

HIAGO PAIVA INÁCIO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA INTERFACE GRÁFICA
PARA UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL DE SI-
MULAÇÃO DE UNIDADES GERADORAS**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2019

HIAGO PAIVA INÁCIO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA INTERFACE GRÁFICA
PARA UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL DE SIMULAÇÃO DE
UNIDADES GERADORAS**

**Projeto de Conclusão de
Curso** apresentado ao Curso de graduação em Engenharia Aeronáutica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **BACHAREL** em **ENGENHARIA AERONÁUTICA**.

Orientador: Prof. Dr. Aldemir Aparecido Cavalini Jr.

UBERLÂNDIA – MG

2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar meus pais Narciso e Elaine por todo apoio e suporte que possibilitaram minha formação sem demais preocupações.

A meus padrinhos por me acolher quando precisei. A Lorena, minha companheira que esteve ao meu lado durante quase toda minha graduação. Aos meus avós e tios, em especial Kellen e João pela oportunidade de vivenciar mercado de trabalho. Aos meus primos e familiares.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Aldemir Aparecido Cavalini Jr. Pela motivação e por acreditar na minha capacidade.

Aos meus professores pelos ensinamentos que me permitiram amadurecer e que me formaram profissionalmente.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica.

INÁCIO, H. P. **Desenvolvimento de uma Interface Gráfica para uma Ferramenta Computacional de Simulação de Unidades Geradoras.** 2019. 59p. Projeto de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, Brasil.

RESUMO

Esse trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma interface gráfica para entrada de dados e visualização de resultados acerca da modelagem robusta para o diagnóstico de defeitos em unidades geradoras. Os sistemas de diagnóstico de defeitos nestas unidades são importantes para manter a confiabilidade e segurança na hidrogeração, contudo, estes sistemas também permitem reduzir custos de manutenção nas usinas hidrelétricas. Buscando agilizar a utilização das ferramentas de auxílio em unidades geradoras, a interface gráfica permite simplificar a entrada e leitura de dados, bem como relacionar parâmetros de maneira automática e limitar valores para os limites estabelecidos. Isso torna a ferramenta de fácil utilização pela equipe de manutenção da usina hidroelétrica.

INÁCIO, H.P. **Development of a Graphical User Interface of a Computational Tool for Generating Units Simulation.** 2019. 59p. Graduation Project, Federal University of Uberlandia, Uberlândia-MG, Brazil.

ABSTRACT

This work aims to develop a graphical user interface for data entry and visualization of results of a robust modeling for fault diagnosis in generating units. The Defect diagnosis systems in these units are important for maintaining reliability and safety in hydrogeneration, they can also allow to reduce maintenance costs in hydroelectric plants. Looking to improve the agility in the use of auxiliary tools in generating units, the graphical interface allows to simplify the input and reading of data, as well as to relate parameters automatically and limit values to the established limits. This makes the tool easy for the hydroelectric plant maintenance team to use.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Principais componentes da UG.....	14
Figura 1.2 - Modelo de elementos finitos da UG considerada (+Z = montante).	16
Figura 3.1- Tela Inicial.....	21
Figura 3.2 - Tela inicial do módulo de simulação	22
Figura 3.3 - Painel <i>Mancal Combinado – Guia</i>	23
Figura 3.4 - Painel <i>Mancal Combinado – Axial</i>	24
Figura 3.5 - Painel <i>Mancal Intermediário</i>	24
Figura 3.6 - Painel <i>Mancal Casquilho</i>	25
Figura 3.7 - Painel <i>Velocidade de Rotação</i>	25
Figura 3.8 - Painel <i>Parâmetros de Geração</i>	26
Figura 3.9 - Painel <i>Desbalanceamento Mecânico</i>	26
Figura 3.10 - Painel <i>Excitação Hidráulica</i>	27
Figura 3.11 - Painel <i>Tirantes do mancal casquilho</i>	28
Figura 3.12 - Painel <i>Roçamento</i>	28
Figura 3.13 - Painel <i>Desalinhamento</i>	29
Figura 3.14 - Painel <i>Air gap do gerador</i>	29
Figura 3.15 - Painel <i>Descrição</i>	30
Figura 3.16 – Mensagem de erro nos dados digitados	31
Figura 3.17 - Confirmação da simulação.....	32
Figura 3.18 - <i>Prompt</i> da simulação em andamento.....	33
Figura 3.19 - Simulação finalizada	34
Figura 3.20 - Carregando simulações salvas	35
Figura 3.21 - Tela inicial do módulo de calibração	36
Figura 3.22 – Carregamento do MDM no módulo de calibração	37
Figura 3.23 – Painéis retráteis do módulo de calibração.....	38
Figura 3.24 - Confirmação da calibração	39
Figura 3.25 - Prompt da calibração em andamento	40
Figura 3.26 - Gráficos gerados ao final da calibração	41
Figura 3.27 – Resultados da calibração exibidas na interface	41

Figura 3.28 - Carregando um modelo calibrado	42
Figura 3.29 – Carregando dados para executar um teste	43
Figura 3.30 - <i>Prompt</i> do teste do modelo em andamento	44
Figura 3.31 - Tela inicial do módulo de diagnóstico	45
Figura 3.32 – Carregamento de modelo calibrado para execução de diagnóstico....	46
Figura 3.33 – Módulo de diagnóstico com valores carregados	47
Figura 3.34 – Quadro para diagnóstico da rigidez dos tirantes	47
Figura 3.35 - Quadro para diagnóstico de roçamento	48
Figura 3.36 – Quadro para diagnóstico de desalinhamento	48
Figura 3.37 – Quadro para diagnóstico de variações do fluxo	48
Figura 3.38 – Quadro para diagnóstico de variações nos desbalanceamentos mecânicos	49
Figura 3.39 – Quadro para diagnóstico de variações na viscosidade do óleo de cada mancal.....	49
Figura 3.40 – Quadro para diagnóstico de variação do air gap.....	49
Figura 3.41 – Quadro para diagnóstico de folga radial e rotação do mancal combinado guia	50
Figura 3.42 – Quadro para diagnóstico de folga radial e rotação do mancal intermediário.....	50
Figura 3.43 – Quadro para diagnóstico de folga radial do mancal casquilho	50
Figura 3.44 - Quadro para diagnóstico da amplitude de excitação	50
Figura 3.45 – Confirmação dos dados do diagnóstico a ser executado	52
Figura 3.46 – Prompt do diagnóstico de defeitos em andamento	53
Figura 3.47 – Carregando diagnóstico salvo	54
Figura 3.48 – Projeto no Netbeans.....	55

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}$	Graus
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius
A	Ampere
kg	Quilograma
MW	Megawatt
N	Newton
$N \cdot s, Ns$	Newton segundo
Ns/m	Newton segundo por metro
$\frac{R}{M}$	Rotações por minuto
s	segundo
μm	Micrometros
V	Volt
X, Y, Z	Coordenadas cartesianas da unidade geradora

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO.....	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	ix
SUMÁRIO.....	xi
CAPÍTULO I	13
1.1 A unidade geradora	14
1.2 Ferramentas Computacionais.....	15
1.3 Descrição do trabalho	17
CAPÍTULO II	19
CAPÍTULO III	21
3.1 Módulo de Simulação	22
3.2 Módulo de Calibração	35
3.3 Módulo de Diagnóstico	44
3.4 Desenvolvimento	54
CAPÍTULO IV	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A produção de energia elétrica é uma das questões centrais na sociedade. Sua demanda aumentou exponencialmente desde a implementação das primeiras lâmpadas elétricas, gerando vários desafios para o aumento de produtividade e redução de custos. Devido as questões ambientais, o setor energético atual, tem o foco no desenvolvimento e aprimoramento de fontes de energias renováveis.

Usinas hidrelétricas são uma das formas tradicionais de produção de energia limpa, e corresponde cerca de 65% da matriz elétrica brasileira. Desta forma, o estudo na área da hidrogeração é de suma importância. Ferramentas aprimoradas que visam detectar possíveis problemas e prever o comportamento das unidades geradoras, auxiliam na redução do custo de geração e aumentam a segurança de operação.

A Universidade Federal de Uberlândia (UFU), em parceria com Companhia Energética Rio das Antas, Foz do Chapecó Energia S.A., Campos Novos Energia S.A., Energética Barra Grande S.A., Paulista Lajeado S.A. (CPFL Energia), Centrais Geradoras Ltda. (CPFL Energia) e CPFL Geração, através do P&D - Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (02476-3108/2016), desenvolveu um projeto de “Modelagem Robusta para o Diagnóstico de Defeitos em Unidades Geradoras”. Este projeto teve como objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para auxiliar no diagnóstico de defeitos que ocorrem em unidades geradoras (UGs). Além disso, duas ferramentas adicionais foram construídas, uma ferramenta de simulação da máquina e outra de calibração, que visa ajustar um modelo matemático a valores obtidos por medições.

1.1 A unidade geradora

A UG é responsável pela transformação da energia mecânica da água em energia elétrica. A Fig. 1.1 mostra os principais componentes da UG utilizada como referência no projeto de pesquisa para o desenvolvimento das ferramentas computacionais mencionadas.

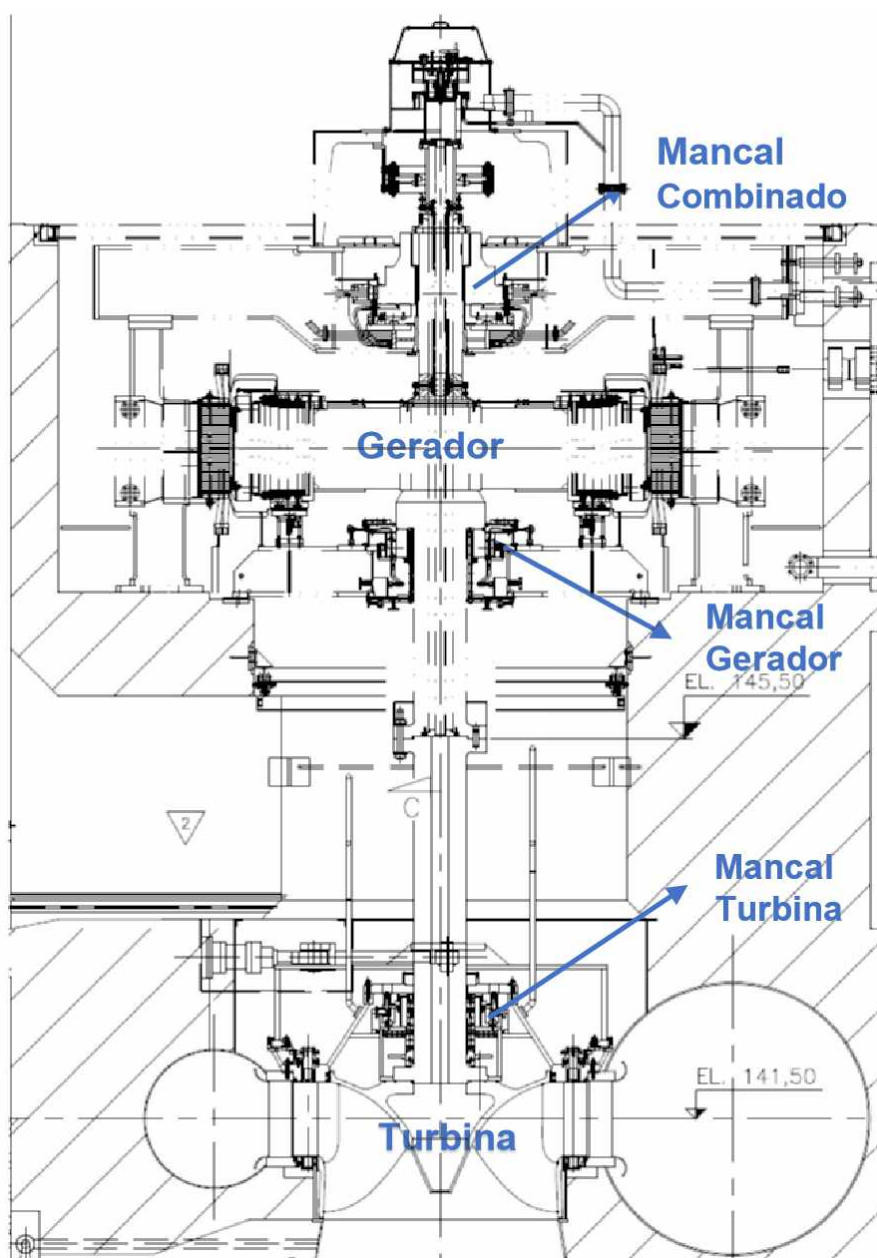


Figura 1.1 - Principais componentes da UG.

