0,3095
uplvg	-0,0340	-0,0271	-0,0136
openpor	0,0129	0,0180	-0,0016
hhrate	-0,0230	0,0317	-0,0264
<b>R<sup>2</sup></b>	0,9475	1,0037	0,9184

**Tabela 9: Correlações de Spearman referentes ao conjunto de amostras A da Simulação 6**

Correlacao de Spearman			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	0,0093	0,0090	-0,5407
pi0ein	-0,0011	0,9581	-0,4926
enri35	0,0222	0,0129	0,0260
ozum0	0,0252	0,0105	0,0112
rab	-0,1568	-0,0590	0,0332
prodis	0,0162	0,1464	-0,0614
korng	0,0260	0,0040	0,0106
por000	0,5500	-0,0446	0,3505
denpor	-0,4611	-0,0141	-0,4442
rih	0,6624	0,2522	0,3363
uplvg	0,0132	-0,0280	0,0150
openpor	0,0316	0,0069	0,0327
hhrate	0,0118	-0,0302	0,0386
<b>R<sup>2</sup></b>	0,9819	1,0109	0,9769

**Tabela 10: Correlações de Spearman referentes ao conjunto de amostras A da Simulação 7**

Correlacao de Spearman			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	0,0586	-0,0191	-0,5165
pi0ein	0,0248	0,9606	-0,4784
enri35	-0,0144	0,0166	-0,0151
ozum0	-0,0003	-0,0065	-0,0018
rab	-0,1932	-0,0721	0,0591
prodis	-0,0405	0,1314	-0,0997
korng	-0,0115	-0,0144	-0,0096
por000	0,5539	0,0079	0,3375
denpor	-0,4563	0,0104	-0,4249
rih	0,6410	0,2383	0,3228
uplvg	-0,0368	0,0105	-0,0456
openpor	0,0068	0,0029	0,0358
hhrate	-0,0133	-0,0086	-0,0186
<b>R<sup>2</sup></b>	0,9708	1,0032	0,9117

**Tabela 11: Correlações de Spearman referentes ao conjunto de amostras A da Simulação 8**

Correlacao de Spearman			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	0,0051	-0,0390	-0,5363
pi0ein	0,0010	0,9594	-0,4778
enri35	-0,0033	-0,0340	0,0257
ozum0	-0,0217	-0,0061	-0,0061
rab	-0,1303	-0,0565	0,0535
prodis	-0,0190	0,1045	-0,0540
korng	-0,0095	0,0231	-0,0016
por000	0,5456	-0,0198	0,3215
denpor	-0,4260	0,0066	-0,4260
rih	0,6617	0,2349	0,3565
uplvg	0,0275	0,0079	-0,0177
openpor	-0,0234	0,0008	-0,0173
hhrate	0,0266	-0,0081	0,0189
<b>R<sup>2</sup></b>	0,9369	0,9935	0,9352

**Tabela 12: Correlações de Spearman referentes ao conjunto de amostras A da Simulação 9**

Correlacao de Spearman			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	-0,0199	-0,0129	-0,5564
pi0ein	0,0031	0,9587	-0,4836
enri35	-0,0001	0,0099	-0,0053
ozum0	-0,0225	0,0197	-0,0317
rab	-0,1875	-0,0651	0,0346
prodis	0,0212	0,1433	-0,0682
korng	0,0122	0,0435	-0,0214
por000	0,5655	0,0007	0,3424
denpor	-0,4376	0,0335	-0,4568
rih	0,6501	0,2341	0,3360
uplvg	-0,0047	-0,0393	0,0148
openpor	0,0050	0,0207	0,0140
hhrate	0,0065	0,0124	0,0086
<b>R<sup>2</sup></b>	0,9707	1,0045	0,9902

**Tabela 13: Correlações de Spearman referentes ao conjunto de amostras A da Simulação 10**

Correlacao de Spearman			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	0,0198	-0,0015	-0,5491
pi0ein	0,0080	0,9599	-0,4982
enri35	-0,0144	-0,0118	0,0071
ozum0	0,0246	-0,0093	0,0148
rab	-0,1777	-0,0730	0,0438
prodis	0,0237	0,1521	-0,0747
korngr	0,0118	-0,0168	0,0358
por000	0,5351	-0,0246	0,3307
denpor	-0,4100	0,0064	-0,4037
rih	0,6648	0,2462	0,3266
uplvg	0,0583	0,0142	0,0318
openpor	-0,0032	-0,0345	0,0145
hhrate	0,0187	0,0244	0,0000
<b>R<sup>2</sup></b>	0,9336	1,0136	0,9390

No que diz respeito às correlações, a escala de cores permite a visualização de uma concordância entre os fatores considerados influentes, os quais são consistentemente positivos ou negativos e em geral possuem sua primeira casa decimal em comum. As variáveis rab, por000, denpor e rih afetam a temperatura; pi0ein, prodis e rih afetam a pressão; e rah, pi0ein, por000, denpor e rih afetam a deformação por fluência.

Como estudado nas referências [11] e [16], a soma quadrática das correlações de Spearman fornece uma boa medida da linearidade do modelo, e os resultados exibidos nas Tabelas 4 a 13 mostram valores de R<sup>2</sup> próximos à unidade, indicando que efeitos de segunda ordem não são esperados no TRANSURANUS.

Os índices de sensibilidade de primeira ordem são apresentados abaixo, com os números negativos ou próximos a zero apresentados com fundo branco, e os coeficientes positivos apresentando coloração mais forte ao se aproximar de 1.

**Tabela 14: Índices de Sensibilidade calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 1**

Índices de 1a Ordem			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	-0,0619	0,0490	0,3438
pi0ein	0,0082	0,9122	0,2197
enri35	-0,1514	0,0575	0,0433
ozum0	-0,1579	0,0437	0,0433
rab	-0,0889	0,0406	0,0399
prodis	-0,1075	0,0688	0,0396
korng	-0,1141	0,0487	0,0433
por000	0,2593	0,0803	0,1424
denpor	0,2798	0,0615	0,2280
rih	0,2804	0,0942	0,1725
uplv	-0,0112	0,0614	0,0369
openpor	-0,1461	0,0431	0,0433
hhrate	-0,0580	0,0537	0,0431

**Tabela 15: Índices de Sensibilidade calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 2**

Índices de 1a Ordem			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	0,1931	0,0095	0,3191
pi0ein	0,1254	0,9332	0,2758
enri35	0,0112	-0,0024	0,0534
ozum0	0,0401	-0,0018	0,0535
rab	-0,0102	-0,0005	0,0567
prodis	0,2317	0,0244	0,0542
korng	0,0960	0,0093	0,0534
por000	0,3134	0,0265	0,1583
denpor	0,2849	-0,0006	0,2018
rih	0,4343	0,0528	0,2077
uplv	0,1178	-0,0039	0,0525
openpor	0,0429	-0,0011	0,0535
hhrate	0,0434	-0,0059	0,0538

**Tabela 16: Índices de Sensibilidade calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 3**

Índices de 1a Ordem			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	0,1815	0,0273	0,2850
pi0ein	-0,0019	0,9519	0,1755
enri35	0,0581	0,0202	-0,0471
ozum0	0,0763	0,0106	-0,0470
rab	0,0882	0,0316	-0,0488
prodis	-0,0320	0,0271	-0,0392
korng	0,0736	0,0107	-0,0470
por000	0,1929	0,0081	0,0856
denpor	0,1990	0,0057	0,1355
rih	0,4034	0,0778	0,0547
uplv	0,0183	0,0118	-0,0419
openpor	0,0816	0,0117	-0,0470
hhrate	0,0612	0,0143	-0,0474

**Tabela 17: Índices de Sensibilidade calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 4**

Índices de 1a Ordem			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	-0,0662	0,0147	0,1932
pi0ein	0,0203	0,9332	0,1831
enri35	-0,1535	0,0032	-0,0902
ozum0	-0,0755	-0,0078	-0,0902
rab	0,0913	0,0229	-0,0869
prodis	-0,1741	0,0079	-0,0936
korng	-0,1236	0,0011	-0,0901
por000	0,0352	-0,0049	0,0423
denpor	0,2341	-0,0260	0,1970
rih	0,4754	0,0722	0,0426
uplv	-0,0661	0,0115	-0,0885
openpor	-0,0672	-0,0066	-0,0902
hhrate	-0,0024	0,0057	-0,0904

