

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

MÉTRICA DE COMPLEXIDADE EM SISTEMAS A
EVENTOS DISCRETOS

João Ricardo Braga de Paiva

[UFG] & [EMC]
[Goiânia - Goiás - Brasil]
2016

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS 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 nº 9610/98, 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.

1. Identificação do material bibliográfico: Dissertação Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação

Nome completo do autor: João Ricardo Braga de Paiva

Título do trabalho: Métrica de Complexidade em Sistemas a Eventos Discretos

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.



Assinatura do (a) autor (a) ²

Data: 27 / 06 / 2016

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

²A assinatura deve ser escaneada.

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

**MÉTRICA DE COMPLEXIDADE EM SISTEMAS A
EVENTOS DISCRETOS**

João Ricardo Braga de Paiva

Dissertação apresentada à Banca Examinadora como exigência parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação pela Universidade Federal de Goiás (UFG), Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), sob a orientação do Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto

[UFG] & [EMC]
[Goiânia - Goiás - Brasil]
2016

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 Complexidade em Sistemas a Eventos Discretos
[manuscrito] / João Ricardo Braga de Paiva. - 2016.
83 f.

Orientador: Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica (EEEC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Goiânia, 2016.

Bibliografia.

Inclui lista de figuras, lista de tabelas.

1. Complexidade. 2. Sistemas a Eventos Discretos. 3. Simulação. I. Calixto, Wesley Pacheco, orient. II. Título.

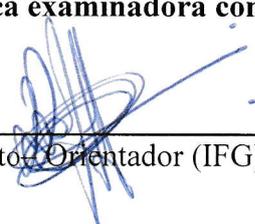


FOLHA DE APROVAÇÃO

"Métrica de Complexidade em Sistemas a Eventos Discretos"

JOÃO RICARDO BRAGA DE PAIVA

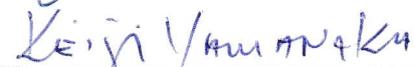
Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos senhores:



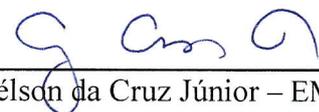
Wesley Pacheco Calixto - Orientador (IFG)



Elder Geraldo Domingues - IFG



Keiji Yamanaka - UFU



Gélson da Cruz Júnior - EMC/UFG

Goiânia, 27 de abril de 2016

“En nuestro tiempo, nos hallamos muy lejos de la visión monolítica de la física clásica. Ante nosotros se abre un universo del que apenas comenzamos a entrever las estructuras. Descubrimos un mundo fascinante, tan sorprendente y nuevo como el de la exploración de la infancia.”

ILYA PRIGOGINE, PRÊMIO NOBEL DE QUÍMICA DE 1977
em “¿Tan sólo una ilusión?”, Setembro, 1983.

A todas as pessoas que intencionalmente ou não, me ajudaram durante esta trajetória. Parentes, amigos e até mesmo desconhecidos que em algum momento expressaram apoio e apreço ao meu sonho de me tornar um Mestre. A eles dedico este trabalho, não somente meu, mas de todos os que puderem se beneficiar dele.

AGRADECIMENTOS

Sou muito grato às oportunidades que recebi em minha vida e muito feliz por ter as enxergado e as aproveitado, em sua maior parte. Ao provedor de todo o bem que me foi direcionado e Grande Arquiteto do Universo, independente da denominação que receba nas mais diversas crenças, o meu muito obrigado. Continuo meus agradecimentos citando meus pais, João e Maria Aparecida. Tenho convicção de que muito do que alcancei é reflexo da boa educação e incentivo ao estudo sempre presentes em minha criação e na das minhas irmãs, Talita e Priscila, as quais estendo meus agradecimentos.

Agradeço também, de forma muito especial aos integrantes e corajosos amigos de nossa "Equipe Complexa", que junto a mim se aventuraram a estudar um tema tão pouco explorado como complexidade de sistemas. Agradeço por partilharem comigo seu tempo, experiências e sobretudo sua paciência. Viviane Gomes, Bruno Aniceto, Geovanne Furriel e Laís Silva a vocês meu muito obrigado!

Ainda, gostaria de agradecer o apoio de todos os pesquisadores integrantes do NExT que durante o desenvolvimento deste trabalho contribuíram com conselhos, análises e comentários relativos à pesquisa. Agradeço em especial às amigas Talita Vilas Boas e Marcela Carvalho pelas ótimas tardes de conversas e reflexões que passamos juntos.

Finalmente, agradeço ao meu não somente orientador, mas colega de trabalho e amigo Wesley Pacheco Calixto por acreditar em meu potencial desde o início de nossas conversas, em 2013. Agradeço muito pelas orientações, conselhos pessoais e profissionais e trocas de experiências. Todo o esforço valeu a pena!

RESUMO

Este trabalho apresenta métrica para cálculo de complexidade em sistema a eventos discretos. A metodologia proposta utiliza a dinâmica do sistema levando em consideração suas conexões ativas, mapeadas na matriz de relacionamento. A métrica de complexidade é aplicada a três sistemas distintos. Os resultados obtidos apresentam a relação entre a complexidade e as características específicas de cada sistema. O método proposto agrega conhecimento sobre o sistema, contribuindo para análises de comportamento e desempenho.

COMPLEXITY METRIC IN DISCRETE EVENT SYSTEMS

ABSTRACT

This work presents metric for complexity calculation in discrete event systems. The proposed methodology uses the dynamics of the system taking into account their active connections, mapped in relationship matrix. The complexity metric is applied to three distinct systems. The results show the relationship between the complexity and specific characteristics of each system. The proposed method combines knowledge about the system, contributing to behavior and performance analysis.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	23
CAPÍTULO 2 SISTEMA, MODELO E SIMULAÇÃO	29
2.1 Sistemas	29
2.2 Sistemas a Eventos Discretos	31
2.3 Modelagem	33
2.4 Simulação	34
2.5 Considerações	36
CAPÍTULO 3 COMPLEXIDADE	37
3.1 Complexidade sob o Ponto de Vista Filosófico	37
3.2 Modelo para Cálculo de Complexidade	40
3.3 Considerações	42
CAPÍTULO 4 METODOLOGIA	43
4.1 Métrica de Complexidade Baseada em Conexões	43
4.2 Modelo do Jantar dos Filósofos Chineses	44
4.3 Modelo do Centro de Distribuição	48
4.4 Modelo do Centro de Emergência Hospitalar	51
4.5 Considerações	53
CAPÍTULO 5 RESULTADOS	55
5.1 Jantar dos Filósofos Chineses	55
5.2 Centro de Distribuição	61
5.3 Centro de Emergência Hospitalar	66
5.4 Complexidade × Risco	70

CAPÍTULO 6 CONCLUSÃO	75
6.1 Contribuições do Trabalho	75
6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Diferentes organizações para o conjunto de cinco elementos.	30
2.2 Evolução dinâmica de sistema a eventos discretos no tempo.	32
2.3 Sistema de fila aberto.	33
2.4 Sistema de fila fechado.	33
2.5 Simulação computacional.	35
3.1 Matriz de Stacey.	38
4.1 Jantar dos Filósofos Chineses.	45
4.2 Centro de Distribuição.	48
4.3 Centro de Emergência Hospitalar.	51
5.1 Relação da Complexidade Estática \times Número de Recursos.	56
5.2 Dinâmica do processo para o filósofo F_2	58
5.3 Complexidades Estática, Dinâmica e Média do Jantar dos Filósofos Chi- neses.	59
5.4 Utilização percentual de recursos e complexidade para o Centro de Dis- tribuição.	62
5.5 Variação no número de recursos e complexidade para o Centro de Distri- buição.	63
5.6 Relação entre Tempo de Entrega e Complexidade.	64
5.7 Menor e maior complexidade para o Centro de Emergência Hospitalar. . .	67
5.8 Utilização percentual de recursos e complexidade para o Centro de Emer- gência Hospitalar.	68
5.9 Picos de complexidade para o Centro de Emergência Hospitalar.	69
5.10 Correlação entre complexidade, incerteza e métodos de apoio à decisão. .	72
5.11 Sobreposição métodos de apoio à decisão e Matriz de Stacey.	72
5.12 Gráfico aranha do Centro de Emergência Hospitalar.	73

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
4.1 Relação entre Filósofos e <i>Hashis</i>	47
4.2 Relação entre Pedidos, Fila e Recursos.	50
4.3 Relação entre Pacientes, Fila e Recursos.	53
5.1 Relação entre $n_r \times \gamma_e(f)$	56
5.2 Tempos a_c , a_e e a_f para cada filósofo.	57
5.3 Eficiência dos filósofos	58
5.4 Relação entre $n_r \times T(F_i)$	58
5.5 Percentual de ocorrência de valores de $\gamma_d(f)$	60
5.6 Distribuições probabilísticas adotadas para o Centro de Distribuição.	61
5.7 Cenários com menores tempos de entrega e complexidade correspondente.	64
5.8 Relação entre tempo de entrega \times complexidade.	65
5.9 Distribuições probabilísticas adotadas para o Centro de Emergência Hospitalar.	66
5.10 Complexidade e tempos médios do Centro de Emergência Hospitalar.	68
5.11 Relação entre tempos de permanência no Centro de Emergência Hospitalar \times complexidade.	69
5.12 Menores valores para relação entre tempos de permanência e complexidade.	70
5.13 Menores eficiências no uso dos recursos.	70
5.14 Maiores eficiências no uso dos recursos.	70
5.15 Relação entre o número de recursos e a eficiência.	74

LISTA DE SÍMBOLOS

α	– Número pertencente ao conjunto dos números naturais não nulos
$\gamma(d)$	– Complexidade dinâmica no Centro de Distribuição
$\gamma(p)$	– Complexidade dinâmica no Centro de Emergência Hospitalar
$\gamma(s)$	– Complexidade do sistema
$\gamma_d(f)$	– Complexidade dinâmica no Jantar dos Filósofos Chineses
$\gamma_e(f)$	– Complexidade estática no Jantar dos Filósofos Chineses
$\gamma_m(f)$	– Complexidade média no Jantar dos Filósofos Chineses
$\Gamma(S)$	– Complexidade do sistema
η	– Eficiência do filósofo
ρ	– Número de conexões ativas no instante t
σ	– Desvio padrão
ψ	– Probabilidade de que a conexão ocorra
a_c	– Estado comendo do filósofo
a_e	– Estado esperando do filósofo
a_f	– Estado filosofando do filósofo
C	– Cenário
C_1, C_2 e C_3	– Caminhões 1 à 3
d	– Número total de partículas no sistema
D_1, D_2	– Docas 1 e 2
E	– Número de microestados que uma partícula pode assumir
E_1	– Técnico de exames 1
F_i	– Filósofo i
F_1 à F_5	– Filósofos 1 à 5
g	– Posição do símbolo na mensagem
G_1, G_2	– Grupos de carregadores 1 e 2
h	– Número de símbolos disponíveis para a composição de mensagem
H_1 à H_5	– <i>Hashis</i> 1 à 5, respectivamente
$H(X)$	– Entropia informacional
i	– Conexão entre dois elementos do sistema
j	– Estado de uma entidade
k	– Número de estados das entidades
l	– Número de partículas em cada microestado do sistema
m	– Tamanho de T_j
\bar{m}	– Média
M	– Matriz de relacionamento entre entidades, recursos e filas
M_1, M_2	– Médicos 1 e 2, respectivamente
n	– Quantidade de filósofos
\mathbb{N}	– Conjunto dos números naturais
N	– Número de elementos na matriz M

N_1, N_2	– Enfermeiros 1 e 2
n_{a_c}	– Número de filósofos no estado a_c
n_{a_e}	– Número de filósofos no estado a_e
n_{a_f}	– Número de filósofos no estado a_f
n_{c_j}	– Número de conexões ativas por entidade no estado j
n_e	– Número de entidades do sistema no instante t
n_{e_j}	– Número de entidades no estado j
n_f	– Número de filas do sistema
n_{h_c}	– Número de pacientes em consulta médica
n_{h_e}	– Número de pacientes realizando exames
n_{h_f}	– Número de pacientes em fila
n_{h_m}	– Número de pacientes recebendo medicação
n_{p_c}	– Número de pedidos sendo carregados
n_{p_f}	– Número de pedidos em fila
n_{p_t}	– Número de pedidos sendo transportados
n_r	– Número de recursos do sistema
$p(c)_i$	– Probabilidade de que determinada conexão i ocorra
p_f	– Probabilidade de que uma partícula esteja no microestado f
p_g	– Probabilidade de um símbolo na posição g
$p(x)_{p,q}$	– Probabilidade de ocorrência de conexão entre os elementos p e q
P_1 à P_6	– Pedidos 1 à 6
Pe_1 à Pe_7	– Pacientes de Emergência 1 à 7
Q	– Fila do Centro de Distribuição
Q_1	– Fila de atendimento médico inicial
Q_2	– Fila para medicação
Q_3	– Fila para exames
Q_4	– Fila de retorno ao médico
R_C	– Relação entre T_e e $\gamma(d)$
R_H	– Relação entre t_p e $\gamma(p)$
R_{H_1}	– Relação entre t_{p1} e $\gamma(p)$
R_{H_2}	– Relação entre t_{p2} e $\gamma(p)$
R_{H_3}	– Relação entre t_{p3} e $\gamma(p)$
R_{H_4}	– Relação entre t_{p4} e $\gamma(p)$
S	– Conjunto de conexões do sistema
$ S $	– Tamanho do conjunto S
S_B	– Entropia térmica do sistema
t	– Instante arbitrário de tempo
t_{a_c}	– Tempo que o filósofo permaneceu no estado a_c
t_{a_e}	– Tempo que o filósofo permaneceu no estado a_e
t_{a_f}	– Tempo que o filósofo permaneceu no estado a_f

t_1 à t_9	–	Tempos 1 à 9 gerados por distribuição probabilística
t_n	–	Tempo gerado por distribuição probabilística
t_p	–	Tempo de permanência no Centro de Emergência Hospitalar
t_{p1}	–	Tempo de permanência para saída sem exame nem medicação
t_{p2}	–	Tempo de permanência para saída com exames e/ou medicação
t_{p3}	–	Tempo de permanência para saída após ser atendido mais de uma vez
t_{p4}	–	Tempo de permanência para saída para internação
t_{pc}	–	Tempo de carregamento de pedido
t_{pf}	–	Tempo de espera em fila de pedido
t_{pt}	–	Tempo de transporte de pedido
T_e	–	Tempo de entrega de pedido
$T(F_i)$	–	Tempo total de simulação do Jantar dos Filósofos Chineses
T_j	–	Vetor de períodos de tempo t para o estado a_c
Ut	–	Unidade de Tempo
w	–	Número total de estados possíveis do sistema no instante t

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O conceito de sistema, de acordo com o senso comum, pode ser definido como o agrupamento de partes que operam juntas, visando o objetivo coletivo. Pode ser utilizado em diferentes contextos no cotidiano humano como na saúde, política, educação, esportes e outros.

