

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA,  
MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA  
E DE COMPUTAÇÃO

**MÉTRICA DE ROBUSTEZ COM BASE EM  
DESEMPENHO, COMPLEXIDADE E ESTABILIDADE  
DE SISTEMA**

João Ricardo Braga de Paiva

[UFG] & [EMC]  
[Goiânia - Goiás - Brasil]  
12 de dezembro de 2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

## **TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES**

### **E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

#### **1. Identificação do material bibliográfico**

Dissertação       Tese       Outro\*: \_\_\_\_\_

\*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

**Exemplos:** Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

#### **2. Nome completo do autor**

João Ricardo Braga de Paiva

#### **3. Título do trabalho**

“Métrica de robustez com base em desempenho, complexidade e estabilidade de sistema”

#### **4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)**

Concorda com a liberação total do documento  SIM       NÃO<sup>1</sup>

**[1]** Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

- a)** consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);
- b)** novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;

- Publicação da dissertação/tese em livro.

**Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.**



Documento assinado eletronicamente por **Wesley Pacheco Calixto, Usuário Externo**, em 07/12/2022, às 11:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Joao Ricardo Braga De Paiva, Discente**, em 08/12/2022, às 21:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3387109** e o código CRC **D568482B**.

---

**Referência:** Processo nº 23070.049670/2022-10

SEI nº 3387109



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA,  
MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA  
E DE COMPUTAÇÃO

**MÉTRICA DE ROBUSTEZ COM BASE EM  
DESEMPENHO, COMPLEXIDADE E ESTABILIDADE  
DE SISTEMA**

João Ricardo Braga de Paiva

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de  
Computação, da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação  
(EMC), da Universidade Federal de Goiás (UFG), como exigência parcial para a  
obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica e de Computação.

Área de concentração: Engenharia de Computação

Linha de Pesquisa: Sistemas Inteligentes e Computação Aplicada

Orientador: Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto

[UFG] & [EMC]

[Goiânia - Goiás - Brasil]

12 de dezembro de 2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Paiva, João Ricardo Braga de  
Métrica de robustez com base em desempenho, complexidade e estabilidade de sistema [manuscrito] / João Ricardo Braga de Paiva. - 2022.  
135 f.

Orientador: Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto.  
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Goiânia, 2022.  
Bibliografia. Apêndice.  
Inclui siglas, abreviaturas, símbolos, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Robustez. 2. Desempenho. 3. Complexidade. 4. Estabilidade. 5. Métrica. I. Calixto, Wesley Pacheco, orient. II. Título.

CDU 621.3



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

### ATA DE DEFESA DE TESE

Ata Nº 10 da sessão de Defesa de Tese de **João Ricardo Braga de Paiva** que confere o título de Doutor em **Engenharia Elétrica e de Computação**, na área de concentração em **Engenharia de Computação**.

Aos **sete dias do mês de outubro de dois mil e vinte e dois**, a partir das **14h00min.**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Tese intitulada "**Métrica de robustez com base em desempenho, complexidade e estabilidade de sistema**". Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor **Wesley Pacheco Calixto - (EMC/UFG)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor **Márcio Rodrigues da Cunha Reis - (ENGPROD/IFG)**, membro titular externo; Professora Doutora **Viviane Margarida Gomes - (COMP/IFG)**, membro titular externo; Professor Doutor **Luiz Eduardo Bento Ribeiro - (ENGPROD/IFG)**, membro titular externo, Professor Doutor **Alan Henrique Ferreira Silva - (COMP/Avenue Code LLC)** membro titular externo e Professor Doutor **Gelson da Cruz Junior - (EMC/UFG)** membro interno **cuja participação ocorreu através de videoconferência**, link: [meet.google.com/aje-rxms-hzy](https://meet.google.com/aje-rxms-hzy). Durante a argüição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do **trabalho**. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Tese tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor **Wesley Pacheco Calixto**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos sete dias do mês de outubro de dois mil e vinte e dois.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Wesley Pacheco Calixto, Usuário Externo**, em 07/10/2022, às 15:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOAO RICARDO BRAGA DE PAIVA, Discente**, em 07/10/2022, às 15:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **MÁRCIO RODRIGUES DA CUNHA REIS, Usuário Externo**, em 07/10/2022, às 15:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **ALAN HENRIQUE FERREIRA SILVA, Usuário Externo**, em 07/10/2022, às 16:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **VIVIANE MARGARIDA GOMES, Usuário Externo**, em 07/10/2022, às 16:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Gelson Da Cruz Junior, Professor do Magistério Superior**, em 07/10/2022, às 16:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Eduardo Bento Ribeiro, Usuário Externo**, em 07/10/2022, às 18:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3235020** e o código CRC **FE130781**.

---

Referência: Processo nº 23070.049670/2022-10

SEI nº 3235020

*“Toda decisão acertada é proveniente de experiência. E toda experiência é proveniente de uma decisão não acertada.”*

*ALBERT EINSTEIN*



*A todos que puderem se beneficiar com o conhecimento aqui  
contido, dedico este trabalho.*



## AGRADECIMENTOS

Às forças do Universo, que conheço e desconheço, por me conduzirem ao aperfeiçoamento contínuo.

À minha família. Aos meus pais, João Soares de Paiva e Maria Aparecida de Souza Braga Paiva, por serem como as estrelas: mesmo distantes asseguram luz em minha jornada. Às minhas irmãs Rosana Talita Braga e Priscila Braga Paiva, pelo apoio às minhas decisões de vida.

Aos meus amigos: Antonio Humberto de Almeida Soares Junior, Jefferson Carlos Sanches de Faria, Pedro Henrique Franco Moraes, Fabrycio Antunes de Souza Parente Andrade e Pedro Henrique Maione Campos por serem a exata companhia de que precisei, em diversos momentos. Agradeço também às amigas Viviane Margarida Gomes e Alana da Silva Magalhães, pela empatia e acolhimento que me proporcionaram em situações de dificuldade.

Ao meu orientador professor Wesley Pacheco Calixto (EMC/UFG), pela confiança em meu potencial, pelos direcionamentos acadêmicos e pessoais e pela amizade que construímos nestes anos de convivência.

Aos professores Márcio Rodrigues da Cunha Reis (ENGPROD/IFG), Luiz Eduardo Bento Ribeiro (ENGPROD/IFG) e Gélson da Cruz Junior (EMC/UFG) que contribuíram para o aperfeiçoamento deste trabalho com valiosas sugestões.



## RESUMO

Este trabalho propõe métrica que avalia a robustez do sistema com base no desempenho, complexidade e estabilidade. A metodologia considera a dinâmica interna dos sistemas e as interações com o meio externo utilizando a medida de complexidade, avalia ainda, a habilidade do sistema em retornar ao equilíbrio após situação adversa. A aplicação da métrica de robustez proposta possibilita realizar comparações entre diferentes configurações de recursos para o sistema em análise. São utilizados três modelos para estudos de caso: i) modelo do sistema de Unidade de Terapia Intensiva, ii) modelo do sistema de escalonamento de processos e iii) modelo do sistema de tração e frenagem de veículos elétricos. Identifica-se que nos cenários com maior robustez que a registrada para o caso base, a contribuição das componentes na métrica é aproximada, sendo a contribuição do desempenho cerca de 30% e as contribuições da complexidade e estabilidade cerca de 35%. Nos cenários com menor robustez que a registrada para o caso base, existe maior grau de variação da contribuição das componentes na medida de robustez. Os resultados obtidos indicam que a métrica proposta pode ser utilizada como ferramenta para análises quantitativas, que consideram apenas a robustez e análises qualitativas, que consideram desempenho, complexidade e estabilidade em conjunto com a robustez. A aplicação da métrica proposta incrementa o nível de informação sobre o sistema, permitindo decisão melhor fundamentada.



# ROBUSTNESS METRIC BASED ON PERFORMANCE, COMPLEXITY AND STABILITY OF SYSTEM

## ABSTRACT

This work proposes a metric that evaluates the system's robustness based on performance, complexity, and stability. The methodology considers the system's internal dynamics and interactions with the external environment using complexity measure, also evaluates the system's ability in returning to equilibrium after an adverse situation. The proposed robustness metric application makes it possible comparisons between different resource configurations for the system under analysis. The proposed robustness metric application allows comparison between distinct resource configurations for the subject system. Three models are used for case studies: i) intensive care unit system model, ii) process scheduling system model, and iii) electric vehicle traction and braking system model. It is identified that in the scenarios with greater robustness than that recorded for the base case, the component's contribution to the metric is approximate, with performance contribution at around 30% and the complexity and stability contributions at about 35%. In scenarios with less robustness than that recorded for the base case, there is a greater variation degree in components' contribution to the robustness measure. Results indicate that the proposed metric can be used as a tool for quantitative analyses, which only consider robustness, and qualitative analyses, which consider performance, complexity, and stability together with robustness. Applying the proposed metric increases information level about the system, allowing better-reasoned decision.



## SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>31</b>
<b>CAPÍTULO 2 PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO APLICADA</b> . . . . .	<b>37</b>
2.1 Sistema e modelo . . . . .	37
2.2 Processo de otimização . . . . .	38
2.2.1 Métodos de otimização . . . . .	39
2.2.2 Otimização por enxame de partículas . . . . .	43
2.3 Considerações . . . . .	46
<b>CAPÍTULO 3 MÉTRICAS DE OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE</b> . . . . .	<b>47</b>
3.1 Métricas de otimização . . . . .	47
3.2 Natureza do problema com relação aos métodos de otimização . . . . .	48
3.3 Análise de sensibilidade de parâmetro . . . . .	50
3.3.1 Diagrama-aranha e método da área . . . . .	53
3.4 Considerações . . . . .	54
<b>CAPÍTULO 4 MEDIDAS ENVOLVIDAS NAS ANÁLISES DOS SISTEMAS</b> . . . . .	<b>55</b>
4.1 Medida de desempenho do sistema . . . . .	55
4.2 Medida de complexidade do sistema . . . . .	55
4.2.1 Métrica de complexidade natural dos sistemas . . . . .	56
4.3 Medida de estabilidade do sistema . . . . .	58
4.4 Medida de robustez do sistema . . . . .	59
4.5 Considerações . . . . .	60
<b>CAPÍTULO 5 METODOLOGIA</b> . . . . .	<b>61</b>

5.1	Contextualização . . . . .	61
5.2	Índice de complexidade proposto . . . . .	63
5.3	Índice de estabilidade proposto . . . . .	65
5.4	Métrica de robustez proposta . . . . .	67
5.5	Otimização utilizando a métrica de robustez . . . . .	67
5.6	Modelos para aplicação da metodologia . . . . .	68
5.6.1	Modelo do sistema de unidade de terapia intensiva . . . . .	69
5.6.2	Modelo do sistema de escalonamento de processos . . . . .	71
5.6.3	Modelo do sistema de tração e frenagem de veículos elétricos . . . . .	74
5.7	Considerações . . . . .	77
<b>CAPÍTULO 6 RESULTADOS . . . . .</b>		<b>79</b>
6.1	Exposição do fluxo dos resultados . . . . .	79
6.2	Determinação do $c^\beta$ e parametrização do modelo de UTI . . . . .	79
6.2.1	Métrica proposta para o modelo de UTI . . . . .	80
6.2.2	Análise dos cenários para o modelo de UTI . . . . .	82
6.3	Determinação do $c^\beta$ e parametrização do modelo de escalonamento de processos . . . . .	84
6.3.1	Métrica proposta para o modelo de escalonamento de processos . . . . .	86
6.3.2	Análise dos cenários para o modelo de escalonamento de processos . . . . .	88
6.4	Determinação do $c^\beta$ e parametrização do modelo de tração e frenagem de veículos elétricos . . . . .	90
6.4.1	Métrica proposta para o modelo de tração e frenagem de veículos elétricos . . . . .	91
6.4.2	Análise dos cenários de tração e frenagem de veículos elétricos . . . . .	94
6.5	Discussão . . . . .	95
<b>CAPÍTULO 7 CONCLUSÃO . . . . .</b>		<b>99</b>
7.1	Contribuições do Trabalho . . . . .	99
7.2	Trabalhos Futuros . . . . .	100
<b>APÊNDICE A Probabilidades de ocorrência e fatores de relevância de cada tipo de conexão nos modelos estudados . . . . .</b>		<b>103</b>
<b>APÊNDICE B Modelo de UTI: dados do melhor exame obtido após otimização . . . . .</b>		<b>107</b>
<b>APÊNDICE C Modelo de escalonamento de processos: dados do melhor exame obtido após otimização . . . . .</b>		<b>111</b>

APÊNDICE D Modelo de tração e frenagem de veículos elétricos: dados do melhor exame obtido após otimização . .	115
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .	119



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Fluxo de ações do processo de otimização aplicada. . . . .	40
2.2 Fluxograma do método PSO. . . . .	43
3.1 Ilustração da Matriz de Stacey. . . . .	48
3.2 Relação entre complexidade $\times$ incerteza. . . . .	49
3.3 Superposição de Stacey (2011) $\times$ Abramczuk (2000). . . . .	49
3.4 Variação um por vez. . . . .	52
3.5 Diagrama-aranha para sistema com dois parâmetros de entrada. . . . .	53
3.6 Fluxo para a obtenção dos índices de sensibilidade dos parâmetros. . . . .	54
5.1 Fluxo da metodologia proposta. . . . .	61
5.2 Fluxo para obtenção do melhor desempenho. . . . .	62
5.3 Fluxo para obtenção do índice de complexidade proposto. . . . .	64
5.4 Relação entre $\psi(c^a) \times i_\psi(c^a)$ . . . . .	64
5.5 Diagrama-aranha para sistema com três parâmetros de entrada. . . . .	65
5.6 Delimitação do ângulo de inclinação de segmento de reta. . . . .	66
5.7 Fluxo para obtenção do índice de estabilidade proposto. . . . .	67
5.8 Fluxo para obtenção da métrica de robustez proposta. . . . .	68
5.9 Fluxo do processo de otimização com base em métrica de robustez. . . . .	69
5.10 Fluxo dos pacientes no modelo de UTI. . . . .	70
5.11 Relações entre elementos da UTI modeladas por conexões. . . . .	71
5.12 Fluxo do modelo de escalonamento de processos. . . . .	72
5.13 Ilustração hipotética do sistema de escalonamento com nove processos. . . . .	74
5.14 Componentes considerados na modelagem do sistema de tração e frenagem de veículos elétricos. . . . .	75
5.15 Fluxo do modelo de tração e frenagem de veículos elétricos. . . . .	76
6.1 Fluxo dos resultados para cada modelo estudado. . . . .	79
6.2 Valores das componentes da métrica e de robustez $\times$ quantitativo de recursos para o modelo de UTI. . . . .	83
6.3 Valores das componentes da métrica e de robustez $\times$ quantitativo de recursos para o modelo de escalonamento de processos. . . . .	89
6.4 Valores das componentes da métrica e de robustez $\times$ quantitativo de recursos para o modelo de tração e frenagem de veículos elétricos. . . . .	94
6.5 Contribuição [%] de $\mu$ , $i_\psi$ e $\xi$ no valor de $\tau$ para os modelos: (a) UTI, (b) escalonamento de processos e (c) tração e frenagem de veículos elétricos. . . . .	97



## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Trabalhos com tema em otimização associada ao desempenho, complexidade e estabilidade. . . . .	35
3.1 Métricas de otimização para linha de produção automobilística. . . . .	47
4.1 Métricas de estabilidade de sistema. . . . .	59
4.2 Compilação de métricas de robustez de sistema. . . . .	60
6.1 Limites inferiores e superiores utilizados para os valores dos parâmetros na otimização do modelo de UTI. . . . .	81
6.2 Quantitativo de recursos dos cenários com maior $\tau$ que a registrada no $c^\beta$ para o modelo de UTI. . . . .	83
6.3 Limites inferiores e superiores utilizados para os valores dos parâmetros na otimização de desempenho do modelo de escalonamento de processos. . . . .	85
6.4 Limites inferiores e superiores utilizados para os valores dos parâmetros na otimização do modelo de escalonamento de processos. . . . .	87
6.5 Quantitativo de recursos dos cenários com maior $\tau$ que a registrada no $c^\beta$ para o modelo de escalonamento de processos. . . . .	88
6.6 Limites inferiores e superiores utilizados para os valores dos parâmetros na otimização do modelo de tração e frenagem de veículos elétricos. . . . .	92
6.7 Quantitativo de recursos dos cenários com maior $\tau$ que a registrada no $c^\beta$ para o modelo de tração e frenagem de veículos elétricos. . . . .	94
A.1 Modelo de UTI: probabilidades de ocorrência de cada tipo de conexão. . . . .	103
A.2 Modelo de UTI: fatores de relevância de cada tipo de conexão. . . . .	103
A.3 Modelo de escalonamento de processos: probabilidades de ocorrência de cada tipo de conexão. . . . .	104
A.4 Modelo de escalonamento de processos: fatores de relevância de cada tipo de conexão. . . . .	104
A.5 Modelo de tração e frenagem de veículos elétricos: probabilidades de ocorrência de conexão nos estados tração e frenagem . . . . .	104
A.6 Modelo de tração e frenagem de veículos elétricos: fatores de relevância de cada tipo de conexão. . . . .	105
B.1 Modelo de UTI: melhor enxame obtido após o processo de otimização. . . . .	107
B.2 Modelo de UTI: desempenho calculado para as partículas. . . . .	108

B.3	Modelo de UTI: índices de sensibilidade calculados para as partículas [%].	108
B.4	Modelo de UTI: complexidade e índice de complexidade calculados para as partículas. . . . .	109
B.5	Modelo de UTI: índices de estabilidade calculados para as partículas. . .	109
B.6	Modelo de UTI: robustez calculada para as partículas. . . . .	110
C.1	Modelo de escalonamento de processos: melhor enxame obtido após o processo de otimização. . . . .	111
C.2	Modelo de escalonamento de processos: desempenho calculado para as partículas. . . . .	111
C.3	Modelo de escalonamento de processos: índices de sensibilidade calculados para as partículas [%]. . . . .	112
C.4	Modelo de escalonamento de processos: complexidade e índice de complexidade calculados para as partículas. . . . .	112
C.5	Modelo de escalonamento de processos: índices de estabilidade calculados para as partículas. . . . .	113
C.6	Modelo de escalonamento de processos: robustez calculada para as partículas. . . . .	113
D.1	Modelo de tração e frenagem de veículos elétricos: melhor enxame obtido após o processo de otimização. . . . .	115
D.2	Modelo de tração e frenagem de VE: desempenho calculado para as partículas. . . . .	115
D.3	Modelo de tração e frenagem de VE: índices de sensibilidade calculados para as partículas [%]. . . . .	116
D.4	Modelo de tração e frenagem de VE: complexidade e índice de complexidade calculados para as partículas. . . . .	116
D.5	Modelo de tração e frenagem de VE: índices de estabilidade calculados para as partículas. . . . .	117
D.6	Modelo de tração e frenagem de VE: robustez calculada para as partículas.	117

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	–	Ângulo formado entre segmento de reta e eixo horizontal
$\alpha_i$	–	$i$ -ésimo ângulo em $\vec{I}$
$\alpha_{i,1}, \alpha_{i,2}$	–	Ângulos formados entre o primeiro e segundo segmento de reta da curva do parâmetro $x_i$ e o eixo horizontal
$\alpha_{i,m}$	–	Ângulo formado entre o $m$ -ésimo segmento de reta da curva do parâmetro $x_i$ e o eixo horizontal
$\alpha_{max}$	–	Limite para os ângulos contidos em $\vec{I}$
$\alpha_{med}(I)$	–	Média angular de $\vec{I}$
$\vec{\beta}$	–	Cenário base
$\gamma$	–	Relevância de conexão
$\gamma_i$	–	Média dos índices de sensibilidade dos parâmetros diretamente relacionados a cada conexão
$\epsilon$	–	Taxa total de erro
$\theta$	–	Conjunto de restrições de relacionamento entre entidades, recursos e filas
$\lambda$	–	Número de estados das entidades
$\mu$	–	Desempenho
$\mu(c^a)$	–	Desempenho do $c^a$
$\mu(c^{a_i})$	–	Desempenho do $i$ -ésimo cenário
$\mu(E)$	–	Desempenho do modelo de escalonamento de processos
$\mu(U)$	–	Desempenho do modelo de UTI
$\mu(V)$	–	Desempenho do modelo de tração e frenagem de veículos elétricos
$\xi$	–	Índice de estabilidade
$\xi(c^a)$	–	Índice de estabilidade de $c^a$
$\xi(c^{a_i})$	–	Índice de estabilidade do $i$ -ésimo cenário
$\rho$	–	Número de conexões ativas no instante $t$
$\tau$	–	Robustez
$\tau(c^a)$	–	Robustez de $c^a$
$\tau(c^{a_i})$	–	Robustez do $i$ -ésimo cenário
$\psi(c^\beta)$	–	Complexidade de $c^\beta$
$\psi(c^a)$	–	Complexidade de $c^a$

$\psi(c^{a_i})$	– Complexidade do $i$ -ésimo cenário
$\psi(s)$	– Complexidade do sistema
$\psi(c, \gamma)$	– Complexidade natural do sistema com base em conexões ponderadas
$\Omega$	– Espaço de busca de soluções viáveis
$a_1, a_2$	– Coordenadas no eixo das abscissas
$A_{x_i}$	– Área entre a curva do parâmetro $x_i$ e o eixo-base
$a_r$	– Autonomia restante do veículo elétrico
$a_{ref}$	– Valor de referência de $a_r$
$b_1, b_2$	– Coordenadas no eixo das ordenadas
$c$	– Conexão ativa
$c_1, c_2$	– Coeficientes de aceleração (termo cognitivo e termo social)
$c^\beta$	– Cenário base no contexto da métrica de robustez
$c^a$	– Cenário diferente do $c^\beta$
$c^{a*}$	– $c^a$ otimizado
$c^{a_i}$	– $i$ -ésimo cenário
$c_a(\alpha)$	– Cateto adjacente ao ângulo $\alpha$
$c_{max}$	– Consumo máximo de bateria do veículo elétrico
$c_{med}$	– Consumo médio de bateria do veículo elétrico
$c_o(\alpha)$	– Cateto oposto ao ângulo $\alpha$
$C$	– Conexão de controle
$C_1 \cdots C_{17}$	– Conexões no modelo de escalonamento de processos
$d$	– Quantidade de dimensões do problema
$e(\theta)$	– Função restritora de relacionamento
$E$	– Enxame do método PSO
$E_{melhor}$	– Melhor partícula do enxame
$f(\vec{x})$	– Função de avaliação dos valores de $\vec{x}$
$f(x^*)$	– Melhor valor da função de avaliação
$f_{aval}$	– Função de avaliação
$f_k$	– Valores da função de avaliação para cada partícula
$f_k^*$	– Valor otimizado por PSO
$g_i(\vec{x})$	– Restrições de desigualdade
$g_m$	– Melhor posição conhecida dentre todas as partículas

$h_j(\vec{x})$	– Restrições de igualdade
$i$	– Contador
$\vec{I}$	– Vetor com os ângulos $\alpha$ de todas as curvas
$\vec{I}_{x_1}, \vec{I}_{x_2}, \vec{I}_{x_3}$	– Vetores com os valores dos ângulos formados entre os segmentos de reta das curvas dos parâmetros $x_1, x_2$ e $x_3$ e o eixo horizontal
$\vec{I}_{x_i}$	– Vetor com os valores dos ângulos formados entre os segmentos de reta da curva do parâmetro $x_i$ e o eixo horizontal
$\vec{I}_{x_n}$	– Vetor com os valores dos ângulos formados entre os segmentos de reta da curva do parâmetro $x_n$ e o eixo horizontal
$i_\psi$	– Índice de complexidade
$i_\psi(c^\beta)$	– Índice de complexidade do $c^\beta$
$i_\psi(c^{a_i})$	– Índice de complexidade do $i$ -ésimo cenário
$i_\psi(c^a)$	– Índice de complexidade de $c^a$
$i_{melhor}$	– Índice da melhor partícula do enxame
$iter$	– Número da iteração corrente
$iter_{max}$	– Número máximo de iterações
$j$	– Quantidade de elementos do vetor $\vec{I}$
$k$	– Número de partículas
$k_n$	– $n$ -ésima partícula do enxame
$m$	– Número de segmentos de reta da curva
$M_{lim}$	– Matriz de limites superiores e inferiores
$n$	– Número de parâmetros do sistema
$n_a$	– Número de admissões
$n_{a_{ref}}$	– Valor de referência de $n_a$
$n_{CPU}$	– Número de CPU
$n_{CPU_l}$	– Limite inferior para o número de CPU
$n_{CPU_u}$	– Limite superior para o número de CPU
$n_{c_i}$	– Número de conexões ativas por estado
$n_D$	– Número de discos
$n_{D_l}$	– Limite inferior para o número de discos
$n_{D_u}$	– Limite superior para o número de discos
$n_{DE}$	– Número de dispositivos de entrada

$n_{DE_l}$	–	Limite inferior para o número de dispositivos de entrada
$n_{DE_u}$	–	Limite superior para o número de dispositivos de entrada
$n_e$	–	Número de entidades do sistema no instante $t$
$n_{e_i}$	–	Número de entidades por estado
$n_f$	–	Número de filas do sistema
$n_{iter}$	–	Número iterações do método de otimização
$n_L$	–	Número de leitos
$n_{L_l}$	–	Limite inferior para o número de leitos
$n_{L_u}$	–	Limite superior para o número de leitos
$n_l$	–	Número médio de leitos em uso
$n_{l_{ref}}$	–	Valor de referência de $n_l$
$n_{pf}$	–	Número médio de pacientes na fila
$n_{pf_{ref}}$	–	Valor de referência de $n_{pf}$
$n_r$	–	Número de recursos do sistema
$n_{DS}$	–	Número de dispositivos de saída
$n_{DS_l}$	–	Limite inferior para o número de dispositivos de saída
$n_{DS_u}$	–	Limite superior para o número de dispositivos de saída
$n_M$	–	Número de máquinas elétricas
$n_{M_l}$	–	Limite inferior para o número de máquinas elétricas
$n_{M_u}$	–	Limite superior para o número de máquinas elétricas
$p$	–	Número de pontos da curva
$p_f$	–	Número de processos finalizados
$p_g$	–	Número de processos gerados
$p_I$	–	Percentual de insumos
$p_{I_l}$	–	Limite inferior para o percentual de insumos
$p_{I_u}$	–	Limite superior para o percentual de insumos
$p_m$	–	Melhor posição conhecida da partícula
$P(c)$	–	Probabilidade de ocorrência da conexão $c$
$P(c)_i$	–	Probabilidade de ocorrência de conexão
$p_B$	–	Potência elétrica fornecida pela bateria
$p_{B_l}$	–	Limite inferior para a potência elétrica fornecida pela bateria
$p_{B_u}$	–	Limite superior para a potência elétrica fornecida pela bateria

$p_{EQ}$	–	Percentual de equipe médica
$p_{EQ_l}$	–	Limite inferior para o percentual de equipe médica
$p_{EQ_u}$	–	Limite superior para o percentual de equipe médica
$p_M$	–	Potência mecânica fornecida pela máquina elétrica
$p_{M_l}$	–	Limite inferior para a potência mecânica fornecida pela máquina elétrica
$p_{M_u}$	–	Limite superior para a potência mecânica fornecida pela máquina elétrica
$P_1 \cdots P_9$	–	Processos no modelo de escalonamento de processos
$r$	–	Número de restrições de desigualdade
$r_1, r_2$	–	Números aleatórios com distribuição uniforme no intervalo $[0, 1]$
$\mathbb{R}^v$	–	Conjunto dos números reais com $v$ dimensões
$s$	–	Número de restrições de igualdade
$S_B^a$	–	Índice de sensibilidade do parâmetro potência elétrica fornecida pela bateria
$S_C^a$	–	Índice de sensibilidade do parâmetro taxa de chegada de pacientes
$S_{CPU}^a$	–	Índice de sensibilidade do parâmetro número de CPU
$S_D^a$	–	Índice de sensibilidade do parâmetro número de discos
$S_{DE}^a$	–	Índice de sensibilidade do parâmetro número de dispositivos de entrada
$S_{DS}^a$	–	Índice de sensibilidade do parâmetro número de dispositivos de saída
$S_{EA}^a$	–	Índice de sensibilidade do parâmetro taxa de eventos adversos
$S_{EQ}^a$	–	Índice de sensibilidade do parâmetro percentual de equipe médica
$S_I^a$	–	Índice de sensibilidade do parâmetro percentual de insumos
$S_L^a$	–	Índice de sensibilidade do parâmetro número de leitos
$S_M^a$	–	Índice de sensibilidade do parâmetro potência mecânica fornecida pela máquina elétrica
$S_{NM}^a$	–	Índice de sensibilidade do parâmetro número de máquinas elétricas
$S_{RAM}^a$	–	Índice de sensibilidade do parâmetro quantidade de memória RAM
$S_{x_i}^a$	–	Índice de sensibilidade do parâmetro $x_i$
$t$	–	Instante arbitrário de tempo na simulação

$t_C$	– Taxa de chegada dos pacientes
$t_{C_l}$	– Limite inferior para a taxa de chegada dos pacientes
$t_{C_u}$	– Limite superior para a taxa de chegada dos pacientes
$t_{EA}$	– Taxa de eventos adversos
$t_{EA_l}$	– Limite inferior para a taxa de eventos adversos
$t_{EA_u}$	– Limite superior para a taxa de eventos adversos
$t_{RAM}$	– Quantidade total de memória RAM
$t_{RAM_l}$	– Limite inferior para a quantidade total de memória RAM
$t_{RAM_u}$	– Limite superior para a quantidade total de memória RAM
$t_{RAM_{proc}}$	– Espaço médio de memória RAM ocupado por cada processo
$t_s$	– Tempo médio de internação
$t_{s_{ref}}$	– Valor de referência de $t_s$
$T$	– Conexão de torque
$tf_r(i)$	– Tempo médio de espera em fila para utilização do $i$ -ésimo recurso
$u_r(i)$	– Percentual de utilização do $i$ -ésimo recurso do modelo de escalonamento de processos
$v$	– Número de variáveis de decisão
$v_k$	– Velocidade atual da partícula
$v_{k_n}$	– Nova velocidade da partícula
$w$	– Coeficiente de inércia
$w_{max}, w_{min}$	– Valor máximo e mínimo para o coeficiente de inércia
$x_1, x_2, x_3$	– Parâmetros do sistema
$x_1^\beta, x_2^\beta$	– Valores de referência dos parâmetros do sistema
$\vec{x}$	– Vetor de variáveis de decisão
$x_i$	– $i$ -ésimo parâmetro do sistema
$x_i^\beta$	– Valor de referência para o parâmetro $x_i$
$x_k$	– Posição atual da partícula
$x_{k_n}$	– Nova posição da partícula
$x_L$	– Limite inferior para os valores de $\vec{x}$
$x_n$	– $n$ -ésimo parâmetro do sistema
$x_n^\beta$	– Valor de referência para o parâmetro $x_n$
$x_U$	– Limite superior para os valores de $\vec{x}$

- $x_v$  – Valor do último parâmetro em  $\vec{x}$
- $\vec{X}_i$  – Novos valores para  $x_i$
- $\vec{Y}_i$  – Saídas obtidas pela variação de  $x_i$
- $z$  – Número de recursos do modelo de escalonamento de processos



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	–	Corrente Alternada
CC	–	Corrente Contínua
CPU	–	<i>Central Processing Unit</i>
FIFO	–	<i>First In, First Out</i>
HD	–	<i>Hard Disk</i>
PSO	–	<i>Particle Swarm Optimization</i>
RAM	–	<i>Random Access Memory</i>
SED	–	Sistema a Eventos Discretos
UT	–	<i>Uncented Transform</i>
UTI	–	Unidade de Terapia Intensiva
VE	–	Veículo Elétrico



## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

A visão multifacetada sobre sistema é algo incipiente. As análises dos sistemas, em sua maioria, são realizadas considerando exclusivamente seu desempenho. A avaliação do sistema sob o ponto de vista simultâneo da complexidade, estabilidade e robustez, levando em conta o desempenho, pode aprimorar as análises na área de modelagem de sistemas.

Ilgen e Schneider (1991) afirmam que a problemática relacionada à determinação do desempenho do sistema deve ser tratada sob visão multidisciplinar. Segundo os autores, a escolha das características a serem consideradas na avaliação do desempenho deve levar em conta o impacto do sistema no maior número de áreas possíveis, tendo em vista as limitações da análise. Borman e Brush (1993) propõem que o desempenho final do sistema pode ser obtido a partir de técnica de análise multidimensional, considerando o desempenho de partes de interesse do sistema. Desta maneira, o desempenho do sistema deve ser compreendido como composição de desempenhos, inerentes a cada fração do sistema que realiza alguma tarefa específica (CAMPBELL et al., 1993).

Para Campbell (1999), a solução para mensurar o desempenho é a utilização de métricas capazes de fornecer valor que indique quão satisfeito é o requisito estabelecido como referência. Desta maneira, a aptidão do sistema pode ser sintetizada utilizando métricas de desempenho. Cadwell (2002) afirma que o desempenho do sistema varia durante seu funcionamento, até mesmo nos sistemas considerados altamente consolidados. Esta variação do desempenho pode acontecer tanto em regime transitório quanto em regime permanente (NICOLAE et al., 2012). Além do desempenho, é possível medir outras características dinâmicas em sistemas como, por exemplo, a complexidade.

Na antiga Grécia, temas complexos eram discutidos, como amor, justiça, política, morte e outros. Platão, por volta do ano 250 *a.C.*, considerava que cada indivíduo deveria desempenhar função específica para o funcionamento da comunidade, observada como um todo. Aristóteles, entendia que o todo é mais que a soma das partes, pois a interação entre componentes faz surgir um todo complexo diferente da simples junção de elementos individuais (PEREIRA, 2014; BINI, 2012).

Para Simon (1962), as propriedades observáveis no todo não podem ser medidas

facilmente analisando apenas as propriedades das partes que o constituem e suas leis de interação. Para [Bak e Wiesenfeld \(1987\)](#), isto se deve principalmente à característica de auto-organização, presente em sistemas complexos. Esta característica diz respeito à capacidade que estes sistemas possuem de reorganizar seu próprio comportamento e/ou estrutura conforme evoluem.