Os componentes principais da UG em questão são:

- a. Eixo: é formado por 2 partes principais, sendo elas o eixo do gerador e o eixo da turbina;
- b. Mancal hidrodinâmico combinado de sapatas oscilantes (radial e escora): localizado acima do gerador, este mancal é a combinação de um mancal guia e um mancal de escora. O mancal de escora suporta cargas axiais enquanto o guia suporta esforços radiais;
- c. Mancal hidrodinâmico radial intermediário de sapatas oscilantes: é o mancal do gerador, também chamado de guia do gerador;
- d. Mancal hidrodinâmico radial cilíndrico: é o mancal guia da turbina;
- e. Gerador: responsável pela produção da energia elétrica;
- f. Selo Mecânico: localizado junto ao mancal guia da turbina, visando promover a vedação contra a face superior da cuba rotativa do mancal guia do eixo;
- g. Turbina do tipo Francis, distribuidor e pré-distribuidor: responsável por capturar a energia mecânica da água e transferir para o eixo.

1.2 Ferramentas Computacionais

Os códigos foram construídos baseados em um modelo completo de elementos finitos calibrado a partir de medições experimentais, representando matematicamente a UG, combinado com uma técnica de análise de incertezas. Neste caso, é possível realizar o diagnóstico de defeitos através da solução de um problema inverso típico, sendo que estes são detectados comparando as respostas de vibração determinadas pelo modelo representativo construído (máquina virtual) com aquelas obtidas pelas medições realizadas. Além do diagnóstico, a ferramenta computacional permite ao usuário executar a simulação do modelo matemático inserindo defeitos comumente encontrados no sistema.

Em todos os módulos (simulação, calibração e diagnóstico), uma máquina virtual construída a partir do método dos elementos finitos é utilizada. Neste caso, 24 elementos de vigas de Timoshenko foram usados para representar os eixos da UG

em análise (veja a Fig. 1.2). Massas adicionadas e discos rígidos são usados para representar os componentes da máquina rotativa.

Os mancais foram representados por metamodelos, construídos a partir da solução das equações de Reynolds e da energia associadas com cada um dos mancais.

Os esforços hidráulicos foram obtidos através de simulações de CFD (Computational Fluid Dynamics).

De acordo com BARBOSA (2018), para obter um modelo mais representativo nos mancais, é necessário adotar um modelo chamado termohidrodinâmico (THD). Esta formulação considera a variação da viscosidade do filme de óleo gerada pelo aumento de energia térmica resultante do cisalhamento das camadas do fluido. Porém o custo computacional associado aos modelos THD torna sua aplicação inviável na modelagem de máquinas rotativas (SICCHIERI, 2019). Ainda de acordo com SICCHIERI (2019), a metamodelagem apresenta-se como uma alternativa confiável para reduzir o custo computacional, além de manter as características não lineares do sistema.

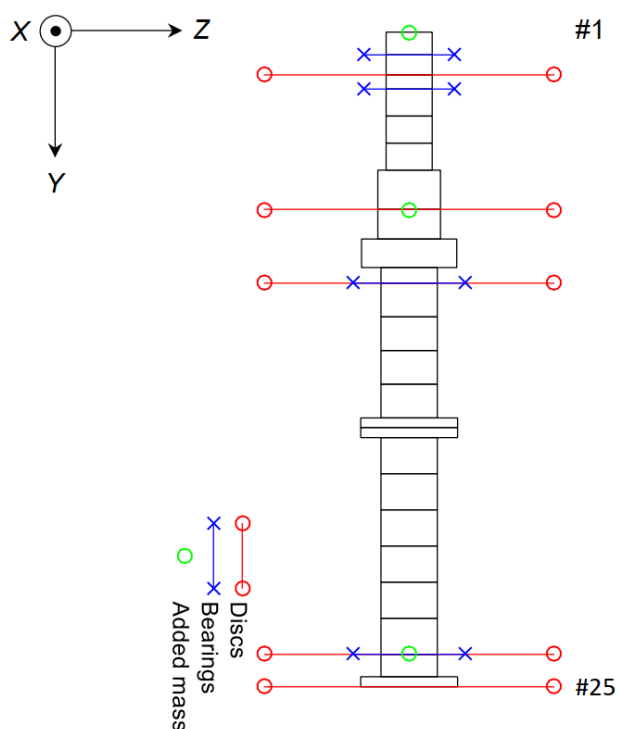


Figura 1.2 - Modelo de elementos finitos da UG considerada (+Z = montante).

Mais detalhes sobre as ferramentas desenvolvidas podem ser encontrados projeto de P&D Modelagem Robusta para o Diagnóstico de Defeitos em Unidades Geradoras (02476-3108/2016), promovido pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) em parceria com a Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Laboratório de Mecânica de Estruturas – LMEst, com o financiamento das empresas CERAN, BAEISA, ENERCAN, Foz do Chapecó e CPFL Energia.

1.3 Descrição do trabalho

Para facilitar o acesso do usuário as ferramentas de simulação, calibração e diagnóstico, foi necessário a criação de uma interface gráfica. O Java foi a linguagem escolhida para produção da interface, juntamente com o JavaFX, que é uma plataforma moderna para criação de aplicação. Com o intuito de auxiliar no desenvolvimento dos códigos, foi utilizado o NetBens como IDE (*Integrated Development Environment*).

Esse trabalho está dividido em quatro capítulos. Após a introdução, é realizada no segundo capítulo uma revisão bibliográfica buscando apresentar algumas características das linguagens de programação, em especial a linguagem Java, além de sua aplicação na construção de interfaces gráficas.

No terceiro capítulo, toda interface desenvolvida é descrita, apresentando suas funções, aplicações e limitações.

No quarto capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido e as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com a popularização dos computadores nas últimas décadas, as linguagens de programação evoluíram, e começaram a surgir linguagens de alto nível, como o FORTRAN, criada em 1954 (WEXELBLAT, 1986).

Mais tarde, foram desenvolvidas linguagens como o C++ (SCHILDT, 1998), que permitem a programação orientada a objetos (POO). Este tipo de programação é baseado na composição e interação entre de unidades chamadas de *objetos*. Na POO, é possível atribuir diversos atributos a cada *objeto*, o que possibilita caracterizar elementos e processos reais de maneira simples.

Na década de 90, teve início o desenvolvimento da linguagem Java por uma equipe de programadores nos laboratórios da *Sun Microsystems* (Indrusiak, 1996).

Java é uma linguagem de programação orientada a *objetos*. Seu código compilado pode ser executado por qualquer sistema operacional que tenha um interpretador instalado. Para executar um código compilado nesta linguagem, é necessário a instalação do *Java Runtime Environment* (JRE), composto pela *Java Virtual Machine* (JVM), além das bibliotecas. Desta forma, o mesmo código é executado nos diferentes sistemas operacionais através de uma JVM específica para cada um.

De acordo com Indrusiak (1996), Java é uma linguagem simples, de fácil aprendizado ou migração, pois possui um reduzido número de construções. Além disso, contém um conjunto de bibliotecas que fornecem grande parte da funcionalidade básica da linguagem, incluindo rotinas de acesso à rede e criação de interface gráfica.

Para o desenvolvimento de aplicações em Java, é utilizado o Java *Development Kit* (JDK), que além do JRE, é composto pela *JavaLang* (linguagem Java), juntamente com diversas ferramentas denominadas *Javatools*. Entre estas ferramentas estão o *JavaC* (Compilador Java), o *Debugger* (permite a verificação da execução do programa em tempo real), e as *APIs* (*Application Programming Interface*).

Com o intuito de facilitar o uso das ferramentas do JDK, é possível fazer uso de um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE - *Integrated Development Environment*). O *NetBeans* é uma IDE de código aberto com integração com diversas APIs, o que agiliza o desenvolvimento de aplicações.

Entre as APIs com um certo grau de integração está o *JavaFX*. A plataforma *JavaFX*, contém recursos modernos que permitem a criação de aplicações bem desenvolvidas para *desktop*, *browser* e dispositivos móveis através de códigos FXML. Os códigos FXML funcionam em forma de cascata, facilitando o posicionamento dos elementos dentro da interface. Além disso, uma ferramenta chamada *JavaFX Scene Builder*, parcialmente integrada com o *NetBeans* permite a criação de telas mais simples arrastando e soltando os elementos nas posições desejadas.

CAPÍTULO III

INTERFACE DESENVOLVIDA

A interface foi desenvolvida para a execução de três ferramentas computacionais dedicadas para a UG considerada. A primeira é uma ferramenta de simulação computacional para obtenção do comportamento dinâmico da máquina de acordo com determinadas condições de operação. A segunda é uma ferramenta que permite determinar os parâmetros desconhecidos do modelo matemático, chamado de máquina virtual, de acordo com dados experimentais medidos na UG. Isso é realizado com o objetivo de obter uma máquina virtual representativa. A última ferramenta utiliza a máquina virtual calibrada (representativa) para executar um diagnóstico que permita detectar possíveis defeitos no sistema.

Ao iniciar a interface, o usuário escolhe qual ferramenta será utilizada na tela mostrada pela Fig. 3.1.



Figura 3.1- Tela Inicial

3.1 Módulo de Simulação

O módulo de simulação é uma ferramenta na qual o usuário pode inserir diferentes condições de operação da UG, incluindo alguns defeitos, com o objetivo de simular o seu comportamento dinâmico.

Para possibilitar a melhor visualização, a interface de simulação foi dividida em 3 painéis, como mostra a Fig. 3.2. O painel da esquerda é destinado a entrada dos parâmetros desejados para a execução da simulação, o qual já se encontra preenchido com valores padrão. No painel central, há um esquema do modelo de elementos finitos da UG, além de quadros para apresentação simplificada dos resultados. No painel da direita, foi inserido abas para melhor organização dos botões responsáveis pela apresentação de dados detalhados da simulação.

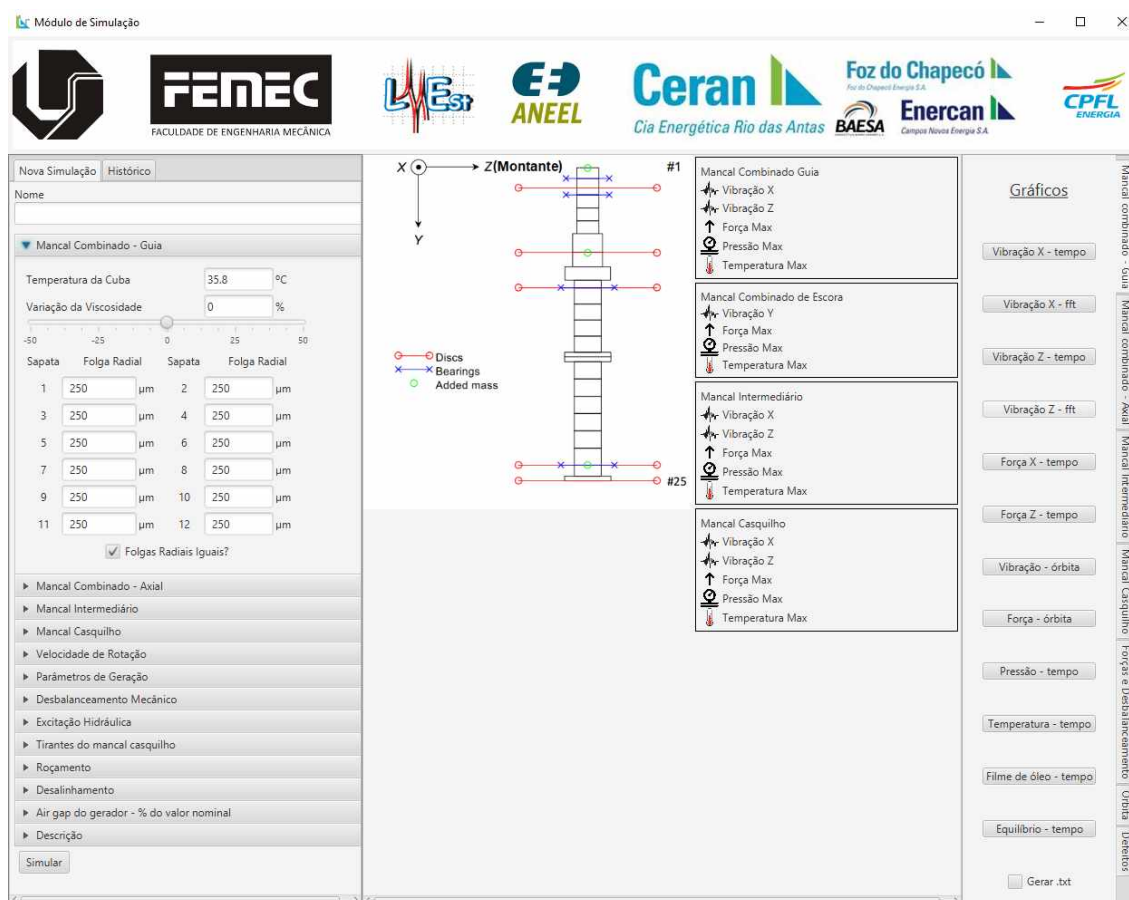


Figura 3.2 - Tela inicial do módulo de simulação

Antes da execução da simulação, o usuário pode dar um nome para simulação, que será salva posteriormente. Além disso, deve-se completar todos os campos de parâmetros no painel esquerdo. Os campos para entrada de dados foram divididos em treze painéis retráteis.