**Tabela 18: Índices de Sensibilidade calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 5**

Índices de 1a Ordem			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	0,0649	-0,0142	0,3541
pi0ein	0,1826	0,9137	0,2969
enri35	0,0618	-0,0011	0,0729
ozum0	0,0441	-0,0036	0,0729
rab	0,0718	0,0012	0,0711
prodis	-0,0417	0,0051	0,0792
korngr	0,0320	-0,0034	0,0728
por000	0,4064	-0,0015	0,2033
denpor	0,1714	-0,0126	0,2749
rih	0,4705	0,0509	0,1686
uplvg	-0,0443	-0,0035	0,0689
openpor	0,0479	-0,0031	0,0729
hhrate	0,0449	-0,0057	0,0726

**Tabela 19: Índices de Sensibilidade calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 6**

Índices de 1a Ordem			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	0,0391	0,0096	0,3717
pi0ein	0,1518	0,8762	0,3525
enri35	0,1175	0,0043	0,0567
ozum0	0,1638	0,0036	0,0566
rab	0,0108	0,0105	0,0521
prodis	-0,0725	0,0066	0,0549
korngr	0,0266	0,0051	0,0567
por000	0,3664	0,0009	0,1624
denpor	0,3220	0,0305	0,2540
rih	0,6679	0,0816	0,1291
uplvg	0,0089	0,0011	0,0528
openpor	0,1806	0,0043	0,0566
hhrate	0,0182	0,0070	0,0563



**Tabela 20: Índices de Sensibilidade calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 7**

Índices de 1a Ordem			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	-0,0967	-0,0285	0,3056
pi0ein	-0,1557	0,9059	0,2629
enri35	-0,0936	-0,0240	0,0375
ozum0	-0,0838	-0,0104	0,0375
rab	-0,0335	-0,0071	0,0422
prodis	0,0295	-0,0058	0,0485
korng	-0,0246	-0,0108	0,0376
por000	0,1475	-0,0518	0,1806
denpor	0,1302	-0,0267	0,2166
rih	0,5016	0,0449	0,1869
uplvg	-0,0904	-0,0163	0,0350
openpor	-0,0989	-0,0115	0,0375
hhrate	-0,0435	-0,0160	0,0373

**Tabela 21: Índices de Sensibilidade calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 8**

Índices de 1a Ordem			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	0,2413	0,0214	0,2429
pi0ein	0,1950	0,9242	0,2100
enri35	0,1230	0,0256	-0,0524
ozum0	0,0754	0,0132	-0,0524
rab	0,1076	0,0356	-0,0616
prodis	0,0894	0,0409	-0,0539
korng	0,0830	0,0180	-0,0525
por000	0,4088	0,0003	0,1372
denpor	0,2421	-0,0006	0,1730
rih	0,3990	0,0938	0,0581
uplvg	0,0862	0,0190	-0,0491
openpor	0,0714	0,0151	-0,0524
hhrate	0,1085	0,0144	-0,0523

**Tabela 22: Índices de Sensibilidade calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 9**

Índices de 1a Ordem			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	0,0339	0,0028	0,3013
pi0ein	-0,0697	<b>0,9211</b>	0,2886
enri35	-0,0152	0,0021	0,0368
ozum0	-0,0449	0,0034	0,0368
rab	-0,0411	0,0171	0,0321
prodis	0,0351	0,0193	0,0475
korngr	-0,0679	0,0009	0,0367
por000	0,1830	-0,0143	0,1437
denpor	0,1937	-0,0234	0,2142
rih	<b>0,4212</b>	0,0500	0,1808
uplvg	0,0033	0,0038	0,0411
openpor	-0,0370	0,0025	0,0368
hhrate	0,0214	-0,0067	0,0371

**Tabela 23: Índices de Sensibilidade calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 10**

Índices de 1a Ordem			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	-0,0168	-0,0538	0,3196
pi0ein	0,1338	<b>0,8955</b>	0,2736
enri35	0,0024	-0,0606	0,0401
ozum0	0,0583	-0,0559	0,0401
rab	0,1095	-0,0570	0,0376
prodis	0,1116	-0,0482	0,0381
korngr	0,0389	-0,0595	0,0401
por000	<b>0,3941</b>	-0,0764	0,1093
denpor	<b>0,3435</b>	-0,0601	0,2572
rih	<b>0,7188</b>	0,0090	0,1485
uplvg	0,1775	-0,0578	0,0440
openpor	0,0540	-0,0570	0,0401
hhrate	-0,0198	-0,0529	0,0395

Quanto aos índices calculados por decomposição da variância, em todos os dez casos, a pressão interna da vareta no início da operação ( $\pi_{0ein}$ ) é considerado um fator de grande influência sobre a pressão máxima alcançada, sendo superior a 0,9 em todos os casos. Outros fatores que parecem concordar em todas as simulações, ao menos qualitativamente, são a influência da porosidade ao final da densificação ( $den_{por}$ ) e raio interno do revestimento ( $RIH$ ) sobre a temperatura central do combustível, e a influência do raio externo do revestimento e pressão inicial ( $RAH$  e  $\pi_{0ein}$ ) sobre a deformação plástica.

Outros valores, como a influência de  $RAH$  e  $\pi_{0ein}$  sobre a temperatura, variam amplamente, apresentando ora valores positivos, ora negativos. Até certo ponto, a presença de números negativos é esperada, pois uma vez que o modelo é estatístico pode haver flutuação ao redor do zero, mas a presença de números negativos de maior valor absoluto (como o -0,17 no  $prod_{is} \times$  Temperatura central na tabela 16) mostra que a quantidade de amostras geradas para cada simulação individualmente ( $N=2000$ ) é insuficiente para uma boa estatística. A presença de números negativos com valores absolutos significativamente maiores que zero também dificulta a medida da linearidade do sistema através da soma dos coeficientes.

Os índices de efeitos totais, apresentados em seguida, estão sujeitos às mesmas considerações.

**Tabela 24: Índices de efeitos totais calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 1**

Índices de Efeitos Totais			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	0,2318	0,0075	0,3028
pi0ein	0,1589	0,8767	0,2947
enri35	0,3202	-0,0010	0,0126
ozum0	0,3100	0,0129	0,0126
rab	0,3276	0,0250	0,0202
prodis	0,2753	0,0251	0,0274
korngr	0,2852	0,0071	0,0125
por000	0,5044	-0,0230	0,1017
denpor	0,3395	-0,0035	0,2597
rih	0,7731	0,0804	0,0993
uplvg	0,1725	-0,0057	0,0199
openpor	0,2968	0,0134	0,0126
hhrate	0,2266	0,0022	0,0129

**Tabela 25: Índices de efeitos totais calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 2**

Índices de Efeitos Totais			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	-0,2720	0,0054	0,2991
pi0ein	-0,1979	0,9041	0,2833
enri35	-0,0905	0,0176	0,0198
ozum0	-0,1281	0,0162	0,0198
rab	0,0168	0,0220	0,0164
prodis	-0,3103	0,0329	0,0282
korngr	-0,1689	0,0054	0,0199
por000	0,2075	-0,0105	0,1238
denpor	0,0720	0,0151	0,2597
rih	0,4283	0,0763	0,0992
uplvg	-0,1927	0,0188	0,0218
openpor	-0,1304	0,0154	0,0198
hhrate	-0,1144	0,0205	0,0195

**Tabela 26: Índices de efeitos totais calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 3**

Índices de Efeitos Totais			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	-0,2191	-0,0839	0,3703
pi0ein	-0,0369	0,8746	0,3578
enri35	-0,0929	-0,0764	0,0921
ozum0	-0,1249	-0,0668	0,0920
rab	-0,0655	-0,0821	0,0954
prodis	-0,0007	-0,0490	0,0960
korng	-0,1070	-0,0675	0,0920
por000	0,3822	-0,0622	0,1953
denpor	0,1801	-0,0596	0,3262
rih	0,4220	-0,0142	0,2279
uplvg	-0,0548	-0,0677	0,0870
openpor	-0,1306	-0,0679	0,0920
hhrate	-0,1010	-0,0704	0,0925

**Tabela 27: Índices de efeitos totais calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 4**

Índices de Efeitos Totais			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	0,1618	-0,0623	0,4876
pi0ein	0,0789	0,9061	0,4027
enri35	0,2569	-0,0515	0,1640
ozum0	0,1626	-0,0409	0,1640
rab	0,0828	-0,0675	0,1618
prodis	0,2770	-0,0261	0,1774
korng	0,2186	-0,0498	0,1640
por000	0,6492	-0,0411	0,2511
denpor	0,3029	-0,0172	0,3160
rih	0,5025	0,0060	0,2567
uplvg	0,1744	-0,0591	0,1626
openpor	0,1541	-0,0419	0,1640
hhrate	0,1042	-0,0541	0,1642