[Simon \(1991\)](#) afirma que o comportamento de sistemas complexos pode variar de maneira inesperada, pois as interações entre seus elementos podem ocorrer de diferentes maneiras conforme sua evolução no tempo, o que resulta em diferentes níveis de complexidade durante seu funcionamento. [Casti \(1995\)](#) propõe que em sistemas complexos existe a chamada dinâmica de acontecimentos inesperados. Portanto, é razoável considerar que não é possível compreender totalmente a dinâmica de sistemas naturais ou construídos pelo homem em termos das propriedades dos blocos de construção que os compõem ([GELL-MANN; LLOYD, 1996](#); [BAK, 1996](#); [BAR-YAM, 1997](#)).

O nível de consenso na literatura, sobre os requisitos necessários para classificar determinado sistema como complexo, ainda é reduzido. Porém, [Sussman \(2000\)](#) lista vinte diferentes definições/observações sobre complexidade e [Lloyd \(2001\)](#) sugere classificação de complexidade de sistema com base no nível de dificuldade para descrevê-lo ou construí-lo e em seu grau de organização. Estas são algumas tentativas de propor características unificadoras para sistemas complexos. Somado a isto, está o aumento do número de regras e restrições das organizações humanas, o que acarreta aumento na complexidade dos sistemas reais e torna a discussão sobre características de sistemas complexos mais desafiadora ([BAR-YAM, 2002](#); [OTTINO, 2004](#); [MEED, 2005](#)).

[Holland \(2006\)](#) e [Mitchell \(2009\)](#) descrevem que a falta de unanimidade da comunidade científica na definição de características de sistemas complexos não inviabiliza seu estudo, pois existem alternativas para lidar com a emergência presente nestes sistemas. Dentre estas alternativas, está a apresentada por [Stacey \(2011\)](#), que propõe adoção de dois parâmetros para distinguir o nível de complexidade de determinado assunto ou objeto: desacordo, relacionado com a definição do objeto e incerteza, relacionada com seu desenvolvimento, realização, construção e a tecnologia existente para tanto. Neste contexto, sistemas complexos podem apresentar padrões detectáveis, úteis no processo de análise e definição de decisões estratégicas ([CRUTCHFIELD, 2012](#); [HOLLAND, 2014](#); [ASLAKSEN, 2016](#)).

Para [Mobus et al. \(2015\)](#) as organizações interna e externa do sistema contribuem

para determinar seu grau de complexidade, haja vista que as conexões entre os elementos e suas leis de funcionamento refletem a interação que o sistema tem com o ambiente. Assim como ocorre com o desempenho, é possível quantificar a complexidade de sistema através de métricas. Dentre as métricas propostas pode-se mencionar as baseadas em: i) entropia (ROSSO et al., 2012; BATTY et al., 2014), ii) estatística (FELDMAN; CRUTCHFIELD, 1998; ABDALLAH; PLUMBLEY, 2012; ARBONA et al., 2014), iii) dimensão fractal (CORBIT; GARBARY, 1995; YOUNG et al., 2017), iv) conteúdo de informação algorítmica (GELL-MANN; LLOYD, 1996; AY et al., 2010), v) profundidade dinâmica (DEACON; KOUTROUFINIS, 2014) e vi) conexões de sistema (SANTOS et al., 2015; GOMES et al., 2016; PAIVA et al., 2016; KOOREHDAVOUDI; BOGDAN, 2016; PAIVA et al., 2017; GOMES et al., 2019; GOMES, 2020).

Os mecanismos de autorregulação dos sistemas complexos normalmente trabalham à favor da manutenção da estabilidade. Paice e Wirth (1997) discutem estabilidade em termos do equilíbrio do sistema, frente à sua dinâmica de funcionamento. Para os autores, sistemas estáveis possuem mecanismos para lidar com condições inesperadas e preservar o equilíbrio. Da mesma maneira que acontece com desempenho e complexidade, pode-se mensurar estabilidade utilizando técnicas específicas.

Bai e Zhou (2013) utilizam método baseado na variação da frequência em relação à limiares estabelecidos para mensurar a estabilidade, utilizando dispositivos geradores de onda. Okuyama (2016) apresenta metodologia para medir a estabilidade em sistemas a eventos discretos. No estudo, o autor utiliza teoria dos grafos associada à representação matricial, obtendo como resultado métrica de estabilidade considerada inédita. Pesterev (2016) propõe existência dos chamados setores de estabilidade em sistemas de controle, caracterizando faixas de operação nas quais o sistema trabalha de maneira estável. Chestnov e Shatov (2018) e Liu et al. (2019) descrevem que além das diferentes circunstâncias de operação, diferentes cenários de carga podem fazer a estabilidade do sistema variar.

Há na literatura trabalhos que relacionam desempenho, complexidade e estabilidade à temática de otimização. O aumento no número de trabalhos nesta área se deve à crescente investigação de soluções para problemas com solução onerosa, que requerem otimização de aspectos específicos do sistema. Zhong et al. (2004), propõem estrutura denominada árvore direcional generalizada capaz de incorporar ao processo de otimização, em tempo de execução, novos conhecimentos sobre o problema. Esta abordagem visa aperfeiçoar a trajetória de busca, reduzindo a problemática dos mínimos locais. Lee et al. (2014) tratam o problema da perda de pacotes em

transmissões de redes de computadores propondo metodologia de otimização com base em estrutura de camadas. Como resultado do estudo, os autores obtêm técnica que realiza ajuste dinâmico das características de cada camada da rede conforme o desempenho medido durante seu funcionamento.

No área de sistemas de banco de dados, [Feng et al. \(2016\)](#) sugerem otimização com base na análise simultânea de seus múltiplos componentes, como: tabelas, relacionamentos, metadados e outros. No trabalho é apresentada metodologia para determinar a estrutura de armazenamento e o método de busca que associados proporcionam melhor desempenho do sistema. Uma revisão sistemática de cerca de duzentas técnicas de otimização de desempenho de sistemas de potência é apresentada por [Singh et al. \(2018\)](#), que as classificam de acordo com diferentes pontos de vista do sistema. Segundo os autores a categorização realizada pode auxiliar pesquisadores e profissionais na escolha da abordagem mais adequada para a resolução de problemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

Técnicas de otimização são utilizadas em estudos de complexidade de sistema, como em [Xiao et al. \(2008\)](#), que sugerem a modelagem de sistemas por intermédio de redes de transporte público, com ênfase em sua complexidade. [Wan e Luo \(2012\)](#) modelam o sistema através de grafos e realizam mudanças na geometria e no número de elementos, orientando o processo de otimização por intermédio da complexidade medida no modelo. Para [Laddha e Ramalingam \(2016\)](#) e [Hammami \(2018\)](#), a utilização do processo de otimização na resolução de problemas em sistemas complexos, compostos por componentes heterogêneos, deve levar em consideração as características do sistema, que influenciam na forma como o processo de otimização é aplicado.

No contexto da estabilidade do sistema, técnicas de otimização são aplicadas com intuito de encontrar parâmetros de entrada que permitam que o sistema se adapte às condições inesperadas, preservando o equilíbrio durante sua dinâmica de funcionamento ([KRISHNASWAMY et al., 2005](#); [SHYR et al., 2007](#)). [Keshtkar et al. \(2007\)](#) introduzem técnica que associa medida de estabilidade e otimização para especificar o comportamento em sistemas mecânicos. Os trabalhos de [Odintsov et al. \(2015\)](#) na área de sistemas de potência e de [Nassar et al. \(2019\)](#) na área de energia eólica, consideram o conceito de estabilidade no processo de otimização, buscando a obtenção de soluções que aliem estabilidade e atendimento aos requisitos do sistema. Na Tabela 1.1 estão dispostos os trabalhos que abordam a temática de otimização associada aos conceitos de desempenho, complexidade e estabilidade. As referências para cada conceito estão ordenadas cronologicamente, seguidas por sua respectiva

contribuição.

Tabela 1.1 - Trabalhos com tema em otimização associada ao desempenho, complexidade e estabilidade.

Conceito	Referências	Contribuição
Desempenho	Zhong et al. (2004)	Árvore direcional generalizada
	Lee et al. (2014)	Otimização com base em estrutura de camadas
	Feng et al. (2016)	Otimização com base na análise de múltiplos componentes
	Singh et al. (2018)	Revisão de técnicas de otimização de sistemas de potência
Complexidade	Xiao et al. (2008)	Modelagem do sistema com ênfase em complexidade
	Wan e Luo (2012)	Modelagem do sistema através de grafos
	Laddha e Ramalingam (2016)	Otimização com base em características complexas
	Hammami (2018)	
Estabilidade	Krishnaswamy et al. (2005)	Técnicas de otimização orientadas ao equilíbrio do sistema
	Shyr et al. (2007)	
	Keshtkar et al. (2007)	Técnica que associa medida de estabilidade e otimização
	Odintsov et al. (2015) Nassar et al. (2019)	Soluções que aliam estabilidade e atendimento aos requisitos

São vários os trabalhos desenvolvidos utilizando os conceitos de desempenho, complexidade e estabilidade de sistema, no entanto, considerando: i) as múltiplas abordagens para medida de desempenho, ii) o estreito nível de concordância na definição quantitativa de complexidade, iii) a análise da estabilidade com foco no desempenho e a complexidade sob circunstâncias adequadas de funcionamento e iv) o desenvolvimento do processo de otimização levando em conta o desempenho, a complexidade e a estabilidade, verifica-se a lacuna existente nos métodos de análise de sistemas utilizando medida única que agrupe estes conceitos.

Este trabalho objetiva preencher parte desta lacuna, desenvolvendo métrica que auxilie na procura por novas regiões no espaço de busca das variáveis de entrada do sistema, justificando assim esta proposta. Desta forma, pode-se construir a hipótese: **se** é possível medir desempenho, complexidade e estabilidade no modelo validado, **então** é possível desenvolver métrica que combine estes três conceitos, possibilitando obtenção de soluções robustas.

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de técnica para calcular valores otimizados para os parâmetros de soluções robustas. Como objetivos específicos tem-se: i) construir modelos de sistemas reais, ii) verificar os modelos por intermédio de simulação, iii) mensurar desempenho, complexidade e estabilidade através de métricas aplicadas aos modelos e iv) estabelecer medida de robustez utilizando desempenho, complexidade e estabilidade.

O trabalho encontra-se dividido em sete capítulos. O Capítulo 2 aborda aspectos inerentes ao processo de otimização aplicada. No Capítulo 3 são apresentados conceitos referentes a métricas de otimização e análise de sensibilidade. No Capítulo 4 são abordados aspectos referentes a desempenho, complexidade, estabilidade e robustez de sistema. A metodologia para verificação de soluções robustas é apresentada no Capítulo 5. No Capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos para os estudos de caso. O Capítulo 7 apresenta a conclusão do trabalho e algumas recomendações de trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO APLICADA

Neste capítulo são brevemente descritas as características básicas do processo de otimização. São abordadas definições de sistema, modelo e simulação e a relação entre estas definições e o processo de otimização. Discorre-se sobre os conceitos de espaço de busca das variáveis, função de avaliação, restrições e o método de otimização por enxame de partículas.

#### 2.1 Sistema e modelo

**Sistemas** são compostos por unidades denominadas elementos ou componentes, que interagem trocando informações ou materiais através de conexões e como consequência manifestam determinado comportamento. Assim, o resultado alcançado quando elementos do sistema trabalham juntos não pode ser obtido quando os elementos são considerados individualmente (BERTALANFFY, 1968; MAIER, 1996; RECHTIN; MAIER, 2010). A ciência de sistemas afirma que existem princípios que regem todos os tipos de sistemas, na qual a principal premissa é a **sistemidade**, qualidade recursiva que define que o sistema pode, ao mesmo tempo, ser constituído de sistemas menores e ser parte de sistemas maiores, sendo que, cada sistema conserva sua totalidade (KLIR, 2013; MOBUS et al., 2015).

Além da sistemidade, a ciência de sistemas afirma que sistemas possuem hierarquias funcionais e estruturais, podendo ser representados como redes de interações entre componentes. Com relação às propriedades universais, sistemas possuem: i) totalidade, relacionada à coesão interna entre elementos e suas fronteiras, ii) composição, relativa aos elementos e interações que os constituem, iii) organização interna, referente à forma como sua estrutura desempenha funções e iv) organização externa, que diz respeito à sua interação com o ambiente (KLIR, 2013; MOBUS et al., 2015; WILSON, 2015).

Sistemas podem ser representados por **modelos**, que permitem realização de experimentos e observação de seu comportamento. A modelagem é o processo de representação das regras de comportamento do sistema e sua interação com o ambiente (TARANTOLA et al., 2007). Vários estudos e análises podem ser realizados utilizando o modelo do sistema, sem o custo, risco ou inconveniência da manipulação do sistema real (MONTGOMERY, 2004; PAIVA, 2016). Ao modelar sistemas, é necessário determinar o escopo ou abrangência, definindo quais elementos e interações são con-

siderados, sendo desta maneira, o modelo, a representação simplificada do sistema real (CURY, 2001; CHWIF; MEDINA, 2014).

O grau de abstração utilizado deve ser suficiente para modelar o sistema evidenciando todos os detalhes necessários para o estudo, sem que sejam abordadas particularidades irrelevantes (MELLO, 2007; CHWIF; MEDINA, 2014). Considera-se que o modelo é capaz de representar o sistema real quando dado mesmo conjunto de entradas fornece mesmo conjunto de saídas em ambos. O mesmo sistema pode ser representado por diferentes modelos, dependendo da experiência do modelista e da ênfase da investigação a ser realizada. Assim, pela manipulação de parâmetros de entrada, podem ser realizados experimentos utilizando o modelo para reproduzir cenários de interesse, sendo possível observar as saídas na forma de resultados (WAINER, 2009; CHWIF; MEDINA, 2014).

Estes experimentos podem ser realizados, de acordo com Pegden et al. (1995), por intermédio da **simulação**, que visa reproduzir o comportamento e a observação da dinâmica do sistema modelado. A simulação de modelos, construídos para representar sistemas, pode ser realizada computacionalmente ou não computacionalmente. A simulação não computacional, como a realizada em túneis de vento ou de impacto, utiliza sensores e outros aparatos eletrônicos para simular modelos de sistemas reais (PAIVA, 2016). A simulação computacional é método amplamente utilizado na ciência, tendo em vista a crescente disponibilidade de softwares e hardwares específicos para simulação de alto desempenho (COSTA; LIMA, 2005; CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008).

Durante a simulação são reproduzidas ações que ocorrem no sistema real. Estas ações equivalem aos acontecimentos ocorridos durante o funcionamento do sistema e podem ocorrer propositalmente, espontaneamente ou pela verificação de determinada condição (COSTA; LIMA, 2005; CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008). A simulação permite visualização antecipada de comportamentos do sistema que poderiam, de forma geral, serem observados apenas com o sistema em funcionamento, possibilitando ensaios com valores de parâmetros históricos, reais e experimentais (WAINER, 2009). Desta maneira, com intermédio da simulação é possível compreender o funcionamento do sistema e definir estratégias para melhoria de sua operação.

## 2.2 Processo de otimização

A **otimização** é a tarefa de buscar a melhor solução ou conjunto de soluções dentre as soluções possíveis ou factíveis, que são aquelas que satisfazem todas as restrições

do problema de otimização através da escolha sistemática de parâmetros dentro do espaço de busca  $\Omega$  das soluções viáveis. No processo de otimização, a função de avaliação representa a nota atribuída à qualidade de determinada solução e deve sintetizar o conhecimento disponível acerca do problema a ser resolvido. As variáveis de projeto ou variáveis de decisão correspondem aos valores assumidos por  $\vec{x}$  em  $f(\vec{x})$ , pertencendo a determinada faixa de valores limitadas pelo limite inferior  $x_L$  e limite superior  $x_U$ . O problema de otimização é expresso por (REZENDE, 2003; CALIXTO, 2012):

$$\begin{aligned} & \min f(\vec{x}) \\ & \text{sujeito à :} \\ & g_i(\vec{x}) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, r \leq v \\ & h_j(\vec{x}) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, s \leq v \\ & \text{com } \vec{x} \in \mathbb{R}^v \subset \Omega \end{aligned}$$

em que  $\vec{x}$  é o vetor com  $v$  valores de parâmetros do sistema a ser otimizado, dado por  $\vec{x} = [x_1, x_2, \dots, x_v]$ , sendo as  $r$  restrições impostas por  $g_i(\vec{x})$  de desigualdade e as  $s$  restrições impostas por  $h_j(\vec{x})$  de igualdade. O número total de restrições deve ser  $g_i(\vec{x}) + h_j(\vec{x}) \leq v$ . As restrições aproximam os modelos computacionais dos sistemas reais e problemas originalmente restritos podem ter suas restrições transformadas em penalidade na função de avaliação, tornando-se irrestritos.

O **processo de otimização** é o procedimento iterativo que busca o melhor valor da função de avaliação  $f(x^*)$  dentro do espaço de busca  $\Omega$ . Inicialmente, o modelo é submetido ao simulador, sendo obtido valor da função de avaliação para cada possível solução. Este valor é comparado com valor definido para a função de avaliação ótima/otimizada  $f(x^*)$ . Caso o valor da função de avaliação  $f(\vec{x})$  seja superior ao valor de  $f(x^*)$ , isto é:  $f(\vec{x}) > f(x^*)$ , o método de otimização é executado mediante as restrições  $g_i(\vec{x})$  e  $h_j(\vec{x})$ , fornecendo novos parâmetros de entrada para o modelo, que é novamente simulado. Este processo é repetido até que a condição de parada seja atendida. A Figura 2.1, adaptada de Gomes (2017), ilustra o processo de otimização.

### 2.2.1 Métodos de otimização

Os métodos de otimização podem ser classificados em: i) determinísticos, ii) heurísticos, iii) estocásticos e iv) inferenciais. Nos **métodos determinísticos** é possível

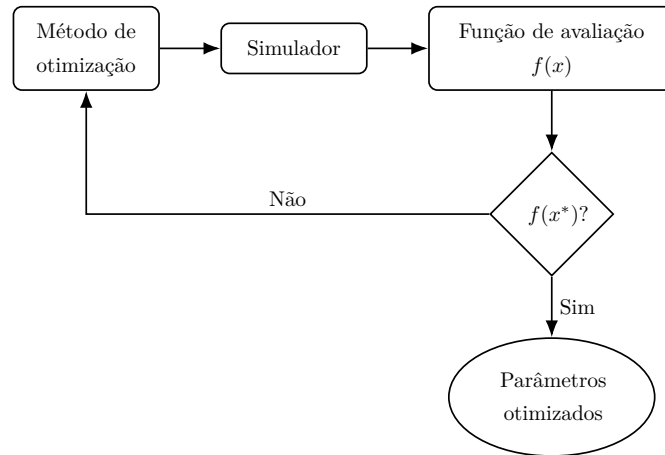


Figura 2.1 - Fluxo de ações do processo de otimização aplicada.

prever a sequência de passos de execução pois, dado o ponto de partida  $\vec{x}$ , o método sempre levará à mesma resposta  $f(\vec{x})$ . A desvantagem destes métodos de otimização é que, na maioria das vezes, os mesmos requerem pelo menos a primeira derivada da função de avaliação em relação às variáveis de decisão. Assim, as funções  $f(\vec{x})$ ,  $g_i(\vec{x})$  e  $h_j(\vec{x})$ , para os métodos determinísticos, devem ser contínuas e diferenciáveis no espaço de busca (LEE; EL-SHARKAWI, 2008; RAO, 2019).

Métodos determinísticos garantem convergência para solução ótima, não necessariamente para a solução ótima global. Algumas dificuldades encontradas na utilização de métodos de otimização determinísticos são: i) a qualidade do resultado depende da escolha do ponto de partida, ii) tendem a ficar presos nos mínimos locais, iii) algoritmo considerado eficiente para solução de determinado problema de otimização pode não ser para a solução de outro, iv) não são eficientes em tratar problemas onde o espaço de busca  $\Omega$  é discreto e v) não se adequam à computação paralela. Como exemplos desta tipo de método de otimização, pode-se citar: Método de Newton, Método de Quase-Newton, Método do Gradiente e vários outros (SARAMAGO et al., 2008; RAO, 2019).

Os **métodos heurísticos** implementam busca direcionada, não necessitando de conhecimento especializado do problema a ser tratado. Com intuito de aproximar a função de avaliação da resposta otimizada, estes métodos realizam sucessivas iterações, até que um dos critérios de parada seja atendido. Classificados como busca cega, os métodos heurísticos utilizam somente a função de avaliação e parâmetros aleatórios no processo de otimização, sem necessitar do uso de derivadas. Como várias escolhas são executadas com base em números sorteados em tempo de execução,

não é possível prever a sequência de buscas que o algoritmo heurístico irá executar. Esta variação diversifica a pesquisa por soluções (COOPER, 1964; GILL et al., 2019).

Os métodos heurísticos são capazes de encontrar soluções otimizadas para problemas que geralmente são não lineares, de difícil representação e descritos por funções nem sempre diferenciáveis. Isto os torna convenientes para tratar sistemas que nem sempre apresentam expressões matemáticas que os descrevam de forma analítica. Dentre os métodos heurísticos, pode-se citar: busca tabu, arrefecimento simulado, algoritmo genético, colônia de formigas, enxame de partículas, entre vários outros (ARROYO et al., 2002; HAFTKA; GÜRDAL, 2012).

Os **métodos estocásticos** realizam busca por soluções otimizadas em modelos que descrevem o sistema através de cenários com variáveis escolhidas de forma aleatória. Contudo, aleatoriedade e estocasticidade, embora intrinsecamente relacionadas, não são sinônimas (PAPOULIS; PILLAI, 2002). O processo estocástico busca indexar a aleatoriedade contida no sistema em função do tempo. Desta maneira, métodos estocásticos utilizam funções de probabilidade para modelar a incerteza proveniente das variáveis aleatórias conforme o sistema evolui no tempo. Em síntese: sistemas e processos são estocásticos e as variáveis que os integram são aleatórias (GUBNER, 2006).

O método de Monte Carlo é exemplo de método estocástico no qual são geradas aleatoriamente amostras de valores para as variáveis de entrada do sistema modelado. Estas amostras são confrontadas com modelo probabilístico, de maneira iterativa. Um dos fatores que pode restringir a utilização do método de Monte Carlo é o elevado número de iterações necessárias para se convergir à resultado com grau de confiança satisfatório (ZIN-EDDINE et al., 1994; AZEVEDO et al., 2009). A alternativa ao método de Monte Carlo é a transformada da incerteza (*Uncented Transform* – UT), técnica capaz de realizar aproximação discreta de funções de densidade de probabilidade de variáveis aleatórias, mantendo suas propriedades estatísticas (LEÃO et al., 2016). Outro método que aborda os processos estocásticos sob o ponto de vista de estados discretos são as cadeias de Markov, nas quais a distribuição de probabilidade do próximo estado do sistema depende apenas do estado atual e não da sequência de eventos que o precederam (SHARPE, 1988).

**Métodos inferenciais** são aqueles que procuram reproduzir a característica humana de raciocínio inferencial na busca de solução para problemas de otimização. Realizar inferências acerca de determinado sistema constitui processo de validação de novas proposições com base na aceitação da veracidade de proposições anteriores.

Ou seja, os métodos inferenciais assumem a possibilidade de que eventos passados ocorridos sob determinadas circunstâncias podem ocorrer novamente no futuro, mediante mesmas condições (ABRAMCZUK, 2000).

O método da inferência estatística, pertencente à classe dos métodos inferenciais, utiliza amostra aleatória de dados para descrever e realizar inferências sobre o funcionamento do sistema. A inferência estatística é especialmente adequada à situações em que não é conveniente ou possível, por limitações de tempo ou técnicas, examinar os valores de todos os parâmetros de entrada ou todas as saídas de determinado sistema simulado. Todavia, utilizando inferência é possível estimar estes valores com precisão baseada em níveis de confiança, que quantificam a precisão das previsões realizadas (CARVALHO et al., 2015).

Desta maneira, métodos determinísticos são aplicáveis à problemas nos quais os eventos estão ligados por relações de causalidade simples, sendo o problema conhecido. Métodos heurísticos são aplicáveis quando o problema admite solução aproximada, com base em conhecimentos anteriores. Os métodos estocásticos são recomendados à problemas cujo estado futuro não é totalmente determinado pelo estado presente. E os métodos inferenciais podem ser utilizados quando trata-se de problemas nos quais eventos que ocorreram no passado tendem a ocorrer no futuro, mediante condições conhecidas. Portanto, a escolha do método de otimização mais adequado depende da natureza do problema em análise.

Sob o ponto de vista prático, a otimização pode ser aplicada de duas maneiras: ligada e desligada. Dochow (2016) afirma que otimização ligada é aquela que ocorre com parâmetros obtidos diretamente do sistema durante seu funcionamento. Estes parâmetros podem ser extraídos pela leitura de sinais provenientes de sensores conectados no sistema, realizada em tempo de execução. Os valores dos parâmetros são então submetidos ao processo de otimização, que é encarregado de fornecer novos valores para os parâmetros ou como apontam Jaillet e Wagner (2012), indicar ações que devem ser tomadas em partes específicas do sistema.

Na otimização desligada o sistema é representado por intermédio de modelo matemático (LETHAM; BAKSHY, 2019). Nesterov (2013) informa que neste tipo de otimização os valores dos parâmetros da solução candidata devem ser submetidos ao simulador que está conectado a função de avaliação, que quantifica a qualidade da solução. Portanto, a otimização desligada é utilizada pelos analistas de sistemas para aprimorar o projeto do sistema, enquanto a otimização ligada é utilizada para melhorar as características apresentadas durante a evolução do sistema (LETHAM; BAKSHY,

2019).

### 2.2.2 Otimização por enxame de partículas

A **otimização por enxame de partículas** (*Particle Swarm Optimization* - PSO) é método de otimização heurístico proposto por [Eberhart e Kennedy \(1995\)](#) que realiza pesquisa por soluções através da troca de informações entre partículas, determinando as trajetórias que cada uma deve tomar no espaço de busca. O termo partícula é analogia a física, pois partículas possuem posição e velocidade, mas não possuem massa e volume. A qualidade de cada partícula (solução candidata) é dada pelo valor da função de avaliação  $f(\vec{x})$  calculada para sua posição.

O algoritmo PSO possui implementação simplificada, uma vez que utiliza estruturas de programação triviais e operações matemáticas com baixo custo computacional. Contudo, como toda heurística, não garante solução ótima e é passível de estagnação com relação à ótimos locais. A técnica busca solução otimizada alterando a velocidade e a posição de cada partícula e com isto, redefine sua trajetória no espaço de busca, como ilustrado na Figura 2.2, adaptada de [Serapião \(2009\)](#). A velocidade e posição de cada  $k$  partícula do enxame  $E$  é atualizada a cada iteração, dado por [Eberhart e Kennedy \(1995\)](#):

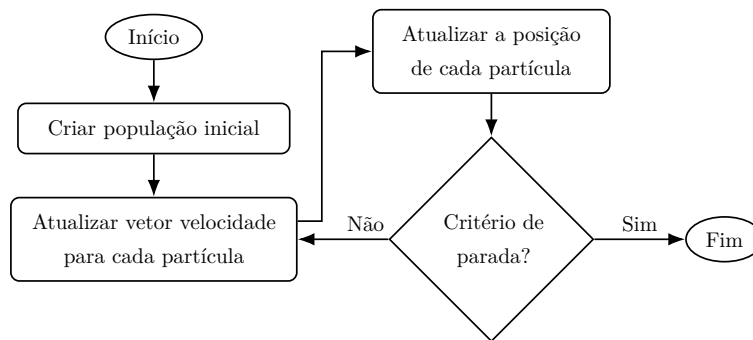


Figura 2.2 - Fluxograma do método PSO.

$$v_{k_n} = w \cdot v_k + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_m - x_k) + c_2 \cdot r_2 \cdot (g_m - x_k) \quad (2.1)$$

$$x_{k_n} = x_k + v_{k_n} \quad (2.2)$$

na qual  $v_{k_n}$  é a nova velocidade da partícula,  $w$  é o coeficiente de inércia,  $v_k$  é a velocidade atual da partícula,  $c_1$  é o termo cognitivo e  $c_2$  é o termo social, que são coeficientes de aceleração referentes à memória local e à global, respectivamente,  $r_1$  e  $r_2$  são números aleatórios com distribuição uniforme no intervalo  $[0; 1]$ , que conferem estocasticidade ao método,  $p_m$  é a melhor posição conhecida da partícula,  $g_m$  é a melhor posição conhecida dentre todas as partículas,  $x_k$  é a posição atual da partícula e  $x_{k_n}$  é a nova posição da partícula.

É possível controlar a relevância da inércia, da memória local e da memória global da partícula variando  $w$ ,  $c_1$  e  $c_2$ . A inércia representa a capacidade de manter a partícula em direção idêntica à que vinha seguindo. A memória local, relacionada ao conhecimento da própria partícula, conduz a solução em direção a melhor posição que a mesma encontrou até o momento. A memória global tem relação com o conhecimento coletivo, conduzindo a solução na direção da melhor posição descoberta pelo enxame.

A determinação dos valores dos coeficientes pode ser realizada utilizando conhecimento prévio do problema (TAVARES et al., 2015; LACERDA et al., 2018) aliado à técnicas propostas na literatura. Wang et al. (2013) sugerem variação no valor do coeficiente de inércia  $w$ , dado por:

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} \cdot iter \quad (2.3)$$

na qual  $w_{min}$  é o valor mínimo e  $w_{max}$  é o valor máximo para o coeficiente de inércia,  $iter_{max}$  é o número máximo de iterações adotado para o problema e  $iter$  é o número da iteração corrente. Fundamentado em diversos experimentos, Sun e Xiong (2012) propõem que a utilização de valores no intervalo  $[0,9; 1,2]$  para  $w_{min}$  e  $w_{max}$  é capaz de incrementar o desempenho do algoritmo PSO, diminuindo a quantidade de iterações necessárias para convergência e aumentar a qualidade da solução otimizada encontrada pelo método.

Com relação aos coeficientes de aceleração,  $c_1$  e  $c_2$ , quando: i)  $c_1 = c_2 = 0$ , as partículas ficam à deriva, dependendo apenas do coeficiente de inércia, ou seja, mantendo sua velocidade atual até atingirem algum limite do espaço de busca, ii)  $c_1 > 0$  e  $c_2 = 0$ , as partículas realizam somente busca local, analisando apenas sua vizinhança, iii)  $c_1 = 0$  e  $c_2 > 0$ , todo o enxame de partículas é atraído para ponto único no espaço de busca, iv)  $c_1 = c_2$ , a memória local e a global possuem a mesma

relevância, atraindo as partículas com igual intensidade, v)  $c_1 > c_2$ , as partículas são atraídas para sua melhor posição conhecida no espaço de busca e vi)  $c_1 < c_2$ , as partículas são atraídas para a melhor posição global conhecida do espaço de busca. Para problemas unimodais, com espaço de busca de pequena granularidade, valores maiores para  $c_2$  que para  $c_1$  são mais eficientes. Por outro lado, para problemas multimodais, com amplo espaço de busca, valores maiores para  $c_1$  que para  $c_2$  são mais vantajosos (ENGELBRECHT, 2007).

---

**Algoritmo 2.1:** OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

---

**Entrada:**  $d, k, M_{lim}, w, c_1, c_2$   
**Saída:** *Solucao Otimizada*

```

1 início
2    $E \leftarrow$  INICIALIZAR ENXAME( $d, k, M_{lim}$ )
3    $v_k \leftarrow$  INICIALIZAR VELOCIDADES( $k$ )
4   enquanto ( $\neg$ CONDICAO PARADA()) faça
5     para ( $n = 1$  até  $k$ ) faça
6        $k_n \leftarrow E[n, :]$ 
7        $f_k[n] \leftarrow$  FUNCAO AVALIACAO( $k_n$ )
8        $p_m[n] \leftarrow$  MELHOR POSICAO PARTICULA( $k_n, f_k[n]$ )
9     fim
10     $g_m \leftarrow$  MELHOR PARTICULA ENXAME( $E, f_k$ )
11     $i_{melhor} \leftarrow$  INDICE MELHOR PARTICULA ENXAME( $E, g_m$ )
12    para ( $n = 1$  até  $k$ ) faça
13       $r_1 \leftarrow$  RAND(0, 1)
14       $r_2 \leftarrow$  RAND(0, 1)
15       $x_k \leftarrow E[n, :]$ 
16       $v_{k_n} \leftarrow$  ATUALIZAR VELOCIDADE( $w, v_k[n], c_1, r_1, p_m[n], x_k, c_2, r_2, g_m$ )
17       $v_k[n] \leftarrow v_{k_n}$ 
18       $x_{k_n} \leftarrow$  ATUALIZAR POSICAO( $x_k, v_{k_n}$ )
19       $E[n, :] \leftarrow x_{k_n}$ 
20    fim
21  fim
22   $E_{melhor} \leftarrow (E[i_{melhor}, :])$ 
23   $f_{k*} \leftarrow$  FUNCAO AVALIACAO( $E_{melhor}$ )
24  SOLUCAO OTIMIZADA  $\leftarrow [E_{melhor}, f_{k*}]$ 
25 fim
26 retorna Solucao Otimizada

```

---

O fluxo clássico do algoritmo PSO é ilustrado na Figura 2.2 e descrito no Algoritmo 2.1, cuja as entradas são: i) quantidade de dimensões  $d$  do problema de otimização (parâmetros a serem otimizados), ii) quantidade  $k$  de partículas, iii) matriz  $M_{lim}$  de tamanho  $d \times 2$  com os limites superiores e inferiores para inicialização das partículas, iv) coeficiente de inércia  $w$ , v) valor de  $c_1$  e vi) valor de  $c_2$ . A saída do Algoritmo 2.1 é a solução otimizada, composta pelos parâmetros e respectiva função de avaliação da partícula com melhor aptidão encontrada.

### **2.3 Considerações**

O processo de otimização constitui ferramenta para o aprimoramento do modelo ou do sistema diretamente. A utilização de otimização viabiliza a obtenção de cenários melhores que podem ser analisados com foco na complexidade, estabilidade e robustez. No próximo capítulo serão detalhados conceitos relativos à métricas de otimização e análise de sensibilidade de parâmetros do sistema, que são utilizados na metodologia deste trabalho.