O primeiro painel foi intitulado *Mancal Combinado – Guia* (Fig. 3.3). Neste painel, o usuário deve completar os seguintes campos:

- Temperatura da cuba no mancal combinado;
- Variação da viscosidade;
- Folga radial das doze sapatas.

Existe neste painel, uma opção para replicar o valor digitado para a folga radial na primeira sapata para as outras onze sapatas. Para isso, basta marcar uma caixa de seleção de folgas radiais iguais. Assim, os campos para as sapatas de dois a doze, são desativados.

Sapata	Folga Radial	Sapata	Folga Radial
1	250 μm	2	250 μm
3	250 μm	4	250 μm
5	250 μm	6	250 μm
7	250 μm	8	250 μm
9	250 μm	10	250 μm
11	250 μm	12	250 μm

☐ Folgas Radiais Iguais?

Figura 3.3 - Painel *Mancal Combinado – Guia*

O segundo painel é o *Mancal Combinado – Axial* (Fig. 3.4). Neste painel, há um campo desativado, informando a temperatura da cuba do mancal combinado digitada no painel anterior, além de caixas de seleção para simular sapatas fora de operação.

Figura 3.4 - Painel *Mancal Combinado – Axial*

O terceiro, é o painel do mancal intermediário (Fig. 3.5). Nele o usuário deve informar o valor a ser simulado para temperatura da cuba no mancal intermediário, a porcentagem de variação da viscosidade, e os valores para folga radial nas seis sapatas, havendo a possibilidade de utilizar o valor digitado para a primeira sapata em todas as outras, bastando marcar a caixa de seleção de folgas radiais iguais.

Figura 3.5 - Painel *Mancal Intermediário*

O quarto painel é o *Mancal Casquilho* (Fig. 3.6). Neste painel, é necessário informar a temperatura da cuba no mancal casquilho, a porcentagem da variação da viscosidade e a folga radial.

▼ Mancal Casquilho

Temperatura da Cuba °C

Variação da Viscosidade %

-50 -25 0 25 50

Folga Radial μm

Figura 3.6 - Painel *Mancal Casquilho*

O quinto, é o painel de velocidade de rotação (Fig. 3.7), onde o usuário entra com os dados de velocidade inicial e final em rotações por minuto (rpm) da máquina, além da rampa em segundos. A rampa indica o tempo de simulação, associado com a variação linear da velocidade de rotação entre seus valores inicial e final.

▼ Velocidade de Rotação

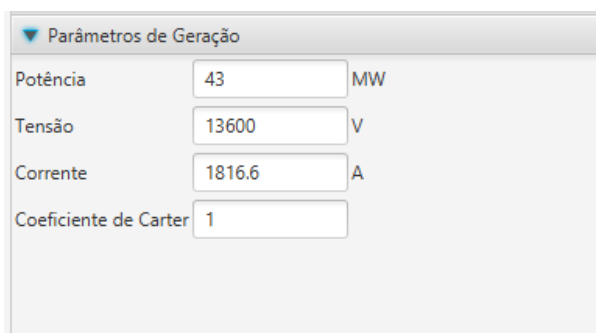
Velocidade Inicial RPM

Velocidade Final RPM

Rampa s

Figura 3.7 - Painel *Velocidade de Rotação*

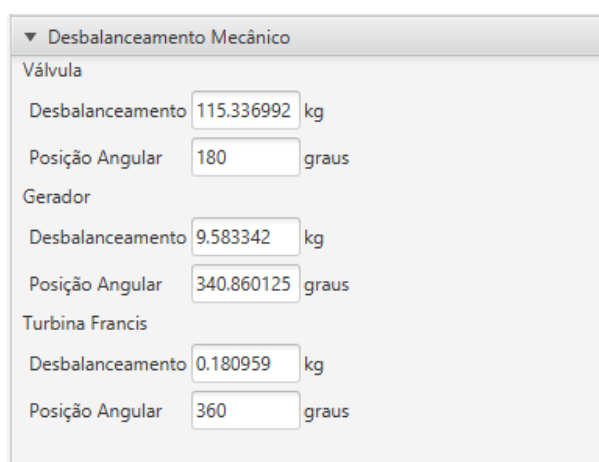
O sexto painel, nomeado de *Parâmetros de Geração* (Fig.3.8), contém os campos para entrada dos valores de potência, tensão, corrente e do coeficiente adimensional de cárter. O coeficiente de Carter é usado para simular um desbalanceamento magnético aplicado no gerador, onde 1 é o valor para o desbalanceamento máximo.



Parâmetros de Geração	
Potência	43 MW
Tensão	13600 V
Corrente	1816.6 A
Coeficiente de Carter	1

Figura 3.8 - Painel *Parâmetros de Geração*

O sétimo é o painel de *Desbalanceamento Mecânico* (Fig. 3.9). Neste painel, é possível inserir desbalanceamento na válvula, no gerador e na turbina Francis. Para adicionar o desbalanceamento nos componentes da UG, basta informar o valor da massa de desbalanceamento e a posição angular no campo referente a cada componente.



Desbalanceamento Mecânico	
Válvula	
Desbalanceamento	115.336992 kg
Posição Angular	180 graus
Gerador	
Desbalanceamento	9.583342 kg
Posição Angular	340.860125 graus
Turbina Francis	
Desbalanceamento	0.180959 kg
Posição Angular	360 graus

Figura 3.9 - Painel *Desbalanceamento Mecânico*

O oitavo painel é denominado *Excitação Hidráulica* (Fig. 3.10). Neste painel, o usuário entra com os valores das forças atuantes na turbina nas direções X, Y e Z (determinados através das simulações de CFD previamente realizadas), e com os valores das amplitudes de vibração medidas nas direções X e Z.

Foi implementada uma função que calcula um valor base para as forças nas direções X e Z de acordo com o valor digitado para potência no gerador, no painel de parâmetros de geração. Este valor é calculado com base em uma aproximação linear de valores obtidos pelas simulações de CFD. O valor base para a força da direção Y foi fixado em 900 kN, e não muda com a potência.

Ainda assim, é possível alterar os valores das forças atuante. Para facilitar, é possível provocar uma variação percentual digitando o valor, ou movendo a barra deslizante conforme Fig. 3.10. Os campos do valor da força em Newtons, e variação percentual, são coligados, com isso, provocando alteração em um deles, o outro é ajustado automaticamente.



Figura 3.10 - Painel *Excitação Hidráulica*

Tirantes do Mancal Casquilho é o nono painel (Fig. 3.11). Nele é possível entrar com valores de rigidez dos tirantes do referido mancal, nas direções X e Z.

Tirantes do mancal casquilho	
Rigidez na direção X	0 N/m
Rigidez na direção Z	0 N/m

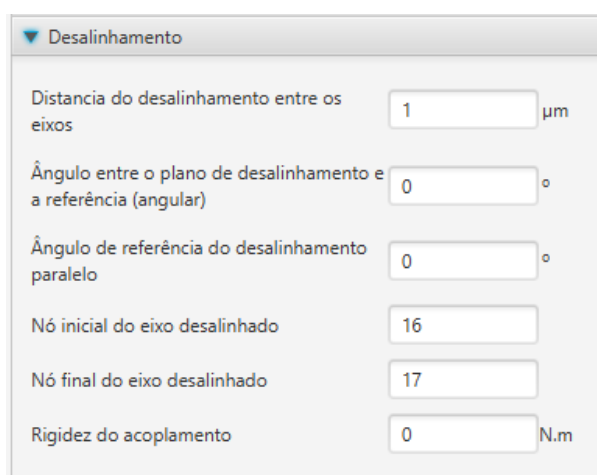
Figura 3.11 - Painel *Tirantes do mancal casquilho*

O décimo é o painel *Roçamento* (Fig. 3.12). Este painel permite ao usuário simular o defeito do roçamento nos mancais da UG. Para isso, o usuário pode inserir os valores de rigidez, amortecimento e coeficiente de atrito na posição em que a parte girante entra em contato com a parte fixa. Além disso, é necessário informar a aproximação com base na porcentagem da distância radial da folga no contato em cada mancal.

Roçamento	
Rigidez na posição do contato	0 N/m
Amortecimento na posição do contato	20 Ns/m
Coeficiente de atrito do contato	0.05
Mancal combinado guia - % da distância radial da folga no contato ($\Delta R_{UB} * C_r / 100$)	99 %
Mancal intermediário - % da distância radial da folga no contato ($\Delta R_{UB} * C_r / 100$)	99 %
Mancal casquilho - % da distância radial da folga no contato ($\Delta R_{UB} * C_r / 100$)	99 %

Figura 3.12 - Painel *Roçamento*

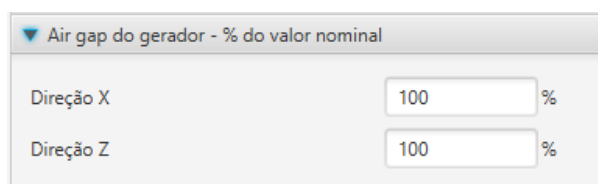
O décimo primeiro painel permite ao usuário inserir dados para o *Desalinhamento* (Fig. 3.13). Os parâmetros para simular o efeito de desalinhamento são a distância do desalinhamento entre os eixos, o ângulo que o plano de desalinhamento faz com a referência, o ângulo de referência do desalinhamento paralelo, os nós inicial e final do eixo desalinhado de acordo com o modelo de elementos finitos e a rigidez do acoplamento.



Desalinhamento	
Distancia do desalinhamento entre os eixos	1 μm
Ângulo entre o plano de desalinhamento e a referência (angular)	0 °
Ângulo de referência do desalinhamento paralelo	0 °
Nó inicial do eixo desalinhado	16
Nó final do eixo desalinhado	17
Rigidez do acoplamento	0 N.m

Figura 3.13 - Painel *Desalinhamento*

O décimo segundo painel referente ao *Air Gap do Gerador* (Fig. 3.14), que permite simular condições diversas deste parâmetro, bastando entrar com um valor relativo ao nominal tanto para a direção X quanto para a direção Z.



Air gap do gerador - % do valor nominal	
Direção X	100 %
Direção Z	100 %

Figura 3.14 - Painel *Air gap do gerador*

O último painel de entrada de dados do módulo de simulação, é destinado a descrição da simulação (Fig. 3.15). Neste painel há apenas uma caixa de texto que permite ao usuário descrever livremente sobre a simulação que será realizada. Após a conclusão da simulação, todos os dados inseridos, assim como os resultados, serão salvos para possibilitar consultas futuras.