**Tabela 28: Índices de efeitos totais calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 5**

Índices de Efeitos Totais			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	-0,1227	0,0075	0,1476
pi0ein	-0,2415	0,9191	0,1113
enri35	-0,1264	-0,0050	-0,1800
ozum0	-0,1154	-0,0036	-0,1801
rab	-0,0715	0,0000	-0,1726
prodis	-0,0257	0,0300	-0,1738
korng	-0,0941	-0,0027	-0,1800
por000	0,1992	-0,0036	-0,0730
denpor	0,1816	0,0091	0,0375
rih	0,3441	0,0624	-0,0423
uplv	-0,0136	-0,0021	-0,1755
openpor	-0,1189	-0,0040	-0,1801
hhrate	-0,1011	-0,0013	-0,1797

**Tabela 29: Índices de efeitos totais calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 6**

Índices de Efeitos Totais			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	-0,1477	0,0265	0,2011
pi0ein	-0,2663	0,9473	0,1071
enri35	-0,2317	0,0321	-0,0797
ozum0	-0,2893	0,0328	-0,0796
rab	-0,0551	0,0330	-0,0732
prodis	-0,0401	0,0614	-0,0678
korng	-0,1396	0,0311	-0,0796
por000	0,1093	0,0349	0,0406
denpor	-0,0211	0,0068	0,1445
rih	0,0826	0,0839	0,0752
uplv	-0,1266	0,0348	-0,0754
openpor	-0,3075	0,0321	-0,0796
hhrate	-0,1314	0,0291	-0,0793

**Tabela 30: Índices de efeitos totais calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 7**

Índices de Efeitos Totais			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	0,1254	0,0629	0,1532
pi0ein	0,1885	0,9497	0,1090
enri35	0,1162	0,0589	-0,1832
ozum0	0,1008	0,0453	-0,1833
rab	0,1336	0,0519	-0,1833
prodis	-0,0044	0,0775	-0,1787
korngr	0,0464	0,0459	-0,1833
por000	0,5190	0,0874	-0,0698
denpor	0,3194	0,0630	0,0723
rih	0,4534	0,0995	-0,0600
uplvg	0,1186	0,0522	-0,1795
openpor	0,1158	0,0463	-0,1832
hhrate	0,0656	0,0515	-0,1830

**Tabela 31: Índices de efeitos totais calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 8**

Índices de Efeitos Totais			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	-0,3544	-0,0801	0,3970
pi0ein	-0,2998	0,8890	0,3210
enri35	-0,2282	-0,0839	0,0993
ozum0	-0,1987	-0,0715	0,0994
rab	-0,1622	-0,0890	0,1120
prodis	-0,1977	-0,0602	0,1109
korngr	-0,1880	-0,0769	0,0994
por000	0,1488	-0,0600	0,1517
denpor	0,0921	-0,0565	0,3053
rih	0,3920	-0,0315	0,2318
uplvg	-0,1969	-0,0775	0,0957
openpor	-0,1948	-0,0735	0,0994
hhrate	-0,2201	-0,0730	0,0992

**Tabela 32: Índices de efeitos totais calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 9**

Índices de Efeitos Totais			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	0,0300	-0,0018	0,3105
pi0ein	0,1429	<b>0,9113</b>	0,2404
enri35	0,0792	-0,0015	0,0110
ozum0	0,1061	-0,0025	0,0110
rab	0,1740	-0,0137	0,0174
prodis	0,0359	0,0151	0,0108
korng	0,1354	-0,0003	0,0110
por000	<b>0,4967</b>	0,0142	0,1203
denpor	0,2564	0,0273	<b>0,2341</b>
rih	<b>0,5343</b>	0,0765	0,1036
uplvg	0,0589	-0,0029	0,0065
openpor	0,0975	-0,0016	0,0109
hhrate	0,0440	0,0082	0,0107

**Tabela 33: Índices de efeitos totais calculados pelo método Saltelli sobre os dados da Simulação 10**

Índices de Efeitos Totais			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	-0,1480	0,1024	0,1627
pi0ein	-0,3082	<b>0,9916</b>	0,1810
enri35	-0,1661	0,1091	-0,1425
ozum0	-0,2344	0,1042	-0,1425
rab	-0,1934	0,1138	-0,1386
prodis	-0,2775	0,1366	-0,1291
korng	-0,1964	0,1079	-0,1425
por000	0,0714	0,1262	0,0124
denpor	-0,0701	0,1107	0,0606
rih	0,0994	0,1539	0,0120
uplvg	-0,3460	0,1070	-0,1460
openpor	-0,2306	0,1052	-0,1425
hhrate	-0,1466	0,1016	-0,1419



Os índices de efeitos totais também demonstraram a importância de pi0ein, por000, denpor e RIH, mas apresentaram uma variação muito maior sobre os fatores restantes.

Como uma tentativa de obter valores mais razoáveis, uma média foi tomada sobre os dez valores de cada índice. Os resultados obtidos são exibidos abaixo:

**Tabela 34: Média dos Índices de sensibilidade de primeira ordem, calculada sobre os valores das tabelas 14 a 23**

Índices de 1a ordem - Media			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	0,0512	0,0038	0,3036
pi0ein	0,0590	0,9167	0,2538
enri35	-0,0040	0,0025	0,0151
ozum0	0,0096	-0,0005	0,0151
rab	0,0306	0,0095	0,0134
prodis	0,0070	0,0146	0,0175
korng	0,0020	0,0020	0,0151
por000	0,2707	-0,0033	0,1365
denpor	0,2401	-0,0052	0,2152
rih	0,4772	0,0627	0,1349
uplvg	0,0200	0,0027	0,0152
openpor	0,0129	-0,0003	0,0151
hhrate	0,0174	0,0008	0,0150

**Tabela 35: Média dos Índices de efeitos totais, calculada sobre os valores das tabelas 24 a 33**

Índices Totais - Média			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	-0,0715	-0,0016	0,2832
pi0ein	-0,0781	0,9170	0,2408
enri35	-0,0163	-0,0002	-0,0187
ozum0	-0,0411	0,0026	-0,0187
rab	0,0187	-0,0007	-0,0144
prodis	-0,0268	0,0243	-0,0099
korng	-0,0209	0,0000	-0,0187
por000	0,3288	0,0062	0,0854
denpor	0,1653	0,0095	0,2016
rih	0,4032	0,0593	0,1003
uplvg	-0,0406	-0,0002	-0,0183
openpor	-0,0448	0,0023	-0,0187
hhrate	-0,0374	0,0014	-0,0185

A tomada das médias eliminou os valores negativos mais extremos e ressaltou as semelhanças entre os índices de efeitos totais e os índices de sensibilidade de primeira ordem.

O próximo passo consistiu então em realizar um teste t sobre os resultados da simulação. A hipótese nula testada é que a média das simulações seja igual a zero. Foi utilizada uma significância de 95%. Nos casos em que o teste t acusa as médias de serem iguais a zero, os valores das tabelas 34 e 35 foram substituídos por zero. Caso contrário, o valor da média é mantido.

As tabelas a seguir mostram os valores dos índices corrigidos e os desvios padrões obtidos a partir da variância sobre o resultado das simulações:

**Tabela 36: Índices de sensibilidade de 1a ordem corrigidos por meio da aplicação do teste t.**

Índices de 1a ordem - Corrigido			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	0,0000	0,0000	0,3036
pi0ein	0,0000	0,9167	0,2538
enri35	0,0000	0,0000	0,0000
ozum0	0,0000	0,0000	0,0000
rab	0,0000	0,0000	0,0000
prodis	0,0000	0,0000	0,0000
korng	0,0000	0,0000	0,0000
por000	0,2707	0,0000	0,1365
denpor	0,2401	0,0000	0,2152
rih	0,4772	0,0627	0,1349
uplvg	0,0000	0,0000	0,0000
openpor	0,0000	0,0000	0,0000
hhrate	0,0000	0,0000	0,0000

**Tabela 37: Desvios padrões associados aos índices de sensibilidade de primeira ordem, obtidos a partir da variância entre as simulações.**

Índices de 1a ordem - Erro			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	0,1188	0,0294	0,0533
pi0ein	0,1168	0,0213	0,0558
enri35	0,1009	0,0309	0,0562
ozum0	0,0966	0,0248	0,0562
rab	0,0718	0,0284	0,0565
prodis	0,1181	0,0307	0,0577
korng	0,0805	0,0270	0,0562
por000	0,1283	0,0420	0,0469
denpor	0,0680	0,0336	0,0417
rih	0,1294	0,0263	0,0612
uplvg	0,0842	0,0298	0,0540
openpor	0,0982	0,0251	0,0562
hhrate	0,0504	0,0270	0,0562