## CAPÍTULO 3

### MÉTRICAS DE OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Este capítulo aborda o conceito de métrica de otimização e na sequência é realizada breve análise sobre a escolha do método de otimização mais adequado dependendo da natureza do problema. Por fim, é apresentada a técnica de análise de sensibilidade de parâmetro.

#### 3.1 Métricas de otimização

O processo de otimização fornece ao analista conhecimentos sobre o funcionamento de determinado sistema, uma vez que apresenta aspectos nos quais determinadas alterações podem ser realizadas, afim de melhorar a relação de custo-benefício. Estes aspectos podem variar conforme o objetivo do estudo, dando origem à diferentes **métricas de otimização** (RAO, 2019). É possível estabelecer métricas de otimização inspiradas, por exemplo: i) média ou menor/maior valor, ii) requisitos específicos do projetista do sistema, iii) utilização otimizada de recursos, iv) custo de implementação/operacional ou v) aspectos legais e mercadológicos. A Tabela 3.1 dispõe possíveis métricas de otimização para a linha de produção automobilística considerando algumas inspirações.

Tabela 3.1 - Métricas de otimização para linha de produção automobilística.

Inspiração	Métrica
Média	Valor médio de manutenção dos equipamentos da linha de produção
Menor valor	Nível de ruído percebido pelos passageiros
Maior valor	Potência do motor
Requisitos do projetista	Consumo de combustível em rodagem urbana e rodoviária
Utilização otimizada de recursos	Percentual de utilização dos recursos da linha de produção
Custo de implementação	Investimento inicial necessário para começar a produção
Custo operacional	Valor necessário para manter a linha de produção
Aspectos legais	Quantidade de poluição emitida
Aspectos mercadológicos	Aceitabilidade dos consumidores em relação ao projeto

Na Tabela 3.1, observa-se que algumas métricas se relacionam ao processo de produção do automóvel, enquanto outras tem relação com o produto final, sendo que ambas abordagens podem ser adotadas com intuito de otimizar a linha de produção. O processo de otimização busca maximizar, ou na maioria das vezes, minimizar o valor da função de avaliação, elaborada após definição da métrica de otimização (BARBOSA et al., 2013). Considerando a métrica de otimização, que reflete o propósito da análise,

em conjunto com a natureza do problema, é possível determinar o tipo de método de otimização mais adequado a ser utilizado.

### 3.2 Natureza do problema com relação aos métodos de otimização

De acordo com Stacey (2011), a **natureza dos problemas** pode ser: i) simples, ii) complicada, iii) complexa ou iv) caótica, de acordo com a associação de dois critérios. O primeiro critério é o nível de desacordo sobre o problema, relacionado com sua definição e descrição. O segundo critério é o nível de incerteza relacionado ao problema, que diz respeito aos métodos e tecnologias existentes para tratá-lo (PAIVA et al., 2018). A Figura 3.1, adaptada de Stacey (2011), ilustra a organização destes critérios na **Matriz de Stacey**.

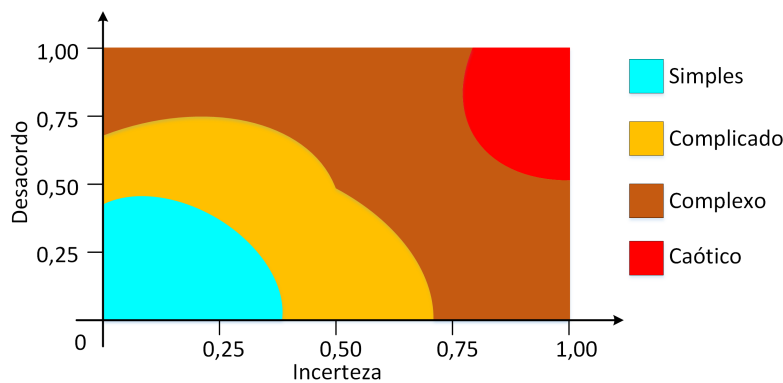


Figura 3.1 - Ilustração da Matriz de Stacey.

Observa-se na Figura 3.1 que na vizinhança do ponto  $[0, 25; 0, 25]$ , região de simplicidade, encontra-se a zona que alia acordo sobre a descrição do problema e certeza de que existem tecnologias familiares para tratá-lo. Quando não há nenhum acordo sobre a descrição do problema e as tecnologias para tratá-lo são poucas ou inexistentes, trabalha-se na zona da anarquia ou caos, encontrada na vizinhança do ponto  $[1; 1]$ . As situações nas quais se está longe do acordo, mas próximo da certeza ou longe da certeza, mas próximo do acordo caracterizam problemas complicados, e localizam-se na vizinhança do ponto  $[0, 5; 0, 5]$ . Os problemas complexos surgem entre o complicado e o caos, na região próxima ao ponto  $[0, 75; 0, 75]$ . Para Stacey (2011), problemas complexos são aqueles em que as relações de causa e efeito não são claras e o problema evolui enquanto está sendo tratado.

De acordo com Abramczuk (2000) existe relação entre complexidade, incerteza e métodos para resolução de problemas. A Figura 3.2, adaptada de Abramczuk (2000),

ilustra a relação entre complexidade  $\times$  incerteza e as possíveis aplicações dos métodos de otimização, na qual, no eixo das abscissas nos valores próximos à 0 a incerteza é baixa e nos valores próximos à 1 a incerteza é alta. No eixo das ordenadas, nos pontos próximos a 0 a complexidade é baixa, e nos pontos próximos à 1 a complexidade é alta. A relação entre complexidade e incerteza define o método mais apropriado para a resolução do problema. A Figura 3.3, adaptada de Paiva et al. (2018), ilustra a superposição das Figura 3.1 e Figura 3.2, na qual observa-se as regiões definidas por Stacey (2011) e a aplicação de cada método de otimização discutida por Abramczuk (2000).

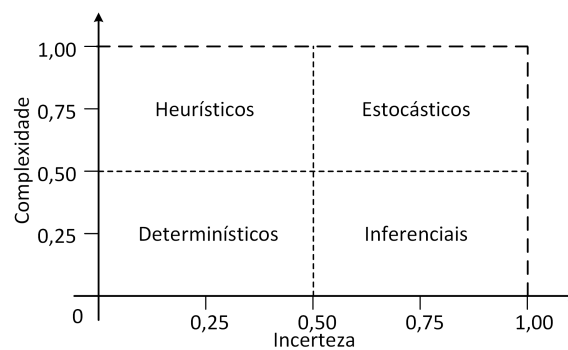


Figura 3.2 - Relação entre complexidade  $\times$  incerteza.

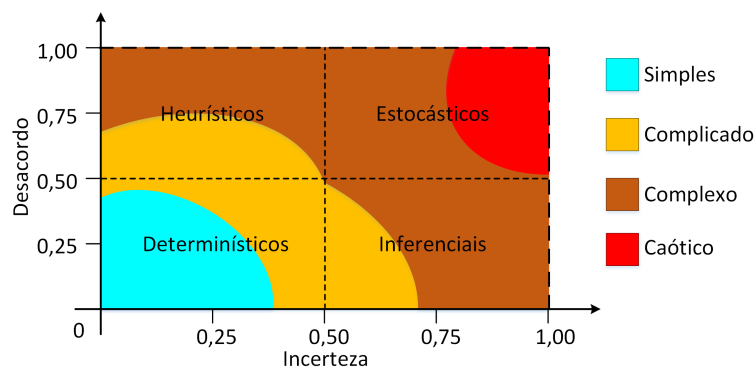


Figura 3.3 - Superposição de Stacey (2011)  $\times$  Abramczuk (2000).

Na Figura 3.3, se o problema encontra-se na região de simplicidade, os métodos determinísticos são capazes de realizar a otimização. Na medida em que aumenta a imprevisibilidade do problema, são necessários métodos mais elaborados para realizar a otimização. Para problemas complicados, podem ser utilizados métodos

determinísticos, heurísticos e inferenciais, de acordo com seu nível de desacordo e incerteza. Problemas complexos podem demandar métodos heurísticos, estocásticos ou inferenciais. Por fim, os problemas localizados na região caótica demandam métodos estocásticos.

Para [Gomes \(2020\)](#) a incerteza, no contexto de sistemas, advém das variações nos parâmetros de entrada devido à alterações nas condições ambientais, sendo seus efeitos observáveis na saída do sistema. Esta saída pode ser representada, por exemplo, pela medida de desempenho, capaz de sintetizar o nível de satisfação aos objetivos impostos no processo. É possível realizar experimentos com diferentes configurações dos parâmetros de entrada, obtendo o desempenho do sistema sob diferentes circunstâncias. De posse dos valores de desempenho para cenários distintos, pode-se realizar estudo de sensibilidade dos parâmetros de entrada do sistema, objetivando compreender seu funcionamento.

### 3.3 Análise de sensibilidade de parâmetro

A **análise de sensibilidade** é a técnica que permite verificar o grau de sensibilidade de cada parâmetro de entrada do sistema observando o impacto nas variações da saída do sistema ([CRITCHFIELD et al., 1986](#); [SALTELLI et al., 2004](#)). Para [Homma e Saltelli \(1996\)](#), a análise de sensibilidade é a estratégia que quantifica a contribuição de cada entrada na saída do sistema/modelo.

A análise de sensibilidade é utilizada para: i) indicar necessidade de simplificação do modelo construído, ii) investigar a causa de erros, iii) verificar quão sensível é o sistema à variações, iv) confirmar o correto processamento dos parâmetros de entrada, v) transformar variáveis de entrada pouco relevantes em constantes com intuito de reduzir o esforço computacional para simulação e vi) identificar regiões de interesse no que diz respeito à complexidade e estabilidade do sistema ([PANNELL, 1997](#); [FREY; PATIL, 2002](#); [SALTELLI et al., 2004](#)).

A análise de sensibilidade de parâmetro pode ser classificada como local ou global, dependendo de como é realizada a variação dos parâmetros de entrada. A análise local considera as saídas do sistema obtidas quando os parâmetros de entrada são variados um por vez (*one-at-a-time*), de forma que enquanto um parâmetro varia, os demais permanecem fixos no valor de referência (valor base). Na análise global, o espaço dos parâmetros de entrada é região finita e as saídas são consideradas globalmente, pela utilização da média de variação de todos os parâmetros de entrada ([HAMBY, 1995](#); [SALTELLI et al., 1999](#)).

A Figura 3.4 ilustra o processo de análise de sensibilidade dos parâmetros de determinado sistema com  $n$  parâmetros de entrada dados por  $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ . Utilizando a análise de sensibilidade local, primeiramente devem ser investigados os valores de referência dos parâmetros que conduzem o sistema ao seu melhor desempenho. O conjunto destes valores de referência é chamado de caso base  $\vec{\beta}$ , dado por:

$$\vec{\beta} = [x_1^\beta, x_2^\beta, \dots, x_i^\beta, \dots, x_n^\beta] \quad (3.1)$$

no qual  $x_i^\beta$  é o valor de referência (valor base) para o parâmetro  $x_i$ . O sistema é então simulado utilizando este conjunto de valores como entrada e a saída correspondente aos valores bases. Após, deve ser definida a faixa de variação para os valores de referência dos parâmetros. Quando os valores de referência são variados de acordo com a faixa definida, são obtidos novos valores para os parâmetros de entrada do sistema. Para o parâmetro  $x_i$ , estes novos valores estão contidos em  $\vec{X}_i$ .

Na Figura 3.4, um ciclo de análise é realizado para cada parâmetro do sistema. Enquanto um parâmetro é modificado, seta na cor vermelha, os demais parâmetros são mantidos constantes, setas na cor azul, em seus valores de referência. Assim, são definidos novos cenários com valores diversos do parâmetro em análise combinados com os valores de referência dos demais parâmetros. Estes cenários são simulados/aplicados ao sistema real e as saídas obtidas são armazenadas em  $\vec{Y}_i$ , permitindo verificar a sensibilidade de cada parâmetro  $x_i$ .

Na análise de sensibilidade dos parâmetros, os métodos analíticos fornecem subsídio para quantificação da relação entre entrada e saída. Podem ser baseados em derivadas, utilizando estratégia de variação de um parâmetro por vez ou em planejamento fatorial, quando todos os parâmetros são variados ao mesmo tempo. Derivadas definem matematicamente quão sensível a saída do sistema é em relação ao parâmetro específico de entrada.

Métodos estatísticos utilizam medidas de centralidade e dispersão para nortear a variação dos parâmetros de entrada e obter a influência na saída. Gomes (2020) descreve as técnicas de variância condicional e de efeitos totais como principais métodos estatísticos de análise de sensibilidade de parâmetro. Técnicas como a de Happ e Moody (1964), que propõem utilização de modelos probabilísticos de eficácia para análise de sensibilidade e a de Rowland e Pastrick (1975) que apresentam algoritmo estocástico que avalia a covariância entre as entradas do sistema.

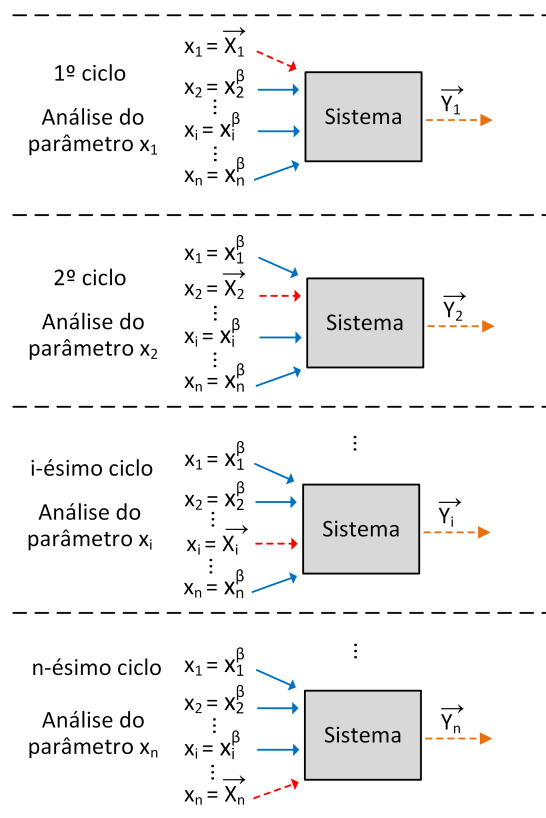


Figura 3.4 - Variação um por vez.

Os métodos visuais podem ser utilizados para inspeção da sensibilidade dos parâmetros do sistema de maneira gráfica. O diagrama de dispersão é um destes métodos, que apresenta visualmente a concentração e/ou dispersão de pontos que representam pares ordenados na forma: valores de saída  $\times$  variação percentual da entrada. Abordagens como a de Saraiva et al. (2017), que propõem realização de variações nos valores base dos parâmetros de forma que o resultado expresse o impacto ocasionado pelas mudanças nas entradas do sistema e a de Eschenbach e McKeague (1989) que apresenta a técnica diagrama-aranha.

Outras técnicas de análise de sensibilidade de parâmetro são apresentadas em trabalhos como de Hamby (1994) e Frey e Patil (2002), que realizam identificação e comparação entre dez métodos de análise de sensibilidade, sendo quatro analíticos, cinco estatísticos e um gráfico. Saltelli et al. (2004) fornecem levantamento de métodos para análise de sensibilidade, com ênfase em modelos científicos. A análise de sensibilidade de parâmetro é capaz de avaliar tanto a estrutura quanto a dinâmica do sistema (ROMANOWICZ, 1983; CLARKE; LOEWEN, 1984; KIM et al., 2006).

### 3.3.1 Diagrama-aranha e método da área

Dentre os métodos de análise de sensibilidade visuais, Eschenbach e McKeague (1989) propõem a utilização do **diagrama-aranha**. A Figura 3.5, adaptada de Gomes (2020), ilustra o diagrama-aranha considerando a análise de sensibilidade dos parâmetros  $x_1$  e  $x_2$  de determinado sistema. O eixo das ordenadas dispõe os valores de saída do sistema, o eixo das abscissas dispõe o valor da variação dos parâmetros de entrada em relação ao valor base e as curvas nas cores azul e vermelha correspondem aos resultados obtidos após simulação considerando os parâmetros  $x_1$  e  $x_2$ . Portanto, cada uma das duas curvas do diagrama-aranha é formada por pontos que relacionam a porcentagem de variação no valor do parâmetro  $\times$  o valor de saída. Assim, é possível mensurar a sensibilidade de cada parâmetro analisando as distâncias das curvas em relação ao eixo base.

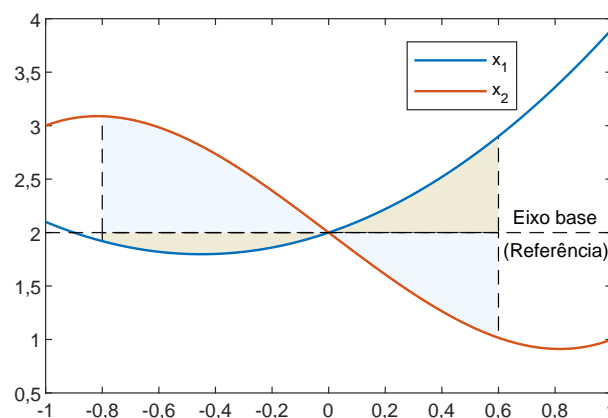


Figura 3.5 - Diagrama-aranha para sistema com dois parâmetros de entrada.

No diagrama-aranha ilustrado na Figura 3.5, é considerado o intervalo de análise de -80% a 60% e os parâmetros são variados no intervalo  $[-100\%; 100\%]$  a partir de seus valores base. Contudo, em situações práticas, alguns parâmetros podem apresentar limitações físicas e/ou estratégicas que restrinjam este intervalo. Mesmo com restrições de variação, o parâmetro pode ter alta sensibilidade. Quanto mais sensível é o parâmetro, maior é o impacto de sua variação na saída do sistema.

Gomes et al. (2019) propõe técnica denominada **método da área** para obter os índices de sensibilidade dos parâmetros de entrada do sistema. No método da área, analisa-se as áreas definidas pelas curvas dos parâmetros e o eixo base. O eixo base é paralelo ao eixo das abscissas no diagrama-aranha, com valor de ordenada igual

à saída do sistema quando simulado para o caso base. A área entre a curva de cada parâmetro e o eixo base corresponde à contribuição do parâmetro em relação à área total. Na Figura 3.5, a contribuição do parâmetro  $x_1$  é destacada na cor azul, enquanto a contribuição de  $x_2$  é destacada na cor marrom. O índice de sensibilidade de parâmetro é dado por:

$$S_{x_i}^a = \frac{A_{x_i}}{\sum_{i=1}^n A_{x_i}} \quad (3.2)$$

no qual  $S_{x_i}^a$  é o índice de sensibilidade do parâmetro  $x_i$ ,  $A_{x_i}$  é a área formada pela curva do parâmetro  $x_i$  e o eixo-base e  $n$  é o número de parâmetros de entrada (GOMES, 2020). A Figura 3.6 ilustra o fluxograma da aplicação do cálculo dos índices de sensibilidade dos parâmetros do sistema utilizando o método da área.

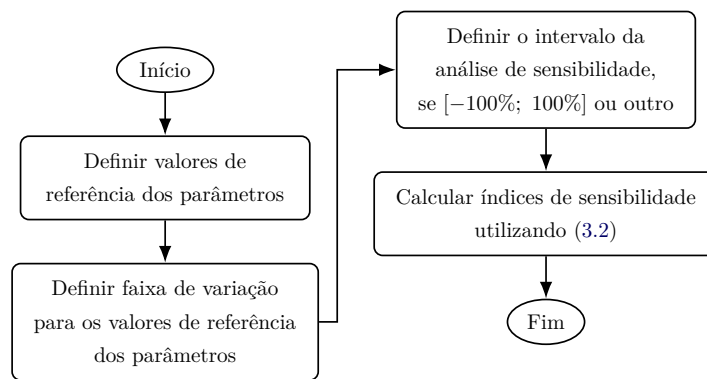


Figura 3.6 - Fluxo para a obtenção dos índices de sensibilidade dos parâmetros.

### 3.4 Considerações

Métricas que objetivam verificar quão adequadamente o sistema exerce suas funções normalmente utilizam medida de desempenho. Porém, a utilização de métricas complementares ao desempenho para a avaliação de sistemas pode revelar cenários relevantes desconsiderados, por exemplo, no processo de otimização. Desta maneira, valores de parâmetros de entrada descartados no processo de otimização podem passar a ser considerados se a métrica levar em conta além do desempenho, aspectos como complexidade, estabilidade e robustez. Os conceitos discutidos neste capítulo são utilizados para medir a complexidade do sistema, apresentada no próximo capítulo.

## CAPÍTULO 4

### MEDIDAS ENVOLVIDAS NAS ANÁLISES DOS SISTEMAS

São apresentados neste capítulo as medidas normalmente consideradas nas análises dos sistemas, desde o desempenho, complexidade, estabilidade até a robustez. A medida de desempenho é abordada considerando as unidades funcionais do sistema. A medida de complexidade é tratada em termos das características de sistemas complexos, com ênfase na métrica de complexidade natural. Em seguida, a definição de estabilidade é apresentada, sendo relacionadas as principais métricas para esta característica dos sistemas. Por fim, a medida de robustez é tratada, com destaque para a relevância desta característica na análise de sistemas.

#### 4.1 Medida de desempenho do sistema

Ilgen e Schneider (1991) e Borman e Brush (1993) afirmam que **desempenho** é a característica que resume o grau de satisfação nas restrições impostas ao sistema sob os múltiplos aspectos considerados na análise. Em outras palavras, o desempenho do sistema sob a ótica do todo é composto pelo relacionamento entre os desempenhos de cada parte do sistema que realiza alguma função (CAMPBELL et al., 1993). Portanto, métricas de desempenho devem ser capazes de fornecer valores quantitativos que permitam comparações entre diferentes cenários de operação do sistema (CAMPBELL, 1999).

De acordo com Fetsch e DeBasio (2011), desempenho se refere ao nível de atendimento aos objetivos do sistema. Considera-se que há elevado desempenho quando o sistema opera utilizando os recursos disponíveis da melhor maneira possível, fornecendo valores satisfatórios para a **métrica de desempenho** (CHANG, 2014; OLIVEIRA et al., 2019). Para a elaboração da métrica de desempenho do sistema deve-se relacionar informações inerentes aos aspectos considerados relevantes pelos analistas.

#### 4.2 Medida de complexidade do sistema

**Complexidade** é a característica que se manifesta quando há interação entre partes relacionadas fazendo emergir comportamento de previsão incerta (HOLLAND, 2006). Por conta da variedade de áreas que abordam a complexidade de forma diferente, Page (2010) sugere adotar combinações de técnicas provenientes de diferentes domínios do conhecimento para tratar problemas envolvendo sistemas complexos. A complexidade pode surgir mesmo quando há pequena diversidade de elementos relacionando-se sob regras simples, pois nos sistemas complexos as interações po-

dem ocorrer de diferentes maneiras implicando resultados diversificados (HOLLAND, 2014).

Além das características unificadoras propostas pela ciência de sistemas, sistemas complexos, apresentam: i) não linearidade, ii) emergência, iii) auto-organização, iv) diversidade, v) interdependência e vi) outras (CASTI, 1995; BAR-YAM, 1997; HOLLAND, 2014). Analisar a presença e o grau em que as características se manifestam é a maneira mais comum para determinação do nível de complexidade do sistema (GOMES, 2020).

A não linearidade se refere ao fato de que as saídas fornecidas por sistemas complexos não são proporcionais às suas entradas e seu comportamento não pode ser expresso como função linear de suas partes (BERTALANFFY, 1968; PAIVA, 2016). Emergência é a característica relacionada ao surgimento de comportamentos complexos a partir de regras simples de interação (MITCHELL, 2009). A auto-organização manifestada em sistemas complexos advém de suas unidades formadoras autorreguláveis e adaptativas, que podem ajustar sua operação para estabelecer regras próprias e gerar novos padrões de comportamento (GELL-MANN, 1988; PAGE, 2010; GERSHENSON; FERNÁNDEZ, 2012).

A heterogeneidade dos agentes integrantes de sistemas complexos é relacionada ao nível de diversidade destes componentes (SANTOS et al., 2012). A diversidade é necessária para que exista complementariedade, permitindo que cada parte contribua com o todo, de acordo com sua singularidade (PAGE, 2010). A interdependência corresponde ao nível de influência existente entre as partes do sistema e o todo. Assim, ao analisar o nível de interdependência do sistema, verifica-se o quanto o todo é afetado com a remoção de uma parte, bem como quão impactada é a própria parte com sua remoção do todo (BAR-YAM, 2002).

#### 4.2.1 Métrica de complexidade natural dos sistemas

**Métricas de complexidade** consideram as características que definem o sistema como complexo, levando em conta as interações de suas partes (MITCHELL, 2009; REPPERGER et al., 2012). De acordo com Baldam et al. (2014), métricas de complexidade são utilizadas para comparar diferentes sistemas ou diferentes condições para o mesmo sistema. O conceito de complexidade natural proposto por Gomes (2020) afirma que cada sistema exibe nível de complexidade próprio, em que exerce seu propósito com alto desempenho, garantindo alcance de seus objetivos. Configurações que levam o sistema a operar em nível de complexidade natural podem ser consi-

deradas otimizadas, sendo outros níveis de complexidade indicativos de ociosidade ou sobrecarga do sistema. A métrica de complexidade natural proposta por Gomes (2020) apresenta as relevâncias das conexões por meio da análise de sensibilidade dos parâmetros.

Na métrica de complexidade natural, independentemente da direção do fluxo de informações entre os elementos do sistema, as conexões entre as entidades, recursos e filas são mapeadas a cada passo da simulação na matriz de relacionamento, na qual as colunas representam as entidades e as linhas representam filas e recursos. A complexidade do sistema  $\psi(s)$ , expressa por (4.1), é calculada durante a simulação e  $P(c)_i$ , referente à probabilidade de ocorrência da conexão  $c$ , é dada por (4.2).

$$\psi(s) = - \sum_{i=1}^{\rho} P(c)_i \cdot \log_2 P(c)_i \quad (4.1)$$

$$P(c)_i = \frac{1}{n_e \cdot (n_r + n_f)} \quad (4.2)$$

no qual  $n_e$  é o número de entidades do sistema no instante  $t$ , podendo ser generalizada pela função  $e(\theta)$ , em que o conjunto de restrições  $\theta$  podem diminuir as possibilidades de relacionamento entre entidades, recursos e filas, assumindo valores no intervalo  $1 \leq e(\theta) \leq n_e$ ,  $n_r$  é o número de recursos do sistema,  $n_f$  é o número de filas e  $\rho$  é o número de conexões ativas no instante  $t$ , dado por:

$$\rho = \sum_{i=1}^{\lambda} n_{c_i} \cdot n_{e_i} \quad (4.3)$$

no qual  $\lambda$  é o número de estados das entidades,  $n_{c_i}$  é o número de conexões ativas por estado e  $n_{e_i}$  é o número de entidades por estado. A complexidade natural  $\psi(c, \gamma)$  na métrica de Gomes (2020) é dada em função das conexões ativas  $c$  e de suas respectivas relevâncias de conexão  $\gamma$ , dada por:

$$\psi(c, \gamma) = \sum_{i=1}^{\rho} [\gamma_i - P(c)_i \cdot \log_2 P(c)_i] \quad (4.4)$$

no qual  $\psi(c, \gamma)$  é a complexidade natural do sistema com base em conexões ponderadas,  $\gamma_i$  é a média dos índices de sensibilidade dos parâmetros diretamente relaci-

onados a cada conexão e  $P(c)_i$  é a probabilidade de ocorrência da conexão.

### 4.3 Medida de estabilidade do sistema

**Estabilidade** refere-se à capacidade do sistema de retornar ao equilíbrio (JEN, 2005). Neste contexto, equilíbrio diz respeito à situação na qual há oscilação mínima no sistema, seja em aspectos relativos à sua dinâmica interna ou as saídas que fornece como resposta à seu ambiente externo. Para preservar o equilíbrio, o sistema deve possuir mecanismos de autorregulação que permitam sua adaptação à condições inesperadas, garantindo a manutenção da estabilidade (PAICE; WIRTH, 1997; THOMAS; BYWATERS, 2021). Xue et al. (2008) e Qiaoge et al. (2008) afirmam que a capacidade de manter equilíbrio faz os sistemas estáveis. Esta capacidade pode ser medida por intermédio de **métricas de estabilidade**.

Para mensurar a estabilidade, Bai e Zhou (2013) recomendam a definição de diferentes limiares para os valores das saídas do sistema. Desta maneira, é possível determinar o pertencimento de determinados cenários à diferentes faixas de interesse, organizado-os em arranjo denominado matriz de detecção de coincidência. Quanto maior o número de cenários em determinada faixa, maior é a estabilidade desta faixa de operação. Chestnov e Shatov (2018) propõem raciocínio similar, sugerindo que os limites entre os quais os parâmetros de entrada do sistema podem variar, de forma que suas saídas mantenham equilíbrio, determinam suas margens de estabilidade. A metodologia proposta por Pesterev (2016) permite a identificação de intervalos de operação estável do sistema chamados setores de estabilidade. Para tanto, o autor utiliza conceitos de funções quadráticas de Lyapunov (WOLF et al., 1985).

Okuyama (2016) propõe método para cálculo de estabilidade de sistema com base no mapeamento da trajetória na matriz de transição de estados. Assim, ao comparar as matrizes de transição de estados referentes ao funcionamento do sistema sob diferentes circunstâncias, é possível mensurar a estabilidade correspondente a cada cenário, denominada trajetória estável. A métrica de estabilidade proposta por Liu et al. (2019) proporciona a obtenção de índices de estabilidade, permitindo detectar configurações de parâmetros de entrada com maior possibilidade de ocasionarem instabilidade no caso de perturbações.

A Tabela 4.1, adaptada a partir dos trabalhos de Bai e Zhou (2013), Pesterev (2016), Okuyama (2016), Chestnov e Shatov (2018) e Liu et al. (2019), dispõe a síntese das principais métricas de estabilidade de sistema, relacionando abordagem,

referência bibliográfica e a contribuição conceitual proposta em cada uma. A característica comum a todas as métricas é a divisão do domínio de valores de entrada/saída em porções, relativas às diferentes situações a que o sistema pode ser submetido durante seu funcionamento e conseqüentemente, a manifestação de diferentes níveis de estabilidade.

Tabela 4.1 - Métricas de estabilidade de sistema.

Abordagem	Referência	Contribuição
Limites de valores de saída	Bai e Zhou (2013)	Matriz de detecção de coincidência
Limites para parâmetros de entrada	Chestnov e Shatov (2018)	Margens de estabilidade
Intervalos de operação estável	Pesterev (2016)	Setores de estabilidade
Comparação entre matrizes de transição de estado	Okuyama (2016)	Trajectoria estável
Configuração de valores de parâmetros de entrada suscetíveis à instabilidade	Liu et al. (2019)	Índice de estabilidade de sistema

#### 4.4 Medida de robustez do sistema

**Robustez** é a capacidade do sistema em se manter funcionando face à alguma mudança ou perturbação interna ou externa (JEN, 2005; PAGE, 2010). Quando o sistema recebe estímulo que o retira de seu regime habitual de operação, há presença de perturbação. Em outras palavras, se existe interferência não planejada no sistema, existem perturbações (YAZ, 1988; YAZ; NIU, 1993; GERTLER, 1998) e se existem perturbações, há incerteza em relação aos estados futuros (DITLEVSEN, 1981; KHAMMASH; PEARSON, 1990; CHWIF; MEDINA, 2014).

De acordo com Klomp et al. (2016), robustez é característica que transita entre o material e o simbólico, podendo inclusive se manifestar por junção de ambos. Por exemplo, para o sistema de controle de tráfego aéreo ser considerado robusto tanto os equipamentos de navegação e aeronaves devem ser resistentes à falhas (característica material) quanto os operadores de tráfego devem ser qualificados e competentes (características simbólicas).

O projeto de sistemas robustos exige variedade de métodos e ferramentas desenvolvidas para apoiar decisões em contextos de incerteza e contingenciamento de recursos, demandando técnicas da área de projeto robusto (PHADKE, 1989; ULLMAN, 2006). Lempert e Collins (2007), afirmam que para a tomada de decisão robusta são necessárias técnicas de identificação de cenários diferentes do cenário otimizado. Schlesinger (2004) afirma que a combinação de outras características de sistema além do

desempenho pode ser utilizada para obtenção de robustez. Croskerry (2009) afirma que o projeto robusto deve ser capaz de caracterizar as vulnerabilidades de tais cenários e avaliar as compensações entre elas, cabendo ao conhecimento do analista o julgamento final acerca de qual é o cenário mais adequado.

Assim como ocorre na literatura de desempenho, complexidade e estabilidade, são identificados trabalhos que objetivam medir a robustez através de métricas, como proposto em Barros (2017). Na Tabela 4.2 é disposta a compilação dos trabalhos que propõem algumas métricas de robustez de sistemas, sendo representados: i) conceitos relacionados à métrica ou que servem de inspiração para sua elaboração, ii) referência bibliográfica e iii) contexto ao qual os autores aplicaram a métrica.

Tabela 4.2 - Compilação de métricas de robustez de sistema.

Conceitos relacionados	Referência	Contexto
Desempenho	Ali et al. (2004)	Sistemas paralelos e distribuídos
	Leonardi e Cruz (2005)	Projeto de controladores
Desempenho/Estabilidade	Swarup (1995)	Controle robusto industrial
Desempenho/Incerteza	Khammash e Pearson (1990)	Sistemas à eventos discretos
Complexidade	Abelein et al. (2012)	Eletrônica automotiva
	Tudevtagva et al. (2013)	Sistemas embarcados
Estabilidade	Paice e Wirth (1997)	Sistemas não lineares
	Castro e Araújo (2004)	Sistemas de potência
Estabilidade/Perturbação	Doyle e Stein (1978)	Controladores de retroalimentação
Sensibilidade de parâmetro	Freudenberg et al. (1981)	Sistemas de controle
Resiliência	Yano et al. (2011)	Serviços de rede
Perturbação	Yaz (1988)	Sistemas à eventos discretos
	Yaz e Niu (1993)	Sistemas à eventos discretos
Estimação de parâmetro	Thompson (1989)	Processamento de sinais
Projeto robusto	Phadke (1989)	Engenharia de qualidade
Teoria dos grafos	Zhao (2015)	Redes complexas
Conhecimento do analista	Klomp et al. (2016)	Sistemas de tráfego aéreo
Segurança e privacidade	Chen et al. (2017)	Internet das coisas

## 4.5 Considerações

A verificação dos diversos conceitos que inspiram as métricas de robustez e a variedade de contextos a que são aplicadas atesta a relevância desta característica na análise de sistemas. As medidas envolvidas nas análises dos sistemas discutidas neste capítulo são utilizadas como base para a elaboração da métrica de robustez, de caráter multidimensional, proposta no próximo capítulo.