A literatura apresenta diversas definições para o termo sistema. É possível considerar que um sistema consiste na reunião de elementos que quando combinados interagem entre si, de forma que apresentem um todo organizado, produzindo comportamento ou resultado impossível de ser obtido pelos elementos individualmente (BERTALANFFY, 1968; RECHTIN; MAIER, 2010).

De acordo com Montgomery (2004), sistemas são conjuntos de elementos ou entes materiais ou imateriais entre os quais é possível definir relação e que operam com estrutura organizada. Para Weinberg (1975) e Martin (2007), sistema também pode ser compreendido como camada conceitual inserida sobre um conjunto de elementos. Assim, dependendo do ponto de vista, o mesmo sistema pode ser percebido de diferentes formas, de acordo com os observadores.

As interações entre os elementos de um sistema podem ocorrer de diferentes maneiras conforme o mesmo evolui no tempo. Isso faz com que seu comportamento possa variar, seja de maneira esperada ou não. Com isto, um sistema pode apresentar diferentes níveis de complexidade de acordo com a realização de suas funções (SIMON, 1991).

O modelo é a gama variada de métodos e aplicações que reproduzem o comportamento dos sistemas reais. Entende-se que o modelo é a representação de determinado sistema com algumas simplificações. De posse do modelo, pode-se representar cada uma das relações entre os componentes de um sistema, realizando a simulação. As relações entre os componentes do sistema, medidas no modelo, indicam a complexidade deste sistema.

O conceito de complexidade, sob o ponto de vista do observador ou do ente que realiza alguma interação com o sistema, é subjetivo e associado à percepção do mesmo e não somente às propriedades do objeto observado (SIMON, 1976). Sendo

assim, se a quantidade de conhecimento sobre o objeto de estudo aumenta, este se torna menos *complexo*, ou seja, a sua complexidade percebida diminui à medida que o conhecimento aumenta, passando a ser considerado mais *simples*.

Um exemplo para este conceito se encontra na indústria automobilística. O primeiro automóvel produzido por Henry Ford em 1903 na sua fábrica em Detroit (Michigan, Estados Unidos) foi o Modelo A, considerado na época invento de elevada complexidade e tecnologia (SNOW, 2014). Entretanto, se comparado aos automóveis modernos repletos de sensores, eletrônica embarcada e com peças construídas utilizando processos de usinagem com rigor nanométrico, o Modelo A é *simplório*. Observe que o objeto de estudo, Modelo A da Ford de 1903, não mudou com o tempo, mas o grau de entendimento a seu respeito e o domínio da tecnologia empregada na construção de carros, esta sim, obteve conhecimento no decorrer dos anos.

Reflexões sobre complexidade de sistemas podem ser observadas desde a antiga Grécia. Por volta do ano 248 *a.C.* Platão entendia que cada um deveria desempenhar sua função para toda a comunidade, evidenciando a necessidade de que cada indivíduo deveria assumir sua parcela de contribuição para que a comunidade funcionasse como um todo. Aristóteles o seguia dizendo que o todo é mais do que a soma das partes, no sentido de que as interações entre as partes fazem surgir um todo complexo que não é resultado simplesmente da junção das partes individuais (PEREIRA, 2014; BINI, 2012).

Um dos primeiros estudos formais sobre complexidade de sistemas foi realizado por Simon (1962), professor de administração do Carnegie Institute of Technology e publicado pela Sociedade Americana de Filosofia, que trata das características que tornavam complexa a arquitetura de um sistema. Em 1976 Simon publica em congresso organizado pela Universidade de Chicago o trabalho que questiona o quão complexos são os sistemas e qual a influência do comportamento e estrutura destes na complexidade (SIMON, 1976).

Bak e Wiesenfeld (1987), pesquisadores do departamento de física do Brookhaven National Laboratory de Nova York realizam estudo que demonstra a relação da auto-organização (capacidade que o sistema possui de modificar sua estrutura enquanto funciona) com a criticalidade em sistemas dinâmicos complexos. Nonaka (1988) publica na revista California Management Review, da Universidade de Berkeley outro estudo sobre auto-organização, com foco nas grandes empresas japonesas da época.

Na década seguinte, [Simon \(1991\)](#) publica o livro intitulado *Models of My Life* que consiste numa autobiografia onde o autor relaciona algumas de suas descobertas científicas sobre complexidade, com fatos marcantes em sua vida. [Casti \(1995\)](#) publica o livro sobre a temática de sistemas complexos e o que ele denomina "*ciência da surpresa*", que rege a dinâmica dos acontecimentos inesperados neste tipo de sistema.

[Bar-Yam \(2002\)](#) do New England Complex Systems Institute da Universidade de Cambridge publica estudo que analisa o aumento da complexidade na medida em que as organizações dos seres humanos se tornam mais elaboradas e com maior número de regras e restrições, realizando paralelo entre o comportamento individual e o coletivo humano.

Na década de 2000 alguns pesquisadores no Brasil começam a estudar complexidade de sistemas com foco em organizações, sistemas fractais e teoria do caos ([MARIOTTI, 2000](#); [SIFERT, 2006](#); [MARTINS, 2009](#)). Ainda nesta década, pesquisadores da Università di Torino na Itália e do Max-Planck-Institut für Physik Komplexer Systeme na Alemanha publicam trabalho sobre como a previsibilidade (ou a ausência dela) pode ser uma das maneiras para caracterizar a complexidade ([BOFFETTA et al., 2002](#)). [Sammarco \(2003\)](#) apresenta trabalho ao College of Engineering and Mineral Resources da Universidade da Virgínia no qual desenvolve metodologia de avaliação de complexidade de sistemas de segurança informatizados. No ano seguinte, o professor Richard Pascale da Universidade de Stanford afirma que segundo seus estudos até mesmo na área da administração de empresas podem ser utilizados conceitos de sistemas complexos ([PASCALE, 2004](#)). Dois anos depois, [Holland \(2006\)](#) publica artigo no qual define algumas características de sistemas complexos adaptativos, sugerindo metodologias para o estudo deste tipo de sistema.

No início desta década, os estudos sobre complexidade foram estimulados pelo crescente uso de sistemas automatizados e pela necessidade de criação de técnicas para gerir os riscos oriundos de sua utilização. [Perrow \(2011\)](#) e [Stacey \(2011\)](#) abordam os riscos promovidos pela crescente complexidade dos sistemas automáticos. No ano seguinte, [Crutchfield \(2012\)](#) publica na revista Nature artigo com intuito de introduzir a ideia que os sistemas complexos que nos rodeiam podem apresentar padrões que podem ser detectados para melhor administração destes sistemas. Ideia também apresentada nos trabalhos de [Gershenson e Fernández \(2012\)](#), [Maldonado et al. \(2015\)](#) e [Gershenson \(2015\)](#).

Outra área que impulsionou os estudos sobre complexidade de sistemas foi a de redes complexas. De acordo com [Metz et al. \(2007\)](#) este tipo de rede apresenta como característica elevado número de elementos e conexões, demandando métodos de análise diferentes dos utilizados para redes convencionais. [Steen \(2010\)](#) apresenta estudo no qual propõe o uso de redes complexas para análise de redes sociais, com foco nos conceitos de influência, centralidade e prestígio. Segundo [Hofstad \(2016\)](#), professor e pesquisador da Eindhoven University of Technology, redes complexas também podem ser utilizadas para detecção de comunidades, avaliação de qualidade de textos, indexação e sumarização de conteúdos.

Diversos outros estudos tem sido realizados no sentido de criar formas para quantificar a complexidade de sistemas ([SUSSMAN, 2000](#); [CLARK; JACQUES, 2012](#); [HASSENE et al., 2014](#)). Segundo [Lemes \(2012\)](#), assim como existem múltiplas definições para complexidade, é natural que existam múltiplas formas de medi-la. Em lista desenvolvida por [Lloyd \(2001\)](#), relacionam-se cerca de quarenta tipos de métricas diferentes para complexidade, classificadas em três grupos, com base nas seguintes considerações: i) nível de dificuldade para descrever totalmente o sistema; ii) nível de dificuldade para construir o sistema e iii) grau de organização. Neste último caso, a complexidade é relacionada não somente com a dificuldade de se descrever a estrutura organizacional do sistema, mas também com a quantidade de informação compartilhada entre as partes do sistema.

Para medir a complexidade em termos matemáticos, absolutos e independentes de subjetividade, pode-se utilizar a relação entre dois valores de elementos do mesmo sistema ou entre sistemas ([BALDAM et al., 2014](#)). Desta forma, o valor da complexidade medida em determinada situação, fornecerá alguma informação relevante se comparado com outro valor de complexidade medido em outro contexto. O valor obtido na medição da complexidade de sistema pode apenas ser avaliado perante outro valor de complexidade medido para outro sistema ou para o mesmo sistema sob circunstâncias diferentes ([HOLLAND, 2014](#)).

A complexidade dos sistemas tem aumentado perceptivelmente, forma de demonstrar isto, é comparar os aviões da segunda guerra mundial, que funcionavam com, aproximadamente 70% de partes mecânicas e 30% de partes eletrônicas. Nos aviões atuais, estas proporções são inversas ([LEMES, 2012](#)). A complexidade neste caso, aumentou de forma expressiva, pois existe a necessidade de mão de obra especializada na construção, manutenção e operação destas máquinas. O aumento da complexi-

dade, implica em maior número de conexões e conseqüentemente, em maior número de pontos de falha. Isto aumenta os riscos de operação bem como os riscos de acidentes. Neste sentido, a complexidade pode ser utilizada como índice de risco em sistemas.

Diante do exposto, pode-se levantar a hipótese: se é possível mapear as conexões e as relações entre os elementos do sistema em estudo e se através destas conexões mapeadas for possível gerar a matriz de relação, pode-se então, a partir destes dados, desenvolver métrica para mensurar a complexidade do sistema. Portanto, propõe-se desenvolver métrica que considere a dinâmica do sistema e suas mudanças de estado, utilizando a ideia de sistema a eventos discretos. Esta proposta difere das propostas encontradas na literatura pela utilização dos sistemas a eventos discretos, pela geração de matriz de relacionamentos, e pela abordagem do sistema de forma dinâmica, considerando as conexões ativas durante seu funcionamento, justificando este trabalho.

Sob o ponto de vista da produção científica, nota-se que os estudos sobre complexidade de sistemas tem apresentado crescimento, sobretudo a partir da década de 1990. Com os dados obtidos em pesquisa realizada na Web of Science em fevereiro de 2016, utilizando os termos *system AND complexity* foi possível observar que as pesquisas nesta área são recentes e que o tema possui potencial para a realização de pesquisas, obtendo média de citações por item publicado de 6,77.

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento da métrica para mensurar a complexidade em sistemas estáticos e dinâmicos. Ainda como objetivo tem-se: i) utilizar a medida de complexidade para auxiliar nas tomadas de decisão, ii) utilizar a medida de complexidade para valoração de sistemas e iii) utilizar a medida de complexidade para mensurar o grau de risco em sistemas.

O trabalho encontra-se dividido em 6 capítulos. No Capítulo 2 é apresentada revisão bibliográfica sobre sistema, modelo e simulação. No Capítulo 3 são apresentados conceitos relativos à complexidade, tanto sob o ponto de vista filosófico quanto sob o ponto de vista do modelo matemático para cálculo de complexidade. No Capítulo 4 é introduzida a metodologia proposta para cálculo de complexidade em sistemas a eventos discretos. No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos para os estudos de caso. O Capítulo 6 apresenta a conclusão do trabalho e algumas recomendações de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

SISTEMA, MODELO E SIMULAÇÃO

Neste capítulo são apresentados conceitos referentes aos sistemas a eventos discretos. São abordadas ainda características gerais inerentes ao conceito de sistemas, modelagem e simulação.