**Tabela 38: Índices de efeitos totais corrigidos por meio da aplicação do teste t.**

Índices Totais - Media			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	-0,0715	-0,0016	0,2832
pi0ein	-0,0781	0,9170	0,2408
enri35	-0,0163	-0,0002	-0,0187
ozum0	-0,0411	0,0026	-0,0187
rab	0,0187	-0,0007	-0,0144
prodis	-0,0268	0,0243	-0,0099
korngr	-0,0209	0,0000	-0,0187
por000	0,3288	0,0062	0,0854
denpor	0,1653	0,0095	0,2016
rih	0,4032	0,0593	0,1003
uplvg	-0,0406	-0,0002	-0,0183
openpor	-0,0448	0,0023	-0,0187
hhrate	-0,0374	0,0014	-0,0185

**Tabela 39: Desvios padrões associados aos índices de efeitos totais, obtidos a partir da variância entre as simulações.**

Índices Totais - Erro			
	Max Temp Central	Max Press Interna	Max Def Fluência
rah	0,1977	0,0602	0,1156
pi0ein	0,2058	0,0367	0,1089
enri35	0,1977	0,0599	0,1225
ozum0	0,1973	0,0533	0,1225
rab	0,1617	0,0643	0,1223
prodis	0,2003	0,0597	0,1234
korngr	0,1787	0,0555	0,1225
por000	0,2052	0,0618	0,1072
denpor	0,1438	0,0511	0,1125
rih	0,2017	0,0565	0,1118
uplvg	0,1751	0,0576	0,1205
openpor	0,1968	0,0541	0,1225
hhrate	0,1395	0,0553	0,1224

Após estas correções, os números negativos são finalmente eliminados das tabelas, permitindo uma análise em conformidade com a teoria. Em primeiro lugar, tomando-se as somas dos índices de sensibilidade da Tabela 36 e combinando as incertezas da Tabela 37 pela fórmula de propagação de erros referente à soma (Equação 7) obtemos informações quanto à linearidade do sistema.

$$\sigma_f^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \dots \quad (7)$$

**Tabela 40: Soma dos índices de sensibilidade para os modelos do TRANSURANUS**

Temperatura Central do Combustível	0,99 ± 0,36
Pressão interna da vareta	0,98 ± 0,11
Deformação plástica do revestimento	1,04 ± 0,20

As somas dos índices de sensibilidade de primeira ordem se aproximarem da unidade está de acordo com o que foi observado nas somas quadráticas dos coeficientes de correlação de Spearman, indicando que os modelos do TRANSURANUS são lineares. Os valores de erro, no entanto, são muito elevados para que essa afirmação seja provada de forma quantitativa. Os erros exibidos nas Tabelas 37 e 39, e propagados para os resultados da Tabela 40 são devidos não aos modelos do TRANSURANUS, mas à natureza estatística do método Saltelli. Ao utilizar métodos estatísticos, quanto maior o valor de N, menos as flutuações estatísticas afetam os resultados. A grande variação dos índices encontrados nas dez simulações indica que 2000 amostras foram insuficientes, e a realização do procedimento com um número maior de amostras consta entre os possíveis desenvolvimentos futuros. Espera-se que com N mais elevado (a referência [16] utilizou 50.000 amostras) os índices obtidos a cada simulação sejam mais próximos entre si, diminuindo os desvios padrões encontrados.

Em seguida, foi realizada uma comparação entre os valores dos índices de efeitos totais e os respectivos índices de sensibilidade de 1ª ordem. Em uma análise preliminar, vê-se que alguns dos índices  $S_i$  são maiores que os respectivos  $S_T$  – nota-se particularmente o caso do efeito de por000 sobre a deformação do revestimento, cuja média é zero para  $S_T$ , mas não nula para  $S_i$ . No

entanto, dada a elevada variância dos resultados das simulações, essas discrepâncias entre as médias dos resultados e a previsão teórica se encontram dentro do desvio padrão. Isso foi verificado estatisticamente por meio da realização de um novo teste t para a hipótese de que a média dos índices de primeira ordem era igual à média dos índices de efeitos totais, seguindo o mesmo padrão de requerer uma confiabilidade de 95%.

Se os valores dos dois índices tivessem sido significativamente diferentes, a subtração de  $S_i$  de  $S_T$  revelaria efeitos de segunda ordem, mas estes não foram verificados no TRANSURANUS.

Sobre os índices considerados relevantes ao final, resta fazer uma análise sobre eles serem ou não os resultados esperados.

No que diz respeito à temperatura, a equação do TRANSURANUS para a condução de calor, tanto para o combustível quanto para o revestimento, é

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + q''' \quad (8)$$

Onde:

C é o calor específico à pressão constante.

h é a entalpia por unidade de massa.

$q'''$  é a densidade de potência

r é o raio

t é o tempo

$\lambda$  é a condutividade térmica e

$\rho$  é a densidade

Fatores que a simulação considera relevantes para o modelo da temperatura central do combustível, como a porosidade média de fabricação (por000) e porosidade ao final do processo de densificação (denpor) são capazes de afetar a densidade da pastilha de  $UO_2$ . A outra variável de entrada considerada

importante é o raio interno do revestimento (RIH). Isso se justifica ao verificar que o modelo de condutividade térmica do TRANSURANUS é afetado pela abertura da folga – uma quantidade que é obtida subtraindo-se RIH e o raio externo da pastilha de combustível (RAB). A pressão do gás de enchimento também exerce influência sobre a condutividade térmica, e isso é verificado nas tabelas X a Y referentes aos índices de correlação de Spearman, porém desaparece no cálculo de índices de primeira ordem pelo método Saltelli.

Nas Tabelas 4 a 13 as correlações mostram RAB com uma correlação consistentemente negativa, com valores absolutos fluando em torno de 0,13-0,19; e RIH com uma correlação consistentemente positiva acima de 0,64. Tendo em vista que, com o número de amostras utilizadas, o método Saltelli apresentou grandes variações entre as simulações realizadas, a variável de entrada com influência menor acabou por ter índices ora positivos, ora negativos, desaparecendo na tomada da média.

Quanto à pressão interna, é evidente que a pressão do gás de enchimento ( $p_{i0ein}$ ), sendo a condição inicial, exerce influência preponderante sobre o resultado. O volume interno da vareta de combustível é o espaço que o gás tem para se expandir, e mais uma vez nas correlações de Spearman vê-se que RIH e RAB, correspondentes à abertura da folga, se destacam, com RIH tendo um valor absoluto maior, positivo (quanto maior o raio interno do revestimento, maior o volume interno da vareta); e RAB tendo um valor negativo (quanto maior o raio da pastilha combustível, menor o volume interno da vareta). Outro fator que se destacou nas correlações de Spearman foi a proporção entre o espaço vazio e o volume da pastilha (prodis), que lida com a presença de concavidades e chanfros na geometria da pastilha de  $UO_2$ . Mais uma vez, a utilização do método Saltelli com  $N = 2000$  amostras não produziu uma concordância entre os índices de sensibilidade das variáveis de entrada com influência pequena, mantendo apenas  $p_{i0ein}$  e RIH.

A variável  $uplvg$ , descrita como volume do plenum inferior, não se mostra relevante nem por meio das análises das correlações, nem na dos

coeficientes, levando a crer que não é utilizada em outros modelos que não o do cálculo da pressão.