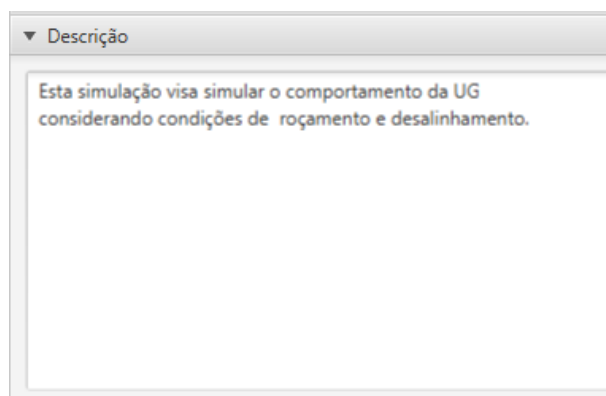


Figura 3.15 - Painel *Descrição*

Para facilitar e referenciar o usuário, foram definidos valores padrão para todos os campos de entrada de dados da simulação, os valores definidos podem ser observados nas Figs 3.2 a 3.14.

Após preencher os campos da coluna esquerda com os valores desejados, o usuário deve clicar no botão *Simular*, abaixo dos painéis de entrada de dados. Caso haja algum dado inconsistente, como um campo em branco, o usuário será notificado por uma caixa de diálogo, informando o erro ocorrido (Fig. 3.16).

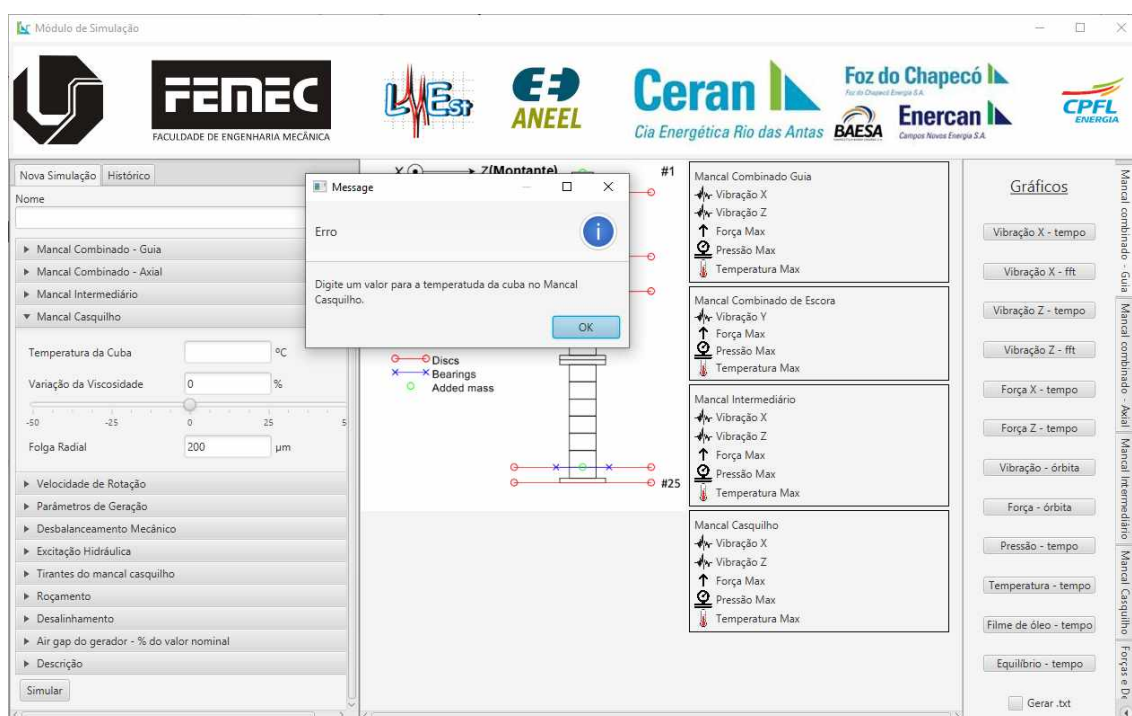


Figura 3.16 – Mensagem de erro nos dados digitados

Visando mitigar erros na simulação, após preencher os campos de maneira consistente, e clicar no botão *Simular*, foi desenvolvido uma janela de confirmação contendo todos os dados inseridos (Fig. 3.17).

Mancal Combinado - Guia		Mancal Casquilho		Tirantes do Mancal Casquilho	
Temperatura da Cuba	35.8 °C	Temperatura da Cuba	32 °C	Rigidez na direção X	0 N/
Varição da Viscosidade	0 %	Varição da Viscosidade	0 %	Rigidez na direção Z	0 N/
Folga Radial Sapata 1	250 µm	Folga Radial	200 µm	<u>Rozamento</u>	
Folga Radial Sapata 2	250 µm	<u>Velocidade de Rotação</u>		Rigidez na posição do contato	0 N/
Folga Radial Sapata 3	250 µm	Velocidade Inicial	300 RPM	Amortecimento na posição do ...	20 Ns/
Folga Radial Sapata 4	250 µm	Velocidade Final	300 RPM	Coefficiente de atrito do contato	0.0
Folga Radial Sapata 5	250 µm	Rampa	1 s	Mancal combinado guia - % da distância radial da folga no ...	99
Folga Radial Sapata 6	250 µm	<u>Parâmetros de Geração</u>		Mancal intermediário - % da distância radial da folga no ...	99
Folga Radial Sapata 7	250 µm	Potência	43 MW	Mancal casquilho - % da distância radial da folga no ...	99
Folga Radial Sapata 8	250 µm	Tensão	13600 V	<u>Desalinhamento</u>	
Folga Radial Sapata 9	250 µm	Corrente	1816.6 A	Distância do desalinhamento e...	1 µ
Folga Radial Sapata 10	250 µm	Coeficiente de Carter	1	Ângulo entre o plano de desali...	0
Folga Radial Sapata 11	250 µm	<u>Desbalanceamento Mecânico</u>		Ângulo de referência do desali...	0
Folga Radial Sapata 12	250 µm	Desbalanceamento na Válvula	115.34 kg	Nó inicial do eixo desalinhado	-
<u>Mancal Combinado - Axial</u>		Posição Angul...	180 °	Nó final do eixo desalinhado	-
Sapatas fora de Operação: Nen...		Desbalanceamento no Gerador	9.58 kg	Rigidez do acoplamento	0 N.
<u>Mancal Intermediário</u>		Posição Angul...	340.86 °	<u>Air gap do gerador - % do valor n...</u>	
Temperatura da Cuba	32.7 °C	Desbalanceamento na Tubina	0.18 kg	Direção X	100
Varição da Viscosidade	0 %	Posição Angul...	360 °	Direção Z	100
Folga Radial Sapata 1	250 µm	<u>Excitação Hidráulica</u>			
Folga Radial Sapata 2	250 µm	Força em X	35400 N		
Folga Radial Sapata 3	250 µm	Força em Y	1608599.03 N		
Folga Radial Sapata 4	250 µm	Força em Z	121000 N		
Folga Radial Sapata 5	250 µm	Vibração em X	12.1 µm		
Folga Radial Sapata 6	250 µm	Vibração em Z	12.9 µm		

OK Cancelar

Figura 3.17 - Confirmação da simulação

A simulação se inicia de fato após a confirmação dos dados inseridos, clicando no botão *OK* da tela de confirmação.

Para informar o usuário do andamento do processo, foi necessário o desenvolvimento de uma janela, no estilo de um *prompt*, que atualiza seu conteúdo de acordo com as saídas da ferramenta de simulação (Fig. 3.18). Ela informa o usuário a cada 100 iterações, e preenche uma barra de progresso para o acompanhamento de maneira mais intuitiva.

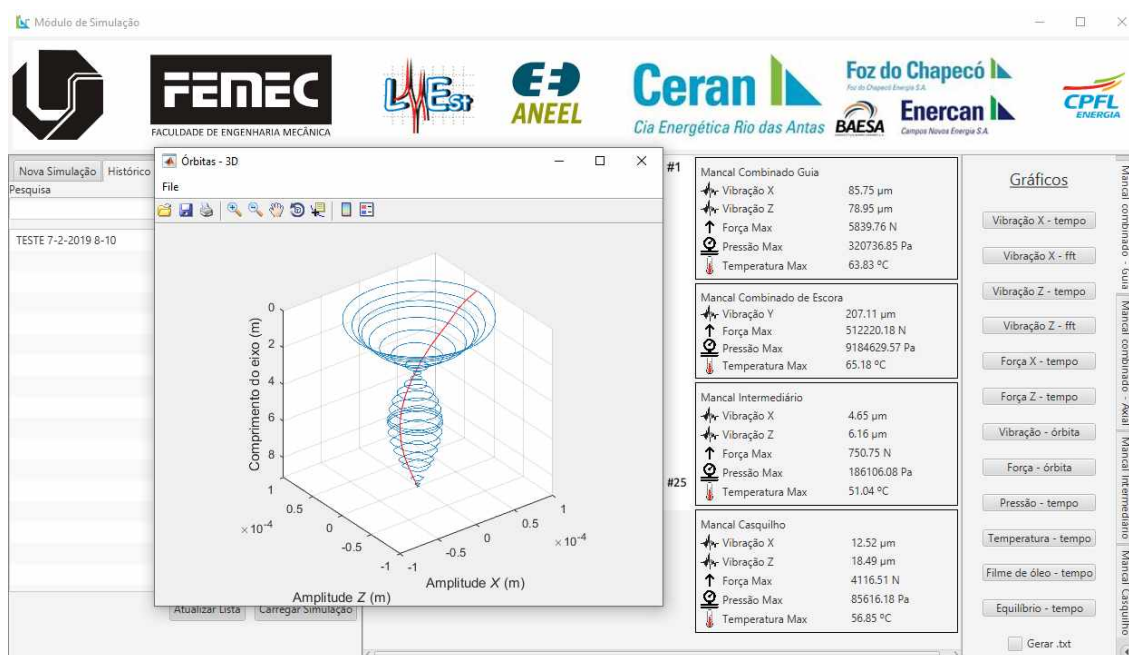


Figura 3.19 - Simulação finalizada

Além dos valores exibidos da tela, a ferramenta de simulação gera um arquivo de dados que permite analisar vários comportamentos teóricos em formato de gráfico. É possível observar o comportamento de vibrações, forças, pressão, temperatura e espessura mínima do filme de óleo em cada um dos mancais. Consegue-se também observar o comportamento da força hidráulica, dos desbalanceamentos mecânico e magnético e dos defeitos de desalinhamento e roçamento.

Para exibição dos gráficos, foi desenvolvida uma ferramenta secundária que gera um gráfico escolhido pelo usuário. Para ativar essa ferramenta, foram dispostos botões, um para cada gráfico possível no painel lateral da direita da interface. Para melhor organização, este painel foi dividido em abas de acordo com as características dos gráficos a serem gerados.

Com a conclusão da simulação, os dados de entrada e os resultados ficam salvos em uma pasta no mesmo diretório da interface. Para acessar estes dados, foi criado uma aba no painel esquerdo, chamada *Histórico*, contendo uma lista com todas as simulações salvas (Fig. 3.20). Ao selecionar uma simulação e clicar no botão *Carregar Simulação*, tanto os campos de entrada, quanto os valores máximos obtidos

naquele processamento, são preenchidos na interface e a geração dos gráficos fica disponível.