## CAPÍTULO 5

### METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia proposta neste trabalho. Inicialmente é realizada a contextualização do trabalho e em seguida são apresentadas as métricas propostas. São detalhadas as técnicas para cálculo de desempenho, índice de complexidade e índice de estabilidade, para na sequência apresentar a técnica de mensurar a robustez. Ao final é apresentado o processo de otimização a ser utilizado com as modelagens dos três sistemas utilizados para os estudos de casos.

#### 5.1 Contextualização

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver métrica para encontrar soluções robustas dentre as várias soluções possíveis. A metodologia parte de modelos de sistemas reais e verificação dos modelos utilizando simulação. Na construção da métrica são utilizados os conceitos de desempenho, complexidade e estabilidade, produzindo a medida de robustez. A proposta parte do sistema otimizado considerando somente o desempenho. Com os valores de seus parâmetros de entrada otimizados, tem-se o valor base. De posse do valor base é possível construir o diagrama-aranha para realizar análise de sensibilidade, medir a complexidade e formular a métrica de estabilidade. A Figura 5.1 ilustra o fluxograma da metodologia proposta.

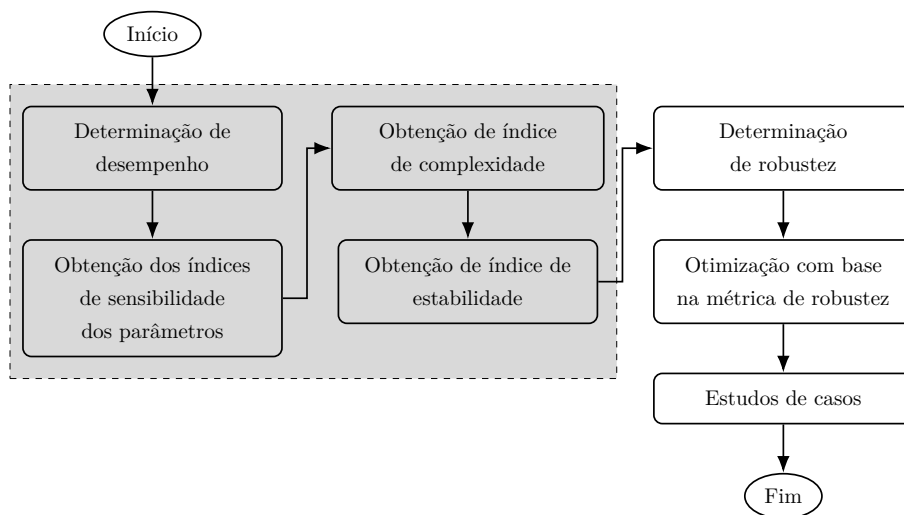


Figura 5.1 - Fluxo da metodologia proposta.

Na Figura 5.1, a região de cor cinza destaca os passos para obtenção das componen-

tes da métrica de robustez: desempenho, índice de complexidade, que depende do cálculo dos índices de sensibilidade e índice de estabilidade. De posse dos valores do desempenho, do índice de complexidade e do índice de estabilidade, determina-se a medida de robustez. Utilizando a métrica de robustez é possível realizar processo de otimização.

A metodologia se inicia com a definição do **cenário base**  $c^\beta$ , que representa o sistema em funcionamento adequado, situação em que seus recursos são utilizados de maneira eficiente. A determinação do  $c^\beta$  pode ser realizada por intermédio de processo de otimização ou por consulta a especialistas. Quando o processo de otimização é adotado para determinação do  $c^\beta$ , geralmente são utilizadas métricas de **desempenho**. Na Figura 5.2 é ilustrado o fluxo de atividades necessárias para o cálculo de desempenho de sistemas a eventos discretos.

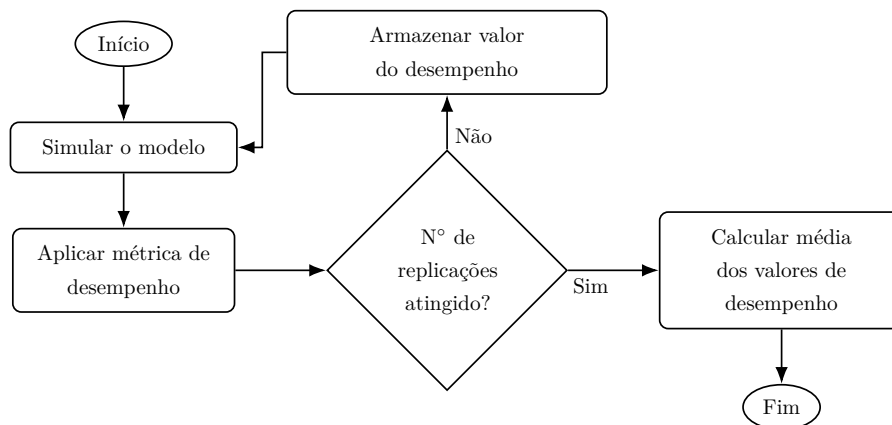


Figura 5.2 - Fluxo para obtenção do melhor desempenho.

Na Figura 5.2, o primeiro passo é a obtenção e simulação do modelo do sistema. Em seguida, a métrica de desempenho é aplicada à saída produzida pelo modelo simulado. No caso de sistemas a eventos discretos, o processo de simulação e de aplicação da métrica de desempenho devem ser repetidos de acordo com o número de replicações considerado necessário para eliminação de tendências. Este número pode ser obtido por associação entre conhecimento do sistema e aplicação de medida de centralidade aos valores de saída obtidos em sucessivas replicações. Na medida em que diminui a variação entre os valores de saída, aproxima-se do número ideal de replicações a ser adotado. A necessidade de realizar replicações decorre do comportamento aleatório dos sistemas a eventos discretos, que apresentam diferente dinâmica a cada simulação.

Após o número de replicações ser atingido é calculada a média dos valores de desempenho armazenados, que determina com maior acurácia o desempenho do sistema nos diferentes cenários avaliados durante a otimização. Assim, o cenário com melhor desempenho após o processo de otimização é considerado o cenário base  $c^\beta$ . O segundo passo é a obtenção dos índices de sensibilidade dos parâmetros considerando  $c^\beta$ , que são utilizados no processo de determinação do índice de complexidade. A necessidade do cálculo dos índices de sensibilidade decorre do fato de que a métrica de complexidade escolhida para compor a métrica de robustez baseia-se em conexões ponderadas por estes índices (GOMES, 2020). Para determinação dos valores dos índices de sensibilidade é utilizado o método da área (GOMES et al., 2019).

## 5.2 Índice de complexidade proposto

A obtenção do **índice de complexidade** é o terceiro passo, que indica o nível de proximidade entre a complexidade do sistema em determinado cenário e sua complexidade natural. Este índice varia no intervalo  $[0; 1]$ , diminuindo ou aumentando na medida em que a complexidade do cenário se distancia ou se aproxima da complexidade natural. Desta forma, considera-se o  $c^\beta$  como sendo o cenário no qual o sistema apresenta sua complexidade natural, estabelecendo que:

$$i_\psi(c^\beta) = 1 \quad (5.1)$$

no qual  $i_\psi(c^\beta)$  é o índice de complexidade do  $c^\beta$ . Para encontrar o índice de complexidade do cenário qualquer  $c^a$ , necessita-se do valor da complexidade natural do  $c^\beta$ , representada por  $\psi(c^\beta)$ . Após a obtenção da  $\psi(c^\beta)$ , é necessário obter o valor da complexidade de  $c^a$ , representada por  $\psi(c^a)$ . Se o valor obtido para  $\psi(c^a)$  for maior que o dobro do valor de  $\psi(c^\beta)$  é aplicado saturador dado por (5.2). Ao realizar este procedimento, considera-se que  $\psi(c^a)$  é limitada superiormente pelo dobro da  $\psi(c^\beta)$ . A limitação da complexidade realizada pelo saturador é necessária para sistemas abertos, uma vez que neste tipo de sistema entidades podem ser adicionadas durante seu funcionamento, não sendo possível prever a complexidade máxima de cada sistema.

$$\psi(c^a) = \begin{cases} 2 \cdot \psi(c^\beta) & \text{se } \psi(c^a) > 2 \cdot \psi(c^\beta) \\ \psi(c^a) & \text{se } \psi(c^a) \leq 2 \cdot \psi(c^\beta) \end{cases} \quad (5.2)$$

Após aplicação do saturador é possível calcular o índice de complexidade do  $c^a$ , representado por  $i_\psi(c^a)$ . O valor de  $i_\psi(c^a)$  desejado é 1, indicando que  $\psi(c^a) = \psi(c^\beta)$ . Portanto, na medida em que  $\psi(c^a)$  se distancia de  $\psi(c^\beta)$ , tanto para valores maiores quanto para valores menores,  $i_\psi(c^a) \rightarrow 0$ , dado por:

$$i_\psi(c^a) = \begin{cases} \frac{|\psi(c^a) - 2 \cdot \psi(c^\beta)|}{\psi(c^\beta)} & \text{se } \psi(c^a) > \psi(c^\beta) \\ \frac{\psi(c^a)}{\psi(c^\beta)} & \text{se } \psi(c^a) \leq \psi(c^\beta) \end{cases} \quad (5.3)$$

A Figura 5.3 ilustra o fluxo para obtenção do índice de complexidade para qualquer cenário  $c^a$  e a Figura 5.4 ilustra a relação  $\psi(c^a) \times i_\psi(c^a)$ , na qual a região sombreada

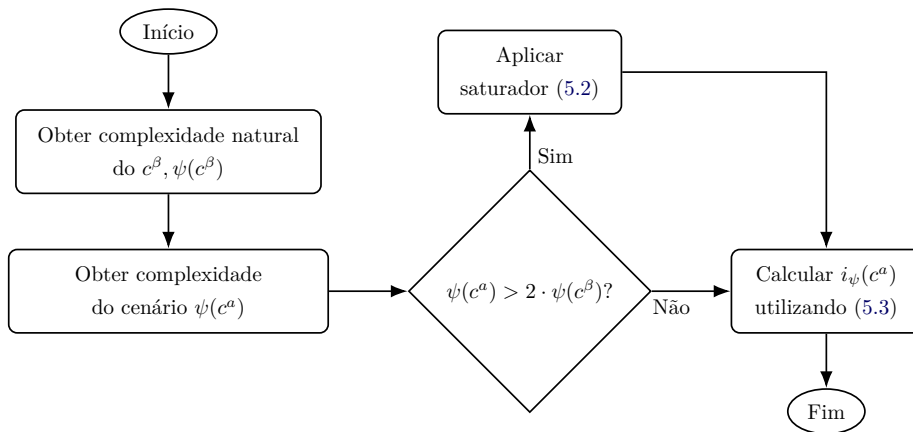


Figura 5.3 - Fluxo para obtenção do índice de complexidade proposto.

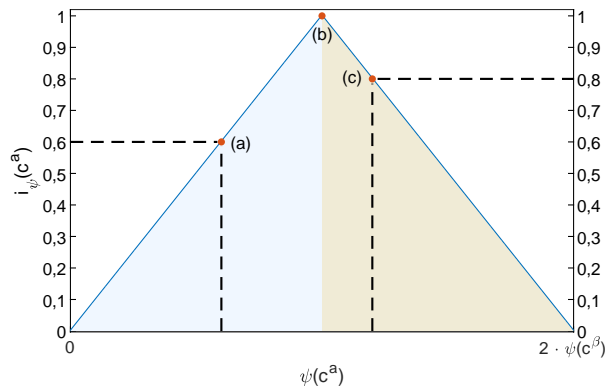


Figura 5.4 - Relação entre  $\psi(c^a) \times i_\psi(c^a)$

na cor azul é delimitada no eixo das abscissas por valores de  $\psi(c^a)$  menores que o valor da complexidade natural do sistema e no eixo das ordenadas por valores de  $i_\psi(c^a)$  no intervalo  $[0; 1]$ . A região sombreada na cor marrom é delimitada no eixo das abscissas por valores de  $\psi(c^a)$  maiores que o valor da complexidade natural do sistema, sendo limitados por  $2 \cdot \psi(c^\beta)$  e no eixo das ordenadas por valores de  $i_\psi(c^a)$  no intervalo  $[1; 0]$ . Observe que os valores obtidos para  $i_\psi(c^a)$  nas duas regiões variam no intervalo  $[0; 1]$  e que para qualquer valor de  $\psi(c^a)$  no intervalo  $[0; 2 \cdot \psi(c^\beta)]$ , sempre há um valor correspondente para  $i_\psi(c^a)$ , como é apresentado nos pontos (a), (c) e (b) da Figura 5.4.

### 5.3 Índice de estabilidade proposto

O **índice de estabilidade** proposto é calculado com base no diagrama-aranha, método visual de análise de sensibilidade. Na Figura 5.5 é ilustrado o diagrama-aranha referente à análise de sensibilidade do sistema com três parâmetros:  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ . O eixo das abscissas representa a variação percentual do valor de cada parâmetro em relação à seu valor de referência. O eixo das ordenadas representa o valor medido na saída do sistema para cada percentual de variação dos parâmetros. Observa-se que cada segmento de reta das curvas do diagrama-aranha apresenta ângulo de inclinação em relação ao eixo horizontal, sendo destacados os três primeiros ângulos de cada curva.

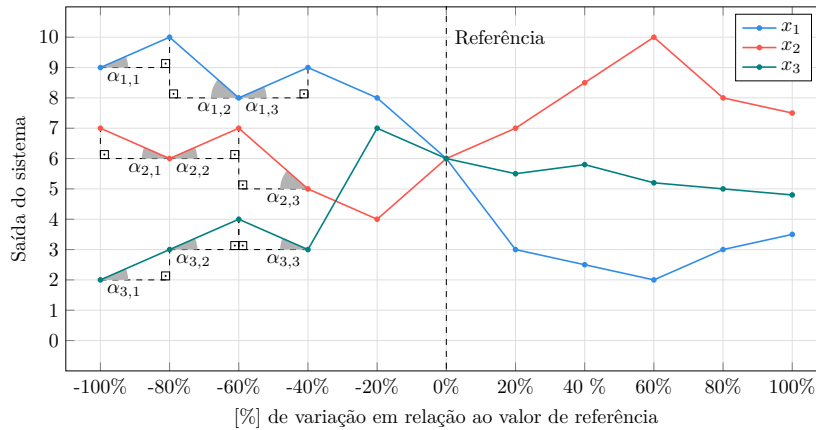


Figura 5.5 - Diagrama-aranha para sistema com três parâmetros de entrada.

A Figura 5.6 ilustra a curva do parâmetro  $x_1$ . Ao considerar segmento de reta específico é possível delimitar triângulo com ângulo  $\alpha$ , sendo seu cateto adjacente  $c_a(\alpha)$ , o módulo da distância entre  $a_1$  e  $a_2$  e seu cateto oposto  $c_o(\alpha)$ , o módulo da

distância entre  $b_1$  e  $b_2$ . O ângulo  $\alpha$  pode ser obtido através da aplicação da função arco tangente, que retorna o ângulo em graus. De maneira genérica, cada uma das  $n$ -curvas do diagrama-aranha pode ser decomposta por diferente quantidade  $p$  de pontos, que originam  $m = p - 1$  segmentos de reta. Isto ocorre porque no processo de análise de sensibilidade podem ser adotados diferentes intervalos de variação para cada parâmetro de entrada do sistema.

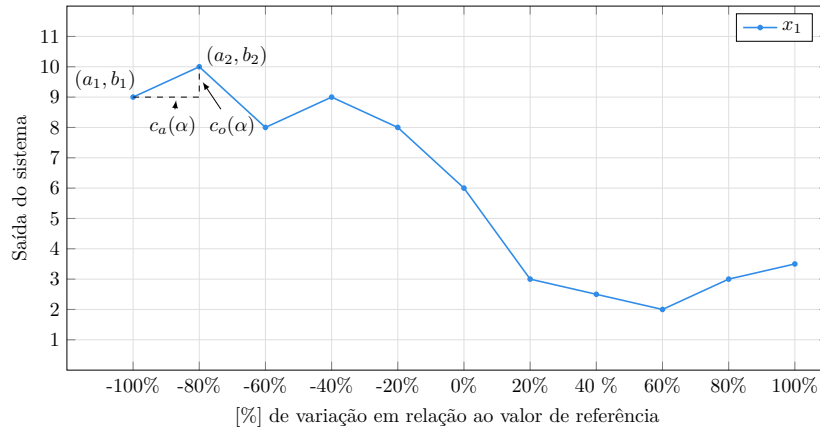


Figura 5.6 - Delimitação do ângulo de inclinação de segmento de reta.

Assim, é possível determinar para cada parâmetro de entrada  $x_i$  do sistema, o vetor  $\vec{I}_{x_i} = (\alpha_{i,1}, \alpha_{i,2}, \dots, \alpha_{i,m})$  que contém os valores em graus dos ângulos formados entre os segmentos de reta que constituem sua curva e uma linha paralela ao eixo das abscissas. Estes vetores, que podem possuir diferentes tamanhos devido à potenciais diferenças no intervalo de análise, podem ser agrupados no vetor  $\vec{I} = [\vec{I}_{x_1}, \vec{I}_{x_2}, \vec{I}_{x_3}, \dots, \vec{I}_{x_n}]$ , que contém os ângulos  $\alpha$  relativos a todas as curvas do diagrama-aranha. A obtenção de  $\vec{I}$  é a primeira ação para o cálculo do índice de estabilidade.

Para o cálculo da média angular de  $\vec{I}$  aplica-se a função arco tangente de dois parâmetros (*atan2*) na média dos senos e cossenos dos ângulos contidos em  $\vec{I}$ , dado por:

$$\alpha_{med}(I) = atan2 \left( \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j \text{sen } \alpha_i, \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j \text{cos } \alpha_i \right) \quad (5.4)$$

no qual  $\alpha_{med}(I)$  é a média angular de  $\vec{I}$ ,  $j$  é a quantidade de elementos do vetor

$\vec{T}$  e  $\alpha_i$  é o  $i$ -ésimo ângulo em  $\vec{T}$ . Considerando o limite superior  $\alpha_{max} = 90^\circ$  para os ângulos contidos em  $\vec{T}$ , é possível calcular o índice de estabilidade dividindo o módulo da diferença entre  $\alpha_{med}(I)$  e  $\alpha_{max}$  pelo valor de  $\alpha_{max}$ , dado por:

$$\xi = \frac{|\alpha_{med}(I) - \alpha_{max}|}{\alpha_{max}} \quad (5.5)$$

em que  $\xi$  é o índice de estabilidade. O valor da estabilidade é ajustado ao intervalo  $[0; 1]$  ( $0 \leq \xi \leq 1$ ), de forma que quanto maior o valor de  $\xi$  mais estável pode ser considerado o sistema em determinado cenário. Diferente do índice de complexidade que tem valor fixo, o valor do índice de estabilidade pode variar no  $c^\beta$ . A Figura 5.7 ilustra o fluxo para obtenção do índice de estabilidade proposto.

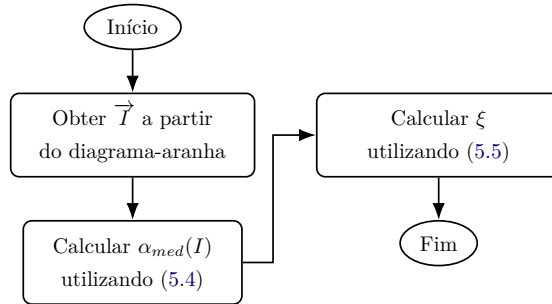


Figura 5.7 - Fluxo para obtenção do índice de estabilidade proposto.

#### 5.4 Métrica de robustez proposta

A métrica de robustez proposta reúne todos os conceitos descritos anteriormente, utilizando os valores obtidos do desempenho  $\mu$ , do índice de complexidade proposto  $i_\psi$  e do índice de estabilidade proposto  $\xi$ . A Figura 5.8 ilustra o fluxo para obtenção da robustez, sendo destacados na cor cinza os passos nos quais são obtidos os valores de cada uma das três componentes. A métrica proposta é dada por:

$$\tau = f(\mu + i_\psi + \xi) \quad (5.6)$$

#### 5.5 Otimização utilizando a métrica de robustez

O processo de otimização determina valores para os parâmetros de determinado cenário  $c^a$  e os apresenta ao simulador, que determina desempenho  $\mu(c^a)$ , índices de

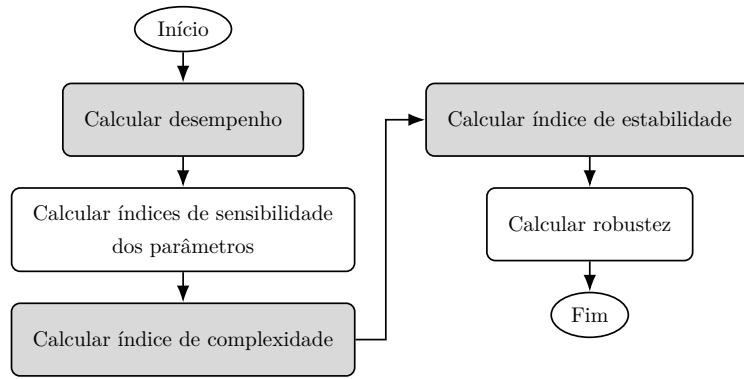


Figura 5.8 - Fluxo para obtenção da métrica de robustez proposta.

complexidade natural  $i_\psi(c^a)$  e estabilidade  $\xi(c^a)$ . Neste processo, o valor de  $\tau(c^a)$  em (5.6) é considerado a função de avaliação  $f_{aval}$  do processo de otimização. Considerando valores no intervalo  $[0; 1]$  para cada componente da métrica de robustez, tem-se que o maior valor possível é  $f_{aval} = 3$ . Considerando que para os valores de  $\mu(c^a)$ ,  $i_\psi(c^a)$  e  $\xi(c^a)$ , quanto maior melhor, pode-se definir o problema como de maximização. Utilizando (5.7), pode-se transformar o problema de maximização em minimização.

$$\lim_{f_{aval} \rightarrow \infty} \frac{1}{f_{aval}} = 0 \quad (5.7)$$

Desta forma, define-se a  $f_{aval}$  como:

$$f_{aval} = \frac{1}{\tau(c^a)} \quad (5.8)$$

A Figura 5.9 ilustra o fluxo do processo de otimização, no qual, ao final do processo é obtido o cenário otimizado  $c^{a*}$ . Mesmo que o sistema não apresente os melhores valores de  $\mu$ ,  $i_\psi$  e  $\xi$  neste cenário, quando são utilizados os valores otimizados para os parâmetros de entrada, o sistema é conduzido à operar de maneira robusta, contemplando em conjunto aspectos de desempenho, complexidade e estabilidade.

## 5.6 Modelos para aplicação da metodologia

Os estudos de casos são realizados com três modelos de sistemas reais. O primeiro modelo apresentado refere-se ao sistema de unidade de terapia intensiva (UTI). O segundo modelo é referente ao sistema de escalonamento de processos e o terceiro

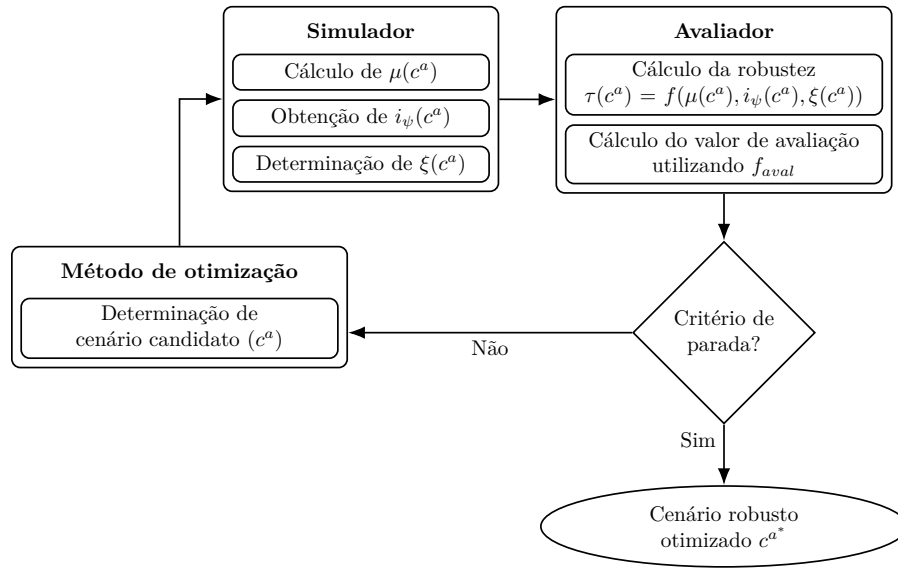


Figura 5.9 - Fluxo do processo de otimização com base em métrica de robustez.

modelo é referente ao sistema de tração e frenagem de veículos elétricos.

### 5.6.1 Modelo do sistema de unidade de terapia intensiva

A **unidade de terapia intensiva** (UTI) consiste em espaço dedicado à pacientes que demandam supervisão e cuidados hospitalares constantes. Além de profissionais da área de saúde, este ambiente conta com equipamentos capazes de auxiliar o funcionamento dos sistemas vitais do corpo humano enquanto enfermidades severas são tratadas (CFM, 2014; PADILHA et al., 2016; MARSHALL et al., 2017). Na UTI podem ocorrer casos de eventos adversos, que implicam em prolongamento do tempo de hospitalização, invalidez ou morte, ocasionado por imperícia, negligência ou acidentes na administração dos cuidados da saúde (PEDREIRA et al., 2013). Quando ocorrem eventos adversos o sistema de UTI é onerado como todo, pois são incrementados custos financeiros e psicológicos. O modelo de sistema de UTI é o descrito por Gomes (2020).

A Figura 5.10, adaptada de Gomes (2020), ilustra o fluxo dos pacientes na UTI. Quando uma vaga na UTI é solicitada, o paciente aguarda em fila FIFO (*First In, First Out*) com prioridades até que os recursos necessários estejam disponíveis e o médico intensivista confirme sua admissão. Em caso de aceite, os recursos são alocados ao paciente, que adentra ao sistema. Em caso de recusa, a solicitação de vaga é cancelada. Quando o paciente recebe alta médica, tanto por óbito quanto por recuperação, os recursos são desalocados.

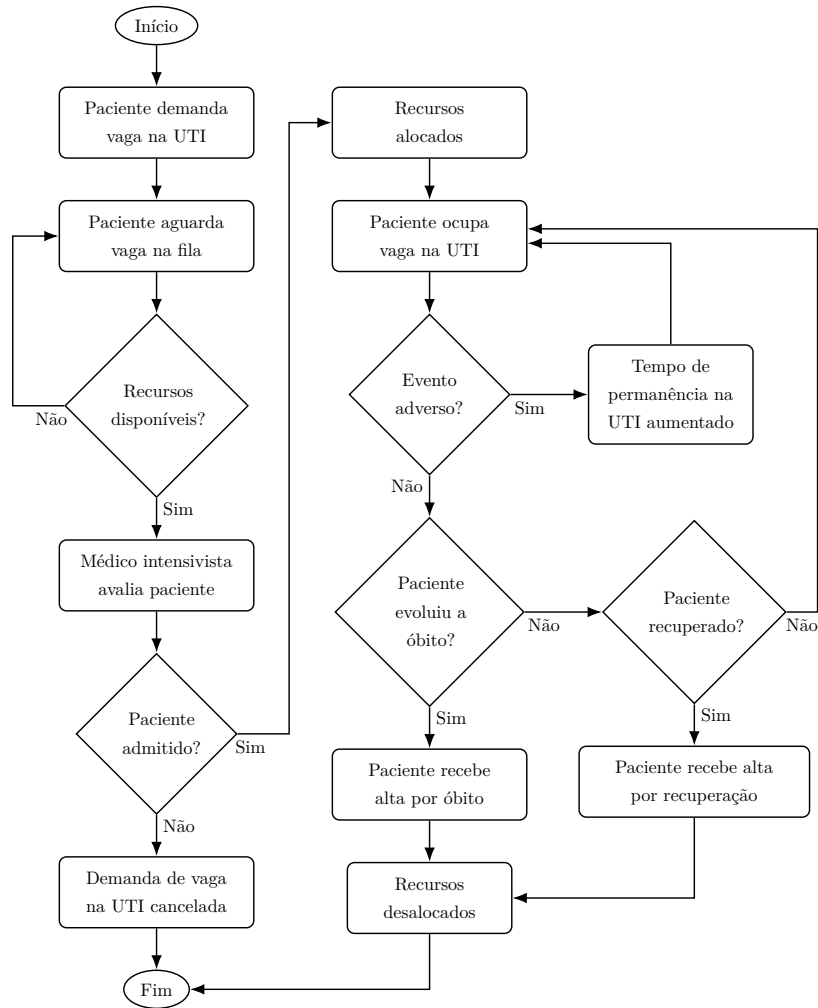


Figura 5.10 - Fluxo dos pacientes no modelo de UTI.

Os parâmetros considerados neste modelo de UTI são: i) número de leitos, ii) percentual de insumos, iii) percentual de equipe médica, iv) taxa de chegada e v) taxa de eventos adversos. O desempenho do modelo de UTI pode ser calculado pela relação entre o número de admissões  $n_a$ , o tempo médio de internação  $t_s$ , número médio de pacientes na fila  $n_{pf}$  e o número médio de leitos em uso  $n_l$ , dado por Gomes (2020):

$$\mu(U) = \frac{1}{4} \cdot \left( 2 + \frac{n_a}{n_{a_{ref}}} - \frac{n_{pf}}{n_{pf_{ref}}} + \frac{n_l}{n_{l_{ref}}} - \frac{t_s}{t_{s_{ref}}} \right) \quad (5.9)$$

na qual  $\mu(U)$  é o desempenho do sistema de UTI,  $n_{a_{ref}}$ ,  $t_{s_{ref}}$ ,  $n_{pf_{ref}}$  e  $n_{l_{ref}}$  representam valores de referência de  $n_a$ ,  $t_s$ ,  $n_{pf}$  e  $n_l$ , respectivamente. Para determinação da complexidade do sistema de UTI consideram-se as relações entre os pacientes e seus elementos. A Figura 5.11, adaptada de Gomes (2020), ilustra como são modeladas

as relações através de conexões. Considera-se que cada paciente esperando na fila de admissão da UTI acrescenta uma conexão ao sistema. Quando o paciente adentra à UTI, são consideradas três conexões: uma com o leito, uma com os insumos e uma com a equipe médica. Se o paciente for afetado por evento adverso durante a internação, mais uma conexão é considerada.

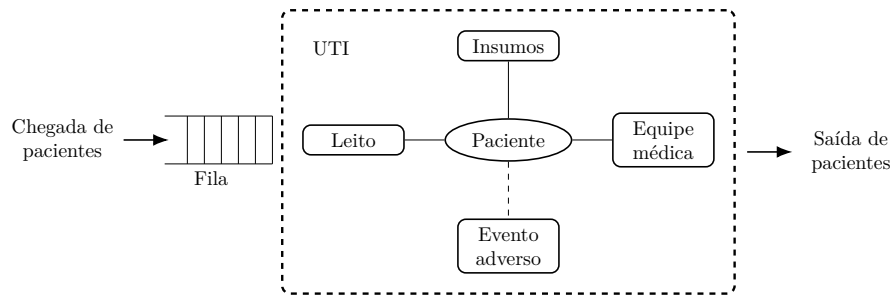


Figura 5.11 - Relações entre elementos da UTI modeladas por conexões.

### 5.6.2 Modelo do sistema de escalonamento de processos

O **sistema de escalonamento de processos** é a parte do sistema operacional que coordena a execução dos processos durante a utilização do computador (STALLINGS, 2003; TANENBAUM, 2016). Para a modelagem do sistema é utilizada teoria de sistemas a eventos discretos considerando os processos como entidades, que utilizam os seguintes recursos: i) CPU, ii) memória RAM, iii) dispositivos de entrada/saída e discos rígidos ou HD. É utilizado o conceito de *quantum*, que determina o tempo máximo de utilização de CPU permitido por processo (TANENBAUM, 2016). Quando o tempo de utilização da CPU pelo processo atinge o valor do *quantum*, sua execução é interrompida. O processo interrompido deve aguardar nova oportunidade para utilizar a CPU.

O fluxo ilustrado na Figura 5.12, representa a dinâmica do sistema. Os primeiros passos são: i) criação do processo, ii) espera da disponibilidade de memória RAM em fila FIFO, iii) espera da disponibilidade de CPU em fila FIFO ordenada por prioridades e iv) a execução do processo na primeira posição da fila até que o valor do *quantum* seja atingido ou até que necessite utilizar dispositivo de entrada/saída ou disco ou até que sua demanda por CPU seja atendida.

Considerando o fluxo ilustrado na Figura 5.12, tem-se: i) se a execução do processo terminar por conta da necessidade de utilização do dispositivo de entrada/saída ou disco, o processo é encaminhado para a fila do recurso correspondente, ii) quando o

dispositivo de entrada/saída ou o disco se tornam disponíveis, o primeiro processo em suas respectivas filas utiliza o recurso e iii) tanto os processos que finalizam a execução por terem atingido o *quantum*, quanto os que terminam a utilização dos dispositivos de entrada/saída ou discos são direcionados novamente para a fila de processos que aguardam a disponibilidade da CPU.