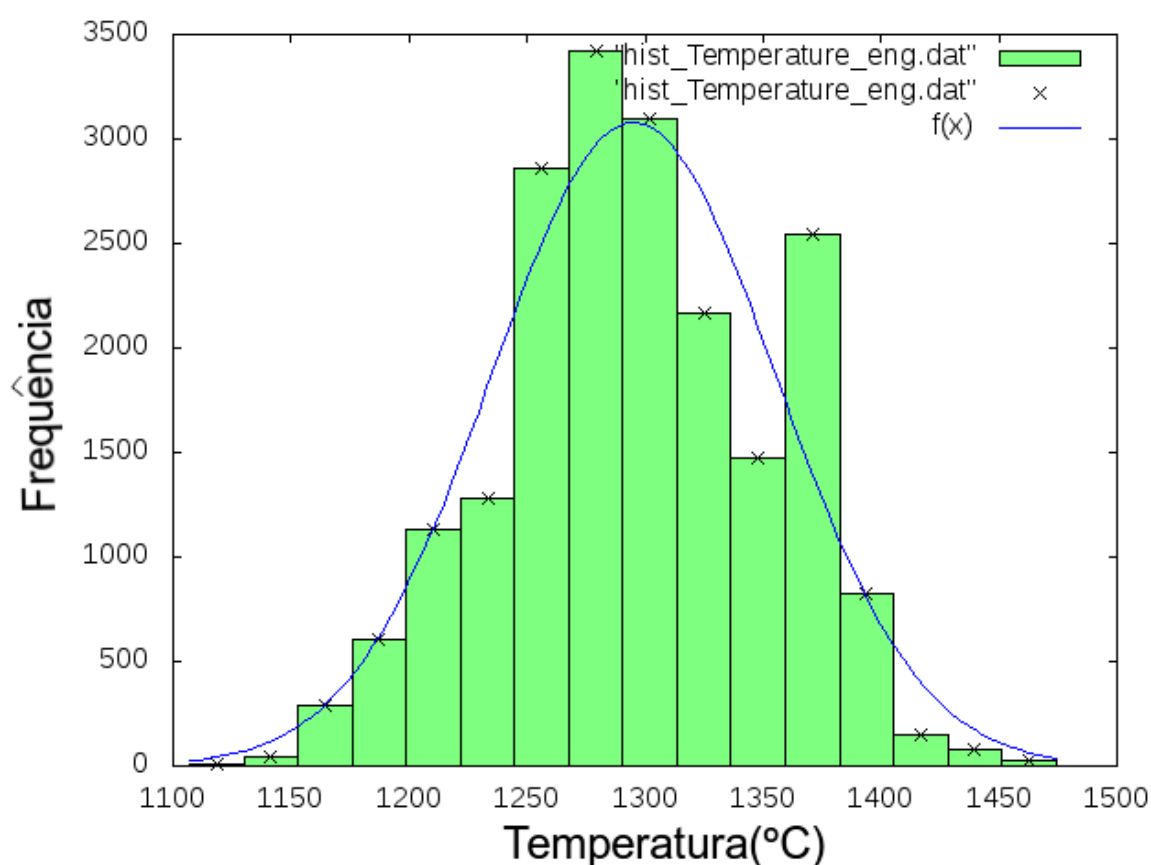
Por último, é esperado que a deformação sobre o revestimento dependa da espessura do mesmo, das propriedades mecânicas dependentes da temperatura e da pressão à qual o revestimento é submetido. A diferença entre RAH e RIH fornece a espessura do tubo de revestimento, e ambas as variáveis são consideradas importantes, tanto analisando-se pelas correlações quanto pelos índices de sensibilidade de primeira ordem. As variáveis  $\rho$  e  $\text{denpor}$ , que afetam a temperatura, acabam aparecendo como fatores influentes também na deformação do revestimento. E a variável  $p$  representa os efeitos da pressão, de forma que os índices de sensibilidade considerados relevantes se encontram plenamente justificados.



## 4.2 Quantificação de incertezas

A combinação dos resultados referentes ao conjunto A de cada simulação resultou nos histogramas apresentados abaixo, seguidos dos resultados da quantificação de incertezas.

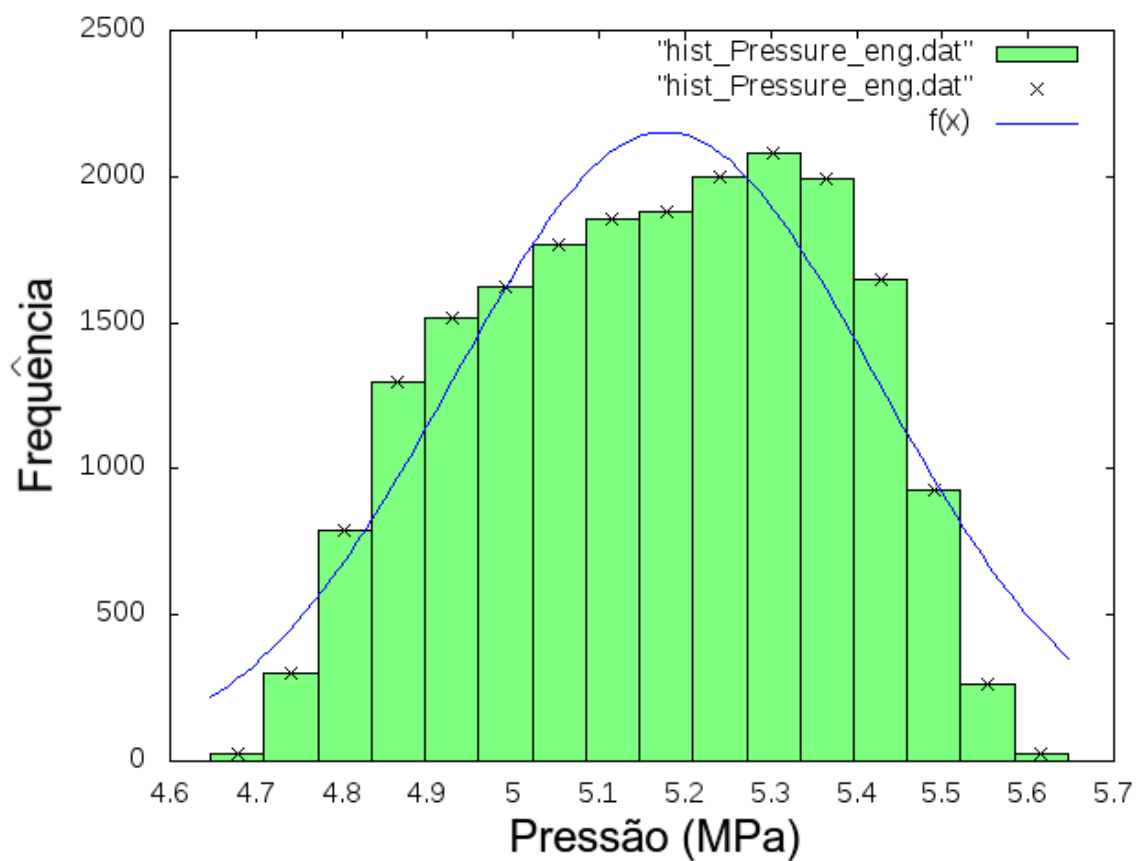
**Figura 9: Histograma dos valores de temperatura máxima obtidos ao longo de 10 simulações e ajuste de uma gaussiana à distribuição.**



**Tabela 41: Resultados da quantificação de incertezas referentes à temperatura central do combustível**

Temperatura	
Valor +- Incerteza	1296      57
Intervalo de Confiança	1185      1407
Extremos	1107      1474

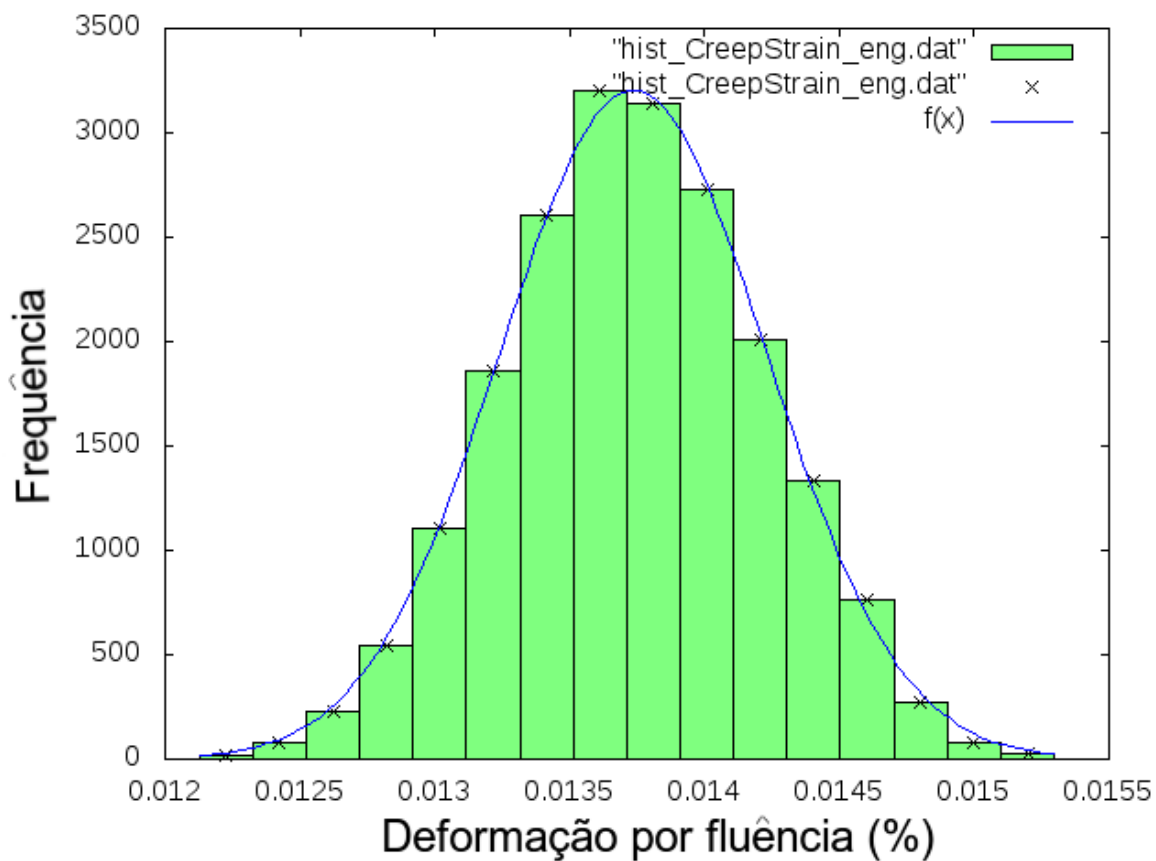
**Figura 10: Histograma dos valores de pressão máxima obtidos ao longo de 10 simulações, e ajuste de uma gaussiana à distribuição.**