2.1 Sistemas

Sistemas são constituídos de unidades básicas com diferentes denominações: elementos, componentes, entidades ou partes. Estas unidades interagem trocando informações ou materiais por meio de interfaces comuns. Desta maneira, como resultado da interação entre as unidades formadoras do sistema, surge o comportamento inerente ao mesmo ([BERTALANFFY, 1968](#); [RECHTIN; MAIER, 2010](#)).

Para [Lemes \(2012\)](#), elementos, interações e comportamento são conceitos que constituem o cerne da definição de sistema. A combinação destas três características define o sistema e o comportamento que emergirá deste sistema.

O sistema dinâmico possui conjunto próprio de estados, e se observado em determinado instante de tempo possuirá configuração definida do seu conjunto de estados. Este conjunto de estados é a informação necessária para descrever o comportamento futuro do sistema, no sentido de fazer previsões sobre a emergência do mesmo ([COSTA; LIMA, 2005](#); [CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008](#); [CHWIF; MEDINA, 2014](#)). O conceito de emergência é intrínseco a sistemas, pois suas variáveis emergem devido as relações do sistema e as interações entre suas partes ([LEMES, 2012](#)).

A maneira com que o comportamento do sistema se manifesta é consequência direta ou indireta da interação entre seus elementos constituintes. Esta interação se dá pelas diferentes estruturas, funções e hierarquias com as quais o sistema pode ser organizado ([CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008](#)).

O conjunto de relacionamentos existentes entre os elementos do sistema, geralmente realizados por conexões físicas ou lógicas, determina a estrutura do mesmo. Desta forma, a estrutura do sistema pode ser definida como a rede formada pelas dependências entre cada elemento do sistema em relação aos outros elementos do mesmo sistema ([LEMES, 2012](#)). Em outras palavras, a estrutura do sistema pode ser com-

preendida como o *layout*, geometria ou a topologia (física ou lógica) com a qual os elementos estão relacionados ou conectados.

O mesmo conjunto de elementos pode ser organizado de diversas maneiras em termos de relacionamentos, dando origem a diferentes estruturas, que por sua vez apresentam comportamentos diferentes. A Figura 2.1 ilustra este conceito, com ênfase nas diferentes organizações estruturais de cinco elementos e consequentemente, diferentes comportamentos.

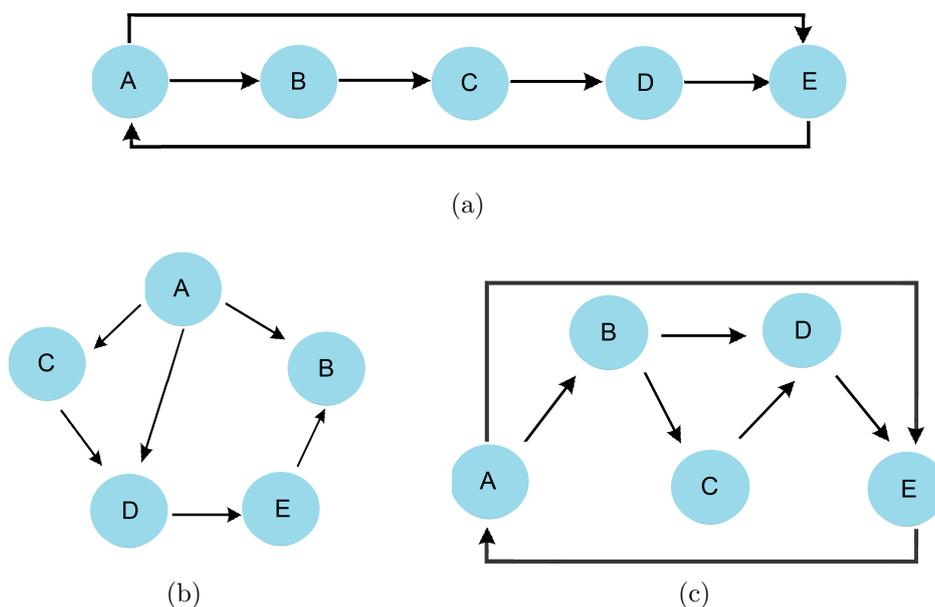


Figura 2.1 - Diferentes organizações para o conjunto de cinco elementos.

Na Figura 2.1 os elementos A, B, C, D, e E estão relacionados de diferentes maneiras. Nas organizações (a) e (b) observa-se que cinco elementos fazem parte do sistema com seis relacionamentos. Entretanto, a disposição das conexões entre os elementos é diferente nos dois arranjos. Isso faz com que mesmo possuindo os mesmos elementos e mesmo número de conexões não seja possível inferir que os dois sistemas apresentam o mesmo comportamento. Na organização (c) observa-se o sistema com os mesmos cinco elementos porém com sete relacionamentos, ilustrando a possibilidade de se obter diferentes estruturas com o mesmo grupo de elementos.

Hierarquia é a relação na qual determinados elementos possuem ascendência (ou descendência) sobre outros, ou nível hierárquico maior (LEMES, 2012). Para Perrow

(2011), o sistema pode ser decomposto em diferentes níveis hierárquicos: sistemas, subsistemas, partes e unidades. Assim, a posição do elemento no sistema lhe atribui dupla característica: i) com relação aos elementos que lhe constituem é o todo e ii) com relação aos elementos hierarquicamente superiores é uma parte. Desta maneira, a medida em que o sistema se torna mais abstrato, ocorre o processo de generalização e a medida em que se torna menos abstrato, ocorre o processo de especialização ou especificação.

2.2 Sistemas a Eventos Discretos

Sistemas a eventos discretos constituem classe de sistemas dinâmicos que dependem da ocorrência de eventos para evoluir. O evento tem como sinônimo acontecimento, episódio ou ocorrência. Na computação, o evento equivale ao resultado da ação. Na prática, estas ações podem provocar mudanças de estado e na maioria das vezes, ocorrem em instantes de tempo irregulares (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008).

Os espaços de estados e de eventos desta natureza podem ser descritos por conjuntos discretos. O conceito de discreto permeia algo reservado, que denota discrição, que não chama atenção. Em sistemas a eventos discretos, o evento discreto é a ação instantânea que ocorre em único momento. Este evento pode ser identificado como ação proposital, ocorrência espontânea ou o resultado da verificação de determinada condição. (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008; CHWIF; MEDINA, 2014).

Para Cury (2001), sistemas a eventos discretos possuem a capacidade de perceber as ocorrências no ambiente à sua volta pela recepção de estímulos (eventos) como o início e término de tarefas ou a percepção da mudança de estado em sensores. Estes eventos possuem natureza instantânea e em consequência disto, caráter discreto no tempo.

Em síntese, as características básicas envolvidas na definição do sistema a eventos discretos são: (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008; CHWIF; MEDINA, 2014; COSTA; LIMA, 2005)

- Ciclo de funcionamento descrito através de sequência de eventos discretos que determinam a execução ou o término de tarefas;
- Possibilidade de ocorrência de eventos simultâneos;
- Necessidade de sincronização com o início de atividade podendo ou não

requerer o término de outra, com temporização das atividades realizadas pelo sistema seguindo rígido controle.

A evolução dinâmica do sistema a eventos discretos no tempo acontece por meio de transições de estados. É possível afirmar que o sistema permanecerá em dado estado entre a ocorrência de dois eventos consecutivos. A Figura 2.2 ilustra a evolução dinâmica do sistema a eventos discretos no tempo.

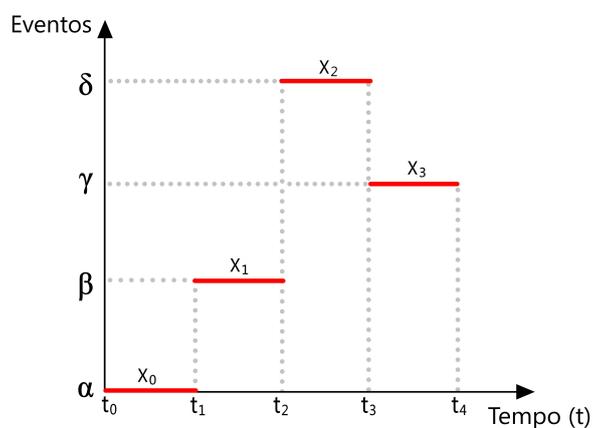


Figura 2.2 - Evolução dinâmica de sistema a eventos discretos no tempo.

A Figura 2.2, ilustra a ocorrência de eventos assíncronos, em momentos aleatórios e com possibilidade de múltiplas ocorrências, com conseqüentes mudanças instantâneas de estado. Durante a evolução deste sistema ocorrem eventos representados por α , β , γ e δ ocasionando os estados X_0 , X_1 , X_2 e X_3 . O mesmo evento pode ter efeitos diferentes no sistema, dependendo do estado em que ele se encontra. Um sistema composto por um interruptor e uma lâmpada pode ser considerado um sistema a eventos discretos. Se a lâmpada está no estado apagada e ocorre o evento de acionamento do interruptor, ela passa para o estado acesa. Porém se este mesmo evento ocorre e a lâmpada está acesa, seu estado muda para apagada.

É possível observar nos sistemas a eventos discretos a existência de três elementos: as entidades, os recursos e as filas, que podem ser assim definidos (CURY, 2001): i) entidades: esperam em fila para utilizar os recursos. Podem ser pessoas, mensagens eletrônicas, processos de um sistema operacional, peças de manufatura, carros em uma rodovia etc., ii) recursos: que atendem, fornecem algo ou algum serviço as

entidades. Podem ser caixas de banco ou supermercado, canais de transmissão de mensagens, processadores no computador, máquinas de manufatura, vias de tráfego etc. e iii) fila: surgem pela necessidade de compartilhamento de recursos limitados pelas entidades usuárias do sistema. Espaço onde as entidades esperam para utilizar os recursos. Podem ser filas de banco ou supermercado, *buffers* de roteadores de rede ou de processadores, filas de produção, engarrafamento de trânsito etc.

As Figura 2.3 e Figura 2.4 ilustram o conceito de fila, recurso e entidade, apresentando a dinâmica de sistemas a eventos discretos. A Figura 2.3 representa sistema aberto, no qual novas entidades podem ser incluídas ou deixar o sistema durante seu funcionamento. A Figura 2.4 ilustra sistema fechado, no qual o número de entidades no sistema é constante durante todo seu período de operação. Para o estudo de sistemas a eventos discretos é necessário conhecimento de todas as suas partes, com o intuito de modelá-lo, portanto, há necessidade da construção do modelo.

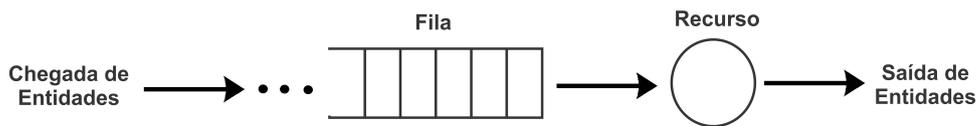


Figura 2.3 - Sistema de fila aberto.

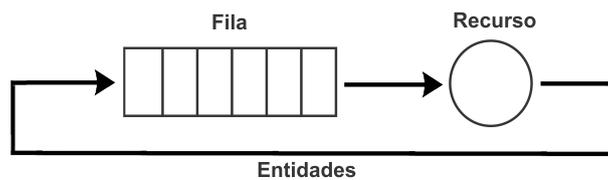


Figura 2.4 - Sistema de fila fechado.

2.3 Modelagem

Modelo é a representação de parte limitada do universo que pode interagir com o mundo externo através das fronteiras que o delimitam (CURY, 2001). Assim, o modelo é a representação por meio da qual são analisadas características importantes do sistema. Se o modelo representar o sistema de forma adequada, vários estudos e análises podem ser realizados utilizando o próprio modelo, sem o custo, risco ou

inconveniência da manipulação do sistema real (MONTGOMERY, 2004). O modelo é capaz de representar o sistema real quando dado mesmo conjunto de entradas, fornece o mesmo conjunto de saídas ou respostas do sistema modelado.

Ao modelar o sistema é necessário determinar seu escopo ou abrangência, definindo quais os elementos e interações devem ser considerados (LEMES, 2012). O grau de abstração utilizado deve ser suficiente para modelar o sistema com todos os detalhes necessários, sem que sejam abordadas particularidades que nada contribuam para a observação do comportamento do sistema modelado.

Portanto, o modelo não deve ser simples a ponto de não ser capaz de fornecer detalhes necessários sobre o funcionamento do sistema. O modelo não deve ser complicado ao ponto de ter representação mais detalhada que o próprio sistema real (CHWIF; MEDINA, 2014). O modelo deve ser a simples representação, de forma que não se torne o problema no processo de análise do sistema.

O motivo para a construção do modelo é a necessidade de observação de características específicas do sistema. Assim, podem existir diferentes modelos para o mesmo sistema. Cada um destes modelos tem ênfase em aspectos distintos do sistema (MELLO, 2007).

Após a identificação dos aspectos do sistema a serem abordados no modelo, é necessária utilização de estrutura organizada para sua descrição (MELLO, 2007). Podem ser utilizados modelos: i) simbólicos, como símbolos gráficos ou fluxogramas, ii) matemáticos, ou iii) de simulação. (CHWIF; MEDINA, 2014)

Quando concluída a construção do modelo para o sistema, é possível sua simulação. A simulação permite a visualização antecipada de características e comportamentos do sistema que poderiam de forma geral serem observadas apenas com o sistema em funcionamento.