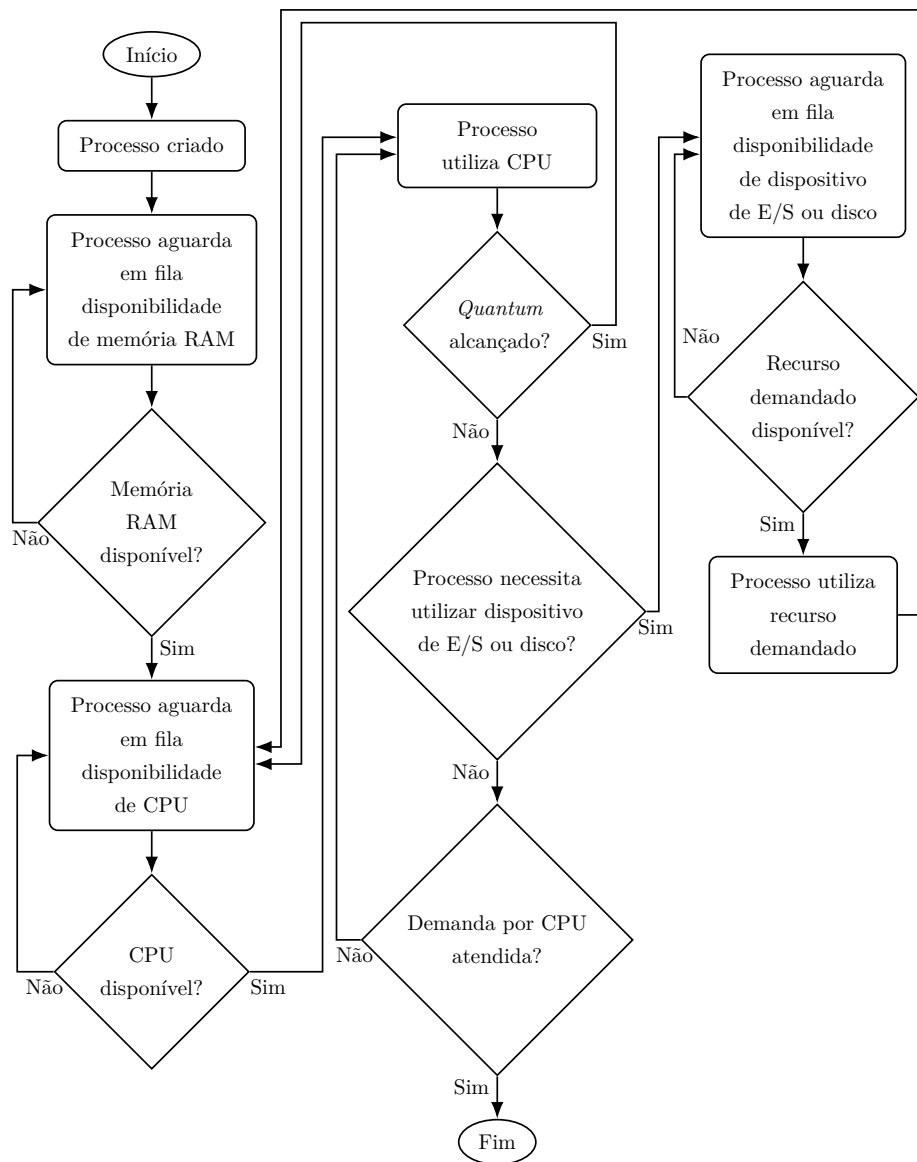


Figura 5.12 - Fluxo do modelo de escalonamento de processos.

São definidos os estados para os processos: i) criado, ii) em fila para utilização de memória RAM, iii) em fila para utilização de CPU, iv) em fila para utilização de dispositivo de entrada/saída ou disco, v) utilizando CPU, vi) utilizando dispositivo

de entrada/saída ou disco e vii) finalizado. Os eventos modelados são: i) criação de processo, ii) alocação de memória RAM, iii) utilização de CPU, iv) utilização de dispositivo de entrada/saída ou disco, v) interrupção de processamento por esgotamento de *quantum*, vi) interrupção de processamento para acesso à dispositivo de entrada/saída ou disco, vii) finalização de processo, viii) desalocação de memória RAM, ix) desalocação de CPU e x) desalocação de dispositivo de entrada/saída ou disco.

Os parâmetros modelados são: i) número de CPU, ii) quantidade de memória RAM, iii) número de dispositivos de entrada, iv) número de dispositivos de saída e v) número de discos. Diferente das métricas usuais, a métrica proposta para o cálculo do desempenho do sistema de escalonamento de processos tem por base: i) a relação quantidade de trabalho demandado  $\times$  quantidade de trabalho finalizado por Lynch (1972) e Sacha (1995), ii) o percentual de utilização dos recursos: CPU por Kung et al. (2003) e Menezes et al. (2005), memória RAM por Chen e Bershad (1993) e Kayande e Shrawankar (2012), dispositivos de entrada e de saída por Page (1972) e Priem e Rosenthal (1997) e discos por Katz et al. (1989) e Guo et al. (2019) e iii) o tempo de espera dos processos nas filas do sistema por Cutler e Lenzmeier (1998), Bohm et al. (2004), Pierre (2006) e Shah et al. (2009). Assim, o desempenho do sistema de escalonamento de processos é dado por:

$$\mu(E) = \frac{1}{(2 \cdot z) + 1} \cdot \left[ \frac{p_f}{p_g} + \sum_{i=1}^z u_{r(i)} + \left( 1 - \frac{tf_{r(i)}}{\max(tf_{r(i)})} \right) \right] \quad (5.10)$$

na qual  $\mu(E)$  é o desempenho,  $p_f$  é o número de processos finalizados e  $p_g$  é o número de processos gerados durante a simulação,  $z$  é o número de recursos do sistema,  $u_{r(i)}$  é o percentual de utilização do  $i$ -ésimo recurso do sistema,  $tf_{r(i)}$  é o tempo médio de espera em fila para utilização do  $i$ -ésimo recurso do sistema e  $\max(tf_{r(i)})$  é o maior tempo médio de espera em fila para a utilização do  $i$ -ésimo recurso do sistema.

A Figura 5.13 ilustra de forma hipotética o fluxograma do modelo de escalonamento de processos, no qual existem nove processos no sistema:  $P_1$  à  $P_9$ . Quando um processo está utilizando CPU, dispositivos de entrada, dispositivos de saída ou discos, processos  $P_1$  à  $P_4$ , com conexões  $C_1$  à  $C_8$ , são contabilizadas duas conexões por processo: uma com o recurso e uma com a memória RAM. Se o processo está aguardando em fila a liberação de algum recurso, exceto a memória RAM, também são contabilizadas duas conexões por processo: uma com a fila do dispositivo requerido

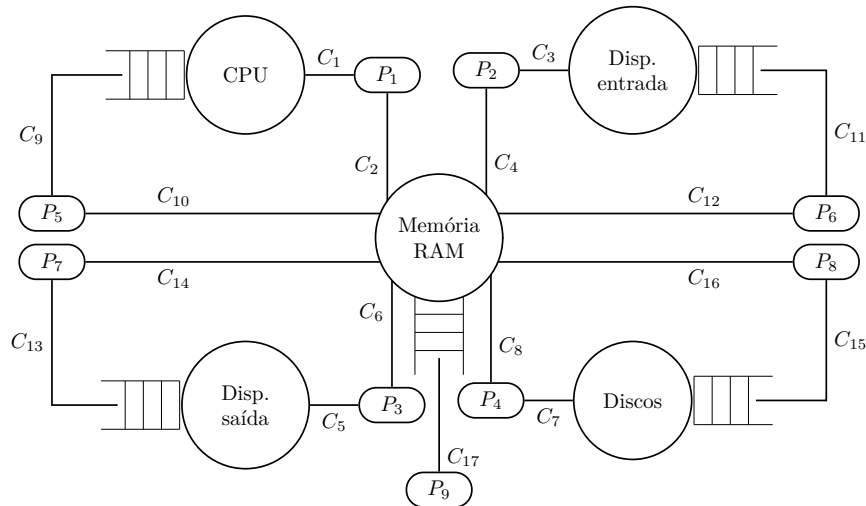


Figura 5.13 - Ilustração hipotética do sistema de escalonamento com nove processos.

e uma com a memória RAM, processos  $P_5$  à  $P_8$ , com conexões  $C_9$  à  $C_{16}$ . Ainda, se o processo estiver aguardando em fila a liberação de memória RAM, processo  $P_9$ , com conexão  $C_{17}$ , é contabilizada apenas uma conexão.

### 5.6.3 Modelo do sistema de tração e frenagem de veículos elétricos

O sistema de **tração e frenagem do veículo elétrico (VE)** representa uma das áreas de investigação para conservar energia e melhorar o rendimento das baterias. A Figura 5.14 ilustra os componentes e conexões considerados na modelagem deste sistema com uma máquina elétrica. Próximas a cada conexão constam as representações: i) **C**, conexão de controle entre componentes, ii) **CC** e **CA**, conexões elétricas em corrente contínua e corrente alternada, respectivamente, e iii) **T**, conexão de torque.

Na Figura 5.14, o fluxo na cor azul ocorre devido a tração do VE, situação na qual o pedal do acelerador se comunica com o controlador do sistema que informa o nível desejado ao inversor CC/CA. A corrente alternada é fornecida à máquina elétrica, que neste momento opera como motor. Por fim, a potência da máquina elétrica, convertida em torque, é transferida para as rodas do VE. O fluxo na cor vermelha ocorre devido a frenagem, situação na qual o pedal do freio se comunica com o controlador do sistema que informa ao sistema de frenagem regenerativa o nível desejado. Durante a frenagem, a energia cinética proveniente do movimento inercial das rodas força a máquina elétrica a girar no sentido contrário, fazendo com que a mesma opere como gerador, recarregando as baterias. O fluxo na cor verde ocorre devido ao carregamento das baterias por fonte externa de energia.

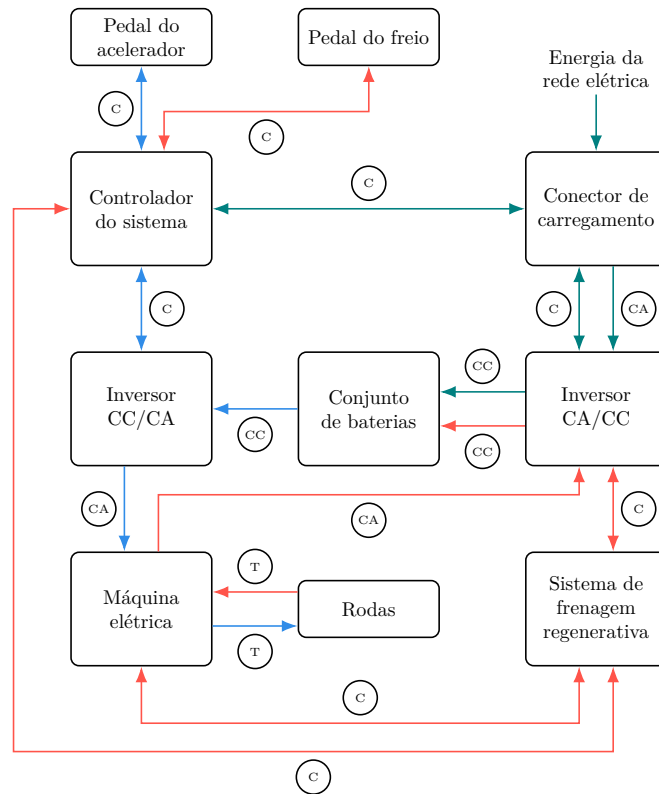


Figura 5.14 - Componentes considerados na modelagem do sistema de tração e frenagem de veículos elétricos.

Considerando a direção das setas na Figura 5.14, quando está sendo realizada tração, sete conexões acontecem no sistema. Quando ocorre frenagem, acontecem onze conexões. Se o VE possuir mais que uma máquina elétrica e os modos de condução urbano ou esportivo forem ativados em algum momento da simulação, devem ser contabilizadas as conexões entre as máquinas adicionais e seus elementos adjacentes. Desta maneira, se o VE estiver realizando tração devem ser consideradas mais duas (modo de condução urbano) ou seis (modo de condução esportivo) conexões. Se o VE estiver realizando frenagem regenerativa e os modos de condução urbano ou esportivo estiverem ativados, devem ser contabilizadas mais quatro ou doze conexões, respectivamente. Quando o sistema está em modo de recarga de bateria por fonte externa, são contabilizadas sete conexões.

Quando são utilizadas duas ou quatro máquinas elétricas, cada uma é instalada sobre um eixo do veículo ou sobre as rodas, respectivamente. O VE modelado possui os seguintes modos de condução: i) econômico, no qual apenas uma máquina elétrica é ativada, ii) urbano, no qual duas máquinas são ativadas e iii) esportivo, no qual quatro máquinas são ativadas. O fluxograma de ações modelado para o sistema de

tração e frenagem de VE é ilustrado na Figura 5.15.

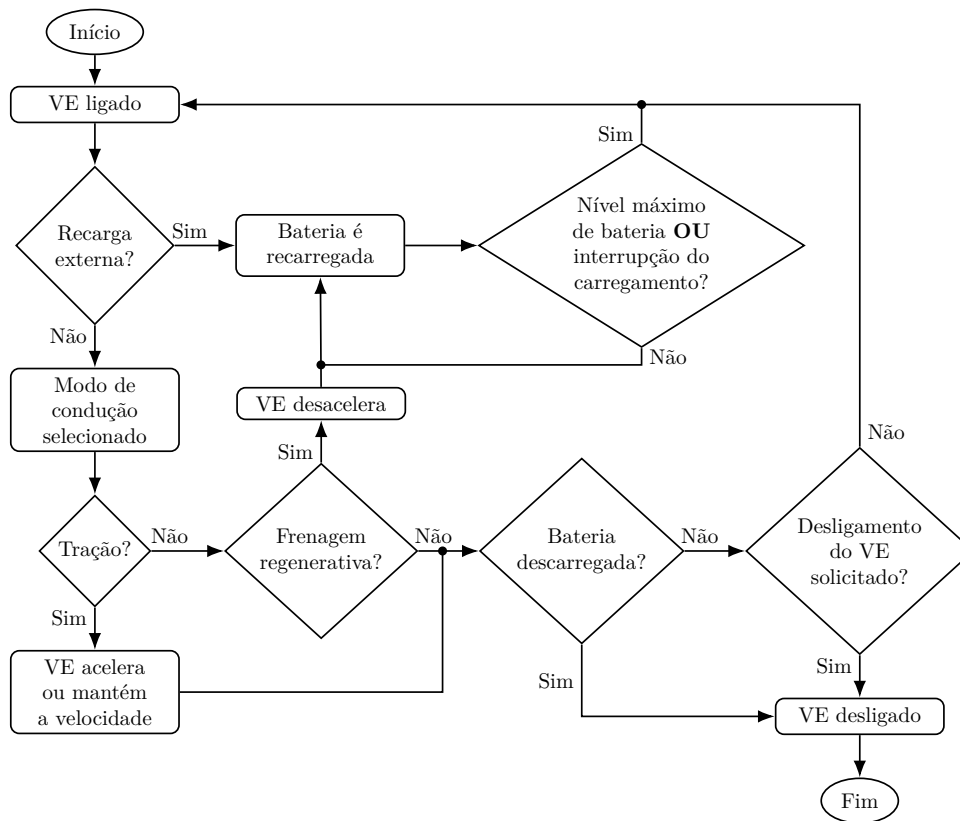


Figura 5.15 - Fluxo do modelo de tração e frenagem de veículos elétricos.

Na modelagem são considerados os estados: i) em tração, ii) em frenagem, iii) em recarga de bateria por fonte externa e iv) desligado. Os eventos modelados são: i) acionamento do VE, ii) recarga do conjunto de baterias por fonte externa, iii) seleção de modo de condução, iv) realização de tração, v) realização de frenagem regenerativa, vi) interrupção de recarga do conjunto de baterias por fonte externa, vii) desligamento do VE por falta de carga de bateria e viii) desligamento do VE por solicitação do motorista. O movimento do VE é influenciado pelas forças: i) resistência ao rolamento, ii) resistência aerodinâmica, iii) resistência ao aclone e iv) resistência às forças de inércia.

Os parâmetros modelados são: i) potência das baterias, ii) potência da máquina elétrica e iii) número de máquinas elétricas. Após simulado o modelo, o desempenho do sistema é calculado com base no consumo da bateria e na autonomia do VE, dado por:

$$\mu(V) = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{c_{med}}{c_{max}} + \frac{a_r}{a_{ref}} \right) \quad (5.11)$$

na qual  $\mu(V)$  é o desempenho do sistema de tração e frenagem de VE,  $c_{med}$  é o consumo médio de bateria do VE no trajeto,  $c_{max}$  é o consumo máximo de bateria registrado durante o trajeto,  $a_r$  é a autonomia do VE, calculada com base no nível restante da bateria e no consumo médio e  $a_{ref}$  é a autonomia de referência definida pelo fabricante do VE.

## 5.7 Considerações

A métrica de robustez avalia o sistema/modelo de maneira multidimensional pois considera em conjunto desempenho, complexidade e estabilidade. Assim, o comportamento da robustez pode ser analisado quando são utilizadas configurações de parâmetros diferentes das do  $c^\beta$ . No próximo capítulo são apresentados os resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta nos três modelos descritos.



## CAPÍTULO 6

### RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos após aplicação da metodologia proposta aos modelos de UTI, de escalonamento de processos e de tração e frenagem de veículos elétricos. Após a apresentação dos resultados é realizada discussão do trabalho sob perspectiva de sua totalidade.

#### 6.1 Exposição do fluxo dos resultados

A Figura 6.1 representa o fluxo utilizado para a exposição dos resultados relativos a cada modelo estudado. Inicialmente, o cenário base  $c^\beta$  de cada modelo é apresentado. Na sequência, são determinadas as configurações de cada modelo, relativas a especificações mantidas constantes em todas as simulações. Após definição das configurações, é realizado o processo de otimização com base na métrica de robustez proposta e os cenários otimizados são apresentados. Por fim, é realizada a análise dos cenários para cada modelo.

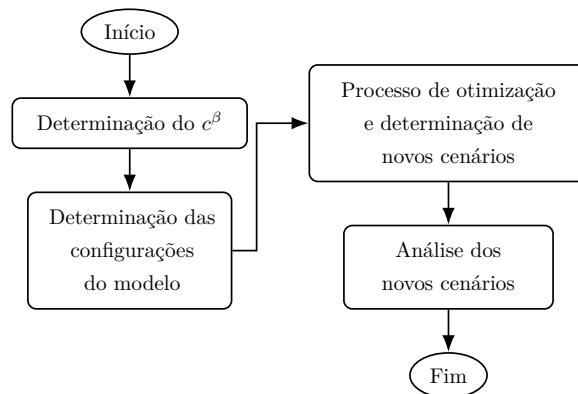


Figura 6.1 - Fluxo dos resultados para cada modelo estudado.

#### 6.2 Determinação do $c^\beta$ e parametrização do modelo de UTI

O caso base  $c^\beta$  considerado para o problema da Unidade de Terapia Intensiva (UTI) foi proposto por Gomes (2020), com a configuração:  $c^\beta = (10, 100, 105, 12, 36)$ . Desta forma, considera-se que quando o modelo de UTI opera com 10 leitos, 100% de insumos, 105% de equipe médica (100% + 5% levando em consideração pequena sobreposição de turnos em casos específicos), taxa de eventos adversos de 12% e taxa de chegada de 36 horas é caracterizada operação regular. O valor de desempenho

calculado para o  $c^\beta$  foi  $\mu = 0,7288$ , sendo a média dos valores de desempenho obtidos em 100 replicações de simulação, considerando a expressão (5.9).

As simulações realizadas com o modelo de UTI levaram em consideração as mesmas configurações adotadas por Gomes (2020). Para cada paciente que chegava à UTI, nos 365 dias de simulação considerados, foi atribuída prioridade, sendo que: 35% dos pacientes possuíam **Prioridade 1**, 50% **Prioridade 2**, 7% **Prioridade 3**, 7% **Prioridade 4** e 1% **Prioridade 5**. Os pacientes aguardaram atendimento em fila do tipo FIFO ordenada seguindo as prioridades dos pacientes, de **Prioridade 1** até **Prioridade 5**. Quando havia disponibilidade de recursos, o primeiro paciente da fila era avaliado pelo médico intensivista, com taxa de recusa à admissão de 10%, situação na qual sequer adentrava à sala da UTI. Quando o paciente é aceito, são alocados: i) um leito, ii) de 6% a 12% do total de insumos, seguindo distribuição uniforme  $U(6; 12)$  e iii) de 6% a 12% da carga horária da equipe médica, seguindo também distribuição uniforme  $U(6; 12)$ .

O tempo médio de permanência dos pacientes na UTI, em dias, é definido de acordo com a prioridade. Considerando distribuição normal, os seguintes parâmetros foram adotados: **Prioridade 1** com  $N(8; 3)$ , **Prioridade 2** com  $N(5; 2)$ , **Prioridade 3** com  $N(7; 1)$ , **Prioridade 4** com  $N(7; 1)$  e **Prioridade 5** com  $N(30; 7)$ . Define-se que durante a estadia na UTI, cada paciente envolvido em ocorrência de evento adverso tem o tempo de permanência acrescido entre 15 dias a 45 dias, seguindo distribuição uniforme  $U(15; 45)$ , sendo a possibilidade de óbito de 20%. Seja por óbito ou recuperação, quando o paciente sai da UTI os recursos a ele alocados são liberados, sendo o paciente que recebe alta médica classificado como: i) recuperado sem histórico de evento adverso, ii) falecido sem histórico de evento adverso, iii) recuperado com histórico de evento adverso e iv) falecido com histórico de evento adverso.

### 6.2.1 Métrica proposta para o modelo de UTI

A aplicação da métrica de robustez proposta ao modelo de UTI permitiu realizar estudos relativos ao dimensionamento dos recursos da unidade: leitos  $n_L$ , insumos  $p_I$  e equipe médica  $p_{EQ}$ , utilizados para suprir a demanda por atendimento, estabelecida pelas taxas de chegada de pacientes  $t_C$  e de eventos adversos  $t_{EA}$ . A aplicação da métrica também permitiu verificar o comportamento da robustez quando foram variados os valores dos parâmetros. A variação da robustez tem relação com: i) o número de admissões na unidade, o tempo de internação, o tamanho da fila de admissão e o quantitativo de leitos em uso, ii) a dinâmica da unidade, levando em

consideração suas conexões e iii) a capacidade de manutenção de equilíbrio quando são alterados o quantitativo de recursos hospitalares e as taxas que determinam a demanda por atendimento.

Buscando obter cenários com maior robustez que o  $c^\beta$ , foi realizado processo de otimização utilizando o algoritmo PSO com enxame de 20 partículas, considerando (5.8). Os limites inferiores e superiores utilizados para os valores dos parâmetros na otimização foram dados por:

$$M_{lim} = \begin{bmatrix} n_{L_l} & n_{L_u} \\ p_{I_l} & p_{I_u} \\ p_{EQ_l} & p_{EQ_u} \\ t_{EA_l} & t_{EA_u} \\ t_{C_l} & t_{C_u} \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

na qual  $n_{L_l}$  e  $n_{L_u}$  são os limites de  $n_L$ ,  $p_{I_l}$  e  $p_{I_u}$  são os limites de  $p_I$ ,  $p_{EQ_l}$  e  $p_{EQ_u}$  são os limites de  $p_{EQ}$ ,  $t_{EA_l}$  e  $t_{EA_u}$  são os limites de  $t_{EA}$  e  $t_{C_l}$  e  $t_{C_u}$  são os limites de  $t_C$ , dispostos na Tabela 6.1, no qual o subíndice  $l$  indica o limite inferior e o subíndice  $u$  indica o limite superior.

Tabela 6.1 - Limites inferiores e superiores utilizados para os valores dos parâmetros na otimização do modelo de UTI.

Parâmetro	Limites	
$n_L$	$n_{L_l}$	$n_{L_u}$
	1	20
$p_I$	$p_{I_l}$	$p_{I_u}$
	15	200
$p_{EQ}$	$p_{EQ_l}$	$p_{EQ_u}$
	15	200
$t_{EA}$	$t_{EA_l}$	$t_{EA_u}$
	5	24
$t_C$	$t_{C_l}$	$t_{C_u}$
	15	50

As condições de parada consideradas no processo de otimização foram o número de iterações do método  $n_{iter} = 100$  ou o valor da função de avaliação  $f_{aval} < 10^{-6}$ . O coeficiente de inércia  $w$  foi calculado a cada iteração do método, com base em (2.3), considerando  $w_{max} = 1,2$  e  $w_{min} = 0,9$ . Quanto aos coeficientes de aceleração

das partículas, o valor adotado para o termo cognitivo  $c_1 = 1,5$  e para o termo social  $c_2 = 0,5$ . A escolha de maior valor para o termo cognitivo em relação ao termo social se deve à natureza do problema de otimização do modelo de UTI, que apresenta espaço de busca multimodal, em que podem existir várias soluções com avaliações próximas ao ótimo.

O cálculo dos valores de cada componente da métrica foi realizado durante a otimização, permitindo obter o valor da robustez de cada cenário avaliado. O desempenho foi calculado utilizando (5.9), sendo realizadas 100 replicações para cada cenário. Para calcular a complexidade dos cenários avaliados durante a otimização, foi necessário obter os índices de sensibilidade considerando cada cenário, as probabilidades de ocorrência de cada tipo de conexão e seus respectivos fatores de relevância.

Os índices de sensibilidade de cada cenário foram calculados considerando: i) os valores dos parâmetros do cenário como valores de referência, ii) a faixa de variação de  $[-90\%; 100\%]$  para os valores dos parâmetros, restringidos pelos limites inferiores e superiores dispostos na Tabela 6.1 e iii) o intervalo de análise  $[-90\%; 100\%]$ . Para cada cenário avaliado foram adotadas as probabilidades de conexão  $P(c)$  dispostas na Tabela A.1. Na Tabela A.2 estão dispostos os fatores de relevância  $\gamma$  de cada tipo de conexão do modelo, em que  $S_C^a$ ,  $S_L^a$ ,  $S_I^a$ ,  $S_{EQ}^a$  e  $S_{EA}^a$  são os índices de sensibilidade relativos aos parâmetros do modelo. O cálculo da complexidade dos cenários foi realizado considerando as probabilidades dispostas na Tabela A.1, ponderadas pelos fatores de relevância dispostos na Tabela A.2. Para calcular o índice de complexidade de cada cenário foram considerados (5.2) e (5.3). Utilizando (5.5) foram calculados os índices de estabilidade de cada cenário avaliado durante a otimização.

O melhor enxame obtido após o término do processo de otimização, está disposto na Tabela B.1. Cada partícula  $c^{ai}$  do enxame, com  $i = 1, 2, \dots, 20$ , foi considerada representação de determinado cenário distinto. Os valores de desempenho, dos índices de sensibilidade, do índice de complexidade, do índice de estabilidade e da robustez de cada cenário estão dispostos nas Tabela B.2 até Tabela B.6, respectivamente. Foram encontrados cinco cenários com maior  $\tau$  que a registrada para o  $c^\beta$ , com quantitativo de recursos disposto na Tabela 6.2.

### 6.2.2 Análise dos cenários para o modelo de UTI

O caráter multidimensional da métrica de robustez permite a realização de estudos quantitativos que consideram apenas a robustez e qualitativos, que consideram o valor de cada componente da métrica. A Figura 6.2 apresenta no eixo das abscissas

Tabela 6.2 - Quantitativo de recursos dos cenários com maior  $\tau$  que a registrada no  $c^\beta$  para o modelo de UTI.

Leitos	Insumos	Equipe	E.A. [%]	Tx. chegada [h]	$\tau$
13	122	97	11	35	0,8912
11	127	141	11	30	0,8912
11	138	137	10	39	0,8897
9	130	122	9	37	0,8803
12	109	112	10	28	0,8803

o quantitativo de recursos dos oito cenários com maior valor de robustez encontrados após o processo de otimização para o modelo de UTI. O eixo das ordenadas representa os valores de desempenho  $\mu$ , índice de complexidade  $i_\psi$ , índice de estabilidade  $\xi$  e robustez  $\tau$  de cada cenário.

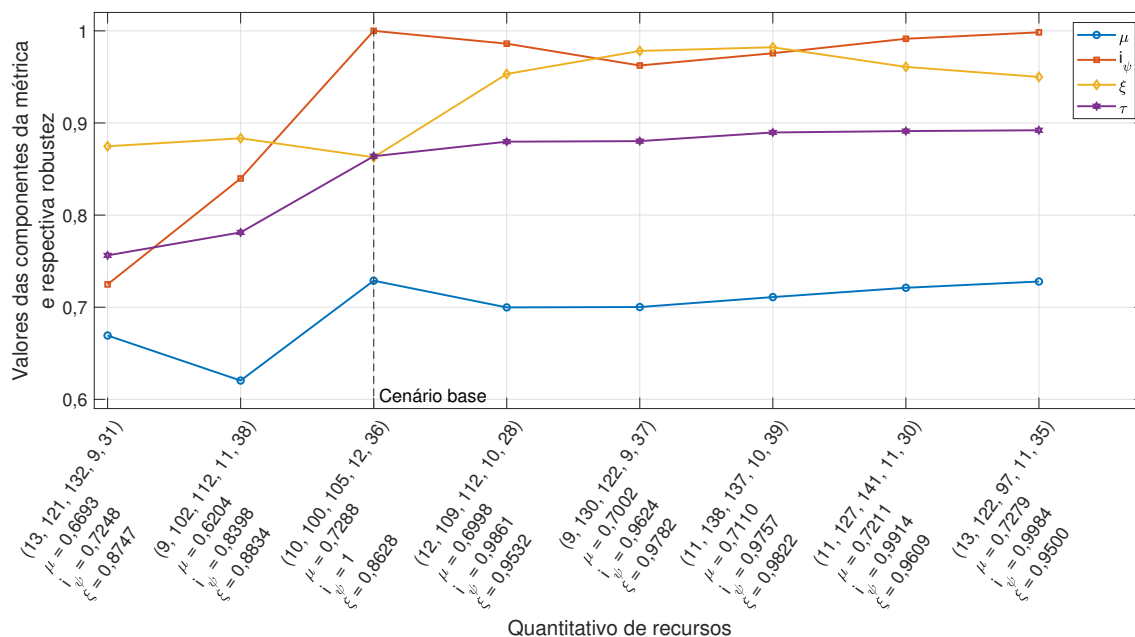


Figura 6.2 - Valores das componentes da métrica e de robustez  $\times$  quantitativo de recursos para o modelo de UTI.

Considerando a análise quantitativa, observa-se que o maior valor de  $\tau$  foi relativo ao cenário (13, 122, 97, 11, 35). O segundo, terceiro, quarto e quinto maiores valores de  $\tau$  foram os dos cenários (11, 127, 141, 11, 30), (11, 138, 137, 10, 39), (9, 130, 122, 9, 37) e (12, 109, 112, 10, 28), respectivamente. Nota-se que os valores de  $\tau$  calculados para os cenários com maior valor de robustez que o  $c^\beta$  foram próximos e os valores de  $\mu$ ,  $i_\psi$  e  $\xi$  foram variáveis. Diante da variação de valores das componentes da métrica, realiza-se a análise qualitativa.

Na análise qualitativa, observa-se que o valor de desempenho do  $c^\beta$  foi o maior obtido e neste cenário a UTI atendeu satisfatoriamente a demanda de pacientes, utilizando os recursos hospitalares disponíveis de maneira adequada. Os valores de  $\mu$  medidos nos cenários com maior  $\tau$  que o registrado para o  $c^\beta$  foram ligeiramente menores que o valor de  $\mu$  medido no  $c^\beta$ , com baixo incremento na medida em que  $\tau$  aumenta. Os três cenários com valor de  $\tau$  maior que o registrado para o  $c^\beta$  com maiores valores de  $\mu$  foram (13, 122, 97, 11, 35), (11, 127, 141, 11, 30) e (11, 138, 137, 10, 39). Em cenários com altos valores de  $\mu$ : i) o número de pacientes admitidos foi alto, ii) o tempo médio de internação dos pacientes na UTI foi reduzido, iii) a quantidade de pacientes que aguardavam vaga na UTI foi reduzida e iv) a taxa de utilização dos leitos foi próxima a 85%.

Ainda realizando análise qualitativa, observa-se que o maior valor de  $i_\psi$  foi o do  $c^\beta$ , pois este cenário é a referência do índice. Os três cenários com valor de  $\tau$  maior que o registrado para o  $c^\beta$  com maiores valores de  $i_\psi$  foram (13, 122, 97, 11, 35), (11, 127, 141, 11, 30) e (12, 109, 112, 10, 28). Ao contrário do que ocorreu com os valores de  $\mu$  e  $i_\psi$ , o  $\xi$  do  $c^\beta$  foi o menor registrado. Os cenários com valor de  $\tau$  maior que o registrado para o  $c^\beta$  com maiores valores de  $\xi$  foram (11, 138, 137, 10, 39), (9, 130, 122, 9, 37) e (11, 127, 141, 11, 30).

Levando em consideração as análises quantitativa e qualitativa, os seguintes cenários se destacam: i) (12, 109, 112, 10, 28), que possui o terceiro maior  $i_\psi$ , sendo o quinto com maior valor de  $\tau$ , ii) (9, 130, 122, 9, 37), que possui o segundo maior  $\xi$ , sendo o quarto com maior valor de  $\tau$ , iii) (11, 138, 137, 10, 39), que possui o terceiro maior valor de  $\mu$  e o maior valor de  $\xi$ , sendo o terceiro com maior valor de  $\tau$ , iv) (11, 127, 141, 11, 30), que possui os segundos maiores valores de  $\mu$  e de  $i_\psi$  e o terceiro maior valor de  $\xi$ , sendo o segundo com maior valor de  $\tau$  e v) (13, 122, 97, 11, 35), que possui o maior valor de  $\mu$  e de  $i_\psi$ , sendo o que possui maior valor de  $\tau$ . Examinando os dois cenários com maiores valores de  $\tau$  foi possível observar que no cenário (11, 127, 141, 11, 30) o valor de  $\xi$  foi maior, enquanto no cenário (13, 122, 97, 11, 35) os valores de  $\mu$  e de  $i_\psi$  foram maiores. O nível de relevância atribuído a cada componente da métrica deve nortear a escolha final entre os cenários por parte do analista.