**Tabela 42: Resultados da quantificação de incertezas referentes à pressão interna da vareta**

Pressão		
Valor +- Incerteza	5,16	0,20
Intervalo de Confiança	4,77	5,56
Extremos	4,65	5,65

**Figura 11: Histograma dos valores de deformação máxima obtidos ao longo de 10 simulações, e ajuste de uma gaussiana à distribuição.**



**Tabela 43: Resultados da quantificação de incertezas referentes à deformação do revestimento**

Deformação		
Valor +- Incerteza	0,0137	0,0005
Intervalo de Confiança	0,0128	0,0147
Extremos	0,0121	0,0153

Uma observação qualitativa das distribuições obtidas sugere que os resultados obtidos se aproximam melhor de uma distribuição normal do que, por exemplo, uma distribuição uniforme ou exponencial. Uma vez que as variáveis de entrada apresentavam distribuições normais truncadas, esse comportamento é esperado. Além disso, vê-se que – para as médias e desvios padrões escolhidas para os parâmetros de entrada variados – não existem resultados se agrupando em regimes de comportamento diferentes, o que seria evidenciado por uma distribuição com dois ou mais picos.

Como forma quantitativa de determinar a distribuição dos resultados, decidiu-se tomar os centros dos intervalos dos histogramas e os números de contagens de cada intervalo e utilizá-los como coordenadas de pontos (símbolo “x” azul dos gráficos das figuras 9, 10 e 11) sobre os quais foi ajustada uma gaussiana, conforme a Equação 9:

$$f(x) = N \cdot \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2s^2}\right) \quad (9)$$

Onde N é um fator de normalização, e m e s representam a média e desvio padrão da gaussiana.

Quando a distribuição dos resultados se aproxima da distribuição normal, a média e desvio padrão obtidos pelo ajuste se tornam equivalentes aos valores da média e desvio padrão obtidos pelo cálculo direto.

A tabela a seguir apresenta a comparação de resultados:

**Tabela 44: Comparação entre média e desvio padrão da amostra com média e desvio padrão de uma gaussiana ajustada sobre os histogramas.**

	Calculado dos dados	Ajustado do histograma
Temperatura	1296 ± 57	1294 ± 60
Pressão	5,16 ± 0,20	5,18 ± 0,25
Deformação	0,0137 ± 0,0005	0,0137 ± 0,0005

Comparando os resultados da Tabela 44 por meio dos testes estatísticos adequados (teste Z para as médias e teste F para as variâncias), os valores encontrados foram considerados compatíveis, de forma que no intervalo

de interesse é possível afirmar que os resultados apresentam distribuição normal em torno da média.

Como última análise a ser realizada, foram tomadas a evolução do resultados de interesse ao longo do tempo, e comparados com os dados das simulações. Devido ao grande número de dados, apenas 1 a cada 10 pontos das simulações são representados nos gráficos.

**Figura 12: Evolução temporal da máxima de temperatura dos casos estudados, em comparação com o caso nominal.**

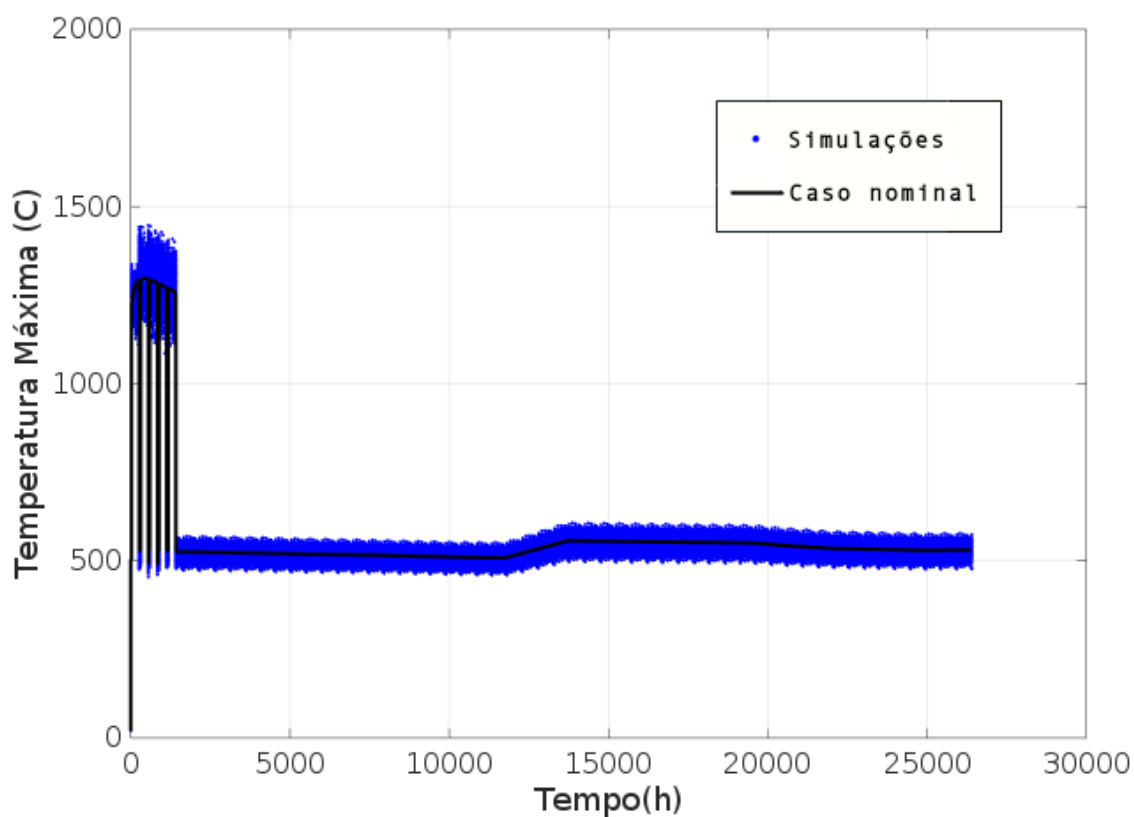


Figura 13: Evolução temporal da máxima de pressão dos casos estudados, em comparação com o caso nominal