2.4 Simulação

Simulação é a ferramenta que permite o conhecimento, *a priori*, de diversos aspectos do sistema, antes de sua construção ou implantação. Este conhecimento proporciona economia de recursos, tempo e diminui a possibilidade de retrabalho sobre o sistema real. O conhecimento antecipado das características do sistema permite ganhos de tempo, financeiro, humano, e possibilita experimentos com valores de parâmetros

históricos, reais e experimentais.

A simulação de sistemas pode ser realizada basicamente de duas maneiras: computacionalmente e não computacionalmente. A simulação não computacional, como a realizada por túneis de vento ou de impacto, utiliza outros mecanismos além de computadores para simular os modelos representativos dos sistemas reais.

De acordo com [Chwif e Medina \(2014\)](#), simulação computacional permite responder diversas questões sobre o sistema simulado, alterando apenas os valores dos parâmetros de entrada no modelo e trazendo como vantagem a possibilidade da previsão de determinadas características do sistema. Estas características, de forma geral, somente poderiam ser visualizadas diretamente no sistema, quando o mesmo encontrasse em operação. De posse do modelo, é possível simular valores de parâmetros de entrada com o intuito de obter previsões.

A Figura 2.5 ilustra o processo de simulação computacional. É possível observar que parâmetros de entrada são fornecidos ao modelo simulado, e este devolve como saída os dados necessários à observação.

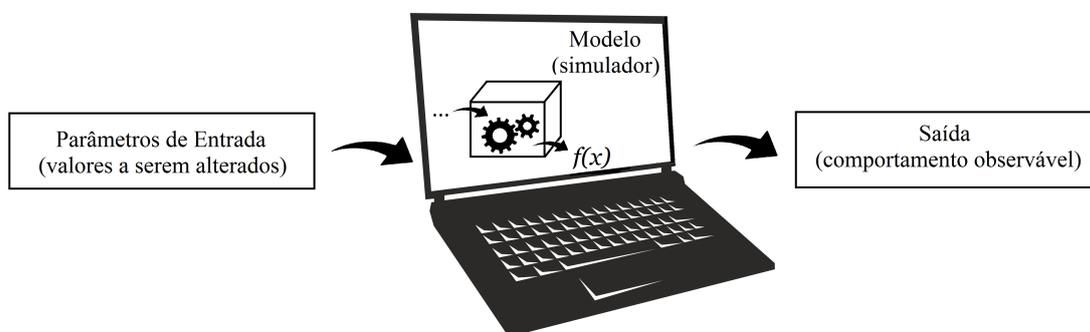


Figura 2.5 - Simulação computacional.

No processo representado na Figura 2.5 os valores dos parâmetros de entrada para o sistema simulado podem ser alterados de forma a constituir diferentes cenários. Cada cenário é submetido ao simulador que utilizando as regras definidas pelo modelo concede saídas que representam o comportamento do sistema.

2.5 Considerações

O conceito de sistemas a eventos discretos pode ser utilizado para modelar sistemas reais em diversos contextos. Os principais objetivos ao se projetar, modelar e simular sistemas desta natureza são a automatização de tarefas que são realizadas manualmente e a otimização no uso de recursos.

CAPÍTULO 3

COMPLEXIDADE

Neste capítulo são discutidos conceitos referentes à complexidade em sistemas. Primeiramente o conceito de complexidade é apresentado sob o ponto de vista filosófico, de forma abstrata. Em seguida é discutida a complexidade em sistemas sob o ponto de vista matemático, com o objetivo de apresentar alguns conceitos sobre a métrica de complexidade em sistemas.

3.1 Complexidade sob o Ponto de Vista Filosófico

O termo complexidade tem conotação subjetiva se observado sob a óptica filosófica. As diversas áreas de conhecimento utilizadas para a análise de sistemas considerados complexos utilizam conjunto de axiomas que diferem, em muitos aspectos, dos que são usados na ciência convencional (LUCAS, 2007).

O conceito de complexidade evolui junto à evolução dos indivíduos. Observa-se que o grau de complexidade percebido pelos indivíduos em relação a algo é mutável ao longo de sua existência. Sob o ponto de vista filosófico, o conceito de complexidade está ligado às experiências individuais, pelas quais o observador passou antes de se confrontar com o sistema observado. A subjetividade é fator presente no julgamento de quão complexo é o sistema, dependendo do observador.

Estudo elaborado por Stacey (2011) utiliza dois parâmetros como referência para distinguir o nível de complexidade de um assunto ou objeto. O primeiro é o nível de desacordo sobre determinado assunto e está relacionado com a definição do objeto tratado e quais os requerimentos para descrevê-lo. O segundo parâmetro é o nível de incerteza que se tem sobre este mesmo objeto e está relacionado a como este pode ser desenvolvido, realizado ou construído e a tecnologia existente para tanto. A Figura 3.1 ilustra a organização destas ideias em esquema conhecido como Matriz de Stacey.

Na Figura 3.1 é possível observar que na proximidade de (0,25;0,25) encontra-se a zona que alia acordo sobre a descrição do que é o objeto tratado e certeza de que existem tecnologias familiares para manipulá-lo (região de simplicidade). Quando não há nenhum acordo sobre a descrição do que é objeto tratado e as tecnologias para manipulá-lo são poucas ou inexistentes, trabalha-se na zona da anarquia ou

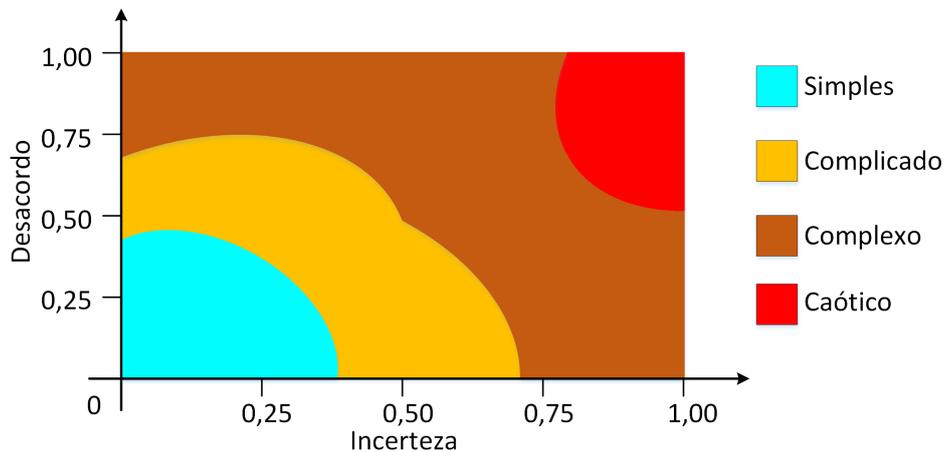


Figura 3.1 - Matriz de Stacey.

caos, encontrada na proximidade de $(1,00;1,00)$. As situações onde se está longe do acordo mas próximo da certeza ou longe da certeza mas próximo do acordo são consideradas complicadas, e localizam-se próximas à $(0,50;0,50)$. Desta forma, a complexidade surge entre o complicado e o caos, na região próxima à $(0,75;0,75)$. A complexidade na Matriz de Stacey é a zona onde estão os problemas difíceis de enquadrar, para os quais as relações de causa e efeito não são claras e o problema evolui enquanto está sendo tratado (STACEY, 2011).

De forma independente da interpretação adotada, é possível observar que com a evolução das ciências e da tecnologia, a complexidade das organizações e dos processos produtivos que permeiam o cotidiano humano, tem aumentado. De acordo com Bar-Yam (2002), o aumento da complexidade está diretamente relacionado com mudanças radicais na estrutura e dinâmica da civilização humana. Este novo paradigma, que o autor denomina modelo de comunicação em rede, e no qual a estrutura mantém os nós ligados direta ou indiretamente aos outros, está presente em quase todos os sistemas. Isto se deve ao fato de que cada elemento possui função que contribui através de suas conexões para atuação do todo, com certo grau de relevância. Além das conexões internas entre os elementos, é crescente a integração entre sistemas e, em consequência, a complexidade observada nos sistemas modernos aumenta constantemente.

No contexto de sistemas, os conceitos de complexidade e simplicidade são opostos, porém não disjuntos. A linha de fronteira que determina onde termina a simplicidade

e começa a complexidade é tênue e difícil de ser determinada. Para [Perrow \(2011\)](#) não são os sistemas simples ou complexos, mas sim suas interações. As interações complexas são aquelas que ocorrem em função de sequências não previstas na especificação ou não familiares no funcionamento do sistema. Estas interações dificilmente são visíveis ou compreensíveis de maneira imediata, podendo acontecer muitas vezes de forma imperceptível no funcionamento do sistema, escondendo riscos iminentes. Já as interações simples são interações observáveis, sendo elas esperadas ou não.

Para o estudo de sistemas com complexidades diferentes, são necessários também diferentes conjuntos de conhecimentos. Para os sistemas simples, o conhecimento disciplinar na maior parte das vezes é suficiente. Este tipo de conhecimento é restrito a categoria organizada e bem delimitada de conhecimentos científicos. Os sistemas complicados necessitam de conhecimentos interdisciplinares ou multidisciplinares, que são resultado da transferência e extrapolação de conhecimentos e técnicas de uma disciplina para outra. Já os sistemas complexos exigem conhecimentos transdisciplinares que ultrapassam as fronteiras impostas nas estruturas disciplinares existentes, transpondo a segmentação do conhecimento humano em áreas ([LEMES, 2012](#)).

Podem ser observadas diversas características em sistemas complexos descritas na literatura ([CASTI, 1995](#); [BAR-YAM, 2002](#); [HOLLAND, 2014](#)). Porém algumas delas são recorrentes e tem destaque:

- Não-Linearidade: os resultados apresentados em sistemas complexos não são proporcionais à suas entradas. Em sentido exato, isto se contrapõe à suposição reducionista de que para o sistema f com parâmetro x têm-se $f(x + y) = f(x) + f(y)$ ou então $f(ax) = af(x)$. Em sentido abrangente, isto quer dizer que mesmo conhecendo as propriedades de cada parte do sistema não é possível inferir seu comportamento apenas relacionando-as, pois os sistemas complexos exigem análise holística de seu comportamento.
- Instabilidade ou Criticalidade: os sistemas complexos tendem a apresentar vários modos possíveis de comportamento emergente, de forma que se torna difícil prever o seu comportamento futuro;
- Irredutibilidade: não é possível dividir o sistema complexo em partes sem perda de suas características fundamentais;
- Adaptabilidade ou Auto-Organização: os sistemas complexos são consti-

túidos de unidades autorreguláveis, adaptativas e inteligentes que podem ajustar seu comportamento e operação conforme as informações que recebem do meio externo;

- **Emergência:** o comportamento emergente do sistema complexo não pode ser inferido a partir da análise dos comportamentos de seus elementos de forma isolada. Isto é, o comportamento do sistema complexo é resultado único das interações de suas partes constituintes e não da soma dos comportamentos de cada uma de suas partes isoladamente;
- **Hierarquia:** os sistemas complexos apresentam múltiplos níveis hierárquicos com estruturas do tipo “muitos para muitos” ou N:M para seus elementos.

3.2 Modelo para Cálculo de Complexidade

Para mensurar em termos numéricos a complexidade do sistema, necessita-se de métricas que utilizem como medida as características principais deste sistema. De acordo [Baldam et al. \(2014\)](#) as métricas de complexidades estabelecem relações entre duas medidas. Isso quer dizer que somente há sentido na utilização da métrica, se o objetivo for a comparação ente dois ou mais sistemas. Desta forma, o valor obtido para a complexidade do sistema, somente agrega conhecimento, se comparado com outro valor de complexidade obtido para outro sistema ou para o mesmo sistema em outro contexto, sob condições diferentes.

Diversos modelos para cálculo de complexidade de sistemas são apresentados na literatura. Estes modelos levam em consideração variados aspectos sobre os sistemas ([LLOYD, 2001](#)). Um destes modelos é apresentado no trabalho de [Lemes \(2012\)](#), que utiliza os conceitos de entropia informacional apresentados por [Shannon \(1948\)](#).

O trabalho de Shannon baseia-se nos conceitos de Mecânica Estatística apresentados por Boltzmann em artigo publicado no mesmo ano da conclusão de seu doutoramento. Neste trabalho, intitulado “Acerca do significado mecânico da segunda lei da teoria do calor” o físico austríaco fundamenta a segunda lei da termodinâmica apresentada por Rudolf Clausius, através da aplicação de princípios mecânicos ao movimento das moléculas de um gás ([DAHMEN, 2006](#)).

Boltzmann desenvolve seu trabalho no contexto da Física, mais especificamente na área da dinâmica das partículas. Para Boltzmann, a entropia térmica, relacionada

ao equilíbrio do sistema termodinâmico, pode ser representada pela expressão (3.1).

$$S_B = -Ed \sum_{f=1}^l p_f \cdot \ln p_f + cte \quad (3.1)$$

onde: S_B é a entropia do sistema, E é o número de microestados que uma partícula pode assumir, d é o número total de partículas, l é o número de partículas em cada microestado e p_f é a probabilidade de que cada partícula esteja no microestado f .