### **6.3 Determinação do $c^\beta$ e parametrização do modelo de escalonamento de processos**

Inicialmente, para o modelo de escalonamento de processos, é realizada a obtenção dos valores dos parâmetros do  $c^\beta$  utilizando processo de otimização de Monte Carlo.

Foram gerados 20.000 valores inteiros para os parâmetros: número de CPU  $n_{CPU}$ , quantidade de memória RAM  $t_{RAM}$ , número de dispositivos de entrada  $n_{DE}$ , número de dispositivos de saída  $n_{DS}$  e número de discos  $n_D$ . O desvio padrão calculado para a amostra aleatória foi de 0.2388 e a taxa total de erro  $\epsilon = 0,005$ . A métrica de desempenho é dada por (5.10) e os limites inferiores e superiores utilizados para os valores dos parâmetros na otimização foram:

$$M_{lim} = \begin{bmatrix} n_{CPU_l} & n_{CPU_u} \\ t_{RAM_l} & t_{RAM_u} \\ n_{DE_l} & n_{DE_u} \\ n_{DS_l} & n_{DS_u} \\ n_{D_l} & n_{D_u} \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

na qual  $n_{CPU_l}$  e  $n_{CPU_u}$  são os limites de  $n_{CPU}$ ,  $t_{RAM_l}$  e  $t_{RAM_u}$  são os limites de  $t_{RAM}$ ,  $n_{DE_l}$  e  $n_{DE_u}$  são os limites de  $n_{DE}$ ,  $n_{DS_l}$  e  $n_{DS_u}$  são os limites de  $n_{DS}$  e  $n_{D_l}$  e  $n_{D_u}$  são os limites de  $n_D$ , dispostos na Tabela 6.3, no qual o subíndice  $l$  indica o limite inferior e o subíndice  $u$  indica o limite superior.

Tabela 6.3 - Limites inferiores e superiores utilizados para os valores dos parâmetros na otimização de desempenho do modelo de escalonamento de processos.

Parâmetro	Limites	
$n_{CPU}$	$n_{CPU_l}$	$n_{CPU_u}$
	1	8
$t_{RAM}$	$t_{RAM_l}$	$t_{RAM_u}$
	4	64
$n_{DE}$	$n_{DE_l}$	$n_{DE_u}$
	1	4
$n_{DS}$	$n_{DS_l}$	$n_{DS_u}$
	1	4
$n_D$	$n_{D_l}$	$n_{D_u}$
	1	4

O caso base otimizado em relação ao desempenho foi  $c^\beta = (4, 32, 2, 2, 2)$ . Assim, considera-se que quatro CPU, 32 *megabytes* [MB] de memória RAM, dois dispositivos de entrada, dois dispositivos de saída e dois discos constituem o quantitativo de recursos computacionais que atendem de maneira regular a demanda para o problema. O valor de desempenho obtido para o  $c^\beta$  foi  $\mu = 0,8271$ , que representa

a média dos valores obtidos para o desempenho em 100 replicações de simulação, considerando (5.10).

As mesmas configurações para o modelo de escalonamento de processos foram mantidas em todas as simulações realizadas. Foram consideradas 24 horas de simulação e a criação de novos processos a cada 300 milissegundos em média, seguindo distribuição normal  $N(300; 60)$ . Com relação à demanda por processamento, cada processo criado necessitou utilizar a CPU por 1,2 segundos em média, considerando distribuição normal  $N(1,2; 0,36)$ . A quantidade de memória RAM necessária para alocar cada processo  $t_{RAM_{proc}}$  foi de 2MB em média, com distribuição normal  $N(2; 1)$ . A cada processo gerado foi atribuída prioridade, que define sua posição na fila FIFO de processos que aguardam disponibilidade de CPU, sendo 1% dos processos **Prioridade 1**, 7% **Prioridade 2**, 7% **Prioridade 3**, 35% **Prioridade 4**, e 50% **Prioridade 5**, considerando que a menor prioridade precede a maior prioridade.

O valor estabelecido para o tempo máximo permitido de utilização de CPU (*quantum*) por processo foi de 200 milissegundos e a probabilidade de que o processo necessite utilizar dispositivos de entrada/saída ou discos durante sua execução foi fixa em 5%. Foram consideradas distribuições normais para o tempo de utilização (em segundos) dos dispositivos de entrada, dispositivos de saída e discos pelos processos, com parâmetros  $N(3; 0,3)$ ,  $N(5; 0,5)$  e  $N(2; 0,3)$ , respectivamente.

### 6.3.1 Métrica proposta para o modelo de escalonamento de processos

A aplicação da métrica de robustez proposta ao modelo de escalonamento de processos permitiu realizar análises sobre a quantitativo de recursos computacionais necessários para suprir determinada demanda de processamento. A aplicação da métrica permitiu a análise do comportamento da robustez quando os valores dos parâmetros foram variados. A variação da robustez tem relação com: i) a quantidade de processos finalizados  $\times$  a quantidade de processos demandados, considerando a utilização de recursos e tempo em fila dos processos, ii) as conexões realizadas durante a dinâmica de escalonamento de processos e iii) à capacidade de manutenção de equilíbrio quando o poder de processamento é alterado.

Com o intuito de obter cenários com maior robustez que o  $c^\beta$ , foi realizado processo de otimização utilizando o algoritmo PSO, considerando a função de avaliação dada por (5.8). O enxame foi composto de 15 partículas e os limites inferiores e superiores utilizados para os valores dos parâmetros na otimização foram os dispostos na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 - Limites inferiores e superiores utilizados para os valores dos parâmetros na otimização do modelo de escalonamento de processos.

Parâmetro	Limites	
	$n_{CPU}$	$n_{CPU_l}$
	1	16
$t_{RAM}$	$t_{RAM_l}$	$t_{RAM_u}$
	4	128
$n_{DE}$	$n_{DE_l}$	$n_{DE_u}$
	1	8
$n_{DS}$	$n_{DS_l}$	$n_{DS_u}$
	1	8
$n_D$	$n_{D_l}$	$n_{D_u}$
	1	8

As condições de parada consideradas no processo de otimização foram o número de iterações do método  $n_{iter} = 50$  ou o valor da função de avaliação  $f_{aval} < 10^{-6}$ . O coeficiente de inércia  $w$  foi calculado a cada iteração do método, de acordo com (2.3), considerando  $w_{max} = 1,2$  e  $w_{min} = 0,9$ . Foi adotado valor igual para os coeficientes de aceleração das partículas:  $c_1 = c_2 = 2,0$ , com objetivo de estabelecer relevância similar tanto para a exploração local quanto para a global. Durante o processo de otimização, para cada cenário avaliado, foram calculados os valores das componentes da métrica e o valor da robustez. O desempenho foi calculado utilizando (5.10), sendo realizadas 100 replicações para cada cenário. Para o cálculo da complexidade dos cenários avaliados durante a otimização foi necessário obter os índices de sensibilidade considerando cada cenário e as probabilidades de ocorrência e fatores de relevância de cada tipo de conexão.

Os índices de sensibilidade de cada cenário foram calculados considerando: i) os valores dos parâmetros do cenário como valores de referência, ii) a faixa de variação de  $[-90\%; 100\%]$  para os valores dos parâmetros, restringidos pelos limites inferiores e superiores dispostos na Tabela 6.4 e iii) o intervalo de análise  $[-90\%; 100\%]$ . As probabilidades de ocorrência de cada tipo de conexão  $P(c)$  estão dispostas na Tabela A.3. A Tabela A.4 contém os fatores de relevância  $\gamma$  de cada tipo de conexão do modelo, em que  $S_{CPU}^a, S_{RAM}^a, S_{DE}^a, S_{DS}^a$  e  $S_D^a$  são os índices de sensibilidade relativos aos parâmetros do modelo.

O cálculo da complexidade dos cenários foi realizado de acordo com as probabilidades dispostas na Tabela A.3, ponderadas pelos fatores de relevância dispostos na Tabela A.4. O cálculo do índice de complexidade de cada cenário foi realizado considerando (5.2) e (5.3). O índice de estabilidade de cada cenário avaliado durante

a otimização foi calculado por (5.5). A Tabela C.1 dispõe o melhor enxame obtido após o término do processo de otimização. Foi considerado que cada partícula  $c^{a_i}$  do enxame, com  $i = 1, 2, \dots, 15$ , representava determinado cenário distinto. Os valores de desempenho, dos índices de sensibilidade, do índice de complexidade, do índice de estabilidade e da robustez de cada cenário estão dispostos nas Tabela C.2 até Tabela C.6, respectivamente. Foram encontrados seis cenários com maior  $\tau$  que a registrada para o  $c^\beta$ , com quantitativo de recursos disposto na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 - Quantitativo de recursos dos cenários com maior  $\tau$  que a registrada no  $c^\beta$  para o modelo de escalonamento de processos.

CPU	RAM [MB]	Disp. entrada	Disp. saída	Discos	$\tau$
5	37	3	2	3	0,8965
6	41	2	2	2	0,8956
5	39	2	2	3	0,8952
11	81	4	3	3	0,8887
10	28	3	3	3	0,8877
4	47	2	2	2	0,8858

### 6.3.2 Análise dos cenários para o modelo de escalonamento de processos

Levando em conta a constituição da métrica de robustez, é possível realizar análises quantitativas considerando apenas a robustez e análises qualitativas, considerando o valor de cada componente da métrica. Analisando a Figura 6.3 é possível observar que o eixo das abscissas representa o quantitativo de recursos dos oito cenários com maior valor de robustez encontrados após o processo de otimização. No eixo das ordenadas, são representados os valores de desempenho  $\mu$ , índice de complexidade  $i_\psi$ , índice de estabilidade  $\xi$  e robustez  $\tau$  de cada cenário.

Considerando a análise quantitativa, observa-se que o maior valor de  $\tau$  foi verificado no cenário (5, 37, 3, 2, 3), seguido dos cenários (6, 41, 2, 2, 2), (5, 39, 2, 2, 3) e (11, 81, 4, 3, 3). Foi possível observar que os cenários que sucedem o  $c^\beta$ , no eixo das abscissas, apresentaram valores de  $\tau$  próximos, sendo variáveis os valores de  $\mu$ ,  $i_\psi$  e  $\xi$ . Realizando análise qualitativa, observa-se que o maior valor de  $\mu$  foi obtido quando o modelo foi simulado considerando o  $c^\beta$ , situação em que atende satisfatoriamente a demanda por processamento, com utilização apropriada dos recursos computacionais disponíveis. Os valores de  $\mu$  medidos nos cenários com maior  $\tau$  que a registrada para o  $c^\beta$  foram ligeiramente menores que o  $\mu$  medido no  $c^\beta$ . Em cenários com altos valores de  $\mu$  como (5, 39, 2, 2, 3), (10, 28, 3, 3, 3) e (11, 81, 4, 3, 3): i) a ociosidade dos recursos foi baixa, ii) os tempos de permanência dos processos nas filas foram

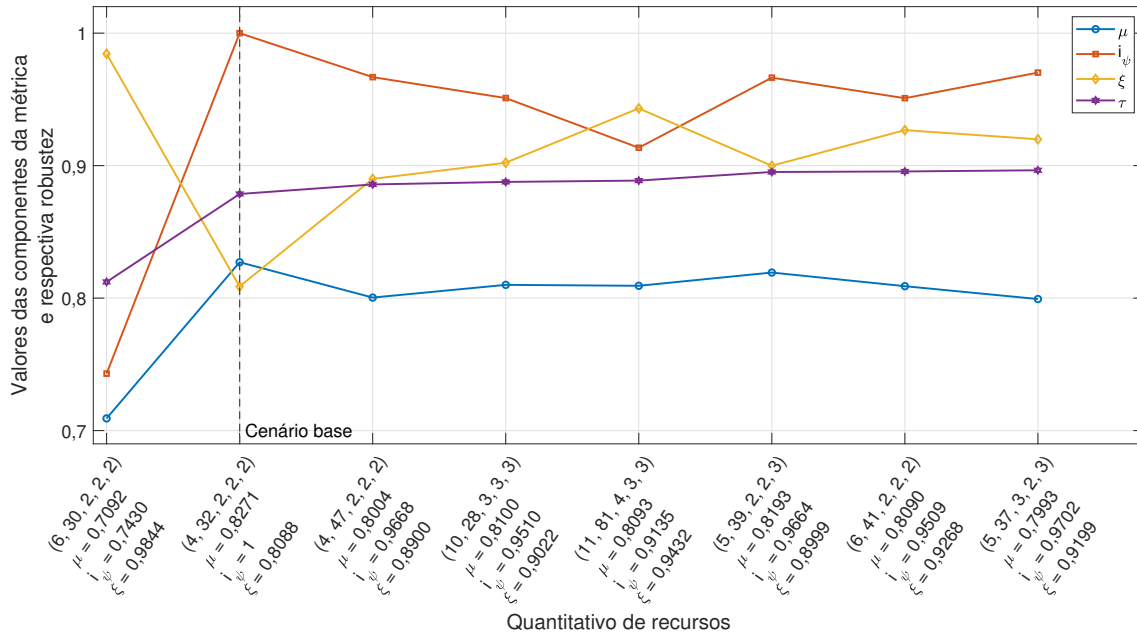


Figura 6.3 - Valores das componentes da métrica e de robustez  $\times$  quantitativo de recursos para o modelo de escalonamento de processos.

reduzidos e iii) a relação entre processos gerados e processos finalizados foi alta.

Ainda considerando análise qualitativa, observa-se que o maior valor de  $i_\psi$  foi relativo ao  $c^\beta$ , uma vez que este é considerado como a referência do índice. Os três cenários com valor de  $\tau$  maior que a registrada para o  $c^\beta$  e com maiores valores de  $i_\psi$  foram (5, 37, 3, 2, 3), (4, 47, 2, 2, 2), e (5, 39, 2, 2, 3). Sob o ponto de vista da complexidade, um dos fatores mais importantes foi o tamanho das filas para utilização dos recursos computacionais, enquanto que sob o ponto de vista do desempenho, o tempo de permanência dos processos em fila foi um dos fatores mais importantes.

Diferentemente do que ocorreu com os valores de  $\mu$  e  $i_\psi$ , o valor de  $\xi$  do  $c^\beta$  foi o menor registrado. O maior valor de  $\xi$  registrado foi o do cenário (6, 30, 2, 2, 2). Porém este cenário, além de não possuir maior valor de  $\tau$  que o registrado para o  $c^\beta$ , possui valores de  $\mu$  e de  $i_\psi$  consideravelmente menores que os do  $c^\beta$ . Os cenários com valor de  $\tau$  maior que a registrada para o  $c^\beta$  e com maiores valores de  $\xi$  foram (11, 81, 4, 3, 3), (6, 41, 2, 2, 2) e (5, 37, 3, 2, 3). Considerando em conjunto a análise quantitativa e a análise qualitativa, destacam-se os cenários: i) (11, 81, 4, 3, 3), que possui o terceiro maior valor de  $\mu$  e o maior valor de  $\xi$ , sendo o quarto com maior valor de  $\tau$ , ii) (5, 39, 2, 2, 3) que possui o maior valor de  $\mu$  e o terceiro maior valor de  $i_\psi$ , sendo o terceiro com maior valor de  $\tau$ , iii) (6, 41, 2, 2, 2), que possui o segundo

maior valor de  $\xi$ , sendo o segundo com maior valor de  $\tau$  e iv) (5, 37, 3, 2, 3), que possui o maior  $i_\psi$  e o terceiro maior valor de  $\xi$ , sendo o que possui maior valor de  $\tau$ .

Analisando os dois cenários com maiores valores de  $\tau$  foi possível constatar que no cenário (6, 41, 2, 2, 2) os valores de  $\mu$  e de  $\xi$  foram maiores, enquanto no cenário (5, 37, 3, 2, 3) o valor de  $i_\psi$  foi maior. A escolha final entre os cenários deve ser realizada com base em quais componentes da métrica são considerados mais relevantes na análise.

#### 6.4 Determinação do $c^\beta$ e parametrização do modelo de tração e frenagem de veículos elétricos

No modelo de tração e frenagem de veículos elétricos o  $c^\beta$  foi estabelecido por consulta à especialistas, que forneceram a configuração:  $c^\beta = (400, 75, 2)$ . Desta maneira, considera-se que quando o modelo é simulado levando em conta bateria de  $400kWh$ , duas máquinas elétricas que fornecem  $75cv$  cada, demanda por energia para realizar três ciclos de condução NBR6601 (ABNT, 2021) e totalizando  $53,5km$  de trajeto, o objetivo do sistema é satisfeito. No contexto do modelo de tração e frenagem de veículos elétricos, ociosidade representa situação em que o nível de bateria do veículo elétrico (VE) é superior a 50% após o percurso do trajeto e sobrecarga representa situação em que o nível de bateria após o trajeto é inferior a 8% ou quando a quantidade de energia fornecida pelo conjunto de baterias é insuficiente. Utilizando (5.11) foi calculado o desempenho para o  $c^\beta$ , com valor de  $\mu = 0,9031$ .

As simulações com o modelo de tração e frenagem de veículos elétricos foram realizadas considerando o ciclo de condução urbano estabelecido pela norma NBR6601 (ABNT, 2021), que se baseia no *Federal Test Procedure*, metodologia estadunidense denominada FTP-75 (EPA, 1975). O ciclo NBR6601 é composto por: i) fase transitória pós partida a frio, com 505 segundos de duração, distância de  $5,8km$  e velocidade média de  $41,2km/h$ , ii) fase estabilizada, com 866 segundos de duração, distância de  $6,2km$  e velocidade média de  $25,8km/h$ , iii) fase de parada, com  $\pm 10min$  de duração e iv) fase transitória pós partida quente, com 505 segundos de duração, distância de  $5,8km$  e velocidade média de  $41,2km/h$ . As velocidades máxima e média no ciclo NBR6601 são de  $91,2km/h$  e  $34,1km/h$ , respectivamente, e as acelerações mínima, média e máxima são de  $-1,5m/s^2$ ,  $0m/s^2$  e  $1,5m/s^2$ , respectivamente.

Foram consideradas a massa de  $1580kg$ , a altura de  $1565mm$ , a largura de  $1790mm$  e o comprimento de  $4480mm$  para o VE. A capacidade máxima de carga do VE

foi fixa em  $415kg$ . Com relação às probabilidades de acionamento de cada modo de condução em instante arbitrário de tempo, foram adotados os valores: 30% para modo econômico, 65% para modo urbano e 5% para modo esportivo. O acionamento de cada modo de condução depende do nível restante de bateria do VE, sendo permitido acionar o modo econômico a qualquer momento, o modo urbano apenas com nível de bateria acima de 10% e o modo esportivo apenas com nível de bateria acima de 50%. A potência considerada para os inversores CC/CA e CA/CC do VE foi de  $87kW$  e  $48kW$ , respectivamente.

A autonomia mínima de referência  $a_{ref}$  adotada foi de  $450km$ . O nível de bateria definido para o VE ao início de cada simulação foi de 100%. Para o cálculo das forças de resistência atuantes sobre o VE a cada instante de simulação, foram considerados o valor padrão de aceleração da gravidade  $9,81m/s^2$ , a soma das massas do VE e de sua capacidade máxima de carga  $1995kg$ , o diâmetro dos pneus fixo em  $647mm$ , a área frontal do veículo fixa em  $2,8m^2$  e a variação de inclinação do pavimento (em graus) segundo distribuição uniforme  $U(0; 10)$ . Em relação aos fatores atmosféricos, foram adotados  $1,22kg/m^3$  para a densidade do ar (ISO, 1975) e velocidade média de vento de  $4,5m/s$  (LIBERMAN et al., 2002). Foi utilizado o valor de 0,23 para o coeficiente de resistência aerodinâmica nas simulações realizadas, considerando VE com carroceria do tipo *hatchback* (EHSANI et al., 2018). As mesmas configurações para o modelo de tração e frenagem de veículos elétricos foram mantidas em todas as simulações realizadas.

#### 6.4.1 Métrica proposta para o modelo de tração e frenagem de veículos elétricos

Ao mensurar a robustez do modelo de tração e frenagem de veículos elétricos utilizando a métrica proposta, foi possível estudar aspectos relativos ao projeto e funcionamento do VE modelado. Sob o ponto de vista do projeto, foi possível analisar a acurácia do dimensionamento da potência das baterias  $p_B$ , da potência da máquina elétrica  $p_M$  e do número de máquinas elétricas  $n_M$ . Sob o ponto de vista do funcionamento, a análise permitiu verificar o comportamento da robustez quando os valores dos parâmetros foram variados. A variação da robustez é relacionada: i) ao consumo de bateria e autonomia do VE, ii) às conexões realizadas durante o funcionamento do VE e iii) à capacidade de manutenção de equilíbrio quando as características do VE são alteradas.

Objetivando encontrar cenários com maior valor de robustez que o calculado para o  $c^\beta$  foi realizado processo de otimização utilizando o algoritmo PSO com enxame de

15 partículas, considerando (5.8) como função de avaliação. Os limites inferiores e superiores utilizados para os valores dos parâmetros na otimização foram dados por:

$$M_{lim} = \begin{bmatrix} p_{B_l} & p_{B_u} \\ p_{M_l} & p_{M_u} \\ n_{M_l} & n_{M_u} \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

na qual  $p_{B_l}$  e  $p_{B_u}$  são os limites de  $p_B$ ,  $p_{M_l}$  e  $p_{M_u}$  são os limites de  $p_M$  e  $n_{M_l}$  e  $n_{M_u}$  são os limites de  $n_M$ , dispostos na Tabela 6.6, no qual o subíndice  $l$  indica o limite inferior e o subíndice  $u$  indica o limite superior.

Tabela 6.6 - Limites inferiores e superiores utilizados para os valores dos parâmetros na otimização do modelo de tração e frenagem de veículos elétricos.

Parâmetro	Limites	
$p_B$	$p_{B_l}$	$p_{B_u}$
	100	1000
$p_M$	$p_{M_l}$	$p_{M_u}$
	37,5	180
$n_M$	$n_{M_l}$	$n_{M_u}$
	1	4

As condições de parada adotadas para o processo de otimização foram o número de iterações do método  $n_{iter} = 50$  ou o valor da função de avaliação  $f_{aval} < 10^{-6}$ . O coeficiente de inércia  $w$  foi calculado a cada iteração do método, de acordo com (2.3), considerando  $w_{max} = 1,2$  e  $w_{min} = 0,9$ . Os valores para os coeficientes de aceleração das partículas foram  $c_1 = c_2 = 2,0$ , estabelecendo igual relevância para a exploração local e global. O cálculo dos valores de cada componente da métrica foi realizado durante a otimização, permitindo obter o valor da robustez de cada cenário avaliado. Utilizando (5.11) foi calculado o desempenho de cada cenário. Em cada simulação foram realizadas 100 replicações. Para assegurar que segunda parcela do numerador da expressão (5.11) tenha valor  $\geq 1$  foram adotadas as relações dadas por:

$$a_r = \begin{cases} a_r & se \ a_r \leq a_{ref} \\ a_{ref} & se \ a_r > a_{ref} \end{cases} \quad (6.4)$$

Para calcular a complexidade dos cenários avaliados durante a otimização, foi neces-

sário obter os índices de sensibilidade considerando cada cenário, as probabilidades de ocorrência de cada tipo de conexão e seus respectivos fatores de relevância. Os índices de sensibilidade de cada cenário foram calculados considerando: i) os valores dos parâmetros do cenário como valores de referência, ii) a faixa de variação de  $[-90\%; 100\%]$  para os valores dos parâmetros do modelo, restringidos pelos limites inferiores e superiores dispostos na Tabela 6.6 e iii) o intervalo de análise  $[-90\%; 100\%]$ . As probabilidades de ocorrência de conexão  $P(c)$  quando o VE se encontra nos estados de tração e frenagem são dispostas na Tabela A.5. Como durante o deslocamento do VE apenas os estados em tração e em frenagem ocorrem, a probabilidade do modelo estar em um destes estados é de 50%. Portanto, todas as conexões entre elementos envolvidos na tração do veículo (na cor azul da Figura 5.14) tem a mesma probabilidade de ocorrer. O mesmo raciocínio se aplica aos elementos envolvidos no processo de frenagem (na cor vermelha da Figura 5.14).

A Tabela A.6 dispõe os fatores de relevância  $\gamma$  de cada tipo de conexão do modelo, em que  $S_B^a$ ,  $S_M^a$  e  $S_{NM}^a$  são os índices de sensibilidade relativos aos parâmetros do modelo. As conexões de controle necessitam que todo o sistema modelado esteja em funcionamento, portanto, são influenciadas por todos os parâmetros e possuem fator de relevância igual a  $um$ . As conexões CC e CA são influenciadas pelo parâmetro potência elétrica fornecida pela bateria. As conexões de transferência de torque são influenciadas tanto pelo parâmetro potência mecânica fornecida pela máquina elétrica quanto pelo parâmetro número de motores elétricos. O cálculo da complexidade dos cenários foi realizado considerando as probabilidades dispostas na Tabela A.5, ponderadas pelos fatores de relevância dispostos na Tabela A.6. Para calcular o índice de complexidade de cada cenário foram considerados (5.2) e (5.3). Utilizando (5.5) foram calculados os índices de estabilidade de cada cenário avaliado durante a otimização.

Na Tabela D.1 está disposto o melhor enxame obtido após a conclusão do processo de otimização. Cada partícula  $c^{a_i}$  do enxame, com  $i = 1, 2, \dots, 15$ , foi considerada representação de determinado cenário distinto. Os valores de desempenho, dos índices de sensibilidade, do índice de complexidade, do índice de estabilidade e da robustez de cada cenário estão dispostos nas Tabela D.2 até Tabela D.6, respectivamente. Foram encontrados dois cenários com maior  $\tau$  que a registrada para o  $c^\beta$ , com quantitativo de recursos disposto na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 - Quantitativo de recursos dos cenários com maior  $\tau$  que a registrada no  $c^\beta$  para o modelo de tração e frenagem de veículos elétricos.

Potência elétrica fornecida pela bateria [kWh]	Potência mecânica fornecida pela máquina elétrica [cv]	Número de máquinas elétricas	$\tau$
670	175	2	0,9261
331	121	2	0,9085

### 6.4.2 Análise dos cenários de tração e frenagem de veículos elétricos

O fato da métrica de robustez ser composta por três componentes distintas permite análises quantitativas, que consideram apenas robustez, e análises qualitativas, que levam em consideração as componentes da métrica. Na Figura 6.4, o eixo das abscissas dispõe o quantitativo de recursos dos oito cenários com maior valor de robustez encontrados após o processo de otimização. No eixo das ordenadas, constam os valores de desempenho  $\mu$ , índice de complexidade  $i_\psi$ , índice de estabilidade  $\xi$  e robustez  $\tau$  de cada cenário. Sob o ponto de vista da análise quantitativa, apenas dois cenários possuem maior valor de  $\tau$  que o  $c^\beta$ : (670, 175, 2) e (331, 121, 2). Contudo, os cenários (729, 173, 2) e (607, 115, 4), na vizinhança do  $c^\beta$ , possuem valores de  $\tau$  satisfatórios. Observa-se proximidade entre os valores de  $\tau$  dos cenários próximos ao  $c^\beta$  e variação nos valores de  $\mu$ ,  $i_\psi$  e  $\xi$ . Diante disto, procede-se análise qualitativa.

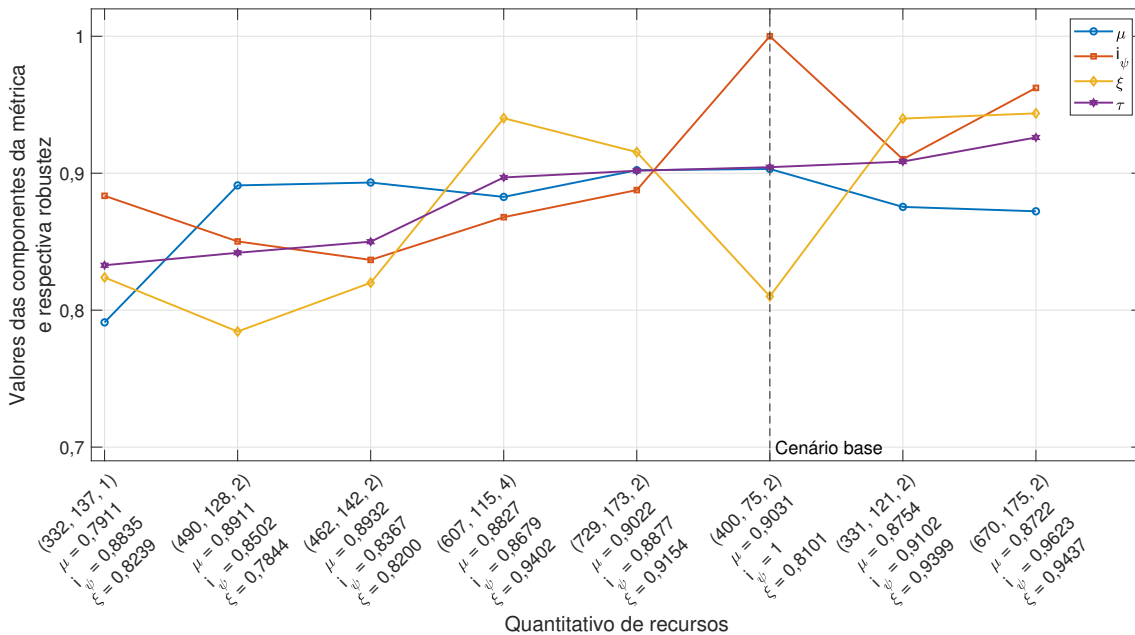


Figura 6.4 - Valores das componentes da métrica e de robustez  $\times$  quantitativo de recursos para o modelo de tração e frenagem de veículos elétricos.

Considerando a análise qualitativa, foi possível observar que o valor de  $\mu$  do  $c^\beta$  foi o maior obtido. Neste cenário, o veículo elétrico é capaz de percorrer o trajeto proposto utilizando a carga do conjunto de baterias de maneira adequada, satisfazendo a demanda por deslocamento. Os dois cenários com os maiores valores de  $\tau$  possuem valores de  $\mu$  menores que o valor calculado para  $c^\beta$ . Porém, os seguintes cenários com valores de  $\tau$  próximos ao valor do  $c^\beta$  registraram valores satisfatórios de  $\mu$ : (729, 173, 2), (462, 142, 2) e (490, 128, 2). Nos cenários com valores satisfatórios de  $\mu$ : i) o consumo médio de bateria do VE no trajeto percorrido se aproximou do consumo máximo registrado, indicando menor variação de consumo de bateria e ii) a autonomia restante e a autonomia mínima de referência se aproximaram, uma vez que esta relação denota a eficiência do dimensionamento do conjunto de baterias, considerando o trajeto percorrido.

Ainda considerando análise qualitativa, foi possível observar que o maior valor de  $i_\psi$  foi o do  $c^\beta$ , pois este cenário é a referência do índice. Desconsiderando  $c^\beta$ , os dois cenários com maior valor de  $\tau$  foram os que apresentaram os maiores valores de  $i_\psi$ . Mesmo não possuindo valor de  $\tau$  maior que o calculado para o  $c^\beta$ , o cenário (729, 173, 2) foi o que apresentou o terceiro maior  $i_\psi$ . O  $\xi$  do  $c^\beta$ , ao contrário do que foi observado para o  $\mu$  e  $i_\psi$ , não foi o maior obtido, sendo o segundo menor valor registrado. Os cenários com maior valor de  $\tau$  que o calculado para o  $c^\beta$  apresentaram o primeiro e o terceiro maior  $\xi$ , respectivamente. O cenário (607, 115, 4), apesar de não possuir valor de  $\tau$  maior que o calculado para o  $c^\beta$ , foi o que apresentou o segundo maior valor de  $\xi$ .

Levando em consideração as análises quantitativa e qualitativa, observa-se que: i) o cenário (331, 121, 2) foi o que apresentou o segundo maior valor de  $i_\psi$  e o terceiro maior valor de  $\xi$ , possuindo o segundo maior valor de  $\tau$  e ii) o cenário (670, 175, 2) foi o que apresentou maiores valores de  $i_\psi$  e  $\xi$ , sendo o que apresentou maior valor de  $\tau$ . O critério para a escolha final entre os cenários deve ser a relevância atribuída a cada componente da métrica na análise.

## 6.5 Discussão

A métrica de robustez proposta pode ser considerada multidimensional pois as métricas de desempenho, complexidade e estabilidade que a compõem levam em conta características diversas do sistema. Desta maneira, a medida de robustez contempla aspectos como a influência dos parâmetros de entrada no funcionamento do sistema, o grau de satisfação do sistema aos múltiplos requisitos considerados em sua análise, as interações entre os elementos do sistema, a interação do sistema com o meio

externo e a capacidade do sistema de retornar ao equilíbrio.

Os intervalos entre os valores de  $\mu$ ,  $i_\psi$  e  $\xi$  do  $c^\beta$  e valores próximos podem ser utilizados como raios que delimitam regiões de interesse para a análise. Por exemplo, o intervalo formado entre o valor de  $\xi$  do  $c^\beta$  e o maior valor de  $\xi$  medido nos cenários analisados pode delimitar região que contém valores de  $\xi$  de soluções robustas. Desta forma, cenários localizados na intersecção entre as regiões de interesse relativas à  $\mu$ ,  $i_\psi$  e  $\xi$  constituem a **região de robustez**. Assim, os cenários que possuem maior robustez que o cenário base compõem a **região de robustez**.