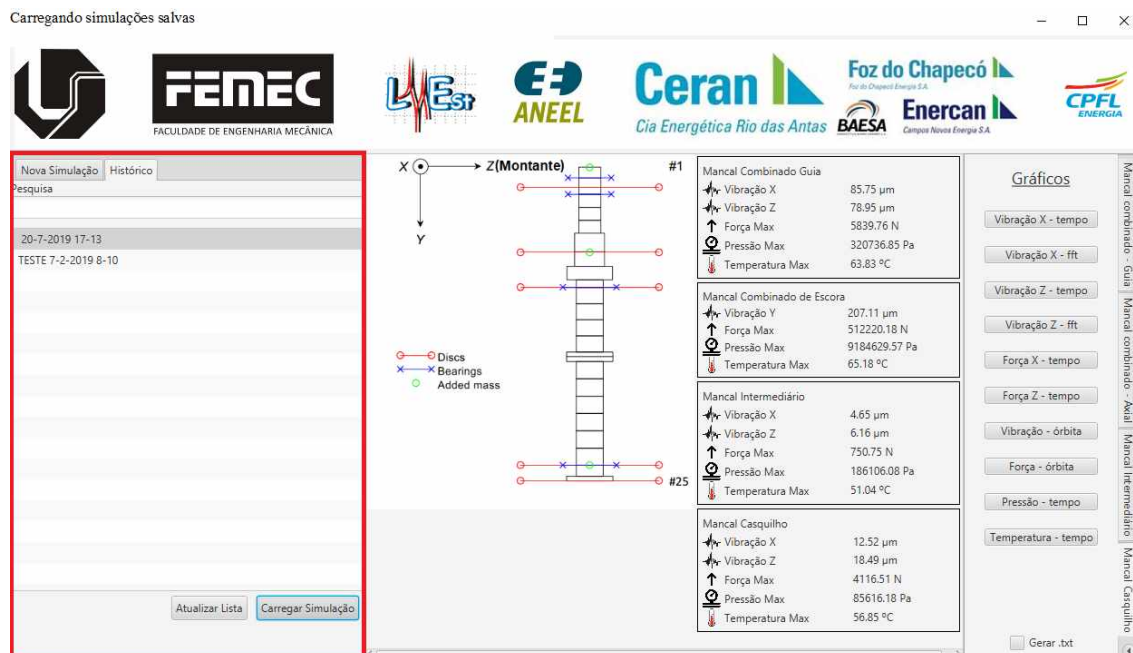


Figura 3.20 - Carregando simulações salvas

3.2 Módulo de Calibração

O módulo de calibração é a ferramenta que permite ao usuário realizar o ajuste da máquina virtual de acordo com os valores medidos na UG. Com isso, sempre que for realizada alguma intervenção na máquina, como um balanceamento, a calibração do modelo matemático pode ser realizada de maneira simplificada. Este módulo é acessado através do botão *Ajuste da Máquina Virtual* na tela inicial do programa (Fig. 3.1).

Figura 3.21 - Tela inicial do módulo de calibração

A ferramenta é capaz de trabalhar diretamente com o sistema de monitoramento utilizado na usina. Deste modo, deve-se carregar um arquivo de extensão .tdms com os dados medidos.

Ao clicar no botão *Abrir MDM*, localizado no painel esquerdo do módulo de calibração, uma ferramenta auxiliar, abre um selecionador de arquivos, de acordo com o padrão do sistema operacional, que permite ao usuário escolher o arquivo contendo as medições. Com isso, é realizada a leitura dos dados e os valores para as temperaturas nas cubas de cada mancal, juntamente com os valores de potência, tensão e corrente nos parâmetros de geração são preenchidos de maneira automática. Ao concluir o carregamento dos dados do sistema de monitoramento da usina, o texto ao lado do botão de carregamento informa esta situação (Fig.3.22). As caixas de texto dos campos carregados foram desativadas para evitar a alteração dos valores.

Figura 3.22 – Carregamento do MDM no módulo de calibração

O usuário deve completar o restante dos dados de calibração nos painéis *Mancal Combinado – Guia*, *Mancal Combinado -Axial*, *Mancal Intermediário*, *Mancal Casquilho*, *Velocidade de Rotação*, *Parâmetros de Geração*, *Excitação Hidráulica* e *Descrição*, de maneira similar ao módulo de simulação.

A Fig. 3.23, mostra todos os painéis retrateis para entrada de dados. Note que, diferente do módulo de simulação não há o painel de desbalanceamento, nem o campo para a força axial (direção Y) no painel de excitação hidráulica, pois estes são os parâmetros que serão calibrados. Não há aqui os painéis para inserção de defeitos, pois foge do intuito da calibração.

The image shows a software interface for a calibration module, divided into four main panels:

- Mancal Combinado - Guia:** Includes a temperature input, a viscosity variation slider (0-50%), and a table for radial clearances (Sapata and Folga Radial) for 11 points, each with a 250 µm value. A checkbox for 'Folgas Radiais Iguais?' is present.
- Mancal Combinado - Axial:** Includes a temperature input and a table for axial clearances (Sapata and Fora de Operação) for 6 points.
- Mancal Intermediário:** Includes a temperature input, a viscosity variation slider, and a table for radial clearances for 6 points. A checkbox for 'Folgas radiais Iguais?' is present.
- Mancal Casquilho:** Includes a temperature input, a viscosity variation slider, and a single radial clearance input (200 µm).

Below these panels are two common sections:

- Velocidade de Rotação:** Fields for initial velocity (300 RPM), final velocity (300 RPM), and ramp time (1 s).
- Parâmetros de Geração:** Fields for power (MW), tension (V), current (A), and a coefficient of Carter (1).
- Excitação Hidráulica:** Sliders for force in X and Z directions (35400.000 N and 120999.99 N respectively) and vibration in X and Z directions (µm).
- Descrição:** A large text area for model identification.

Figura 3.23 – Painéis retráteis do módulo de calibração

A área central do módulo de calibração foi destinada aos campos dos parâmetros que serão ajustados. Com isso, o usuário deve entrar com os limites inferiores e superiores de busca para a massa de desbalanceamento e a posição angular na válvula, na turbina e no gerador, bem como os limites para a força axial (Fig.3.22). Nesta área, também foram adicionados botões de opção que permitem ao usuário escolher o tipo de calibração entre *determinístico* e *robusto*, e se deve ser considerada a *fase das respostas de vibração*.

A ferramenta de calibração permite a realização de cálculos paralelos em mais de um processador lógico do computador. Para isso, o primeiro campo da área central, foi destinado para determinação do *número de processadores* a serem utilizados.

Também é possível dar um nome ao modelo que será calibrado, visando facilitar sua identificação, pois ele será utilizado para execução do diagnóstico de defeitos, e de possíveis testes futuros.

Ao clicar no botão *Executar*, uma verificação dos dados é realizada. Caso exista alguma inconsistência nos dados, como campos em branco, valor de limite inferior maior que o valor digitado para limite superior, ou número de processadores maior que o disponível no computador onde a simulação está sendo realizada, é exibida uma caixa de diálogo informando o problema ao usuário. Se não for detectado

problemas nos dados, é mostrada uma tela com os valores dos parâmetros que serão utilizados no ajuste do modelo (Fig. 3.24).

Tipo de Calibração	Determinístico	Fase de Vibração	Considerar	Parâmetros de Geração	
<u>Mancal Combinado - Guia</u>		<u>Mancal Intermediário</u>		Potência	43 MW
Temperatura da Cuba	35.8 °C	Temperatura da Cuba	32.7 °C	Tensão	13600 V
Variação da Viscosidade	0 %	Variação da Viscosidade	0 %	Corrente	1816.6 A
Folga Radial Sapata 1	250 µm	Folga Radial Sapata 1	250 µm	Coeficiente de Carter	1
Folga Radial Sapata 2	250 µm	Folga Radial Sapata 2	250 µm	<u>Excitação Hidráulica</u>	
Folga Radial Sapata 3	250 µm	Folga Radial Sapata 3	250 µm	Força em X	35400 N
Folga Radial Sapata 4	250 µm	Folga Radial Sapata 4	250 µm	Força em Z	121000 N
Folga Radial Sapata 5	250 µm	Folga Radial Sapata 5	250 µm	Vibração em X	12.11 µm
Folga Radial Sapata 6	250 µm	Folga Radial Sapata 6	250 µm	Vibração em Z	12.91 µm
Folga Radial Sapata 7	250 µm	<u>Mancal Casquilho</u>		<u>Intervalos de Calibração</u>	
Folga Radial Sapata 8	250 µm	Temperatura da Cuba	32 °C	Desbalanceamento Válvula	[106 - 113] kg
Folga Radial Sapata 9	250 µm	Variação da Viscosidade	0 %	Desbalanceamento Gerador	[4 - 14] kg
Folga Radial Sapata 10	250 µm	Folga Radial	200 µm	Desbalanceamento Turbina	[78 - 88] kg
Folga Radial Sapata 11	250 µm	<u>Velocidade de Rotação</u>		Posição Angular Válvula	[0 - 360] °
Folga Radial Sapata 12	250 µm	Velocidade Inicial	300 RPM	Posição Angular Gerador	[0 - 360] °
<u>Mancal Combinado - Axial</u>		Velocidade Final	300 RPM	Posição Angular Turbina	[0 - 360] °
Sapatas fora de Operação: Nenhuma!		Rampa	1 s	Força Axial	[980000 - 1800000]

Figura 3.24 - Confirmação da calibração

Ao confirmar os dados digitados, os mesmos são repassados para a ferramenta de calibração, e o processamento é iniciado.

Para acompanhamento do ajuste de modelos, foi desenvolvida uma janela com as informações da calibração em tempo real (Fig. 3.25). Como este é um processo demorado que requer horas de cálculo, foi implementado nesta janela um botão para que o usuário possa parar a calibração. Este botão, não cancela o ajuste instantaneamente, ele apenas informa a ferramenta de calibração para que ela não realize mais

iterações de aprimoramento dos parâmetros, fazendo com que ela siga para próxima etapa.

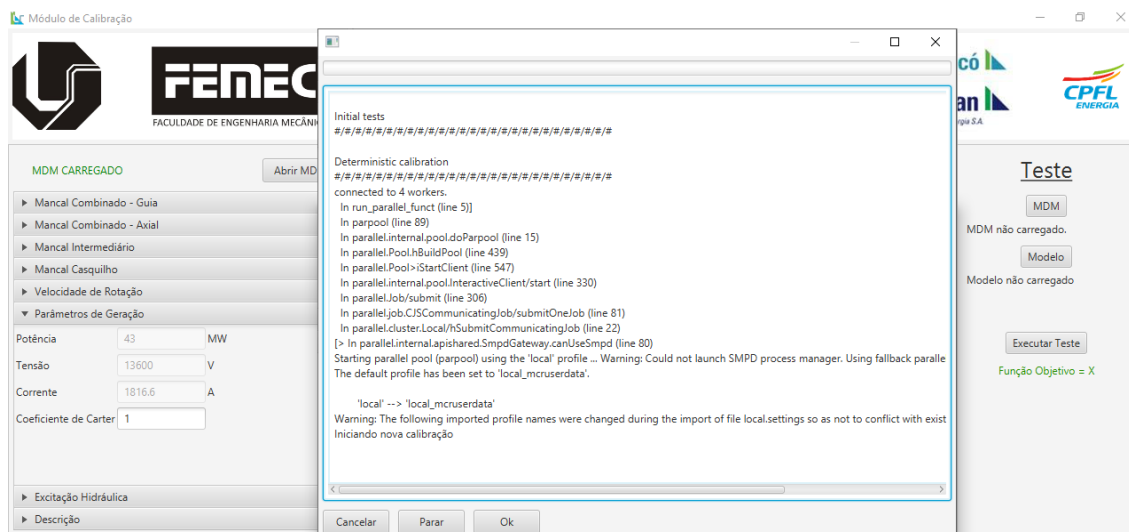


Figura 3.25 - Prompt da calibração em andamento

Nesta tela também foi implementado um botão para cancelar o processo, que é interrompido completamente, sem gerar resultados.

Com o fim do ajuste, um teste é realizado de maneira automática para comparar os valores simulados utilizando o modelo calibrado, com os valores experimentais. Para análise, a ferramenta gera os gráficos comparativos (Fig. 3.26).