Baseado no trabalho de Boltzmann, Shannon propõe conceitos de entropia informacional no contexto da teoria de comunicação, com foco em como mensagens trafegavam em canais de comunicação. Em (3.2) é apresentada a expressão proposta por Shannon para medir a quantidade de informação de determinada mensagem.

$$H(X) = - \sum_{g=1}^h p_g \cdot \log_2 p_g \quad (3.2)$$

onde: $H(X)$ é a entropia informacional, h é o número de símbolos disponíveis para a composição da mensagem, e p_g é a probabilidade de que cada símbolo ocorra na mensagem na posição g .

É possível observar semelhança nas duas expressões, que utilizam-se de conceitos da teoria de probabilidade para mensurar a possibilidade do sistema estar em determinado estado. Lemes (2012) aplica o conhecimento de Boltzmann e Shannon em sistemas genéricos de engenharia, com ênfase na probabilidade de ocorrência de conexões entre os elementos. Lemes considera que a variabilidade das conexões entre os elementos do sistema pode ser considerada como medida de complexidade, conforme a expressão (3.3).

$$\Gamma(S) = - \sum_{p,q=1}^{|S|} p(x)_{p,q} \cdot \log_2 p(x)_{p,q} \quad (3.3)$$

em que: $\Gamma(S)$ é a complexidade das conexões do sistema, S é o conjunto de conexões do sistema, sendo $|S|$ o tamanho deste conjunto e $p(x)_{p,q}$ é a probabilidade de ocorrência de conexão entre os elementos p e q .

A abordagem proposta por Lemes prevê a medição de complexidade em sistemas apenas em tempo de projeto, considerando o sistema de forma estática e supondo que todas as conexões do sistema estão ativas a todo tempo. Entretanto, em sistemas reais, isto não ocorre, pois as interações entre seus elementos acontecem de forma não determinística. Assim, conforme o sistema evolui ao longo do tempo, diferentes combinações de conexões podem ocorrer, não excluindo porém a possibilidade de que todas as conexões estejam ativas em determinado momento.

3.3 Considerações

Os sistemas de engenharia tem se tornado cada vez mais elaborados e complexos. Por conta disto, surge a necessidade do desenvolvimento de métricas para medida de complexidade de sistemas que levem em conta características não triviais dos mesmos. Desta maneira, é possível afirmar que as métricas de complexidade devem ser desenvolvidas considerando que nos sistemas complexos acontecem interações inesperadas e nem sempre observáveis de maneira imediata. Com a utilização de métricas de complexidade é possível observar de maneira antecipada algumas características relativas à dinâmica de funcionamento dos sistemas complexos.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

Neste capítulo apresenta-se a metodologia proposta para mensurar a complexidade em sistemas. Apresenta-se ainda as modelagens de três casos de sistemas a eventos discretos que serão utilizados para mensurar a complexidade, usando o método proposto.

4.1 Métrica de Complexidade Baseada em Conexões

Diversas métricas para cálculo da complexidade foram desenvolvidas com base na dimensão do sistema, entropia, informação, custo, hierarquia, organização, entre outros critérios (LLOYD, 2001). As métricas de complexidade de sistema podem ser agrupadas segundo vários critérios, como por exemplo, o tamanho do sistema (em termos de números de elementos ou conexões) ou a quantidade de requisitos funcionais que o mesmo deve cumprir.

A medida de complexidade é adimensional, por isto, somente tem sentido se comparada a outro valor medido no próprio sistema ou em sistema distinto, desde que a natureza dos sistemas analisados permita comparação (REPPERGER et al., 2012).

Com base na modelagem de Lemes (2012), propõe-se método para mensurar a complexidade em sistemas a eventos discretos. Diferente da modelagem de Lemes, o método proposto considera as conexões ativas durante a dinâmica do sistema, de forma a produzir a matriz de relacionamento M em cada instante t , levando em conta a relação entre entidades, recursos e filas.

Considerando a expressão (3.3), pode-se escrever:

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

onde $\gamma(s)$ é a complexidade do sistema, ρ é o número de conexões ativas no instante t e $p(c)_i$ é a probabilidade de que determinada conexão i ocorra, dada por:

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

onde n_e é o número de entidades do sistema no instante t , n_r é o número de recursos do sistema, n_f é o número de filas.

O \log_2 da expressão (4.1) surge da probabilidade ψ de que a conexão esteja ativa ou inativa. Isto é, $\psi(\text{ativa}, \text{inativa}) = (\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$. Considerando valores normalizados, se $\gamma(s) = 1$, então $\gamma(s) = -(\frac{1}{2} \cdot \log_x \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \log_x \frac{1}{2}) = \log_x 2$ e $\log_x 2 = 1$ se e somente se $x = 2$. O número total de estados possíveis do sistema para a configuração no instante t será $w = 2^N$, onde N é o número de elementos em M e $\log_2 2^N = N$. O número de conexões ativas ρ no instante t é dado por:

$$\rho = \sum_{j=1}^k n_{c_j} \cdot n_{e_j} \quad (4.3)$$

onde k é o número de estados das entidades, n_{c_j} é o número de conexões ativas por entidade no estado j e n_{e_j} é o número de entidades no estado j .

A aplicação da métrica se inicia junto ao processo de simulação do sistema a eventos discretos. Durante o processo de simulação ocorrem eventos, que fazem com que o sistema mude de estado e altere as conexões ativas entre seus elementos. Desta forma, a matriz de relacionamento M será construída, com base nas conexões ativas, considerando a dinâmica do sistema. A matriz de relacionamento M apresenta as conexões ativas em determinado instante t . A partir desta matriz é possível observar quais entidades estão em fila e que recursos estão sendo alocados para quais entidades. Utilizando a matriz de relacionamentos é possível contabilizar o número total de conexões ativas no instante t , obtendo assim os valores de n_{c_j} e n_{e_j} .

A cada configuração do sistema, no instante t , será calculada a complexidade. Este ciclo de medição se repetirá a cada mudança de estado, durante a simulação. Ao final da simulação, como resultado, será obtido o comportamento da complexidade relativo a todos os estados.

4.2 Modelo do Jantar dos Filósofos Chineses

Este problema proposto por [Dijkstra \(1971\)](#) se tornou clássico problema de sincronização em computação distribuída, onde existe a disputa por recursos que são limitados. O problema original consiste em situação na qual cinco filósofos estão sentados a volta de uma mesa circular. Cada filósofo possui um prato de macarrão à

sua frente e para comê-lo o filósofo necessita de dois *hashis*. Existe apenas um *hashi* entre cada par de pratos, ou seja, cinco filósofos chineses, cinco pratos e cinco *hashis* como ilustrado na Figura 4.1. Admite-se que a vida destes filósofos divide-se em dois estados: comer e pensar.

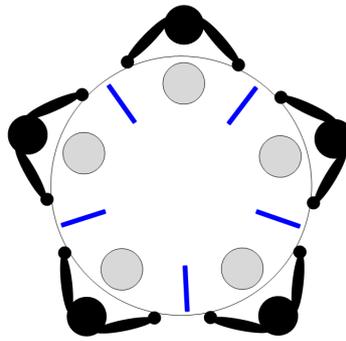


Figura 4.1 - Jantar dos Filósofos Chineses.

O filósofo estará pensando se não estiver com os dois *hashis* e estará comendo se estiver com os dois *hashis*. Quando o filósofo está com fome, ele tenta pegar o *hashi* da sua direita e o da esquerda, um de cada vez. Se o filósofo conseguir pegar os dois *hashis*, ele começa a comer por determinado tempo. Caso um dos *hashis* já esteja sendo utilizado, o filósofo que tentou pegar continua pensando, porém com um *hashi* já alocado. Quando o filósofo termina de comer, ele devolve os dois *hashis* para a mesa e começa a pensar, liberando, deste modo, os *hashis* para os filósofos adjacentes (DIJKSTRA, 1971).

O problema proposto por Edsger Dijkstra pode ser reformulado para ser modelado como sistema a eventos discretos, sendo representado por eventos e estados que podem ser representados por conjuntos discretos. Desta forma, propõem-se que os estados dos filósofos sejam: i) a_f filosofando, ii) a_e esperando e iii) a_c comendo. Com base nos estados, tem-se os seguintes eventos: 1) começar a filosofar, 2) terminar de filosofar, 3) começar a esperar, 4) terminar de esperar, 5) começar a comer e 6) terminar de comer.

Para realizar a simulação, será necessário definir i) a quantidade de filósofos n , ii) o filósofo F_i que inicia a simulação, com $i = 1, 2, 3, \dots, n$, iii) a orientação da simulação (sentido horário ou anti-horário), iv) a quantidade m de períodos de tempo t que os filósofos podem ficar no estado a_c e v) o vetor T_j de períodos de tempo t para

o estado a_c , com $j = 1, 2, 3, \dots, m$, que pode ser gerado aleatoriamente utilizando qualquer distribuição probabilística.

O filósofo que estiver no estado a_c ocupa dois *hashis*. Se o filósofo estiver com apenas um *hashi*, está esperando para comer, portanto está no estado a_e . Caso o filósofo esteja sem nenhum *hashi*, significa que ele está filosofando, ou seja, no estado a_f . Considerando o sentido horário, o filósofo F_i utiliza o *hashi* liberado pelo filósofo F_{i-1} , à sua direita, e o outro *hashi* liberado pelo filósofo F_{i+1} , à sua esquerda, observada a relação (4.4).

$$\begin{cases} F_{i-1} = F_n & \text{se } i - 1 = 0 \\ F_{i+1} = F_1 & \text{se } i + 1 = n + 1 \end{cases} \quad (4.4)$$

Cada filósofo F_i ficará no estado a_c durante o período de tempo dado por T_j , em sua j -ésima posição, que corresponde à j -ésima vez que algum filósofo assume o estado a_c . Quando o filósofo terminar de comer, obrigatoriamente ele mudará para o estado a_f e deverá esperar, no mínimo, uma rodada para voltar ao estado a_c . A simulação terminará quando o vetor T_j for totalmente percorrido, com $j = m$, e todos os filósofos saírem do estado a_c . Ao final da simulação, serão obtidos os tempos t_{a_c} , t_{a_e} e t_{a_f} que o filósofo F_i permaneceu nos estados a_c , a_e e a_f , respectivamente. O tempo total de simulação $T(F_i)$ será a soma dos tempos t_{a_c} , t_{a_e} e t_{a_f} para a entidade F_i .

Duas abordagens serão consideradas no modelo do Jantar dos Filósofos Chineses: i) os filósofos sempre querem comer e ii) os filósofos nem sempre querem comer. Na primeira, os recursos serão requisitados durante todo o tempo, diferentemente da segunda abordagem, na qual os filósofos poderão decidir não comer mesmo que os recursos (*hashis*) estejam disponíveis. O relógio de simulação irá variar de uma em uma unidade de tempo [Ut], que corresponde a uma rodada. No início de cada rodada, os filósofos poderão mudar seu estado conforme as regras da simulação.

Para aplicar a métrica de complexidade no Problema do Jantar dos Filósofos Chineses, será considerado que o número de conexões ativas ρ neste sistema em dado momento será fornecido pela expressão (4.5), onde: n_{a_f} , n_{a_e} e n_{a_c} são número de filósofos no estado a_f , a_e e a_c , respectivamente. Quando o filósofo estiver comendo, acrescentará-se ao sistema duas conexões, uma com cada *hashi* utilizado. Quando o filósofo estiver esperando, acrescentará-se uma conexão, com o *hashi* que já foi

alocado e os filósofos no estado pensando não acrescentarão nenhuma conexão ao sistema. Sendo assim, tem-se que ρ é dado por:

$$\rho = 2 \cdot n_{ac} + 1 \cdot n_{ae} + 0 \cdot n_{af} \quad (4.5)$$

Para calcular a probabilidade de ocorrer conexão $p(c)_i$ neste sistema, considera-se que n_e é igual ao número de filósofos, n_r é o número de recursos que cada entidade pode utilizar, neste caso $n_r = 2$, haja vista que cada filósofo só tem a sua disposição dois *hashis* e n_f é igual a *zero* por se tratar de sistema fechado, onde a fila não é levada em consideração.

O cálculo da complexidade será realizado com base nas conexões ativas a cada instante da simulação. A Tabela 4.1 dispõe a relação que representa o instante t onde os filósofos F_1 e F_4 estão filosofando, F_3 está esperando para comer e F_2 e F_5 estão comendo. A Tabela 4.1 pode ser representada pela matriz em (4.6) onde as colunas representam os filósofos de F_1 à F_5 e as linhas representam os *hashis* de H_1 à H_5 . No caso do Jantar dos Filósofos Chineses, pode-se ter a configuração apresentada na matriz de relacionamento M , desconsiderando a fila, pois este sistema é fechado no sentido de que não é possível que novas entidades sejam adicionadas durante seu funcionamento.

Tabela 4.1 - Relação entre Filósofos e *Hashis*.