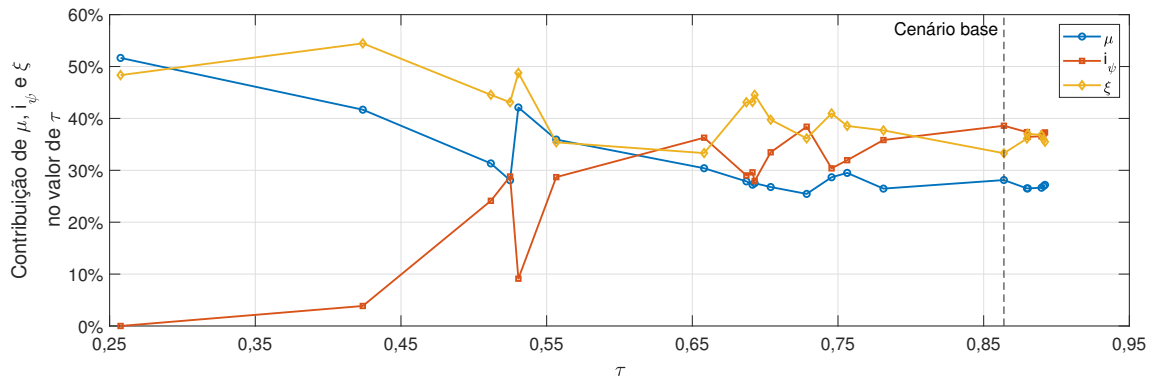
Nos três modelos estudados observou-se que tanto o desempenho quanto o índice de complexidade dos cenários são menores que os do cenário base. Em relação à estabilidade ocorreu o inverso: os valores de estabilidade dos cenários que compõem a região de robustez são maiores que o valor de estabilidade do cenário base. Portanto, nos modelos estudados o aumento da robustez em relação ao cenário base implicou a diminuição do desempenho e do índice de complexidade e aumento de estabilidade. Assim, o desenvolvimento de métrica de robustez que combina desempenho, complexidade e estabilidade possibilitou a obtenção de soluções robustas, corroborando a hipótese deste trabalho.

Os valores das três componentes da métrica de robustez apresentada contribuem em diferentes proporções no valor da robustez medida. Para determinar a contribuição do desempenho no valor da robustez deve ser utilizada (6.5). Para determinar a contribuição do índice de complexidade e do índice de estabilidade no valor da robustez o numerador de (6.5) deve ser substituído por  $i_\psi$  ou  $\xi$ , respectivamente.

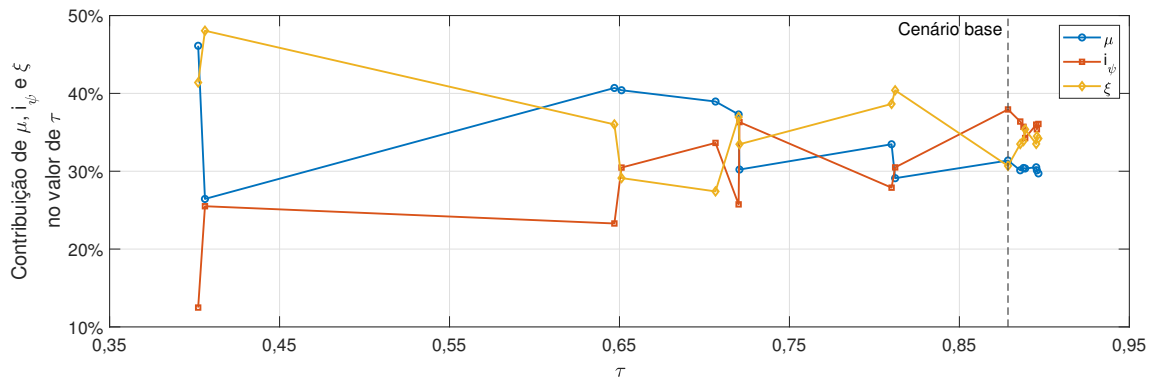
$$\frac{\mu}{\mu + i_\psi + \xi} \quad (6.5)$$

Analisando a Figura 6.5 é possível observar a contribuição percentual de cada uma das componentes da métrica no valor da robustez considerando os cenários dispostos nas Tabela B.1, Tabela C.1 e Tabela D.1. Analisando em conjunto a Figura 6.5(a), Figura 6.5(b) e Figura 6.5(c), referentes aos modelos de UTI, de escalonamento de processos e de tração e frenagem de veículos elétricos, respectivamente, é possível observar que nestes cenários da **região de robustez**, a contribuição das componentes no valor de  $\tau$  foi aproximada, sendo a contribuição de  $\mu \approx 30\%$  e as contribuições de  $i_\psi$  e  $\xi \approx 35\%$ .

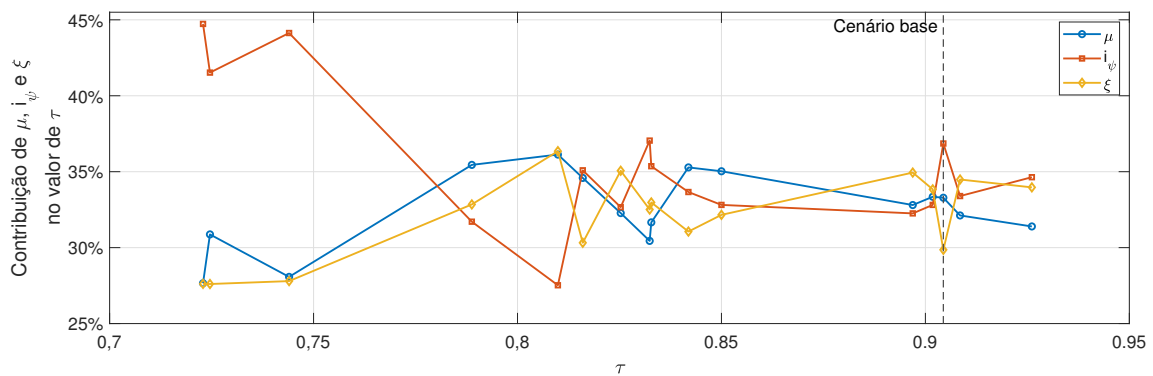
Na medida em que os valores de  $\tau$  diminuam, a contribuição de  $i_\psi$  no valor de  $\tau$



(a)



(b)



(c)

Figura 6.5 - Contribuição [%] de  $\mu$ ,  $i_\psi$  e  $\xi$  no valor de  $\tau$  para os modelos: (a) UTI, (b) escalonamento de processos e (c) tração e frenagem de veículos elétricos.

tende a diminuir e as contribuições de  $\mu$  e  $\xi$  tendem a aumentar nos modelos de UTI e escalonamento de processos, sendo observada tendência de que  $\xi$  tenha maior contribuição. No modelo de tração e frenagem de veículos elétricos, a contribuição de  $i_\psi$  no valor de  $\tau$  tem aumento em cenários próximos à **região de robustez**, seguido de aumento em cenários distantes desta região. Este comportamento se deve à diminuição do desempenho e do índice de estabilidade em cenários com menor

robustez associada ao fato de que estes cenários possuem índice de complexidade próximos à *um*.

As principais dificuldades enfrentadas durante o desenvolvimento do trabalho foram o elevado tempo necessário para realizar as simulações e a limitação de informações sobre os sistemas, o que onerou o processo de construção e parametrização dos modelos de escalonamento de processos e de tração e frenagem de veículos elétricos. A utilização de computação paralela minimizou o problema relacionado ao tempo das simulações. Quanto ao modelo de escalonamento de processos, foi realizada pesquisa bibliográfica, que subsidiou a construção do modelo e a determinação dos dados de parametrização. Em relação ao modelo de tração e frenagem de veículos elétricos, as consultas aos especialistas permitiram a elaboração do modelo e a utilização de normas nacionais e internacionais permitiram a parametrização.

A metodologia para obtenção de novos cenários apresentada neste trabalho demonstrou-se eficaz para sistemas a eventos discretos. Contudo, sua aplicabilidade à sistemas com variáveis e tempo contínuos deve ser verificada. O cálculo de robustez utilizando outras métricas de desempenho, complexidade e estabilidade tem a possibilidade de estudo futuro.

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSÃO

O objetivo geral deste trabalho foi o desenvolvimento de técnica para calcular valores otimizados para os parâmetros de forma a encontrar soluções robustas, construindo modelos de sistemas reais, verificando os modelos por intermédio de simulação, medir o desempenho, a complexidade e a estabilidade através de métricas aplicadas aos modelos e propor métrica de robustez utilizando a observação e as métricas de desempenho, complexidade e estabilidade. Todos os objetivos foram atingidos e a hipótese primária/básica foi corroborada através de simulação.

Para cada modelo estudado/desenvolvido foi definido um cenário base e utilizando processo de otimização, foram obtidos cenários que compõem a região de robustez. Neste trabalho, foi escolhida a métrica de desempenho para nortear o dimensionamento de recursos para atendimento das demandas impostas ao sistema. Porém, o nível de informação acerca do sistema quando considerada a complexidade, a estabilidade e a robustez em conjunto com o desempenho torna-se maior, permitindo decisões estratégicas melhor fundamentadas.

No modelo de UTI os dois cenários com maior  $\tau$  possuem elevados valores de  $\mu$ ,  $i_\psi$  e  $\xi$ . Contudo, se a estabilidade for o fator considerado mais importante na análise, o cenário com o segundo maior valor de  $\tau$  possui vantagem em relação ao cenário com maior valor de  $\tau$ . Em relação ao modelo de escalonamento de processos, o segundo cenário com maior valor de  $\tau$  possui maiores valores de  $\mu$  e  $\xi$  e o cenário com maior valor de  $\tau$  possui o maior valor de  $i_\psi$ , sendo o mais adequado se a complexidade for o fator mais importante na análise. No modelo de tração e frenagem de veículos elétricos, o cenário com o segundo maior valor de  $\tau$  não foi o que apresentou maiores valores de  $\mu$ ,  $i_\psi$  e  $\xi$ , mas considerando o conjunto de características estudadas, é o cenário de maior interesse. O cenário com maior valor de  $\tau$  apresentou também os maiores valores de  $i_\psi$  e  $\xi$ , sendo o melhor cenário encontrado para este estudo de caso. Portanto, conclui-se que é possível encontrar cenários mais robustos que o cenário otimizado em relação ao desempenho ao realizar análise de robustez do sistema.

#### 7.1 Contribuições do Trabalho

As principais contribuições deste trabalho foram:

- Desenvolvimento de métrica de robustez de sistema com base em desempenho, complexidade e estabilidade;
- Desenvolvimento de métrica de estabilidade de sistema com base no diagrama-aranha;
- Processo de otimização utilizando a métrica de robustez proposta.

Outras contribuições foram as publicações:

#### Artigos em revista:

PAIVA, JOÃO R.B.; MAGALHÃES, ALANA S.; MORAES, PEDRO H.F.; BULHÕES, JÚNIO S.; CALIXTO, WESLEY P. Stability Metric Based on Sensitivity Analysis Applied to Electrical Repowering System. **Energies**, v. 14, p. 7824, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14227824>

GOMES, VIVIANE M.; PAIVA, JOÃO R.B.; REIS, MARCIO R.C.; WAINER, GABRIEL A.; CALIXTO, WESLEY P. Mechanism for Measuring System Complexity Applying Sensitivity Analysis. **Complexity**, v. 2019, p. 1-12, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2019/1303241>

#### Artigos em congressos:

PAIVA, JOÃO R.B.; GOMES, VIVIANE M.; REIS, MARCIO R.C.; WAINER, GABRIEL; CALIXTO, WESLEY P. Relationship Between Risk and Complexity in System Using Connection Based Metric. In: **2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)**, 2018, Palermo. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/eeeic.2018.8493772>

RODRIGUES, B.A.; PAIVA, J.R.B.; GOMES, V.M.; MORRIS, C.; CALIXTO, W.P. Passfault: an Open Source Tool for Measuring Password Complexity and Strength. In: **The 8th International Multi-Conference on Complexity, Informatics and Cybernetics**, 2017, Orlando, Florida, USA. The 8th International Multi-Conference on Complexity, Informatics and Cybernetics, 2017.

## 7.2 Trabalhos Futuros

Considerando os resultados alcançados com este trabalho, verificaram-se lacunas a serem preenchidas por trabalhos futuros, como:

- metodologia para determinação de fatores de ponderação para as componentes  $\mu$ ,  $i_\psi$  e  $\xi$  da métrica de robustez;
- metodologia para identificação e classificação de cenários robustos utilizando diagrama de Venn.



## APÊNDICE A

### Probabilidades de ocorrência e fatores de relevância de cada tipo de conexão nos modelos estudados

Tabela A.1 - Modelo de UTI: probabilidades de ocorrência de cada tipo de conexão.

<b>Tipo de conexão</b>	$P(c)$
Paciente – fila	Probabilidade experimental de cada prioridade de paciente na fila
Paciente – leito	$\frac{1}{n_L}$
Paciente – insumos	0,9
Paciente – equipe médica	0,9
Paciente – evento adverso	$\frac{1}{t_{EA}}$

Tabela A.2 - Modelo de UTI: fatores de relevância de cada tipo de conexão.

<b>Tipo de conexão</b>	$\gamma$
Paciente – fila	$S_C^a$
Paciente – leito	$S_L^a$
Paciente – insumos	$S_I^a$
Paciente – equipe médica	$S_{EQ}^a$
Paciente – evento adverso	$S_{EA}^a$

Tabela A.3 - Modelo de escalonamento de processos: probabilidades de ocorrência de cada tipo de conexão.

Tipo de conexão	$P(c)$
Processo – CPU	$\frac{1}{n_{CPU}}$
Processo – fila CPU	1
Processo – memória RAM	$\frac{t_{RAMproc}}{t_{RAM}}$
Processo – fila memória RAM	1
Processo – dispositivo de entrada	$\frac{1}{n_{DE}}$
Processo – fila dispositivo de entrada	1
Processo – dispositivo de saída	$\frac{1}{n_{DS}}$
Processo – fila dispositivo de saída	1
Processo – disco	$\frac{1}{n_D}$
Processo – fila disco	1

Tabela A.4 - Modelo de escalonamento de processos: fatores de relevância de cada tipo de conexão.

Tipo de conexão	$\gamma$
Processo – CPU	$S_{CPU}^a$
Processo – fila CPU	$S_{CPU}^a$
Processo – memória RAM	$S_R^a$
Processo – fila memória RAM	$S_R^a$
Processo – dispositivo de entrada	$S_{DE}^a$
Processo – fila dispositivo de entrada	$S_{DE}^a$
Processo – dispositivo de saída	$S_{DS}^a$
Processo – fila dispositivo de saída	$S_{DS}^a$
Processo – disco	$S_D^a$
Processo – fila disco	$S_D^a$

Tabela A.5 - Modelo de tração e frenagem de veículos elétricos: probabilidades de ocorrência de conexão nos estados tração e frenagem

Estado	$P(c)$
Tração	0,5
Frenagem	0,5

Tabela A.6 - Modelo de tração e frenagem de veículos elétricos: fatores de relevância de cada tipo de conexão.

<b>Tipo de conexão</b>	$\gamma$
Controle	$S_B^a + S_M^a + S_{NM}^a$
CC e CA	$S_B^a$
Torque	$S_M^a + S_{NM}^a$



## APÊNDICE B

### Modelo de UTI: dados do melhor enxame obtido após otimização

Tabela B.1 - Modelo de UTI: melhor enxame obtido após o processo de otimização.

$c^{a_i}$	Leitos	Insumos	Equipe	E.A. [%]	Tx. chegada [h]
$c^{a_1}$	14	162	158	8	31
$c^{a_2}$	8	61	70	8	34
$c^{a_3}$	9	96	110	11	40
$c^{a_4}$	9	130	122	9	37
$c^{a_5}$	11	138	137	10	39
$c^{a_6}$	15	92	139	10	39
$c^{a_7}$	8	91	90	11	27
$c^{a_8}$	11	127	141	11	30
$c^{a_9}$	10	98	120	10	39
$c^{a_{10}}$	8	134	117	10	35
$c^{a_{11}}$	7	83	96	12	34
$c^{a_{12}}$	9	102	112	11	38
$c^{a_{13}}$	5	79	95	14	26
$c^{a_{14}}$	15	142	118	9	19
$c^{a_{15}}$	13	121	132	9	31
$c^{a_{16}}$	6	68	59	11	35
$c^{a_{17}}$	13	120	119	10	29
$c^{a_{18}}$	14	148	142	8	30
$c^{a_{19}}$	13	122	97	11	35
$c^{a_{20}}$	12	109	112	10	28

Tabela B.2 - Modelo de UTI: desempenho calculado para as partículas.

$c^{a_i}$	$\mu(c^{a_i})$
$c^{a_1}$	0,5718
$c^{a_2}$	0,5998
$c^{a_3}$	0,5646
$c^{a_4}$	0,7002
$c^{a_5}$	0,7110
$c^{a_6}$	0,4423
$c^{a_7}$	0,5299
$c^{a_8}$	0,7211
$c^{a_9}$	0,5745
$c^{a_{10}}$	0,6703
$c^{a_{11}}$	0,4809
$c^{a_{12}}$	0,6204
$c^{a_{13}}$	0,3990
$c^{a_{14}}$	0,5563
$c^{a_{15}}$	0,6693
$c^{a_{16}}$	0,6002
$c^{a_{17}}$	0,5654
$c^{a_{18}}$	0,6411
$c^{a_{19}}$	0,7279
$c^{a_{20}}$	0,6998

Tabela B.3 - Modelo de UTI: índices de sensibilidade calculados para as partículas [%].

$c^{a_i}$	$S_L^a$	$S_I^a$	$S_{EQ}^a$	$S_{EA}^a$	$S_C^a$
$c^{a_1}$	0,16%	6,93%	50,03%	36,67%	6,21%
$c^{a_2}$	60,15%	4,25%	15,32%	7,97%	12,32%
$c^{a_3}$	47,26%	9,39%	4,78%	33,88%	4,69%
$c^{a_4}$	30,11%	2,08%	20,31%	30,75%	16,75%
$c^{a_5}$	13,36%	24,09%	31,13%	1,68%	29,74%
$c^{a_6}$	3,22%	5,82%	1,53%	24,70%	64,71%
$c^{a_7}$	1,43%	13,63%	2,94%	77,49%	4,52%
$c^{a_8}$	5,81%	27,06%	30,27%	4,85%	32,01%
$c^{a_9}$	14,81%	5,54%	43,15%	5,79%	30,72%
$c^{a_{10}}$	51,65%	35,53%	1,06%	10,27%	1,49%
$c^{a_{11}}$	69,33%	6,26%	6,01%	7,50%	10,89%
$c^{a_{12}}$	5,29%	42,73%	36,99%	2,74%	12,25%
$c^{a_{13}}$	4,05%	4,80%	6,14%	1,35%	83,66%
$c^{a_{14}}$	25,36%	15,55%	0,87%	47,04%	11,18%
$c^{a_{15}}$	4,70%	23,86%	18,73%	48,35%	4,37%
$c^{a_{16}}$	3,74%	19,82%	3,52%	23,72%	49,20%
$c^{a_{17}}$	30,53%	43,71%	5,19%	15,12%	5,45%
$c^{a_{18}}$	28,01%	3,35%	54,26%	13,01%	1,37%
$c^{a_{19}}$	40,09%	9,16%	3,76%	20,23%	26,76%
$c^{a_{20}}$	16,47%	3,27%	31,68%	11,84%	36,74%

Tabela B.4 - Modelo de UTI: complexidade e índice de complexidade calculados para as partículas.

$c^{a_i}$	$\psi(c^{a_i})$	$i_\psi(c^{a_i})$
$c^{a_1}$	14,6800	0,5806
$c^{a_2}$	38,4565	0,4790
$c^{a_3}$	35,0431	0,6140
$c^{a_4}$	24,3342	0,9624
$c^{a_5}$	25,8974	0,9757
$c^{a_6}$	39,0983	0,4536
$c^{a_7}$	49,3298	0,0490
$c^{a_8}$	25,0679	0,9914
$c^{a_9}$	35,4451	0,5981
$c^{a_{10}}$	46,8999	0,1451
$c^{a_{11}}$	41,2060	0,3703
$c^{a_{12}}$	29,3342	0,8398
$c^{a_{13}}$	50,5684	0,0000
$c^{a_{14}}$	21,2214	0,8393
$c^{a_{15}}$	18,3256	0,7248
$c^{a_{16}}$	32,4566	0,7163
$c^{a_{17}}$	32,7001	0,7067
$c^{a_{18}}$	17,1794	0,6795
$c^{a_{19}}$	25,3247	0,9984
$c^{a_{20}}$	24,9330	0,9861

Tabela B.5 - Modelo de UTI: índices de estabilidade calculados para as partículas.

$c^{a_i}$	$\xi(c^{a_i})$
$c^{a_1}$	0,9258
$c^{a_2}$	0,5909
$c^{a_3}$	0,8953
$c^{a_4}$	0,9782
$c^{a_5}$	0,9822
$c^{a_6}$	0,6788
$c^{a_7}$	0,6924
$c^{a_8}$	0,9609
$c^{a_9}$	0,8887
$c^{a_{10}}$	0,7763
$c^{a_{11}}$	0,6838
$c^{a_{12}}$	0,8834
$c^{a_{13}}$	0,3734
$c^{a_{14}}$	0,7899
$c^{a_{15}}$	0,8747
$c^{a_{16}}$	0,6578
$c^{a_{17}}$	0,8393
$c^{a_{18}}$	0,9162
$c^{a_{19}}$	0,9500
$c^{a_{20}}$	0,9532

Tabela B.6 - Modelo de UTI: robustez calculada para as partículas.

$c^{a_i}$	$\tau(c^{a_i})$
$c^{a_1}$	0,6928
$c^{a_2}$	0,5566
$c^{a_3}$	0,6913
$c^{a_4}$	0,8803
$c^{a_5}$	0,8897
$c^{a_6}$	0,5249
$c^{a_7}$	0,4238
$c^{a_8}$	0,8912
$c^{a_9}$	0,6871
$c^{a_{10}}$	0,5306
$c^{a_{11}}$	0,5117
$c^{a_{12}}$	0,7812
$c^{a_{13}}$	0,2575
$c^{a_{14}}$	0,7285
$c^{a_{15}}$	0,7563
$c^{a_{16}}$	0,6581
$c^{a_{17}}$	0,7038
$c^{a_{18}}$	0,7456
$c^{a_{19}}$	0,8921
$c^{a_{20}}$	0,8797

## APÊNDICE C

### Modelo de escalonamento de processos: dados do melhor enxame obtido após otimização

Tabela C.1 - Modelo de escalonamento de processos: melhor enxame obtido após o processo de otimização.

$c^{a_i}$	CPU	RAM [MB]	Disp. entrada	Disp. saída	Discos
$c^{a_1}$	11	81	4	3	3
$c^{a_2}$	4	47	2	2	2
$c^{a_3}$	6	41	2	2	2
$c^{a_4}$	5	41	2	3	3
$c^{a_5}$	4	18	2	1	6
$c^{a_6}$	10	28	3	3	3
$c^{a_7}$	5	36	2	2	4
$c^{a_8}$	5	39	2	2	3
$c^{a_9}$	5	37	3	2	3
$c^{a_{10}}$	7	25	3	3	3
$c^{a_{11}}$	3	35	2	1	4
$c^{a_{12}}$	5	19	3	1	2
$c^{a_{13}}$	6	30	2	2	2
$c^{a_{14}}$	8	44	3	4	2
$c^{a_{15}}$	4	70	1	1	5

Tabela C.2 - Modelo de escalonamento de processos: desempenho calculado para as partículas.

$c^{a_i}$	$\mu(c^{a_i})$
$c^{a_1}$	0,8093
$c^{a_2}$	0,8004
$c^{a_3}$	0,8090
$c^{a_4}$	0,8133
$c^{a_5}$	0,3221
$c^{a_6}$	0,8100
$c^{a_7}$	0,8057
$c^{a_8}$	0,8193
$c^{a_9}$	0,7993
$c^{a_{10}}$	0,7893
$c^{a_{11}}$	0,7899
$c^{a_{12}}$	0,8257
$c^{a_{13}}$	0,7092
$c^{a_{14}}$	0,6532
$c^{a_{15}}$	0,5562

Tabela C.3 - Modelo de escalonamento de processos: índices de sensibilidade calculados para as partículas [%].

$c^{a_i}$	$S_{CPU}^a$	$S_{RAM}^a$	$S_{DE}^a$	$S_{DS}^a$	$S_D^a$
$c^{a_1}$	8,07%	23,39%	17,53%	46,87%	4,14%
$c^{a_2}$	2,38%	20,91%	35,10%	5,49%	36,12%
$c^{a_3}$	25,98%	33,52%	3,14%	31,25%	6,11%
$c^{a_4}$	4,89%	63,98%	0,89%	12,72%	17,53%
$c^{a_5}$	66,59%	24,39%	0,89%	2,24%	5,90%
$c^{a_6}$	15,87%	5,72%	13,56%	17,36%	47,49%
$c^{a_7}$	0,41%	12,94%	2,00%	50,07%	34,58%
$c^{a_8}$	17,75%	22,71%	25,30%	0,53%	33,71%
$c^{a_9}$	25,98%	33,52%	3,14%	31,25%	6,11%
$c^{a_{10}}$	12,66%	49,02%	3,31%	0,01%	35,00%
$c^{a_{11}}$	10,19%	1,26%	46,61%	5,31%	36,65%
$c^{a_{12}}$	58,14%	3,23%	1,86%	5,39%	31,38%
$c^{a_{13}}$	8,60%	38,00%	0,21%	7,98%	45,22%
$c^{a_{14}}$	4,88%	52,40%	2,02%	9,44%	31,26%
$c^{a_{15}}$	1,71%	2,99%	84,16%	4,95%	6,20%

Tabela C.4 - Modelo de escalonamento de processos: complexidade e índice de complexidade calculados para as partículas.

$c^{a_i}$	$\psi(c^{a_i})$	$i_\psi(c^{a_i})$
$c^{a_1}$	29,0032	0,9135
$c^{a_2}$	27,5789	0,9668
$c^{a_3}$	28,0043	0,9509
$c^{a_4}$	18,0923	0,6778
$c^{a_5}$	45,0944	0,3107
$c^{a_6}$	28,0032	0,9510
$c^{a_7}$	38,5423	0,5561
$c^{a_8}$	27,5903	0,9664
$c^{a_9}$	25,8992	0,9702
$c^{a_{10}}$	15,8893	0,5952
$c^{a_{11}}$	41,3220	0,4520
$c^{a_{12}}$	34,3554	0,7130
$c^{a_{13}}$	33,5543	0,7430
$c^{a_{14}}$	32,4324	0,7850
$c^{a_{15}}$	49,3676	0,1506

Tabela C.5 - Modelo de escalonamento de processos: índices de estabilidade calculados para as partículas.

$c^{a_i}$	$\xi(c^{a_i})$
$c^{a_1}$	0,9432
$c^{a_2}$	0,8900
$c^{a_3}$	0,9268
$c^{a_4}$	0,9392
$c^{a_5}$	0,5854
$c^{a_6}$	0,9022
$c^{a_7}$	0,7985
$c^{a_8}$	0,8999
$c^{a_9}$	0,9199
$c^{a_{10}}$	0,5689
$c^{a_{11}}$	0,6990
$c^{a_{12}}$	0,5809
$c^{a_{13}}$	0,9844
$c^{a_{14}}$	0,7235
$c^{a_{15}}$	0,4993

Tabela C.6 - Modelo de escalonamento de processos: robustez calculada para as partículas.

$c^{a_i}$	$\tau(c^{a_i})$
$c^{a_1}$	0,8887
$c^{a_2}$	0,8858
$c^{a_3}$	0,8956
$c^{a_4}$	0,8101
$c^{a_5}$	0,4061
$c^{a_6}$	0,8877
$c^{a_7}$	0,7201
$c^{a_8}$	0,8952
$c^{a_9}$	0,8965
$c^{a_{10}}$	0,6512
$c^{a_{11}}$	0,6470
$c^{a_{12}}$	0,7065
$c^{a_{13}}$	0,8122
$c^{a_{14}}$	0,7206
$c^{a_{15}}$	0,4021



## APÊNDICE D

### Modelo de tração e frenagem de veículos elétricos: dados do melhor enxame obtido após otimização

Tabela D.1 - Modelo de tração e frenagem de veículos elétricos: melhor enxame obtido após o processo de otimização.

$c^{a_i}$	Potência elétrica fornecida pela bateria [ $kWh$ ]	Potência mecânica fornecida pela máquina elétrica [ $cv$ ]	Número de máquinas elétricas
$c^{a_1}$	490	128	2
$c^{a_2}$	589	171	2
$c^{a_3}$	331	121	2
$c^{a_4}$	410	62	4
$c^{a_5}$	770	59	1
$c^{a_6}$	751	160	1
$c^{a_7}$	607	115	4
$c^{a_8}$	465	139	1
$c^{a_9}$	515	144	2
$c^{a_{10}}$	745	85	4
$c^{a_{11}}$	332	137	1
$c^{a_{12}}$	670	175	2
$c^{a_{13}}$	462	142	2
$c^{a_{14}}$	729	173	2
$c^{a_{15}}$	445	113	4

Tabela D.2 - Modelo de tração e frenagem de VE: desempenho calculado para as partículas.

$c^{a_i}$	$\mu(c^{a_i})$
$c^{a_1}$	0,8911
$c^{a_2}$	0,6266
$c^{a_3}$	0,8754
$c^{a_4}$	0,5998
$c^{a_5}$	0,7991
$c^{a_6}$	0,6711
$c^{a_7}$	0,8827
$c^{a_8}$	0,8467
$c^{a_9}$	0,7602
$c^{a_{10}}$	0,8778
$c^{a_{11}}$	0,7911
$c^{a_{12}}$	0,8722
$c^{a_{13}}$	0,8932
$c^{a_{14}}$	0,9022
$c^{a_{15}}$	0,8388

Tabela D.3 - Modelo de tração e frenagem de VE: índices de sensibilidade calculados para as partículas [%].

$c^{a_i}$	$S_B^a$	$S_M^a$	$S_{NM}^a$
$c^{a_1}$	48,81%	48,15%	3,04%
$c^{a_2}$	30,59%	60,98%	8,43%
$c^{a_3}$	50,89%	45,76%	3,35%
$c^{a_4}$	60,11%	32,63%	7,27%
$c^{a_5}$	4,04%	40,98%	54,98%
$c^{a_6}$	7,72%	60,46%	31,82%
$c^{a_7}$	8,93%	30,21%	60,86%
$c^{a_8}$	52,04%	3,17%	44,79%
$c^{a_9}$	44,19%	52,46%	3,35%
$c^{a_{10}}$	41,98%	3,75%	54,27%
$c^{a_{11}}$	52,05%	3,29%	44,67%
$c^{a_{12}}$	18,80%	63,42%	17,78%
$c^{a_{13}}$	51,84%	3,29%	44,87%
$c^{a_{14}}$	11,09%	62,15%	26,76%
$c^{a_{15}}$	54,97%	41,01%	4,02%

Tabela D.4 - Modelo de tração e frenagem de VE: complexidade e índice de complexidade calculados para as partículas.

$c^{a_i}$	$\psi(c^{a_i})$	$i_\psi(c^{a_i})$
$c^{a_1}$	13,8210	0,8502
$c^{a_2}$	11,8402	0,9850
$c^{a_3}$	13,1004	0,9102
$c^{a_4}$	11,6606	0,9701
$c^{a_5}$	9,7204	0,8087
$c^{a_6}$	13,1904	0,9027
$c^{a_7}$	13,6083	0,8679
$c^{a_8}$	10,3259	0,8590
$c^{a_9}$	12,9213	0,9251
$c^{a_{10}}$	16,0023	0,6687
$c^{a_{11}}$	10,6204	0,8835
$c^{a_{12}}$	12,4740	0,9623
$c^{a_{13}}$	13,9833	0,8367
$c^{a_{14}}$	13,3701	0,8877
$c^{a_{15}}$	15,0222	0,7503

Tabela D.5 - Modelo de tração e frenagem de VE: índices de estabilidade calculados para as partículas.

$c^{a_i}$	$\xi(c^{a_i})$
$c^{a_1}$	0,7844
$c^{a_2}$	0,6204
$c^{a_3}$	0,9399
$c^{a_4}$	0,5989
$c^{a_5}$	0,8681
$c^{a_6}$	0,6001
$c^{a_7}$	0,9402
$c^{a_8}$	0,7422
$c^{a_9}$	0,8118
$c^{a_{10}}$	0,8832
$c^{a_{11}}$	0,8239
$c^{a_{12}}$	0,9437
$c^{a_{13}}$	0,8200
$c^{a_{14}}$	0,9154
$c^{a_{15}}$	0,7772

Tabela D.6 - Modelo de tração e frenagem de VE: robustez calculada para as partículas.

$c^{a_i}$	$\tau(c^{a_i})$
$c_E^{a_1}$	0,8419
$c_E^{a_2}$	0,7440
$c_E^{a_3}$	0,9085
$c_E^{a_4}$	0,7229
$c_E^{a_5}$	0,8253
$c_E^{a_6}$	0,7246
$c_E^{a_7}$	0,8969
$c_E^{a_8}$	0,8160
$c_E^{a_9}$	0,8324
$c_E^{a_{10}}$	0,8099
$c_E^{a_{11}}$	0,8328
$c_E^{a_{12}}$	0,9261
$c_E^{a_{13}}$	0,8500
$c_E^{a_{14}}$	0,9018
$c_E^{a_{15}}$	0,7888



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDALLAH, S. A.; PLUMBLEY, M. D. A measure of statistical complexity based on predictive information with application to finite spin systems. **Physics Letters A**, Elsevier, v. 376, n. 4, p. 275–281, 2012. 33
- ABELEIN, U.; LOCHNER, H.; HAHN, D.; STRAUBE, S. Complexity, quality and robustness—the challenges of tomorrow’s automotive electronics. In: **IEEE Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)**, 2012. 2012. p. 870–871. 60
- ABNT. **Veículos rodoviários automotores leves - Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escapamento**. NBR 6601:2021. : Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2021. 90
- ABRAMCZUK, A. A. **A prática da tomada de decisão**. : Editora Atlas, 2000. 17, 42, 48, 49
- ALI, S.; MACIEJEWSKI, A. A.; SIEGEL, H. J.; KIM, J.-K. Measuring the robustness of a resource allocation. **IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems**, IEEE, v. 15, n. 7, p. 630–641, 2004. 60
- ARBONA, A.; BONA, C.; MIÑANO, B.; PLASTINO, A. Statistical complexity measures as telltale of relevant scales in emergent dynamics of spatial systems. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Elsevier, v. 410, p. 1–8, 2014. 33
- ARROYO, J. E. C. et al. **Heurísticas e metaheurísticas para otimização combinatória multiobjetivo**. Tese (Doutorado) — Universidade de Campinas, 2002. 41
- ASLAKSEN, E. W. **Designing Complex Systems: Foundations of design in the functional domain**. : CRC Press, 2016. 32
- AY, N.; MULLER, M.; SZKOLA, A. Effective complexity and its relation to logical depth. **IEEE transactions on information theory**, IEEE, v. 56, n. 9, p. 4593–4607, 2010. 33
- AZEVEDO, J. d. S.; OLIVEIRA, S. P.; LIMA, O. A. L. d. Métodos estocásticos para modelagem de escoamento estacionário e transiente em meios porosos.