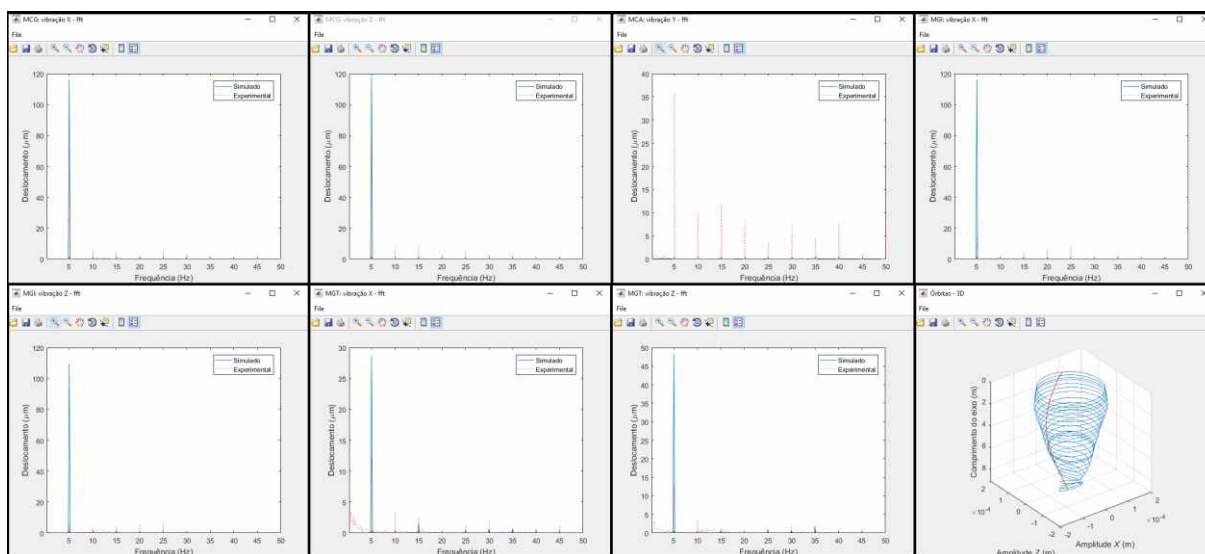


Figura 3.26 - Gráficos gerados ao final da calibração

Os valores obtidos para os dados ajustados, assim como o valor atingido pela função objetivo, são carregados na interface e exibidos na área central (Fig. 3.27).

Módulo de Calibração

MDM CARREGADO Abrir MDM

► Mancal Combinado - Guia
► Mancal Combinado - Axial
► Mancal Intermediário
▼ Mancal Casquilho

Temperatura da Cuba: 32 °C
Variação da Viscosidade: 0 %
Folga Radial: 200 μm

► Velocidade de Rotação
► Parâmetros de Geração
► Excitação Hidráulica
► Descrição

Número de Processadores: 6

Tipo de Calibração: ☒ Determinístico ☐ Robusto Função Objetivo = 38.15

Fase da Vibração: ☒ Considerar ☐ Desconsiderar

	Limite Inferior	Limite Superior	Resultados
Desbalanceamento Válvula	106	113	108.12 kg
Desbalanceamento Gerador	4	14	9.32 kg
Desbalanceamento Turbina	78	88	78 kg
Posição Angular Válvula	0	360	123.58 °
Posição Angular Gerador	0	360	274.27 °
Posição Angular Turbina	0	360	100.52 °
Força Axial	980000	1800000	1254554.44 N

Nome do Modelo: Teste Final Executar

Teste

MDM
MDM não carregado.
Modelo
Modelo não carregado.

Executar Teste
Função Objetivo = X

Figura 3.27 – Resultados da calibração exibidas na interface

Os dados utilizados para realização da calibração, bem como os valores obtidos, são salvos em uma pasta criada no mesmo diretório da interface.

Como a realização de um ajuste, é uma operação demorada, foi desenvolvida uma ferramenta para que o usuário teste um modelo já calibrado, após realizar uma intervenção na UG. Isso pode ser feito no painel direito, denominado *Teste*, na interface de calibração.

Para executar um teste, o usuário deve carregar um novo conjunto de dados medidos pelo sistema de monitoramento da usina, além de um modelo calibrado anteriormente.

O carregamento dos dados medidos, é realizado acessando o botão *MDM* do painel de teste. Deste modo, um localizador de arquivo permite ao usuário escolher a medição desejada.

Ao clicar no botão *Modelo*, é mostrado uma lista com os modelos calibrados anteriormente (Fig. 3.28). Selecionando o modelo desejado e clicando em *Ok*, os valores são carregados na interface e os arquivos de dados ficam disponíveis para execução do teste.

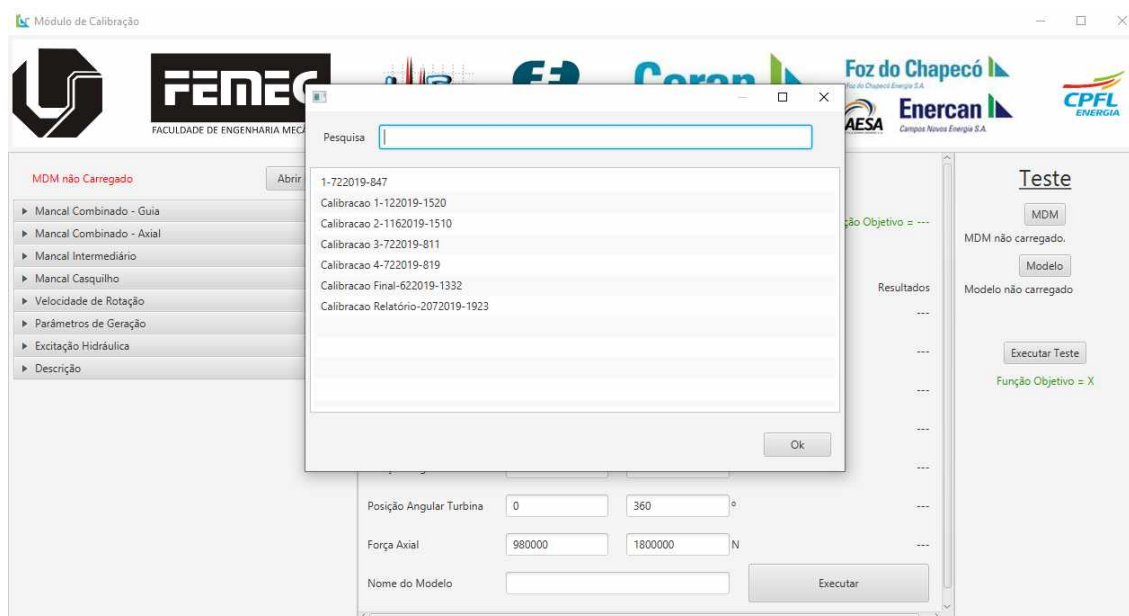


Figura 3.28 - Carregando um modelo calibrado

Os campos de texto do painel de teste indicam se os dados do sistema de monitoramento da usina e o modelo foram carregados (Fig. 3.29).

Módulo de Calibração

MDM CARREGADO

Número de Processadores: 7

Tipo de Calibração: ☒ Determinístico ☐ Robusto Função Objetivo = 38,15

Fase da Vibração: ☒ Considerar ☐ Desconsiderar

	Limite Inferior	Limite Superior	Resultados
Desbalanceamento Válvula	106	113	108.12 kg
Desbalanceamento Gerador	4	14	9.32 kg
Desbalanceamento Turbina	78	88	78 kg
Posição Angular Válvula	0	360	123.58 °
Posição Angular Gerador	0	360	274.27 °
Posição Angular Turbina	0	360	100.52 °
Força Axial	980000	1800000	1254554.44 N

Nome do Modelo: teste relatório

Teste

Modelo Carregado

Função Objetivo = X

Figura 3.29 – Carregando dados para executar um teste

Se ocorreu alguma falha no carregamento do MDM ou do modelo, uma mensagem de erro será exibida ao tentar executar o teste. Caso contrário, ao clicar no botão *Executar Teste*, o mesmo é iniciado e um *prompt* exibe o andamento do processo (Fig. 3.30).

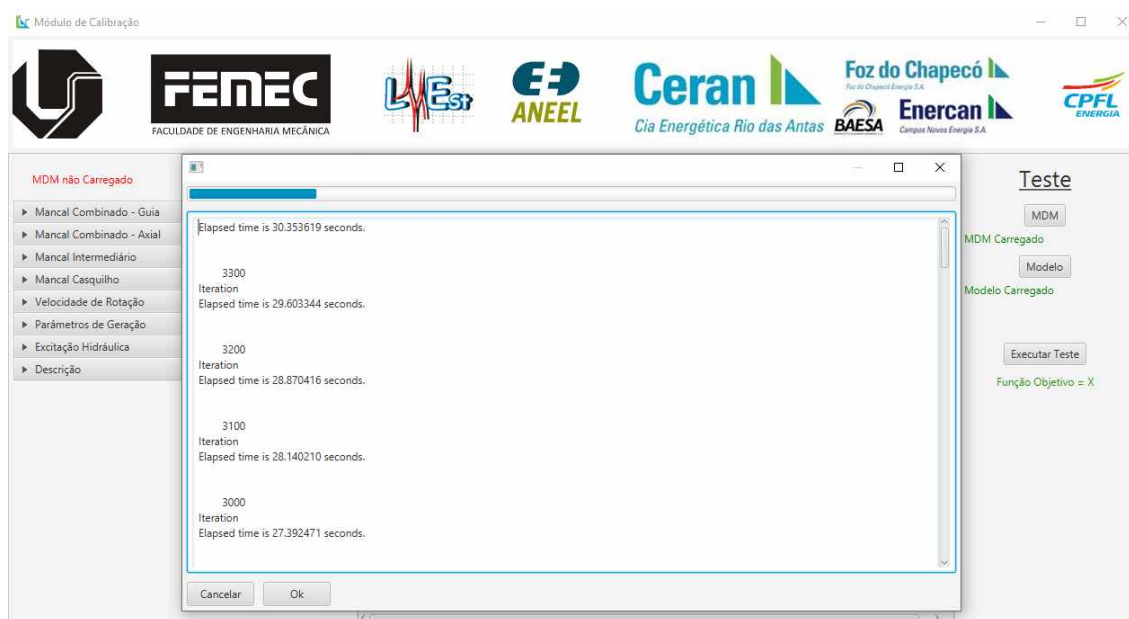


Figura 3.30 - *Prompt* do teste do modelo em andamento

Ao concluir, os gráficos comparativos do modelo com as novas medições são gerados, de maneira similar a Fig. 3.26, e o valor da função objetivo é mostrado no painel direito.

3.3 Módulo de Diagnóstico

O módulo de diagnóstico é a ferramenta que possibilita a detecção de possíveis defeitos na UG. Para isso, são utilizados os dados dos sensores que através do modelo matemático ajustado, permite a identificação dos fatores que levaram as respostas obtidas nas medições.

Este módulo é acessado através do botão *Módulo de diagnóstico* na tela inicial do programa (Fig. 3.1).

A tela para diagnóstico foi dividida em três grandes áreas (Fig. 3.31). O lado esquerdo foi destinado a entrada dos dados previamente obtidos, tanto pelas medições na UG, quanto pelo ajuste da máquina virtual. Na parte central, estão os defeitos

a serem verificados, e no painel direito, foi inserido uma lista com os diagnósticos salvos.

Figura 3.31 - Tela inicial do módulo de diagnóstico

Para realização do diagnóstico de defeitos, é necessário carregar os dados do sistema de monitoramento da usina. Isso é feito da mesma forma que no módulo de calibração. O usuário acessa o botão *Abrir MDM* no painel esquerdo da interface de diagnóstico, o qual possibilitará a seleção do arquivo de dados, através do localizador de arquivos padrão do sistema operacional.

Ao carregar os dados, os valores para temperaturas das cubas nos mancais combinado, intermediário e casquilho, bem como os parâmetros de geração (potência, tensão e corrente) são preenchidos na interface através de uma ferramenta desenvolvida para ler estes dados. O campo de texto ao lado do botão, também é alterado para indicar que os dados foram carregados.

Também é necessário carregar um modelo computacional da máquina ajustada anteriormente no módulo de calibração. Ao ativar o botão *Carregar Modelo*, uma lista com um campo de pesquisa, permite ao usuário escolher um modelo salvo (Fig. 3.32).