<i>Hashi</i>	Filósofo				
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
H_1		X			
H_2		X			
H_3			X		
H_4					X
H_5					X

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

A partir da matriz M , pode-se calcular a complexidade máxima de determinado sistema. Esta complexidade acontece quando tem-se o número máximo de conexões ativas. No caso do modelo do Jantar dos Filósofos Chineses, com cinco filósofos ao redor da mesa, este número será $\rho = 2 \cdot n_{a_c} + 1 \cdot n_{a_e} = 5$ com $n_{a_c} = 2$ e $n_{a_e} = 1$. Observe que, sendo sistema dinâmico, isto ocorre apenas em determinado instante t , ou seja, este evento é a fotografia de momento particular do sistema, que será chamado de complexidade estática. Várias fotografias sequenciais formam a complexidade dinâmica.

4.3 Modelo do Centro de Distribuição

O problema do Centro de Distribuição consiste na logística de entrega de encomendas conforme demanda de pedidos, que podem formar fila de espera. As cargas de cada pedido chegam à doca e são carregadas no caminhão por uma equipe de carregadores (CHWIF; MEDINA, 2014).

A Figura 4.2 ilustra o Centro de Distribuição. Após chegar ao Centro de Distribuição, o pedido aguarda em fila esperando o carregamento. Quando há disponibilidade de recursos, por exemplo, doca, caminhão e equipe de carregadores, o primeiro pedido da fila é carregado. Quando o carregamento é concluído, o caminhão sai para realizar a entrega, e a doca e os carregadores são liberados para novo carregamento. Após a entrega do pedido no destinatário e o retorno ao Centro de Distribuição, o caminhão vazio fica novamente disponível para carregamentos.

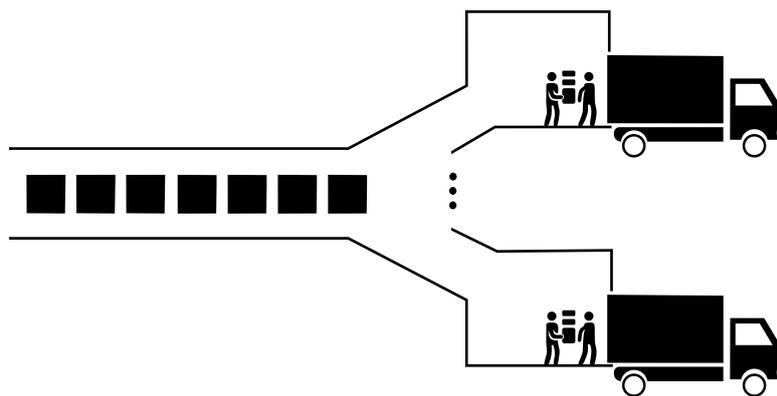


Figura 4.2 - Centro de Distribuição.

O Centro de Distribuição é típico sistema a eventos discretos, que apresenta enti-

dades, filas e recursos. As entidades são os pedidos, que aguardam em fila a disponibilidade pelos recursos: docas, caminhões e carregadores. O conjunto de estados discretos referente aos pedidos são: i) aguardando em fila, ii) sendo carregados e iii) sendo transportados. Com base nos estados, é possível determinar quantos recursos (docas, caminhões e carregadores) estão sendo utilizados em cada instante de tempo t . Do ponto de vista do Centro de Distribuição, existem os seguintes eventos: a) receber novo pedido, b) alocar grupo de carregadores para realizar carregamento, c) começar a utilizar doca, d) alocar caminhão, e) começar a carregar caminhão, f) terminar de carregar caminhão, g) terminar de utilizar doca, h) desalocar grupo de carregadores, i) transportar pedido ao destinatário e j) desalocar caminhão.

Diferente do problema do Jantar dos Filósofos Chineses, o Centro de Distribuição é sistema aberto, pois novas entidades podem ser integradas ao sistema durante sua operação. Assim, o número de entidades (pedidos) e a demanda por recursos (docas, caminhões e carregadores) podem variar com o passar do tempo.

O tempo de entrega T_e dos pedidos, que corresponde ao tempo gasto desde a chegada do pedido ao Centro de Distribuição, até o momento em que é entregue ao destinatário, será composto pela soma dos tempos: i) de espera em fila até ser carregado t_{pf} , ii) de carregamento do pedido t_{pc} e iii) de transporte do pedido do Centro de Distribuição até o destinatário t_{pt} , conforme expressão (4.7):

$$T_e = t_{pf} + t_{pc} + t_{pt} \quad (4.7)$$

O número de conexões ativas será determinado pelo número de pedidos, sendo que cada pedido em fila acrescentará uma conexão ao sistema (com o pedido à sua frente), cada pedido sendo carregado acrescentará três conexões (uma com a doca, uma com o caminhão e uma com a equipe de carregadores) e cada pedido sendo transportado contribuirá com uma conexão no sistema (com o caminhão). Desta forma, tem-se:

$$\rho = 1 \cdot n_{pf} + 3 \cdot n_{pc} + 1 \cdot n_{pt} \quad (4.8)$$

onde n_{pf} , n_{pc} e n_{pt} são o número de pedidos em fila, de pedidos sendo carregados e, sendo transportados, respectivamente.

O número de entidades n_e que cada recurso poderá atender será igual ao número total de pedidos no sistema no instante t , considerando que cada entidade (pedido) pode ser atendida por qualquer recurso do sistema. Portanto n_e é a soma de n_{pf} , n_{pc} e n_{pt} . O valor de n_r é igual a soma do número de docas, caminhões e equipes de carregadores no sistema. O valor de n_f corresponde ao número de filas adotado na modelagem do sistema, neste caso, uma fila.

Considerando a configuração de 6 pedidos com 2 docas, 3 caminhões, 2 grupos de carregadores e uma fila, pode-se no instante t , montar a Tabela 4.2. De posse da Tabela 4.2, pode-se construir a matriz de relacionamento M expressa em (4.9), na qual as colunas representam os pedidos, de P_1 a P_6 , e as linhas representam a fila Q e os recursos: docas D_1 e D_2 , caminhões de C_1 à C_3 e grupos de carregadores G_1 e G_2 , respectivamente.

Tabela 4.2 - Relação entre Pedidos, Fila e Recursos.

Fila/Recurso	Pedido					
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
Q				X	X	X
D_1						
D_2			X			
C_1			X			
C_2	X					
C_3		X				
G_1			X			
G_2						

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Em (4.9), verifica-se que os pedidos P_1 e P_2 estão sendo transportados nos caminhões C_2 e C_3 , respectivamente, o pedido P_3 está sendo carregado pelo grupo de

carregadores G_1 no caminhão C_1 estacionado na doca D_2 e os pedidos P_4 , P_5 e P_6 estão aguardando em fila.

4.4 Modelo do Centro de Emergência Hospitalar

O problema do Centro de Emergência Hospitalar consiste na realização de procedimentos clínicos e atendimento médico a pacientes (entidades) com problemas de saúde, geralmente graves. O atendimento é realizado por médicos, enfermeiros e funcionários de exames (recursos). Durante o funcionamento do Centro de Emergência Hospitalar, podem ser geradas filas, se a quantidade de recursos não for suficiente para atendimento imediato aos pacientes. A Figura 4.3 ilustra o fluxo operacional do Centro de Emergência Hospitalar, no qual os pacientes que chegam aguardam em fila até serem atendidos pelo médico. Após atendimento, os pacientes podem ser encaminhados para medicação, realizada por enfermeiros, ou para exames, realizados por técnicos especializados.

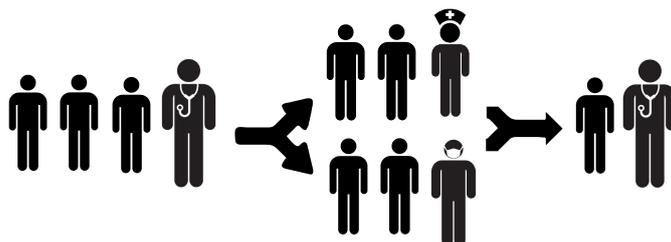


Figura 4.3 - Centro de Emergência Hospitalar.

Durante o atendimento inicial ao paciente, filas podem ser formadas nas seguintes etapas: i) consulta médica, ii) medicação e iii) realização de exames. Neste caso, adota-se como medida de desempenho, o tempo t_p que o paciente fica no Centro de Emergência Hospitalar para atendimento, desde sua chegada até a sua liberação ou internação.

O Centro de Emergência Hospitalar pode ser caracterizado como sistema a eventos discretos, cujo os estados que as entidades (pacientes) podem assumir são: i) aguardando em fila, ii) em consulta médica, iii) recebendo medicação e iv) realizando exames.

Para aplicar a métrica de complexidade neste caso, será considerado que o número de

conexões ativas ρ em dado momento t será fornecido pela expressão (4.10), sendo que cada paciente, independente do estado que esteja, acrescenta apenas uma conexão ao sistema. Considera-se, portanto, que o paciente em fila conecta-se ao paciente à sua frente, o paciente em consulta médica estabelece uma conexão com o médico, o paciente que recebe medicação conecta-se apenas a um enfermeiro e o paciente que está fazendo exame acrescenta uma conexão com o técnico responsável.

$$\rho = 1 \cdot n_{h_f} + 1 \cdot n_{h_c} + 1 \cdot n_{h_m} + 1 \cdot n_{h_e} \quad (4.10)$$

onde n_{h_f} , n_{h_c} , n_{h_m} e n_{h_e} são o número de pacientes em fila, em consulta médica, recebendo medicação e realizando exames, respectivamente.

O número de entidades n_e é igual ao número total de pacientes no sistema no instante t , considerando que cada entidade (paciente) pode ser atendida por qualquer recurso do sistema. Desta forma, n_e é a soma do número de pacientes em cada estado. O número de recursos n_r é igual a soma do número de médicos, enfermeiros e técnicos de exames. O número de filas n_f é igual a quatro, sendo as filas para: i) primeiro atendimento médico após a chegada Q_1 , ii) medicação Q_2 , iii) realização de exames Q_3 e iv) retorno ao médico após exames e/ou medicação Q_4 .

Considerando a configuração de 7 pacientes com 2 médicos, 2 enfermeiros e 1 técnico de exames, pode-se no instante t , montar a Tabela 4.3. De posse da Tabela 4.3, pode-se construir a matriz de relacionamento M expressa em (4.11), na qual as colunas representam os pacientes, de Pe_1 à Pe_7 , e as linhas representam as filas de Q_1 à Q_4 e os recursos: médicos M_1 e M_2 , enfermeiros N_1 e N_2 e técnicos de exames E_1 , respectivamente.

Tabela 4.3 - Relação entre Pacientes, Fila e Recursos.

Fila/Recurso	Paciente						
	Pe_1	Pe_2	Pe_3	Pe_4	Pe_5	Pe_6	Pe_7
Q_1							X
Q_2							
Q_3			X				
Q_4							
M_1				X			
M_2					X		
N_1		X					
N_2						X	
E_1	X						

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Em (4.11), verifica-se que o paciente Pe_1 está fazendo exame com o funcionário E_1 , os pacientes Pe_2 e Pe_6 estão recebendo medicação com os enfermeiros N_1 e N_2 , respectivamente, o paciente Pe_3 está aguardando na fila Q_3 para fazer exame, Pe_4 e Pe_5 estão em consulta com os médicos M_1 e M_2 , respectivamente, e Pe_7 está aguardando em fila Q_1 para realizar a consulta médica.

4.5 Considerações

O modelo desenvolvido para o Problema do Jantar dos Filósofos Chineses permite a observação da relação da complexidade do sistema com a utilização dos recursos. Os modelos do Centro de Distribuição e do Centro de Emergência Hospitalar podem ser utilizados para observação do comportamento da complexidade em função da variação dos parâmetros do sistema. Apesar dos três modelos representarem sistema a eventos discretos, eles necessitam de formulações diferentes para encontrar a matriz de relacionamento. A natureza do sistema determina a forma como será calculado o

número de conexões ativas. Isto é observado nas expressões (4.5), (4.8) e (4.10). Após formuladas as expressões para o cálculo do número de conexões ativas, o restante da métrica permanece o mesmo. Para formular ρ é necessário o conhecimento da dinâmica do sistema.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para os três estudos de caso nos quais a métrica proposta foi aplicada. No estudo de caso do Jantar dos Filósofos Chineses foram calculadas a complexidade estática e dinâmica para duas possíveis abordagens de funcionamento do sistema. No estudo de caso do Centro de Distribuição foi estabelecida relação entre a configuração do sistema e a complexidade. No problema do Centro de Emergência Hospitalar foi encontrada relação entre o uso dos recursos do sistema e a complexidade.

5.1 Jantar dos Filósofos Chineses

Neste caso, serão estudadas a complexidade estática e dinâmica. Para o cálculo da complexidade estática $\gamma_e(f)$, considerou-se o número máximo de conexões ativas, o que somente é possível em sistemas fechados. O sistema do Jantar dos Filósofos Chineses pode ser considerado sistema fechado, no qual novas entidades não podem ser adicionadas durante seu funcionamento. Neste modelo, o número máximo de conexões ativas ρ é igual ao número de recursos.

Para obter a medida da complexidade dinâmica $\gamma_d(f)$ durante a simulação do sistema, utilizou-se a expressão (4.1) a cada ocorrência de evento, considerando a configuração do sistema a cada instante de tempo t .