**Revista Brasileira de Geofísica**, SciELO Brasil, v. 27, n. 2, p. 241–254, 2009. 41

BAI, L.; ZHOU, W. The measurement of transient stability with high resolution. In: **IEEE. 2013 Joint European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC)**. 2013. p. 175–178. 33, 58, 59

BAK, P. **How nature works: the science of self-organized criticality**. 1. ed. New York, NY, USA: Copernicus Books, 1996. ISBN 9780387987385. 32

BAK, P.; WIESENFELD, K. Self-organized criticality: and explanation of 1/f noise. **Phys. Rev. Let**, v. 59, p. 381–384, 1987. 32

BALDAM, R.; VALE, R.; ROZENFELD, H. **Gerenciamento de Processos de Negócio-BPM: Uma referência para implantação prática**. : Campus, 2014. 56

BAR-YAM, Y. **Dynamics of complex systems**. 1. ed. Newton, Massachusetts, USA: Addison-Wesley, 1997. ISBN 9780813341217. 32, 56

\_\_\_\_\_. Complexity rising: From human beings to human civilization, a complexity profile. **Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), UNESCO, EOLSS Publishers, Oxford, UK**, 2002. 32, 56

BARBOSA, H. J.; BERNARDINO, H. S.; BARRETO, A. Using performance profiles for the analysis and design of benchmark experiments. In: **Advances in metaheuristics**. : Springer, 2013. p. 21–36. 47

BARROS, G. H. P. S. d. **Proposta de um meta-modelo para avaliação de robutez de redes de computadores com base na combinação de métricas topológicas**. Dissertação (B.S. thesis) — Brasil, 2017. 60

BATTY, M.; MORPHET, R.; MASUCCI, P.; STANILOV, K. Entropy, complexity, and spatial information. **Journal of geographical systems**, Springer, v. 16, n. 4, p. 363–385, 2014. 33

BERTALANFFY, L. v. **General system theory: Foundations, development, applications**. : Braziller. New York, 1968. 37, 56

BINI, E. **Aristóteles: Metafísica**. 2. ed. : Edipro, 2012. 31

- BOHM, D. E.; LABRIE, R. G.; REYES, D. E. **System and method for utilizing dispatch queues in a multiprocessor data processing system.** : Google Patents, dez. 21 2004. US Patent 6,834,385. 73
- BORMAN, W. C.; BRUSH, D. H. More progress toward a taxonomy of managerial performance requirements. **Human performance**, Taylor & Francis, v. 6, n. 1, p. 1–21, 1993. 31, 55
- CADWELL, C. M. **Performance management.** : AMACOM Div American Mgmt Assn, 2002. 31
- CALIXTO, W. P. **Métodos matemático e computacional aplicados a prospecção geométrica com estratificação tridimensional.** Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2012. 39
- CAMPBELL, J. P. The definition and measurement of performance in the new age. Pulakos (Eds.), **The changing nature of performance: Implications for staffing, motivation, and development**, v. 399, p. 429, 1999. 31, 55
- CAMPBELL, J. P.; MCCLOY, R. A.; OPPLER, S. H.; SAGER, C. E. A theory of performance. **Personnel selection in organizations**, v. 3570, p. 35–70, 1993. 31, 55
- CARVALHO, A. X. Y.; CAJUEIRO, D. d. O.; CAMARGO, R. S. **Introdução aos métodos estatísticos para economia e finanças.** : Editora UnB, 2015. 42
- CASSANDRAS, C. G.; LAFORTUNE, S. **Introduction to discrete event systems.** Secaucus, NJ: Springer Science & Business Media, 2008. 38
- CASTI, J. L. **Complexification: Explaining a paradoxical world through the science of surprise.** Harper Perennial, 1995. 32, 56
- CASTRO, A.; ARAÚJO, C. Um estudo sobre robustez de controladores descentralizados em sistemas de potência. 2004. 60
- CFM, R. nº 2077/2014. **Dispõe sobre a normatização do funcionamento dos Serviços Hospitalares de Urgência e Emergência**, v. 1, p. 20, 2014. 69
- CHANG, K.-H. Improving the efficiency and efficacy of stochastic trust-region response-surface method for simulation optimization. **IEEE Transactions on Automatic Control**, IEEE, v. 60, n. 5, p. 1235–1243, 2014. 55

- CHEN, J. B.; BERSHAD, B. N. The impact of operating system structure on memory system performance. In: **Proceedings of the fourteenth ACM symposium on Operating systems principles**. 1993. p. 120–133. 73
- CHEN, L.; THOMBRE, S.; JARVINEN, K.; LOHAN, E. S.; ALEN-SAVIKKO, A.; LEPPAKOSKI, H.; BHUIYAN, M. Z. H.; BU-PASHA, S.; FERRARA, G. N.; HONKALA, S. et al. Robustness, security and privacy in location-based services for future iot: A survey. **IEEE Access**, IEEE, v. 5, p. 8956–8977, 2017. 60
- CHESTNOV, V.; SHATOV, D. Modified circle criterion of absolute stability and robustness estimation. In: IEEE. **2018 14th International Conference Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems (Pyatnitskiy's Conference) (STAB)**. 2018. p. 1–4. 33, 58, 59
- CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos**. 4. ed. : Campus-Elsevier, 2014. 38, 59
- CLARKE, F. H.; LOEWEN, P. D. Sensitivity analysis in optimal control. In: IEEE. **Decision and Control, 1984. The 23rd IEEE Conference on**. 1984. p. 1649–1654. 52
- COOPER, L. Heuristic methods for location-allocation problems. **SIAM review**, SIAM, v. 6, n. 1, p. 37–53, 1964. 41
- CORBIT, J. D.; GARBARY, D. J. Fractal dimension as a quantitative measure of complexity in plant development. **Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences**, The Royal Society London, v. 262, n. 1363, p. 1–6, 1995. 33
- COSTA, E.; LIMA, A. **Sistemas Dinâmicos a Eventos Discretos: Fundamentos Básicos para a Moderna Automação Industrial**, Ed. Salvador, BA: EDUFBA, 2005. 38
- CRITCHFIELD, G. C.; WILLARD, K. E.; CONNELLY, D. P. Probabilistic sensitivity analysis methods for general decision models. **Computers and biomedical research**, Elsevier, v. 19, n. 3, p. 254–265, 1986. 50
- CROSKERRY, P. A universal model of diagnostic reasoning. **Academic medicine**, LWW, v. 84, n. 8, p. 1022–1028, 2009. 60
- CRUTCHFIELD, J. P. Between order and chaos. **Nature Physics**, Nature Publishing Group, v. 8, n. 1, p. 17–24, 2012. 32

- CURY, J. E. R. Teoria de controle supervisorio de sistemas a eventos discretos. In: **V Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**. 2001. 38
- CUTLER, D. N.; LENZMEIER, C. T. **Queue object for controlling concurrency in a computer system**. : Google Patents, maio 12 1998. US Patent 5,752,031. 73
- DEACON, T.; KOUTROUFINIS, S. Complexity and dynamical depth. **Information**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 5, n. 3, p. 404–423, 2014. 33
- DITLEVSEN, O. **Uncertainty modeling with applications to multidimensional civil engineering systems**. : McGraw-Hill New York, 1981. 59
- DOCHOW, R. **Online algorithms for the portfolio selection problem**. : Springer, 2016. 42
- DOYLE, J.; STEIN, G. Robustness with observers. **IEEE Transactions on Automatic Control**, IEEE, v. 24, n. 4, p. 607–611, 1978. 60
- EBERHART, R.; KENNEDY, J. A new optimizer using particle swarm theory. In: IEEE. **MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science**. 1995. p. 39–43. 43
- EHSANI, M.; GAO, Y.; LONGO, S.; EBRAHIMI, K. M. **Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles**. : CRC press, 2018. 91
- ENGELBRECHT, A. P. **Computational intelligence: an introduction**. : John Wiley & Sons, 2007. 45
- EPA. **EPA Federal Test Procedure (FTP)**. United States Environmental Protection Agency. 1975. 90
- ESCHENBACH, T. G.; MCKEAGUE, L. S. Exposition on using graphs for sensitivity analysis. **The Engineering Economist**, Taylor & Francis, v. 34, n. 4, p. 315–333, 1989. 52, 53
- FELDMAN, D. P.; CRUTCHFIELD, J. P. Measures of statistical complexity: Why? **Physics Letters A**, Elsevier, v. 238, n. 4-5, p. 244–252, 1998. 33
- FENG, D.; ZHU, L.; ZHANG, L. Review of hadoop performance optimization. In: IEEE. **2016 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC)**. 2016. p. 65–68. 34, 35

FETSCH, S. H.; DEBASIO, N. O. Academic service partnerships: Organizational efficiency and efficacy between organizations. **Journal of Professional Nursing**, Elsevier, v. 27, n. 6, p. e82–e89, 2011. 55

FREUDENBERG, J.; LOOZE, D. P.; CRUZ, J. Robustness analysis using singular value sensitivities. **International Journal of Control**, Taylor & Francis, v. 35, n. 1, p. 1158–1166, 1981. 60

FREY, C.; PATIL, S. R. Identification and review of sensitivity analysis methods. **Risk analysis**, Wiley Online Library, v. 22, n. 3, p. 553–578, 2002. 50, 52

GELL-MANN, M. Simplicity and complexity in the description of nature. **Engineering and Science**, California Institute of Technology, v. 51, n. 3, p. 2–9, 1988. 56

GELL-MANN, M.; LLOYD, S. Information measures, effective complexity, and total information. **Complexity**, Wiley Online Library, v. 2, n. 1, p. 44–52, 1996. 32, 33

GERSHENSON, C.; FERNÁNDEZ, N. Complexity and information: Measuring emergence, self-organization, and homeostasis at multiple scales. **Complexity**, Wiley Online Library, v. 18, n. 2, p. 29–44, 2012. 56

GERTLER, J. Fault detection and diagnosis in engineering systems. **CRC, Virginia, USA**, 1998. 59

GILL, P. E.; MURRAY, W.; WRIGHT, M. H. **Practical optimization**. : SIAM, 2019. 41

GOMES, P. H. G. **Geometria de dutos de escape otimizada para aplicação na cogeração da produção de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Goiás, 2017. 39

GOMES, V.; PAIVA, J.; FURRIEL, G.; RODRIGUES, B.; ANICETO, B.; SILVA, L.; CALIXTO, W.; DOMINGUES, E.; JUNIOR, G. C. Complexity metric applied to discrete events systems. In: **6th International Conference on Nonlinear Science and Complexity**. 2016. 33

GOMES, V. M. **Complexidade Natural de Sistemas Baseada em Análise de Sensibilidade**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Goiás, 2020. 33, 50, 51, 53, 54, 56, 57, 63, 69, 70, 79, 80

GOMES, V. M.; PAIVA, J. R.; REIS, M. R.; WAINER, G. A.; CALIXTO, W. P. Mechanism for measuring system complexity applying sensitivity analysis. **Complexity**, Hindawi, v. 2019, 2019. 33, 53, 63

GUBNER, J. A. **Probability and random processes for electrical and computer engineers**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006. 41

GUO, Y.; MCNUTT, B.; TIAN, J.; XU, Y. **Estimation of performance utilization of a storage device**. : Google Patents, fev. 19 2019. US Patent 10,209,898. 73

HAFTKA, R. T.; GÜRDAL, Z. **Elements of structural optimization**. : Springer Science & Business Media, 2012. 41

HAMBY, D. A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. **Environmental monitoring and assessment**, Springer, v. 32, n. 2, p. 135–154, 1994. 52

\_\_\_\_\_. A comparison of sensitivity analysis techniques. **Health physics**, New York: Pergamon Press, c1958-, v. 68, n. 2, p. 195–204, 1995. 50

HAMMAMI, O. System theoretical complexity (stc): On the benefits of system multiobjective optimization and automatic model composition. In: IEEE. **2018 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE)**. 2018. p. 1–7. 34, 35

HAPP, W.; MOODY, D. E. Topological techniques for sensitivity analysis. **IEEE Transactions on Aerospace and Navigational Electronics**, IEEE, n. 4, p. 249–254, 1964. 51

HOLLAND, J. H. Studying complex adaptive systems. **Journal of Systems Science and Complexity**, Springer, v. 19, n. 1, p. 1–8, 2006. 32, 55

\_\_\_\_\_. **Complexity: A very short introduction**. : Oxford University Press, 2014. 32, 56

HOMMA, T.; SALTELLI, A. Importance measures in global sensitivity analysis of nonlinear models. **Reliability Engineering & System Safety**, Elsevier, v. 52, n. 1, p. 1–17, 1996. 50

ILGEN, D. R.; SCHNEIDER, J. Performance measurement: A multi-discipline view. **International review of industrial and organizational psychology**, John Wiley & Sons Ltd, v. 6, p. 71–108, 1991. 31, 55

ISO. **Standard Atmosphere**. ISO 2533:1975. : International Organization for Standardization, 1975. 91

JAILLET, P.; WAGNER, M. R. **Online Optimization**. : Springer Publishing Company, Incorporated, 2012. 42

JEN, E. **Robust design: a repertoire of biological, ecological, and engineering case studies**. : Oxford University Press, 2005. ISBN 9780195165333. 58, 59

KATZ, R. H.; GIBSON, G. A.; PATTERSON, D. A. Disk system architectures for high performance computing. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 77, n. 12, p. 1842–1858, 1989. 73

KAYANDE, D.; SHRAWANKAR, U. Performance analysis for improved RAM utilization. In: IEEE. **2012 CSI Sixth International Conference on Software Engineering (CONSEG)**. 2012. p. 1–6. 73

KESHTKAR, A.; BOLANDI, H.; JALALI, A. A. Design and optimization of robust pid controller via stability methods for a class of uncertainty systems. In: IEEE. **2007 Mediterranean Conference on Control & Automation**. 2007. p. 1–5. 34, 35

KHAMMASH, M.; PEARSON, J. Performance robustness of discrete-time systems with structured uncertainty. **IEEE Transactions on Automatic Control**, IEEE, v. 36, n. 4, p. 398–412, 1990. 59, 60

KIM, N. H.; WANG, H.; QUEIPO, N. V. Adaptive reduction of random variables using global sensitivity in reliability-based optimisation. **International Journal of Reliability and Safety**, Inderscience Publishers, v. 1, n. 1-2, p. 102–119, 2006. 52

KLIR, G. J. **Facets of systems science**. : Springer Science & Business Media, 2013. 37

KLOMP, R.; BORST, C.; PAASSEN, R. van; MULDER, M. Expertise level, control strategies, and robustness in future air traffic control decision aiding. **IEEE Transactions on Human-Machine Systems**, IEEE, v. 46, n. 2, p. 255–266, 2016. 59, 60

KOOREHDAVOUDI, H.; BOGDAN, P. A statistical physics characterization of the complex systems dynamics: quantifying complexity from spatio-temporal interactions. **Scientific reports**, Nature Publishing Group, v. 6, p. 27602, 2016. 33

KRISHNASWAMY, K.; PAPAGEORGIOU, G.; GLAVASKI, S.; PAPACHRISTODOULOU, A. Analysis of aircraft pitch axis stability augmentation system using sum of squares optimization. In: IEEE. **Proceedings of the 2005, American Control Conference, 2005**. 2005. p. 1497–1502. 34, 35

KUNG, S.-T.; CHENG, C.-C.; LIU, C.-C.; CHEN, Y.-C. **Dynamic power saving by monitoring CPU utilization**. : Google Patents, jun. 3 2003. US Patent 6,574,739. 73

LACERDA, M. G. de; NETO, H. D. A.; BERNARDALUDERMIR, T.; KUCHEN, H.; NETO, F. B. L. Population size control for efficiency and efficacy optimization in population based metaheuristics. In: IEEE. **2018 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)**. 2018. p. 1–8. 44

LADDHA, P.; RAMALINGAM, S. P. Bitrate and complexity optimizations for video conferencing systems. In: IEEE. **2016 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)**. 2016. p. 235–236. 34, 35

LEÃO, B. P.; YONEYAMA, T.; GOMES, J. P. P. Asymmetric unscented transform for failure prognosis. **IEEE Transactions on Reliability**, IEEE, v. 65, n. 3, p. 1406–1415, 2016. 41

LEE, H. K.; AHN, K. J.; JUNG, J.; YI, G. Performance optimization by simplification of relationship in scalable layer stream. In: IEEE. **2014 28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops**. 2014. p. 887–894. 33, 35

LEE, K. Y.; EL-SHARKAWI, M. A. **Modern heuristic optimization techniques: theory and applications to power systems**. : John Wiley & Sons, 2008. 40

LEMPERT, R. J.; COLLINS, M. T. Managing the risk of uncertain threshold responses: comparison of robust, optimum, and precautionary approaches. **Risk Analysis: An International Journal**, Wiley Online Library, v. 27, n. 4, p. 1009–1026, 2007. 59

LEONARDI, F.; CRUZ, J. J. d. Projeto de controladores robustos com especificações temporais. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, SciELO Brasil, v. 16, n. 3, p. 279–289, 2005. 60

LETHAM, B.; BAKSHY, E. Bayesian optimization for policy search via online-offline experimentation. **Journal of Machine Learning Research**, v. 20, n. 145, p. 1–30, 2019. 42, 43

LIBERMAN, B.; BATISTA, V. T.; OCÁCIA, G. C. Estimativa de velocidade média do vento a partir de dados de estações meteorológicas com três registros diários. **Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural**, SciELO Brasil, 2002. 91

LIU, Z.; HE, X.; DING, Z.; ZHANG, Z. A basin stability based metric for ranking the transient stability of generators. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, IEEE, v. 15, n. 3, p. 1450–1459, 2019. 33, 58, 59

LLOYD, S. Measures of complexity: a nonexhaustive list. **IEEE Control Systems Magazine**, v. 21, n. 4, p. 7–8, 2001. 32

LYNCH, W. C. Operating system performance. **Communications of the ACM**, ACM New York, NY, USA, v. 15, n. 7, p. 579–585, 1972. 73

MAIER, M. W. Architecting principles for systems-of-systems. In: WILEY ONLINE LIBRARY. **INCOSE International Symposium**. 1996. v. 6, n. 1, p. 565–573. 37

MARSHALL, J. C.; BOSCO, L.; ADHIKARI, N. K.; CONNOLLY, B.; DIAZ, J. V.; DORMAN, T.; FOWLER, R. A.; MEYFROIDT, G.; NAKAGAWA, S.; PELOSI, P. et al. What is an intensive care unit? A report of the task force of the world federation of societies of intensive and critical care medicine. **Journal of critical care**, Elsevier, v. 37, p. 270–276, 2017. 69

MEED, W. Complexity science and the social world. In: KEMPF-LEONARD, K. (Ed.). **Encyclopedia of Social Measurement**. Salford, Greater Manchester, United Kingdom: Elsevier, 2005. p. 399–403. 32

MELLO, B. A. **Modelagem e Simulação de Sistemas**. 2007. 38

MENEZES, E.; TOBIAS, D. F.; RUSSELL, R.; ALTMEJD, M. **CPU utilization measurement techniques for use in power management**. : Google Patents, jan. 18 2005. US Patent 6,845,456. 73

MITCHELL, M. **Complexity: A guided tour**. 1. ed. Oxford, United Kingdom 2009: Oxford University Press, 2009. ISBN 9780199798100. 32, 56

- MOBUS, G. E.; KALTON, M. C. et al. **Principles of systems science.** : Springer, 2015. 32, 37
- MONTGOMERY, E. **Introdução aos Sistemas a Eventos Discretos e à Teoria de Controle Supervisório.** : Alta Books, 2004. 37
- NASSAR, I.; ELSAYED, I.; ABDELLA, M. Optimization and stability analysis of offshore hybrid renewable energy systems. In: IEEE. **2019 21st International Middle East Power Systems Conference (MEPCON).** 2019. p. 583–588. 34, 35
- NESTEROV, Y. **Introductory lectures on convex optimization: A basic course.** : Springer Science & Business Media, 2013. 42
- NICOLAE, P.-M.; POPA, D.-L.; VOINEA, M. Analysis of the operating regimes of a medium/low voltage transformer supplying a distribution network for urban transports. In: IEEE. **2012 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE).** 2012. p. 1–4. 31
- ODINTSOV, M.; GERASIMENKO, K.; AKIMOV, D. Application of multiobjective optimization methods for improving of power system static stability. In: IEEE. **2015 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW).** 2015. p. 251–253. 34, 35
- OKUYAMA, Y. Stability analysis of discrete event systems using multiple metrics and simultaneous linear inequalities. In: IEEE. **2016 55th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE).** 2016. p. 1141–1146. 33, 58, 59
- OLIVEIRA, D.; NAVAUX, P.; RECH, P. Increasing the efficiency and efficacy of selective-hardening for parallel applications. In: IEEE. **2019 IEEE International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI and Nanotechnology Systems (DFT).** 2019. p. 1–6. 55
- OTTINO, J. M. Engineering complex systems. *Nature*, Nature Publishing Group, v. 427, n. 6973, p. 399, 2004. 32
- PADILHA, K. G.; VATTIMO, M. d. F. F.; SILVA, S. C.; KIMURA, M.; WATANABE, M. **Enfermagem em UTI: cuidando do paciente crítico.** : Editora Manole, 2016. 69

- PAGE, J. B. **Method for balancing the utilization of input/output devices.** : Google Patents, out. 31 1972. US Patent 3,702,006. 73
- PAGE, S. E. **Diversity and complexity.** : Princeton University Press, 2010. 55, 56, 59
- PAICE, A.; WIRTH, F. Analysis of the local robustness of stability for maps. In: IEEE. **Control Conference (ECC), 1997 European.** 1997. p. 1259–1264. 33, 58, 60
- PAIVA, J.; GOMES, V.; OLIVEIRA, S.; DOMINGUES, E.; ALVES, A.; JUNIOR, G. ruz; CALIXTO, W. Calculation of system complexity based on the connections: methodology and applications. In: **16 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering.** 2016. 33
- PAIVA, J.; GOMES, V.; RODRIGUES, B. A.; SILVA, L. F. A.; ANICETO, B. C. M.; FURRIEL, G. P.; CALIXTO, W. P. Metric for calculation of system complexity based on its connections. **Transactions on Environment and Electrical Engineering**, v. 2, n. 1, p. 67–73, 2017. 33
- PAIVA, J. R.; GOMES, V. M.; REIS, M. R.; WAINER, G.; CALIXTO, W. P. Relationship between risk and complexity in system using connection based metric. In: IEEE. **2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe).** 2018. p. 1–5. 48, 49
- PAIVA, J. R. B. **Métrica de complexidade em sistemas a eventos discretos.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Goiás, 2016. 37, 38, 56
- PANNELL, D. J. Sensitivity analysis: strategies, methods, concepts, examples. **Agric Econ**, v. 16, p. 139–152, 1997. 50
- PAPOULIS, A.; PILLAI, S. U. **Probability, random variables, and stochastic processes.** : Tata McGraw-Hill Education, 2002. 41
- PEDREIRA, L. C.; BRANDÃO, A. S.; REIS, A. M. Evento adverso no idoso em unidade de terapia intensiva. **Revista brasileira de enfermagem**, SciELO Brasil, v. 66, n. 3, p. 429–436, 2013. 69
- PEGDEN, C. D.; SADOWSKI, R. P.; SHANNON, R. E. **Introduction to simulation using SIMAN.** : McGraw-Hill, Inc., 1995. 38
- PEREIRA, M. H. R. **Platão: A República.** : Calouste Gulbenkian, 2014. 31

- PESTEREV, A. Absolute stability analysis for a linear time varying system of special form. In: IEEE. **2016 International Conference Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems (Pyatnitskiy's Conference)**. 2016. p. 1–3. 33, 58, 59
- PHADKE, M. S. **Quality Engineering Using Robust Design**. : Prentice Hall PTR, 1989. 59, 60
- PIERRE, R. **Process for improving the performance of a multiprocessor system comprising a job queue and system architecture for implementing the process**. : Google Patents, jan. 31 2006. US Patent 6,993,762. 73
- PRIEM, C.; ROSENTHAL, D. S. **Architecture for providing input/output operations in a computer system**. : Google Patents, abr. 22 1997. US Patent 5,623,692. 73
- QIAOGE, L.; MENGYIN, F.; CHANGSHENG, S. Study of the control-equilibrium of control systems. **Journal of Systems Engineering and Electronics**, BIAI, v. 19, n. 4, p. 775–778, 2008. 58
- RAO, S. S. **Engineering optimization: theory and practice**. : John Wiley & Sons, 2019. 40, 47
- RECHTIN, E.; MAIER, M. W. **The art of systems architecting**. : CRC Press, 2010. 37
- REPPERGER, D. W.; ROBERTS, R. G.; KOEPKE, C. G. **Quantitative measurements of system complexity**. : Google Patents, ago. 8 2012. US Patent 8,244,503 B1. 56
- REZENDE, S. O. **Sistemas inteligentes: fundamentos e aplicações**. : Editora Manole Ltda, 2003. 39
- ROMANOWICZ, T. M. Structural sensitivity analysis in a certain class of linear systems. **IEEE transactions on systems, man, and cybernetics**, IEEE, n. 3, p. 413–417, 1983. 52
- ROSSO, O. A.; CARPI, L. C.; SACO, P. M.; RAVETTI, M. G.; PLASTINO, A.; LARRONDO, H. A. Causality and the entropy–complexity plane: Robustness and missing ordinal patterns. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Elsevier, v. 391, n. 1, p. 42–55, 2012. 33

ROWLAND, J. R.; PASTRICK, H. L. A stochastic algorithm for sensitivity analysis. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, IEEE, n. 4, p. 430–436, 1975. 51

SACHA, K. M. Measuring the real-time operating system performance. In: IEEE. **Proceedings Seventh Euromicro Workshop on Real-Time Systems**. 1995. p. 34–40. 73

SALTELLI, A.; TARANTOLA, S.; CAMPOLONGO, F.; RATTO, M. **Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models**. : John Wiley & Sons, 2004. 50, 52

SALTELLI, A.; TARANTOLA, S.; CHAN, K.-S. A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output. **Technometrics**, Taylor & Francis, v. 41, n. 1, p. 39–56, 1999. 50

SANTOS, F. C.; PINHEIRO, F. L.; LENAERTS, T.; PACHECO, J. M. The role of diversity in the evolution of cooperation. **Journal of theoretical biology**, Elsevier, v. 299, p. 88–96, 2012. 56

SANTOS, L.; SILVA, C.; PAIVA, J.; GOMES, V.; OLIVEIRA, S.; ALVES, A.; CALIXTO, W. A methodology for calculation of complexity in systems: Case study. In: **IEEE Congreso Chileno de Ingeniería Eléctrica, Electrônica, Tecnologías de la Información y Comunicaciones**. 2015. p. 213–218. 33

SARAIVA, J. P.; LIMA, B. S.; GOMES, V. M.; FLORES, P. H.; GOMES, F. A.; ASSIS, A. O.; REIS, M. R.; ARAÚJO, W. R.; ABRENHOSA, C.; CALIXTO, W. P. Calculation of sensitivity index using one-at-a-time measures based on graphical analysis. In: IEEE. **Electric Power Engineering (EPE), 2017 18th International Scientific Conference on**. 2017. p. 1–6. 52

SARAMAGO, S. P.; JR, V. S. et al. Introdução às técnicas de otimização em engenharia. **Horizonte científico**, v. 1, n. 9, 2008. 40

SCHLESINGER, R. L. N. S. Characterizing climate-change uncertainties for decision-makers. an editorial essay. **Climatic Change**, Springer Science & Business Media, v. 65, n. 1-2, p. 1, 2004. 59

SERAPIÃO, A. B. d. S. Fundamentos de otimização por inteligência de enxames: uma visão geral. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, SciELO Brasil, v. 20, n. 3, p. 271–304, 2009. 43

SHAH, S. N. M.; MAHMOOD, A. K. B.; OXLEY, A. Hybrid scheduling and dual queue scheduling. In: IEEE. **2009 2nd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology**. 2009. p. 539–543. 73

SHARPE, M. **General theory of Markov processes**. : Academic press, 1988. 41

SHYR, W.-J.; HSU, C.-H.; CHEN, C.-H.; WU, C.-F. Robust stability analysis of discrete time system via an optimization approach. In: IEEE. **Second International Conference on Innovative Computing, Informatio and Control (ICICIC 2007)**. 2007. p. 103–103. 34, 35

SIMON, H. A. The architecture of complexity. **Proceedings of the American Philosophical Society**, v. 106, n. 6, p. 467–482, 1962. 31

\_\_\_\_\_. **Models of my life**. : MIT press, 1991. 32

SINGH, B.; TIWARI, P.; SINGH, S. Enhancement of power system performances by optimally placed facts controllers by using different optimization techniques in distribution systems: A taxonomical review. In: IEEE. **2018 5th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)**. 2018. p. 1–7. 34, 35

STACEY, R. D. **Strategic Management and Organisational Dynamics: The challenge of complexity to ways of thinking about organisations**. 6. ed. : Prentice Hall, 2011. 17, 32, 48, 49

STALLINGS, W. **Computer organization and architecture: designing for performance**. : Pearson Education India, 2003. 71

SUN, Y.; XIONG, H. Job-shop scheduling problem based on particle swarm optimization algorithm. **Sensors & Transducers**, IFSA Publishing, SL, v. 16, p. 116, 2012. 44

SUSSMAN, J. M. Ideas on complexity in systems—twenty views. **Retrieved October**, v. 3, p. 2008, 2000. 32

SWARUP, A. On robustness measures and control. In: IEEE. **Industrial Automation and Control, 1995 (IA & C'95), IEEE/IAS International Conference on**. 1995. p. 281–284. 60

TANENBAUM, A. S. **Structured computer organization**. : Pearson Education India, 2016. 71

TARANTOLA, S.; GATELLI, D.; KUCHERENKO, S.; MAUNTZ, W. et al. Estimating the approximation error when fixing unessential factors in global sensitivity analysis. **Reliability Engineering & System Safety**, Elsevier, v. 92, n. 7, p. 957–960, 2007. 37

TAVARES, Y. M.; NEDJAH, N.; MOURELLE, L. de M. Utilização de otimização por enxame de partículas e algoritmos genéticos em rastreamento de padrões. In: **12 Congresso Brasileiro de Inteligência Computacional**. 2015. 44

THOMAS, D. G.; BYWATERS, D. S. System stability and conclusions. In: **The Creators of Inside Money**. : Springer, 2021. p. 211–215. 58

THOMPSON, M. W. Application of a robustness measure for parameter estimation. In: IEEE. **Circuits and Systems, 1989., Proceedings of the 32nd Midwest Symposium on**. 1989. p. 1154–1157. 60

TUDEVDAGVA, U.; HELLER, A.; HARDT, W. A model for robustness evaluation of embedded systems. In: IEEE. **Strategic Technology (IFOST), 2013 8th International Forum on**. 2013. v. 2, p. 192–195. 60

ULLMAN, D. G. **Making robust decisions: decision management for technical, business, and service teams**. : Trafford Victoria, Canada, 2006. 59

WAINER, G. A. **Discrete-event modeling and simulation: a practitioner's approach**. : CRC press, 2009. 38

WAN, L.; LUO, J. On the complexity of wireless multicast optimization. **IEEE Wireless Communications Letters**, IEEE, v. 1, n. 6, p. 593–596, 2012. 34, 35

WANG, S.; ZHOU, F.; WANG, F. Effect of inertia weight  $\omega$  on pso-sa algorithm. **International Journal of Online Engineering**, v. 9, 2013. 44

WILSON, M. P. General system theory: Towards the unification of science. In: **Proceedings of the 58th Annual Meeting of the ISSS-2014 United States**. 2015. v. 1, n. 1. 37

WOLF, A.; SWIFT, J. B.; SWINNEY, H. L.; VASTANO, J. A. Determining lyapunov exponents from a time series. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, Elsevier, v. 16, n. 3, p. 285–317, 1985. 58

XIAO, P.; MA, J.; LI, J. Complexity and optimization analysis of public transport system of weifang, shandong province, china. In: IEEE. **2008 International**

**Symposium on Information Science and Engineering**. 2008. v. 2, p. 555–558. [34](#), [35](#)

XUE, A.; MEI, S.; XIE, B. A comprehensive method to compute the controlling unstable equilibrium point. In: IEEE. **2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies**. 2008. p. 1115–1120. [58](#)

YANO, T.; MARTINS, E.; SOUSA, F. L. de. A model-based approach for robustness test generation. In: IEEE. **Dependable Computing Workshops (LADCW), 2011 Fifth Latin-American Symposium on**. 2011. p. 33–34. [60](#)

YAZ, E. Deterministic and stochastic robustness measures for discrete systems. **IEEE Transactions on Automatic Control**, IEEE, v. 33, n. 10, p. 952–955, 1988. [59](#), [60](#)

YAZ, E.; NIU, X. New robustness bounds for discrete systems with random perturbations. **IEEE Transactions on Automatic Control**, IEEE, v. 38, n. 12, p. 1866–1870, 1993. [59](#), [60](#)

YOUNG, G.; DEY, S.; ROGERS, A.; EXTON, D. Cost and time-effective method for multi-scale measures of rugosity, fractal dimension, and vector dispersion from coral reef 3d models. **PloS one**, Public Library of Science, v. 12, n. 4, 2017. [33](#)

ZHAO, J. Robustness of complex networks with applications to random graphs. In: IEEE. **Signal and Information Processing (GlobalSIP), 2015 IEEE Global Conference on**. 2015. p. 1062–1065. [60](#)

ZHONG, X.; SANTOS, E.; MCCARTNEY, R. Exploring the relationship between knowledge and algorithm performance in discrete optimization. In: IEEE. **16th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence**. 2004. p. 604–611. [33](#), [35](#)

ZIN-EDDINE, D.; JOSÉ-HENRJQUE, P. Q.; KALIAGUINE, S. Acid hydrolysis of cellulose. part ii: Stochastic simulation using a monte carlo technique. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, Wiley Online Library, v. 72, n. 1, p. 106–112, 1994. [41](#)