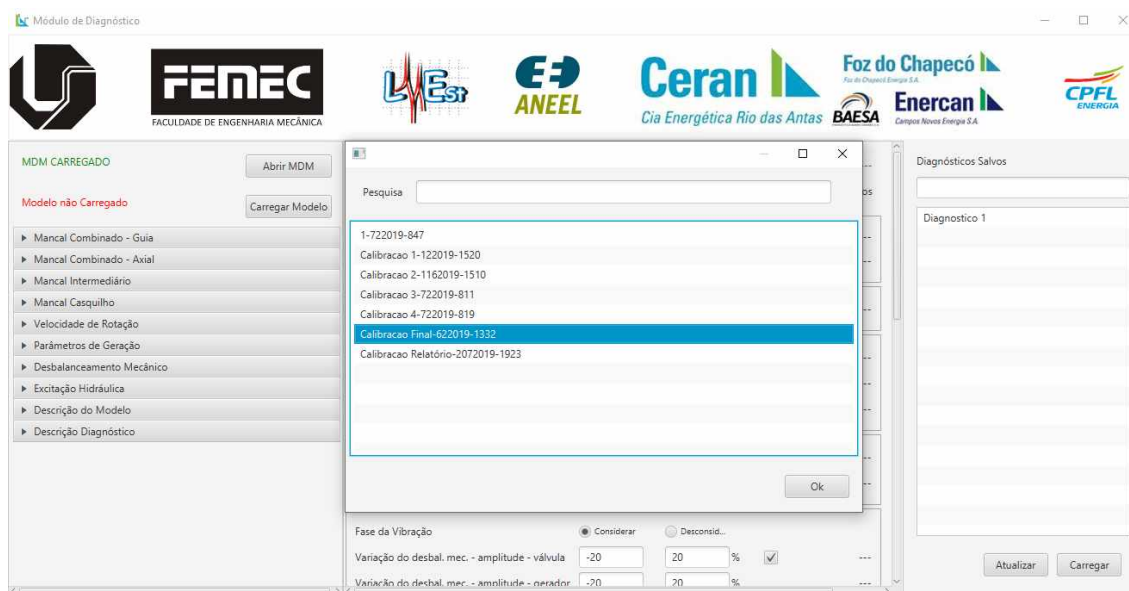


Figura 3.32 – Carregamento de modelo calibrado para execução de diagnóstico

Carregando o modelo, os campos nos painéis no lado esquerdo são preenchidos com os valores informados na calibração.

Os valores obtidos como resultado da calibração do modelo selecionado também são inseridos no painel esquerdo, sendo eles: desbalanceamento e posição angular na válvula, no gerador e na turbina Francis, no painel de desbalanceamento mecânico, além da força na direção *Y* no painel de excitação hidráulica. O campo de texto ao lado do botão de carregamento do modelo também indica que o mesmo foi carregado.

Todos os campos preenchidos automaticamente ficam desativados para impossibilitar a alteração do usuário (Fig. 3.33). Além disso, foi inserido um painel para descrição, que permite a inserção livre de uma explicação sobre o diagnóstico a ser executado.

Figura 3.33 – Módulo de diagnóstico com valores carregados

No painel central, o usuário deve informar quais serão os possíveis defeitos a serem diagnosticados. Essa escolha é feita baseada em características apresentadas pela máquina que possibilitam estimar o que está causando a resposta.

Os possíveis defeitos analisados foram separados em quadros. Para ativar a busca por parâmetros de algum destes possíveis defeitos, o usuário deve marcar a caixa de seleção, localizada em frente aos valores de limites da primeira variável de cada quadro. Ao ativar esta caixa, ativa-se também os campos para edição de limites inferiores e superiores. Foram definidos 11 quadros que possuem valores padrões para facilitar o uso da ferramenta, de acordo com as Figs 3.34 a 3.44.

O primeiro quadro (Fig. 3.34), permite a análise dos parâmetros de rigidez dos tirantes, que deve ser ativado caso haja a suspeita de que este problema levou as respostas medidas.

Rigidez dos tirantes - direção X	100000	200000000	N/m	☒	---
Rigidez dos tirantes - direção Z	100000	200000000	N/m	☐	---

Figura 3.34 – Quadro para diagnóstico da rigidez dos tirantes

Caso tenha a possibilidade de estar ocorrendo roçamento na UG, o segundo quadro (Fig. 3.35) deve ser ativado.

Rigidez do contato	0	1000000000	N/m	☒	---
--------------------	--------------------------------	---	-----	-------------------------------------	-----

Figura 3.35 - Quadro para diagnóstico de roçamento

O terceiro quadro (Fig. 3.36) permite a detecção de defeitos de desalinhamento.

Distância do desalinhamento	0	2	μm	☒	---
Angulo do desalinhamento angular	0	180	°		---
Angulo do desalinhamento paralelo	0	180	°		---

Figura 3.36 – Quadro para diagnóstico de desalinhamento

Problemas devido a variação do fluxo, são diagnosticados ativando o quarto quadro (Fig. 3.37).

Variação do fluxo - direção X	-100	0	%	☒	---
Variação do fluxo - direção Z	-100	0	%		---

Figura 3.37 – Quadro para diagnóstico de variações do fluxo

No quinto quadro (Fig. 3.38), podem ser diagnosticados os defeitos gerados devido a variação no desbalanceamento.

Fase da Vibração	☒ Considerar	☐ Desconsid...			
Variação do desbal. mec. - amplitude - válvula	-20	20	%	☒	---
Variação do desbal. mec. - amplitude - gerador	-20	20	%		---
Variação do desbal. mec. - amplitude - turbina	-20	20	%		---
Variação do desbal. mec. - posição angular - ...	-20	20	%		---
Variação do desbal. mec. - posição angular - ...	-20	20	%		---
Variação do desbal. mec. - posição angular - ...	-20	20	%		---

Figura 3.38 – Quadro para diagnóstico de variações nos desbalanceamentos mecânicos

O sexto quadro (Fig.3.39), permite entrada de parâmetros para determinar a influência de possíveis variações na viscosidade do óleo nos sinais obtidos

Variação da viscosidade do óleo - mancal com...	-50	0	%	☒	---
Variação da viscosidade do óleo - mancal inte...	-50	0	%		---
Variação da viscosidade do óleo - mancal casq...	-50	0	%		---

Figura 3.39 – Quadro para diagnóstico de variações na viscosidade do óleo de cada mancal

No sétimo quadro (Fig. 3.40), é possível inferir a variação do air gap e coeficiente de cárter.

Variação do air gap - direção X	50	100	%	☒	---
Variação do air gap - direção Z	50	100	%		---
Coefficiente de cárter	1	5			---

Figura 3.40 – Quadro para diagnóstico de variação do air gap

O oitavo quadro (Fig. 3.41) permite verificar as folgas radiais e a rotação no mancal combinado.

Folga radial do mancal comb. guia - direção #1	-50	50	μm	☒	---
Folga radial do mancal comb. guia - direção #2	-50	50	μm		---
Rotação do mancal comb guia	0	90	°		---

Figura 3.41 – Quadro para diagnóstico de folga radial e rotação do mancal combinado guia

No nono quadro (Fig. 3.42), o usuário pode inferir folgas radiais e rotação do mancal Intermediário como responsáveis pelos sinais observados.

Folga radial do mancal intermediário - direção #1	-50	50	μm	☒	---
Folga radial do mancal intermediário - direção #2	-50	50	μm		---
Rotação do mancal intermediário	0	90	°		---

Figura 3.42 – Quadro para diagnóstico de folga radial e rotação do mancal intermediário

O décimo quadro (Fig. 3.43), permite a verificação da folga radial do mancal casquilho.

Folga radial do mancal casquilho	-50	50	μm	☒	---
----------------------------------	----------------------------------	---------------------------------	----	-------------------------------------	-----

Figura 3.43 – Quadro para diagnóstico de folga radial do mancal casquilho

O último quadro (Fig. 3.44), destina-se a amplitude de excitação da frequência natural, diferente dos outros parâmetros, aqui, o usuário deve entrar somente com o valor para o limite superior.

Frequência natural - amplitude de excitação	5000	☒
---	-----------------------------------	-------------------------------------

Figura 3.44 - Quadro para diagnóstico da amplitude de excitação

Existe a possibilidade de executar a ferramenta considerando a existência de todos os defeitos listados, porém, cada valor a mais a ser ajustado, aumenta o custo computacional exponencialmente, o que pode impossibilitar a convergência dos resultados. Com isso, o usuário deve determinar quais são os possíveis defeitos que causaram os sinais observados. Neste sentido, cada defeito produz um comportamento na UG, que deve ser de conhecimento do operador para que ele realize boas inferências. Para auxílio e treinamento, a ferramenta de simulação pode ser utilizada para que se observe o comportamento da máquina em diversas condições.

Na área central, além dos defeitos a serem examinados, é necessário informar o número de processadores lógicos que serão utilizados na execução. No final deste painel, existe um campo para nomear o diagnóstico que será salvo posteriormente. Clicando no botão *Executar*, localizado na frente do campo de nomeação, será executado a verificação dos dados inseridos, bem como a confirmação do carregamento do modelo e dos dados medidos pelo sistema de monitoramento da usina.

Caso alguma inconsistência seja identificada, uma caixa de diálogo informa o problema ao usuário. Se tudo estiver corretamente preenchido, uma tela com os valores considerados para execução do diagnóstico será exibida (Fig. 3.45).

Confirma Diagnóstico Número de Processadores: 6

Mancal Combinado - Guia		Mancal Casquilho		Limites	
Temperatura da Cuba	35.8 °C	Temperatura da Cuba	32 °C	Rigidez dos tirantes - direção X	[0 - 0] N/m
Variação da Viscosidade	0 %	Variação da Viscosidade	0 %	Rigidez dos tirantes - direção Z	[0 - 0] N/m
Folga Radial Sapata 1	250 µm	Folga Radial	200 µm	Rigidez do contato	[0 - 0] N/m
Folga Radial Sapata 2	250 µm	<u>Velocidade de Rotação</u>		Distância do desalinhamento	[0 - 0] µm
Folga Radial Sapata 3	250 µm	Velocidade Inicial	300 RPM	Angulo do desalinhamento angular	[0 - 0] °
Folga Radial Sapata 4	250 µm	Velocidade Final	300 RPM	Angulo do desalinhamento paralelo	[0 - 0] °
Folga Radial Sapata 5	250 µm	Rampa	1 s	Variação do fluxo - direção X	[0 - 0] %
Folga Radial Sapata 6	250 µm	<u>Parâmetros de Geração</u>		Variação do fluxo - direção Z	[0 - 0] %
Folga Radial Sapata 7	250 µm	Potência	43 MW	Variação do desbal. mec. - amplitude - válvula	[-20 - 20] %
Folga Radial Sapata 8	250 µm	Tensão	13600 V	Variação do desbal. mec. - amplitude - gerador	[-20 - 20] %
Folga Radial Sapata 9	250 µm	Corrente	1816.6 A	Variação do desbal. mec. - posição angular - turbina	[-20 - 20] %
Folga Radial Sapata 10	250 µm	Coefficiente de Carter	1	Variação do desbal. mec. - posição angular - gerador	[-20 - 20] %
Folga Radial Sapata 11	250 µm	<u>Desbalanceamento Mecânico</u>		Variação do desbal. mec. - posição angular - turbina	[-20 - 20] %
Folga Radial Sapata 12	250 µm	Desbalanceamento na Válvula	115.34 kg	Variação da viscosidade do óleo - mancal combinado	[0 - 0] %
<u>Mancal Combinado - Axial</u>		Posição Angular na Válvula	180 °	Variação da viscosidade do óleo - mancal casquilho	[0 - 0] %
Sapatas fora de Operação: Nenhum!		Desbalanceamento no Gerador	9.58 kg	Variação do air gap - direção X	[0 - 0] %
<u>Mancal Intermediário</u>		Posição Angular no Gerador	340.86 °	Variação do air gap - direção Z	[0 - 0] %
Temperatura da Cuba	32.7 °C	Desbalanceamento na Turbina	0.18 kg	Coefficiente de carter	[0 - 0]
Variação da Viscosidade	0 %	Posição Angular na Francis	360 °	Folga radial do mancal comb. guia - direção #1	[0 - 0] µm
Folga Radial Sapata 1	250 µm	<u>Excitação Hidráulica</u>		Folga radial do mancal comb. guia - direção #2	[0 - 0] µm
Folga Radial Sapata 2	250 µm	Força em X	35400 N	Rotação do mancal comb. guia	[0 - 0] °
Folga Radial Sapata 3	250 µm	Força em Y	1608599.03 N	Folga radial do mancal intermediário - direção #1	[0 - 0] µm
Folga Radial Sapata 4	250 µm	Força em Z	121000 N	Folga radial do mancal intermediário - direção #2	[0 - 0] µm
Folga Radial Sapata 5	250 µm	Vibração em X	12.11 µm	Rotação do mancal intermediário	[0 - 0] °
Folga Radial Sapata 6	250 µm	Vibração em Z	12.91 µm	Folga radial do mancal casquilho	[0 - 0] µm
				Frequência natural - amplitude de excitação	[0 - 0]

OK Cancelar

Figura 3.45 – Confirmação dos dados do diagnóstico a ser executado

Os quadros de defeitos que não foram ativados para busca de parâmetros, aparecem com intervalo de 0 a 0 na tela de confirmação. Ao confirmar os valores a serem utilizados, a interface informa a ferramenta de diagnóstico os parâmetros da máquina virtual calibrada juntamente com os dados medidos pelo sistema de monitoramento da usina, bem como quais defeitos devem ser considerados, e seus respectivos limites de busca. Assim, o diagnóstico é iniciado, e uma tela contendo o andamento do processo é mostrada (Fig. 3.46).