Para o cálculo da complexidade estática $\gamma_e(f)$, não há necessidade de simulação, pois os dados são retirados da configuração estática do sistema (SANTOS et al., 2015). A Tabela 5.1 dispõe o valor da complexidade estática, utilizando a expressão (4.1), para dez cenários do problema do Jantar dos Filósofos Chineses, em que o número de *hashis* (recursos) é alterado utilizando a lei de formação dada pela expressão (5.1). Na expressão (5.1), n_r representa o número de *hashis* e α um número pertencente ao conjunto dos números naturais. É possível observar que independente se n_r é par ou ímpar, a complexidade varia de acordo com (4.1).

$$\begin{cases} n_r = 2^C & \text{se } C = 2\alpha + 1 \\ n_r = 2^C + 1 & \text{se } C = 2\alpha \end{cases} \quad (5.1)$$

onde: C é o cenário $\forall \alpha \in \mathbb{N}$.

Tabela 5.1 - Relação entre $n_r \times \gamma_e(f)$.

C	n_r	$\gamma_e(f)$
1	2	1,00
2	5	1,66
3	8	2,00
4	17	2,54
5	32	3,00
6	65	3,51
7	128	4,00
8	257	4,50
9	512	5,00
10	1025	5,50

A Figura 5.1 ilustra a relação entre a complexidade estática e o número de recursos (*hashis*) para quantidade de 1 a 1000 recursos. Observa-se que há tendência a saturação após determinado número de recursos, isto ocorre por não ser levado em consideração os valores do vetor T_j de períodos de tempo t , disponíveis para que os filósofos assumam o estado a_c .

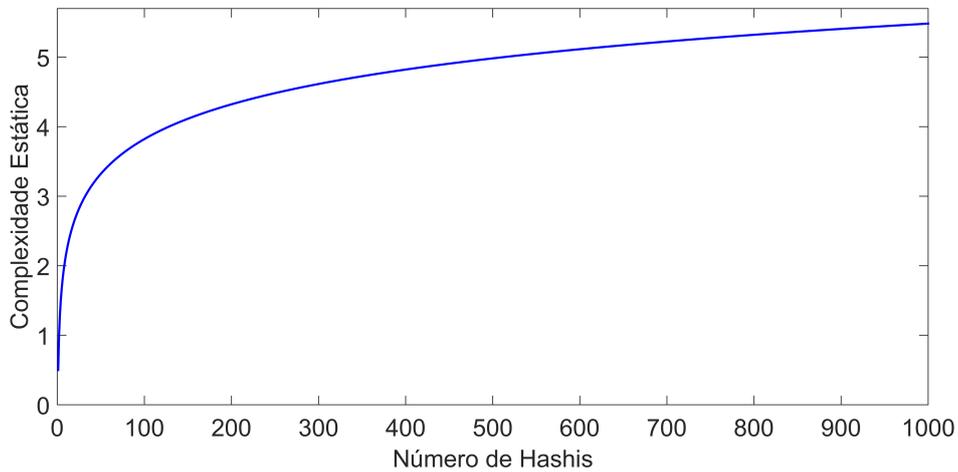


Figura 5.1 - Relação da Complexidade Estática \times Número de Recursos.

Considerando o sistema dinâmico, no estudo de caso do Jantar dos Filósofos Chineses, foram desenvolvidas duas abordagens com o intuito de expressar o comportamento dos filósofos quanto ao seu desejo de comer. Na primeira, os filósofos querem

comer sempre que for possível. A segunda abordagem considera que cada filósofo pode querer comer ou não a cada rodada (PAIVA et al., 2016).

Nesta primeira abordagem, os filósofos (entidades) sempre utilizam todos os *hashis* durante toda a simulação, pois, sempre que um *hashi* é liberado por um filósofo, ele é imediatamente utilizado por outro. Porém, na maioria dos sistemas reais, os recursos não são totalmente utilizados a todo tempo, variando o número de conexões ativas no tempo, de acordo com o funcionamento do sistema.

A Tabela 5.2 dispõe os tempos que cada filósofo permaneceu nos estados comendo a_c , esperando a_e e filosofando a_f , obtidos em simulação utilizando como dados de entrada: número de filósofos $n = 5$, filósofo F_1 iniciando a simulação, orientação da simulação no sentido horário, vetor T_j sendo a sequência de $12 \times [2, 4, 3]$ formando vetor com $m = 36$ posições.

Tabela 5.2 - Tempos a_c , a_e e a_f para cada filósofo.

F_i	t_{a_c}	t_{a_e}	t_{a_f}
1	29	27	15
2	30	27	14
3	26	30	15
4	30	29	12
5	27	29	15

A Figura 5.2 ilustra a ocorrência dos eventos para a entidade F_2 do exemplo da Tabela 5.2. Considerando $T(F_i)$ como o tempo total de simulação para cada entidade, tem-se para este exemplo, $T(F_2) = 71 [Ut]$ (unidade de tempo), observe que o valor de $T(F_i)$ deve ser o mesmo para todas as entidades F_i envolvidas no sistema.

Na Tabela 5.3 dispõe-se os resultados da eficiência de cada entidade do sistema utilizando a expressão (5.2) e considerando o estado a_e como o estado a se medir a eficiência. Na Figura 5.2 é possível observar a repetição que ocorre ao longo do tempo, pelo fato de T_j ser 12 sequências de três elementos iguais.

$$\eta = \frac{t_{a_c}}{T(F_i)} \quad (5.2)$$

No caso da complexidade dinâmica para esta primeira abordagem, considerou-se a

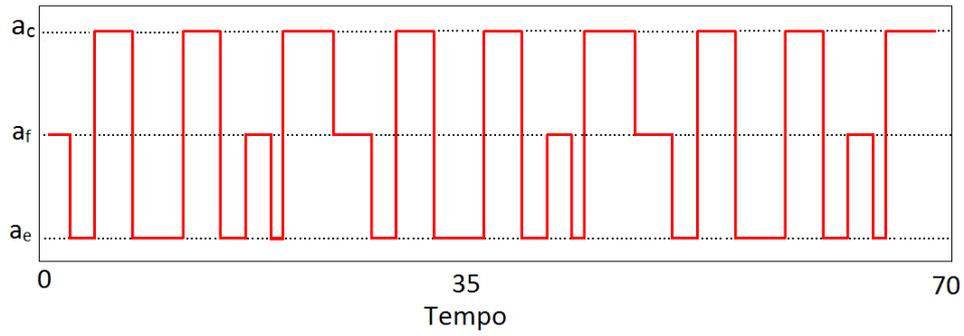


Figura 5.2 - Dinâmica do processo para o filósofo F_2 .

Tabela 5.3 - Eficiência dos filósofos

F_i	η
1	0.204
2	0.211
3	0.183
4	0.211
5	0.190

configuração a cada instante de tempo t . Portanto, após definidos o vetor de tempo T_j , a orientação da simulação (horária ou anti-horária), o número de recursos n_r e o número de filósofos n , inicia-se a simulação. Considera-se $T_j = 20 \times [7, 9, 2, 10, 1]$, iniciando a simulação em F_1 e com orientação no sentido horário. Utiliza-se T_j fixo e varia-se o número de filósofos e *hashis*, assumindo os valores obtidos na lei de formação expressa em (5.1). Desta forma, tem-se na Tabela 5.4 o tempo total de simulação para diferentes números de recursos.

Tabela 5.4 - Relação entre $n_r \times T(F_i)$

n_r	$T(F_i)$
2	680
5	341
8	208
17	100
32	56
65	30
128	19
257	11
512	11
1025	11

Na Tabela 5.4, observa-se que à medida em que se aumenta o número de recursos e entidades, o tempo total de simulação $T(F_i)$ diminui. Isto ocorre porque os valores dos elementos de T_j são distribuídos para as entidades, assim, como T_j neste caso tem $m = 100$ elementos, quando $n_r > m$ não haverá elementos em T_j para todas as entidades.

Para o caso em que os filósofos podem decidir se querem ou não comer, foi realizada nova simulação. Nesta nova simulação, o desejo de comer dos filósofos a cada rodada foi representado por valor binário gerado aleatoriamente conforme distribuição uniforme. Quando o valor gerado for 0, o filósofo não desejava comer, quando for 1, ele desejava comer. Todos os filósofos iniciaram no estado filosofando a_f , portanto todos os *hashis* estavam livres. O relógio de simulação avançou de uma em uma unidade de tempo [Ut], que corresponde a ocorrência de um ou mais eventos.

A simulação foi realizada durante 200 [Ut] para o cenário com cinco filósofos e cinco *hashis*. O vetor T_j de períodos de tempo t foi gerado utilizando distribuição uniforme de valores inteiros entre 1 e 5. A cada ocorrência de evento no sistema, a expressão (4.1) foi utilizada para medir a complexidade, observando o número de conexões ativas. A Figura 5.3, apresenta o comportamento do sistema relativo as complexidades estática $\gamma_e(f)$, dinâmica $\gamma_d(f)$ e média da complexidade dinâmica $\gamma_m(f)$.

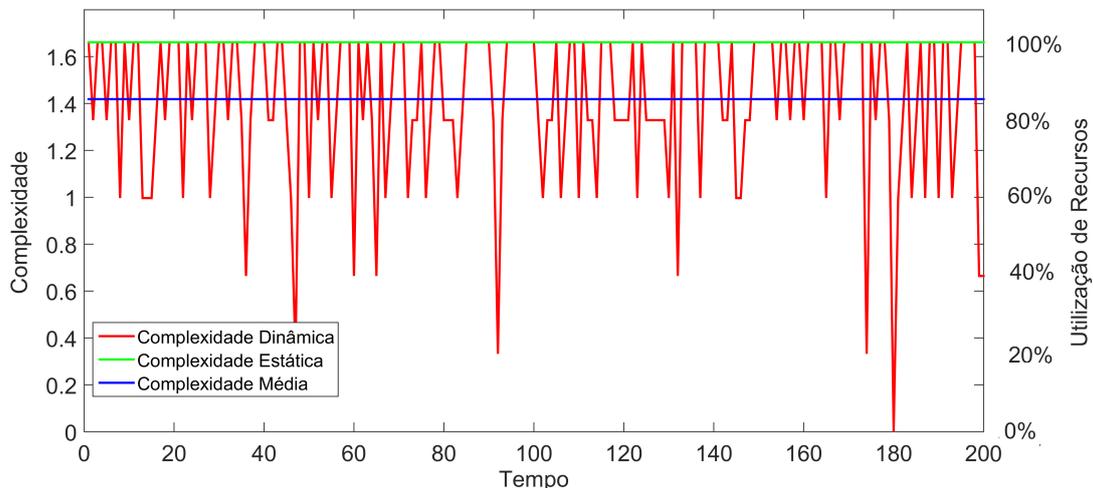


Figura 5.3 - Complexidades Estática, Dinâmica e Média do Jantar dos Filósofos Chineses.

Na Figura 5.3, as complexidades estática e média tiveram valores aproximados a 1,66 e 1,41, respectivamente. A complexidade dinâmica variou durante o processo de simulação e atingiu o valor máximo em vários momentos. Como cada filósofo pôde optar por comer ou não, o número de conexões ativas no sistema alterou-se a cada ocorrência de evento. Observa-se que a complexidade dinâmica teve seu valor limitado superiormente pelo valor da complexidade estática.

Na primeira abordagem, em que os filósofos sempre querem comer, observa-se que, em cada instante de tempo t , a complexidade dinâmica $\gamma_d(f)$ foi máxima, portanto, igual à estática $\gamma_e(f)$. Assim, obtém-se a relação expressa em (5.3).

$$\gamma_d(f) = \gamma_e(f) : \forall t \in T_j \quad (5.3)$$

Na Figura 5.3, observa-se valores de complexidade que se repetem durante a simulação. Após a realização de 100 rodadas, foi possível realizar a análise dos dados, encontrando o percentual de ocorrência, dispostos na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Percentual de ocorrência de valores de $\gamma_d(f)$.

$\gamma_d(f)$	Ocorrência	n_r [%]	n_r
0	0,56%	0	0
0,3322	2,83%	20	1
0,6644	6,30%	40	2
0,9966	19,68%	60	3
1,3288	22,11%	80	4
1,6610	48,50%	100	5

Os valores de complexidade dinâmica dispostos na Tabela 5.5 são indicativos de quantidade de recursos utilizados, pois para que o recurso seja utilizado é necessária conexão entre ele e a entidade, sendo considerado no cálculo da complexidade. A Tabela 5.5 apresenta que com a complexidade máxima de $1,66 = 100\%$, todos os recursos estão sendo utilizados e que isto ocorre em aproximadamente 48% do tempo de simulação. Com complexidade de 1,32, pode-se mensurar que 80% dos recursos são utilizados em aproximadamente 22% do tempo de simulação. Observa-se ainda na relação entre a Figura 5.3 e a Tabela 5.5 que em média, aproximadamente 84% dos recursos são utilizados nesta simulação, $\gamma_m(f) = 1,41 \approx 84\%$. A variação nos valores da porcentagem de n_r é proporcional ao número de recursos.

5.2 Centro de Distribuição

O modelo do Centro de Distribuição foi simulado com base na dinâmica de operação: i) a chegada dos pedidos ocorre em intervalos de tempo t_1 , ii) o carregamento de cada caminhão dura o tempo t_2 , iii) quando um caminhão sai para realizar a entrega, a doca e a equipe de carregadores são liberados para novo carregamento, iv) o transporte de cada pedido até o destinatário realiza-se em período de tempo t_3 e v) após a entrega, o caminhão vazio retorna ao Centro de Distribuição durante período de tempo t_4 .