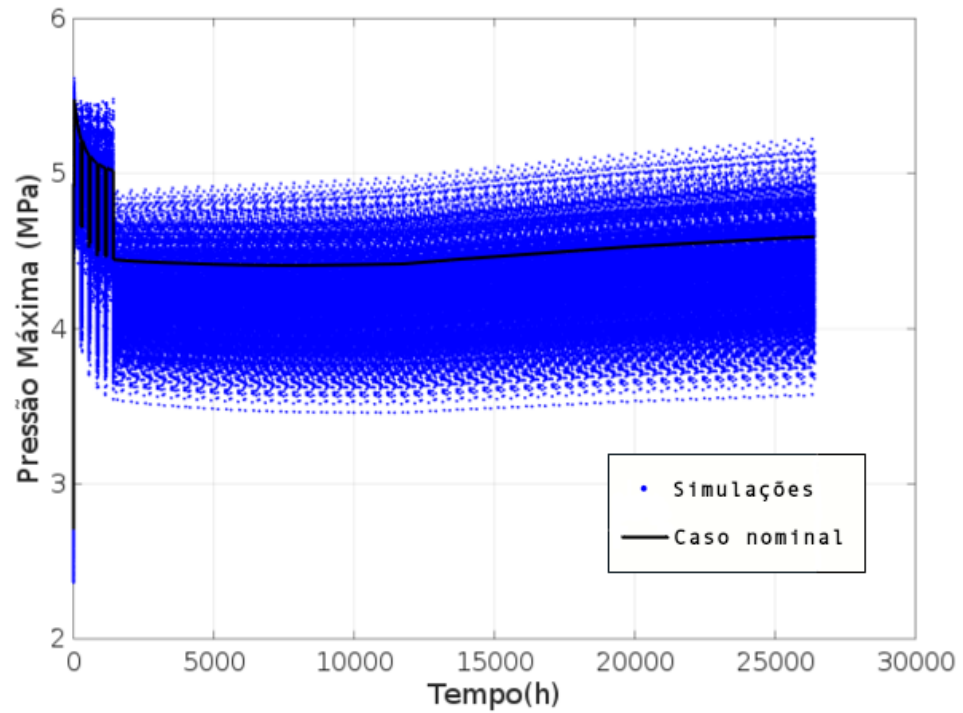
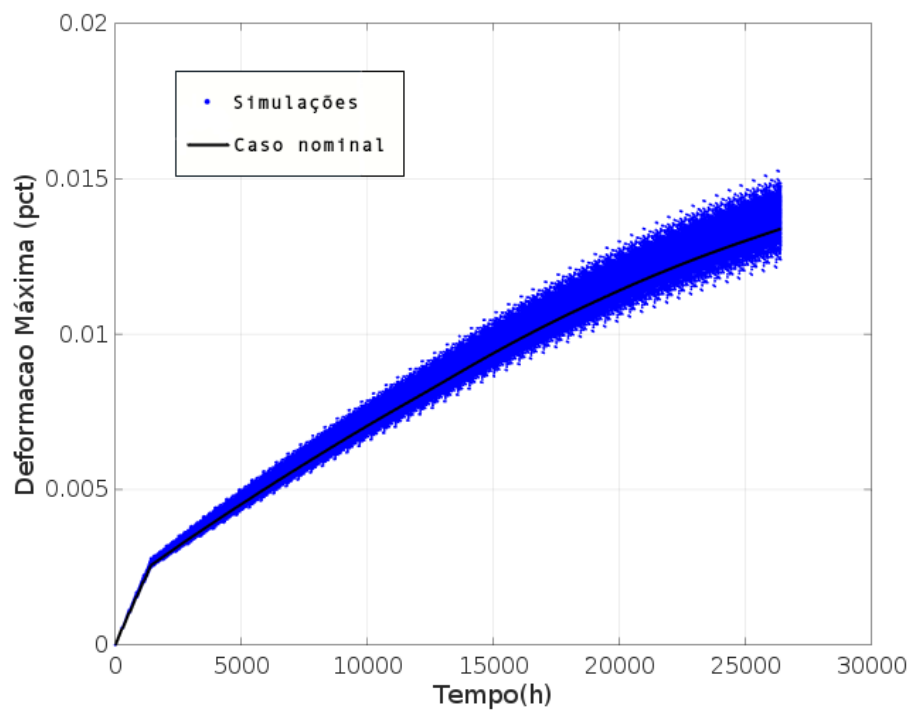


Figura 14: Evolução temporal da máxima de deformação por fluência dos casos estudados, em comparação com o caso nominal



Analisando-se as Figuras 12, 13 e 14 é possível observar a região onde os pontos azuis se concentram, uma maneira visual de identificar os 95% de dados que se encontram dentro do intervalo de confiança. A deformação e a pressão do caso nominal não se encontram exatamente no centro do espaço amostral coberto pelas simulações, com a pressão do caso nominal acima da média aritmética e a deformação abaixo. A variância da temperatura e pressão se mantém razoavelmente constantes através do tempo, enquanto a deformação, por ser um valor cumulativo, tem sua variância aumentando com o tempo.

As figuras abaixo permitem analisar mais de perto as regiões onde as máximas de cada resultado são encontradas:

**Figura 15: Comparação entre o caso nominal do reator hipotético e as simulações, região das temperaturas máximas.**

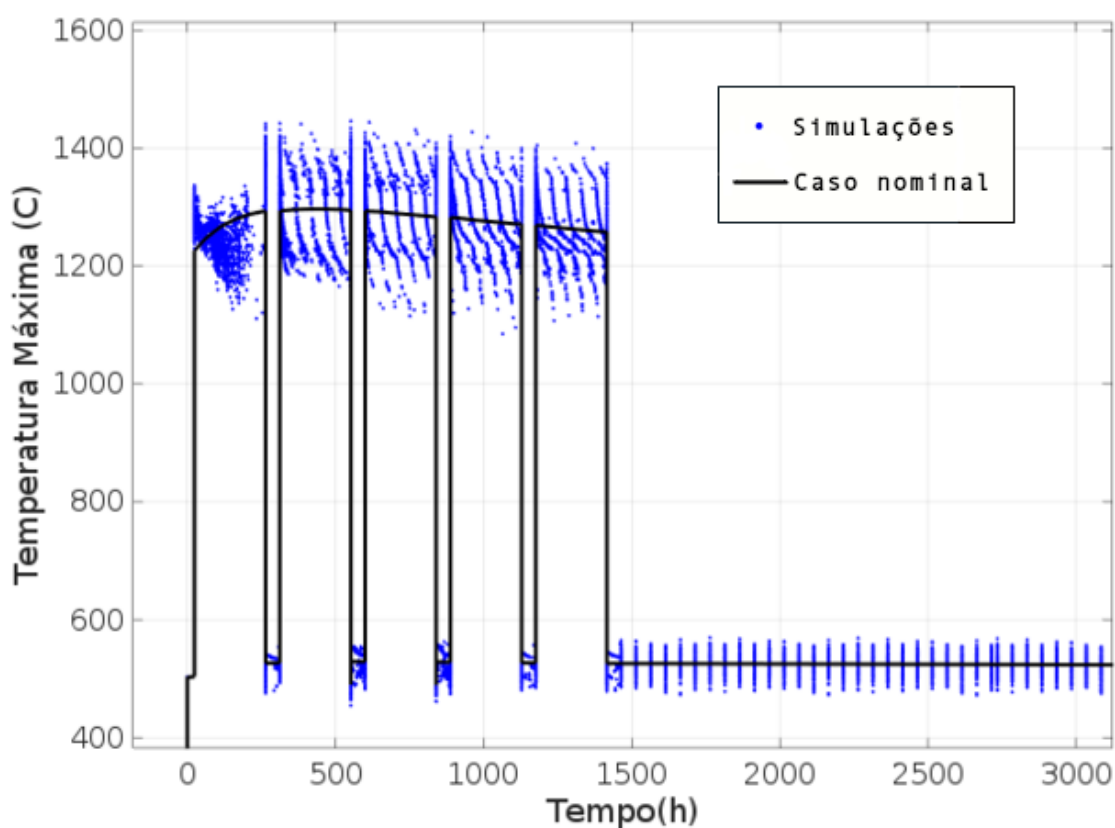


Figura 16: Comparação entre o caso nominal do reator hipotético e as simulações, região das pressões máximas.