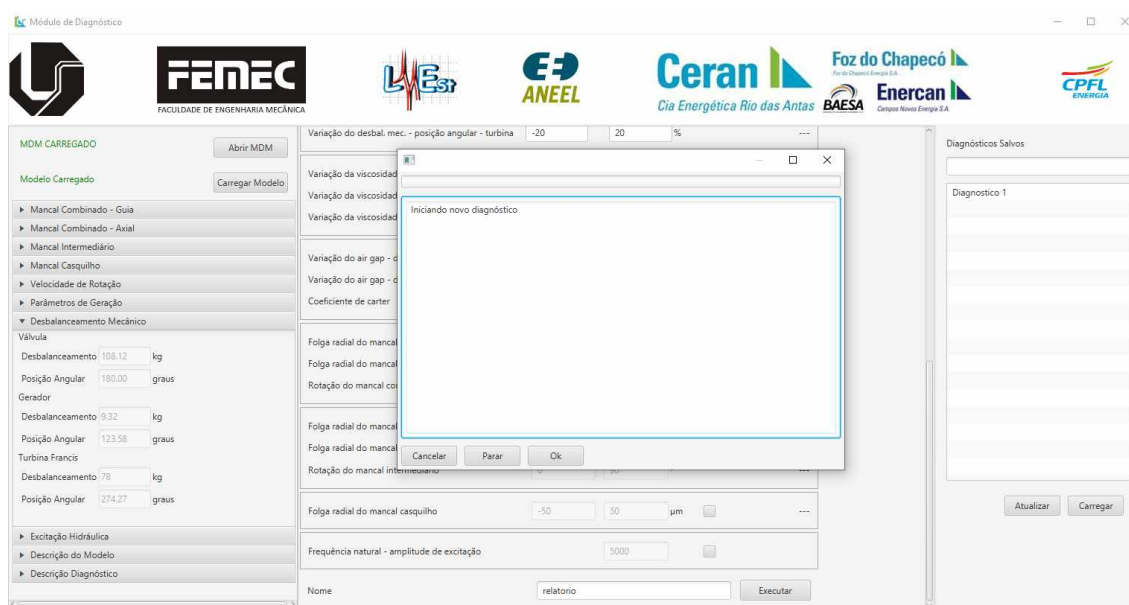


Figura 3.46 – Prompt do diagnóstico de defeitos em andamento

Nesta tela, foi implementado um botão para cancelar o processo, que é interrompido completamente, sem gerar resultados. Também foi desenvolvido um botão para parar as iterações para aprimoramento dos valores dos parâmetros buscados. Assim como no módulo de calibração, este botão informa à ferramenta de diagnóstico para que ao invés de continuar executando as iterações, ela deve prosseguir para a próxima etapa com os melhores valores adquiridos até o momento.

Com o fim de todo o processamento, são exibidos gráficos comparando os resultados obtidos computacionalmente, com os valores medidos pelos sensores. Os valores obtidos são mostrados na coluna de resultados, localizada na área central do módulo de diagnóstico. Os defeitos que não foram considerados, são informados com o valor 0 no resultado. Todos os arquivos contendo os dados utilizados e calculados no diagnóstico são salvos em uma pasta no mesmo diretório da interface.

Por fim, foi desenvolvido uma lista no painel direito contendo todos os diagnósticos salvos. É possível realizar uma busca que filtra a lista de acordo com o nome dado pelo usuário.

Selecionando um diagnóstico e clicando no botão *Carregar*, os resultados são exibidos no painel central e os valores do MDM, bem como os parâmetros do modelo

ajustado, utilizados no diagnóstico, aparecem nos campos do painel esquerdo, junto com a descrição do diagnóstico.

Figura 3.47 – Carregando diagnóstico salvo

3.4 Desenvolvimento

Para a construção dos códigos da interface, as classes criadas foram divididas em 4 pacotes: view, controller, model e func. Além destes, também foi criado o pacote image, contendo as imagens utilizadas.

O pacote view, contém para cada tela do programa, um arquivo FXML que determina os textos, campos, controles, imagens, painéis e seus respectivos posicionamentos em uma tela. Nestes arquivos são nomeados os componentes que podem sofrer alterações na utilização do programa, como os campos de texto, bem como os eventos que irão ocorrer devido a uma interação do usuário, como ativar um botão.

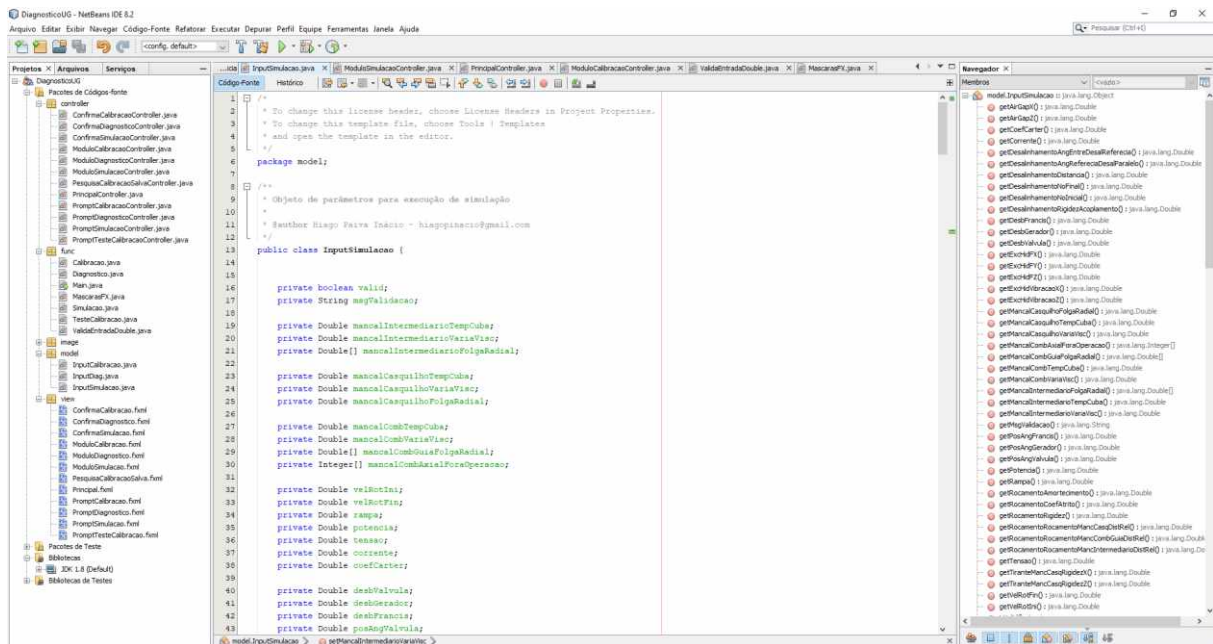


Figura 3.48 – Projeto no Netbeans

No pacote *controller* estão as classes responsáveis por controlar todas as funções da interface. A classe controladora de cada tela é definida no arquivo *.fxml* e utiliza os nomes dos componentes e eventos determinados neste arquivo para poder manipulá-los.

O pacote *model* contém uma classe para os dados da simulação, uma para os dados da calibração e outra para os dados do diagnóstico. Cada classe, contém todos os parâmetros utilizados para execução da respectiva ferramenta. Estas classes permitem definir os valores inseridos pelo usuário em um único objeto, facilitando assim, a transferência dos dados entre as diferentes telas e entre a interface e sua respectiva ferramenta.

O pacote *func* é o mais diverso. Nele existe a classe *main* que determina certos parâmetros e inicia a tela principal. Há também neste pacote o *maskarFX* que possui um método para permitir apenas entrada de números em um campo de texto e outro método para permitir apenas números inteiros. Outra classe é chamada *validaEntradaDouble* que possui um método que verifica se o valor numérico digitado pelo usuário está correto. Caso não tenha sido digitado um número válido, esta classe cria uma mensagem de erro.

As outras classes presentes no pacote *func* são responsáveis por chamar a execução das ferramentas de simulação, calibração, teste de calibração e diagnóstico. Além de iniciar as ferramentas, elas são responsáveis por monitorar a saída das ferramentas, para que as informações possam ser exibidas no respectivo *prompt*.

CAPÍTULO IV

CONCLUSÃO

Dentro da complexidade dos problemas em questão, a interface desenvolvida permite que as tarefas propostas possam ser realizadas de maneira intuitiva por um operador familiarizado com a UG. O preenchimento automático de dados implementado em diversas telas, ao mesmo tempo que evita erros de digitação, traz agilidade na operação das ferramentas. Dentre estes preenchimentos automáticos estão: o carregamento de processos salvos, carregamento de modelos ajustados e carregamento dos dados do sistema de monitoramento da usina.

Outra função importante é a verificação dos dados inseridos pelo operador, isto impede que o programa execute qualquer processo com dados inconsistentes, evitando o travamento no processamento das ferramentas. Junto a isso, a informação do erro contém o local onde ele foi detectado, o que permite uma correção seja feita rapidamente.

A comunicação entre as ferramentas de simulação, calibração e diagnóstico, bem como as ferramentas de análise com a interface gráfica, foi realizada utilizando arquivos compartilhados no diretório do programa. Isso impossibilita a execução simultânea de mais de um processo, pois alterações provocadas por uma das partes poderiam ser lidas por uma execução em andamento, o que comprometeria os valores obtidos ou mostrados na tela. Contudo, a interface desenvolvida possibilita a utilização de todas as ferramentas apresentadas no trabalho, permitindo a alteração de valores sem a necessidade alteração diretamente no código computacional.

Em trabalhos futuros, pretende-se melhorar a comunicação dos dados entre ferramentas de engenharia desenvolvidas e interface gráfica. Outro ponto para desenvolvimento é enriquecer visualmente a interface, com cores, botões, campos e demais

elementos personalizados de acordo com a característica visual das partes envolvidas no projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA, J. S., **Análise de Modelos Termohidrodinâmicos para Mancais de Unidades Geradoras Francis**. 2018. 92 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

FINNEGAN, E., LIGUORI, R., **OCA Java SE 8: Guia de Estudos para o Exame 1Z0-808**. vol. 1, 2018.

Grupo de Usuários Java, GUJ, <http://www.guj.com.br>. Acesso em 28/07/2019.

INDRUSIAK, L. S., **Linguagem Java**. 1996. Grupo JavaRS JUG Rio Grande do Sul - Universidade Federal do Rio Grande do SUL, RS.

SCHILDT, H. (1998). **C++. The Complete Reference** 3. ed. Berkeley: McGraw-Hill. p. 256. 1008 páginas, 1998.

SICCHIERI, L. C., **Metamodelagem Kriging Aplicada em Modelos de Mancais Hidrodinâmicos**. 2019. 115 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

WEXELBLAT, A. (1981). **History of Programming Languages**. New York: Academic Press. p. 6-15. 758 páginas. ISBN 0-12-745040-8.