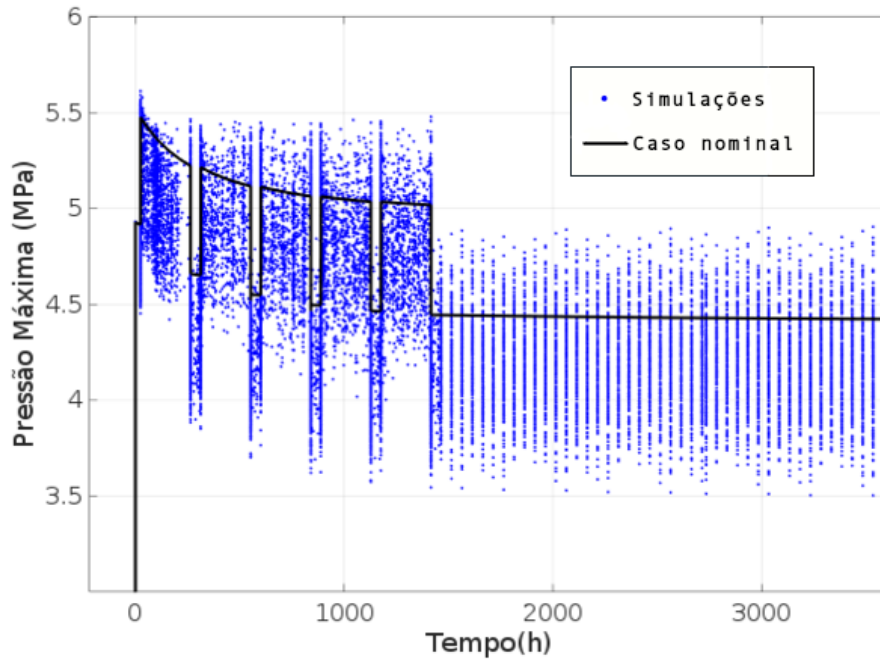
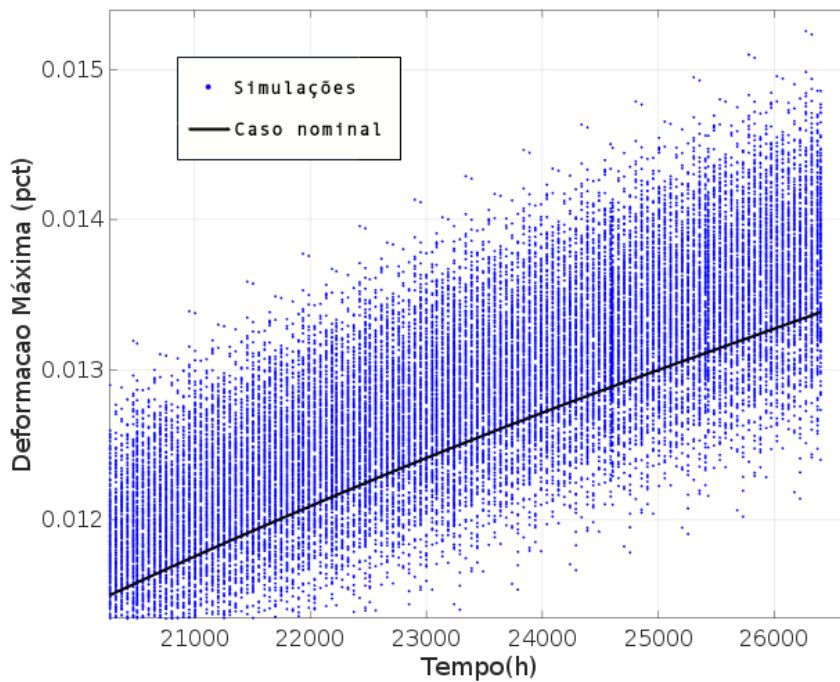


Figura 17: Comparação entre o caso nominal do reator hipotético e as simulações, região da deformação máxima.





## 5 CONCLUSÕES

Ao final do estudo realizado é possível concluir que a temperatura central do combustível permanece bem abaixo do ponto de fusão do dióxido de urânio durante toda a operação, e em nenhum dos casos simulados houve rompimento da vareta – se isto houvesse ocorrido a simulação teria sido interrompida – de forma que mesmo sujeita às variações previstas na geometria e composição, a vareta de combustível deste reator hipotético obedece a dois dos critérios de segurança determinados pela IAEA. Quanto à deformação total da vareta, isso não pode ser afirmado, uma vez que apenas o valor da deformação por fluência foi tomado. Um desenvolvimento futuro seria aperfeiçoar o código para tomar as várias deformações calculadas pelo TRANSURANUS e combiná-las de modo a obter a deformação total.

Se este não fosse o caso, a análise de sensibilidade identificou (dentre os dados de entrada variados) os fatores que mais influenciam a variação dos resultados de interesse, de forma que um controle mais preciso dos resultados pode ser obtido estabelecendo limites de tolerância mais conservadores para as variáveis consideradas importantes.

São elas:

Para o modelo da temperatura central do combustível: a porosidade média de fabricação da pastilha de combustível, responsável por 27% da variância do resultado; a porosidade ao final do processo de densificação, responsável por 24% da variação; e o raio interno do revestimento, responsável por 48% da variação.

Para o modelo da pressão interna da vareta de combustível: a pressão inicial do gás de enchimento da vareta, responsável por 92% da variância do resultado; e o raio interno do revestimento, responsável por 6% da variação.

E para o modelo da deformação do revestimento: os raios interno e externo do revestimento, sendo responsáveis respectivamente por 13% e 30% da variância do resultado; a pressão do gás de enchimento, responsável por 25% da variância; e as porosidades média e final da pastilha de combustível, responsáveis respectivamente por 14% e 22% da variância.

Estes resultados apresentam boa concordância com os modelos utilizados pelo TRANSURANUS, mostrando também a linearidade dos mesmos. No entanto, os erros aos quais estes resultados estão submetidos mostram que a utilização de apenas 2000 amostras é insuficiente para a utilização adequada do método Saltelli. A realização de dez simulações permitiu alcançar os resultados com um grau razoável de confiabilidade, mas para realizar o mesmo estudo com menos – ou, idealmente, apenas uma – simulação, é necessário utilizar um computador cuja capacidade de processamento permita a execução de um número maior de amostras em tempo hábil.

Ainda assim, pode-se dizer que o estudo realizado cumpriu seus objetivos, uma vez que a quantificação de incertezas e a análise de sensibilidade foram corretamente realizadas e foi desenvolvido um método passível de aplicação em trabalhos futuros.

## 6 ATIVIDADES FUTURAS

Realizar as simulações em um computador com alta capacidade de processamento ou *cluster* de forma a definir uma quantidade mínima de amostras para a redução de erros dos índices obtidos pelo método Saltelli. Criação de um novo script que combine os valores de deformação do revestimento de forma a permitir a avaliação da deformação total.

A metodologia desenvolvida também pode ser aplicada para o estudo de outros problemas de interesse, como a influência das condições de contorno (fluxo, temperatura e pressão do refrigerante, potência de operação do reator, etc.) sobre os critérios de segurança.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **Design of the Reactor Core for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-52**, IAEA, Vienna (2019)

[2] EUROPEAN COMMISSION JRC INSTITUTE FOR TRANSURANIUM ELEMENTS. **JRC “TRANSURANUS handbook”**. Karlsruhe, Germany. January 2012.

[3] BABA, M. **Fukushima accident: what happened?** Radiation measurements, volume 55, August 2013, pages 17-21

[4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **Accident Tolerant Fuel Concepts for Light Water Reactors**, IAEA-TECDOC-1797, IAEA, Vienna (2016).

[5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **Structural Materials for Liquid Metal Cooled Fast Reactor Fuel Assemblies-Operational Behaviour**, Nuclear Energy Series No. NF-T-4.3, IAEA, Vienna (2012).

[6] GIOVEDI, C. et al **Fuel Performance Of Iron-Based Alloy Cladding Using Modified Transuranus Code** , XXI ENFIR, Santos (2019)

[7] GIOVEDI, C. et al. **Assessment of stainless steel 348 fuel rod performance against literature available data using TRANSURANUS code**. EPJ Nuclear Sci. Technol. 2 27 (2016)

[8] LOUCKS, P. et al. **Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models And Applications**. Publicado pela UNESCO, Paris, 2005.

[9] SALTELLI, A. et al.(2008). **Global Sensitivity Analysis: The Primer**. John Wiley & Sons.

[10] PASTORE, G., et al. **Uncertainty, and sensitivity analysis of fission gas behavior in engineering-scale fuel modeling**. Journal of Nuclear Materials, v. 456, p. 398-408, (2015).

[11] BOULARÁ, STUZIK, GAUDIER. **Uncertainty and sensitivity analysis of the nuclear fuel thermal behavior**. Comissão de Energia Atômica, França.

[12] GAMBLE, K. A.; SWILER, L. P.; **Uncertainty quantification and Sensitivity analysis applications to fuel performance modeling**. Idaho National Laboratory.

[13] Blanchet, D.; Mikityuk, K.; Coddington, P.;Chawla, R.; **An uncertainty assessment methodology for materials behaviour in advanced fast reactors**. Paul Scherrer Institut, Switzerland

[14] ZHANG, H. et al **Demonstration of uncertainty Quantification and Sensitivity Analysis in PWR Fuel Performance with Bison**. Proceedings of ICAPP 2017April 24-28, 2017 - Fukui and Kyoto (Japan).

[15] BLYTH, T. **Fuel Performance Code Benchmark For Uncertainty Analysis in Light Water Reactor Modeling**. Pennsylvania, 2012.

[16] IKONEN, T.; TULKKI, V.; **Importance of input interactions in the uncertainty and sensitivity analysis of nuclear fuel behavior**. VTT Technical Research Centre of Finland

[17] GREENE, W. H. **Econometric Analysis** (5th ed.). Prentice Hall (2003).

[18] EATON, J.; BATEMAN,D.; HAUBERG, S.; WEHBRING, R. (2014). **GNU Octave version 3.8.1 manual**: a high-level interactive language for numerical computations. CreateSpace Independent Publishing Platform.

---

---

---

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
**Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino**  
**Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000**  
**Fone/Fax(0XX11) 3133-8908**  
**SÃO PAULO – São Paulo – Brasil**  
**<http://www.ipen.br>**

**O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.**

---

---

---