As distribuições probabilísticas adotadas para cada tempo t_n deste estudo de caso e os respectivos valores para seus parâmetros em minutos estão dispostos na Tabela 5.6. A escolha destas distribuições probabilísticas baseia-se na literatura de sistemas a eventos discretos, na qual frequentemente são utilizadas para modelar os processos de chegada em fila de carregamento e entrega. Na Tabela 5.6 as variáveis \bar{m} e σ são as médias e o desvio padrão, respectivamente.

Tabela 5.6 - Distribuições probabilísticas adotadas para o Centro de Distribuição.

Tempo	Distribuição	Parâmetros
t_1	Exponencial	\bar{m} : 120
t_2	Normal	\bar{m} : 120, σ : 30
t_3	Uniforme	Intervalo: [120 – 240]
t_4	Uniforme	Intervalo: [120 – 240]

A quantidade de docas utilizada na simulação variou de 1 a 10, a quantidade de caminhões de 1 a 15 e a quantidade de grupos de carregadores de 1 a 10. As variações nas quantidades de recursos produzem combinação de 1500 possibilidades de cenários diferentes. Desta forma, foi realizada a simulação por 180 dias para cada cenário, considerando 24 horas de operação diárias com cada caminhão carregado com apenas um pedido por vez. Nos 1500 cenários simulados, foram calculados o tempo de entrega T_e , em minutos, e a complexidade $\gamma(d)$ do sistema.

Na Figura 5.4, é possível observar que a complexidade $\gamma(d)$ (em vermelho) possui oscilações que seguem o formato da curva de utilização de caminhões (em verde), ou seja, os cenários que contêm os picos da utilização de caminhões coincidem com os cenários que apresentam os picos de complexidade. No entanto, os picos de complexidade nos primeiros 750 cenários variam entre aproximadamente 0,5 e 1,0. Nos

outros 750 cenários, os picos de complexidade variam entre aproximadamente 0,3 e 0,5, devido a maior quantidade de recursos disponíveis e, portanto, menor formação de fila.

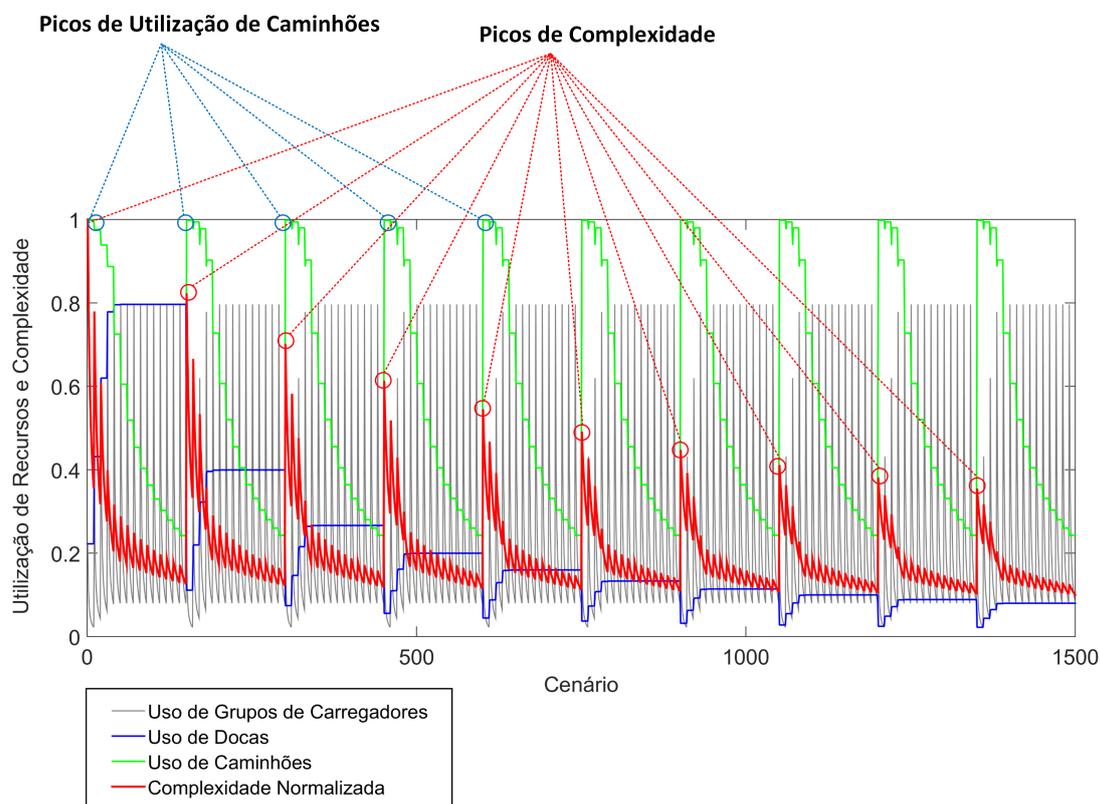


Figura 5.4 - Utilização percentual de recursos e complexidade para o Centro de Distribuição.

Analisando a Figura 5.5, é possível notar que o uso de docas (em azul) diminui durante a simulação pois a quantidade deste recurso aumenta conforme varia-se os cenários. Assim, com maior número de docas para atender a mesma demanda, sua utilização diminui. O uso dos caminhões e dos grupos de carregadores permanece com a mesma característica, pois estes dois recursos dependem da disponibilidade de docas para serem utilizados.

Observa-se ainda, na Figura 5.5, que a utilização do recurso caminhão (em verde) não sofre alterações com o acréscimo no número de docas (em azul) ou de grupos de carregadores (em cinza).

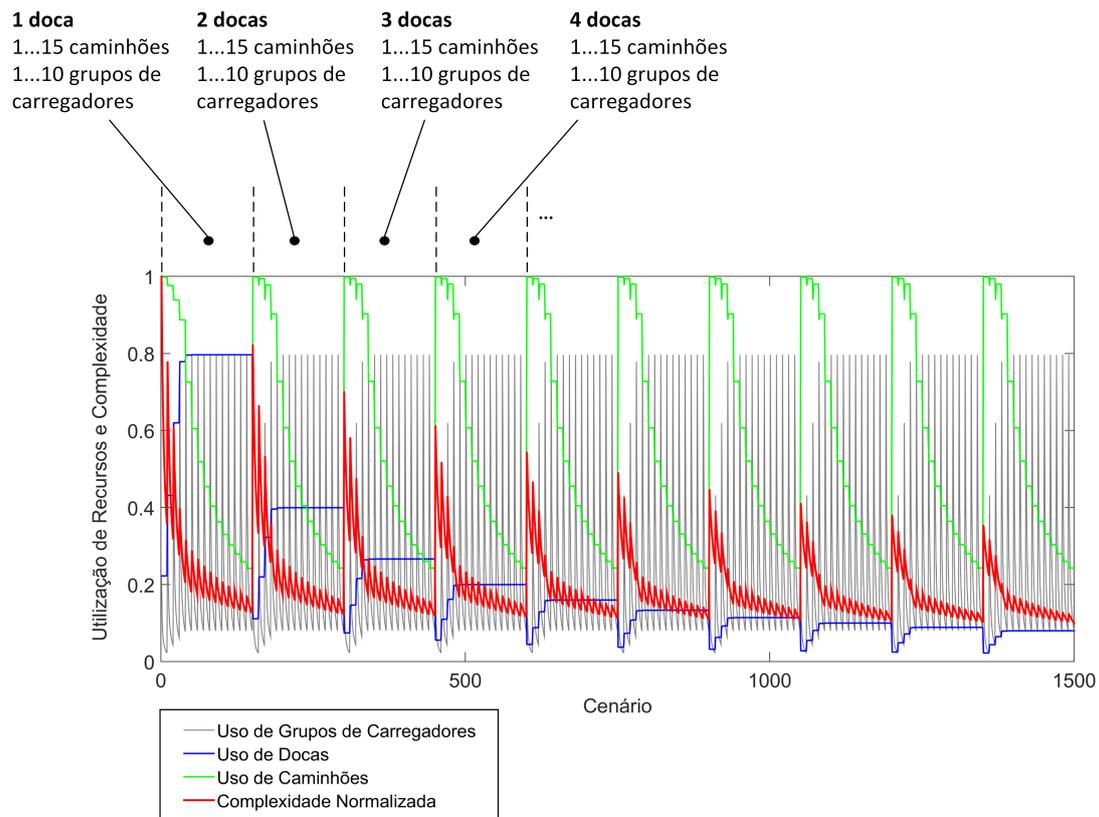


Figura 5.5 - Variação no número de recursos e complexidade para o Centro de Distribuição.

Os valores normalizados do tempo de entrega T_e e da complexidade $\gamma(d)$ para todos os cenários simulados são apresentados na Figura 5.6. Como a simulação é a combinação dos recursos: docas, caminhões e grupos de carregadores, nesta ordem, na Figura 5.6, os picos de T_e (em azul) correspondem às combinações em que havia apenas um caminhão disponível.

A cada mudança no número de docas, um caminhão foi utilizado por 10 cenários, ocasionando os maiores valores do T_e e de $\gamma(d)$. As oscilações que ocorrem na faixa entre os valores 0, 1 e 0, 3 de $\gamma(d)$ são oriundas das variações do número de caminhões, indicando maior sensibilidade deste parâmetro do sistema.

A Tabela 5.7 dispõe alguns valores obtidos na simulação. Observando a Figura 5.6, próximo ao eixo das abscissas, nota-se que existem várias configurações do sistema que resultam no mesmo valor de T_e . No entanto, estão dispostos na Tabela 5.7 os cinco cenários com menor valor de complexidade encontrados para os cinco menores tempo T_e .

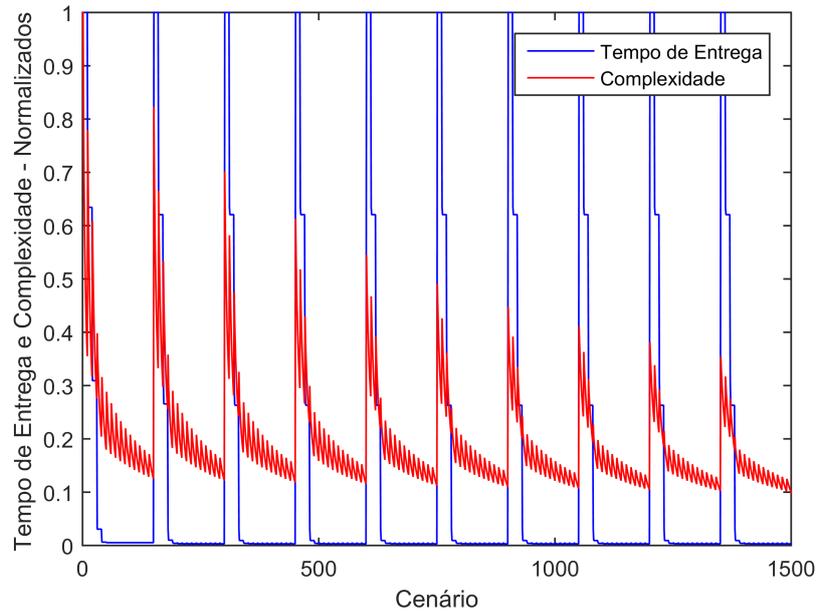


Figura 5.6 - Relação entre Tempo de Entrega e Complexidade.

Tabela 5.7 - Cenários com menores tempos de entrega e complexidade correspondente.

T_e	$\gamma(d)$	Docas	Caminhões	Grupos
276,9357	0,2963	10	15	6
276,9569	0,3038	6	14	10
277,0154	0,2697	10	15	10
277,0368	0,2821	9	14	10
277,0613	0,3041	5	15	10

A menor complexidade encontrada nos 1500 cenários é $\gamma(d) = 0,2697$, que corresponde ao terceiro menor tempo de entrega e ao cenário com o número máximo de recursos disponíveis. O pior tempo de entrega $T_e \approx 340$ vezes maior que o menor tempo, ocorreu em 100 cenários diferentes, como ilustrado na Figura 5.6, nos 10 picos, onde ocorrem 10 cenários. A maior complexidade obtida $\gamma(d) = 2,7906$, foi para o pior tempo, visto que o cálculo tanto do tempo de entrega quanto da complexidade, considera a permanência dos pedidos na fila. Como cada pedido em fila corresponde a uma conexão, quanto maior a fila, maior será o tempo T_e e maior será a $\gamma(d)$.

Observa-se que valores de $\gamma(d)$ estão intrinsecamente relacionados com a configuração do sistema. Colocando os resultados dos 1500 cenários em ordem decrescente

de $\gamma(d)$, ocorre que entre os cinco maiores valores, encontra-se $T_e \approx 815$. Isto representa valor próximo de 3 vezes o menor T_e encontrado, como disposto na Tabela 5.8. Verifica-se que para $T_e = 815,7777$, foram utilizados aproximadamente 84% menos recursos que no cenário de menor T_e .

A partir das análises realizadas na Figura 5.6, Tabela 5.7 e Tabela 5.8, pode-se desenvolver a métrica que considera a configuração do sistema e o tempo utilizado para realizar a tarefa de entrega, dada pela expressão (5.4).

$$R_C = \frac{T_e}{\gamma(d)} \quad (5.4)$$

Tabela 5.8 - Relação entre tempo de entrega \times complexidade.

T_e	$\gamma(d)$	R_C	Docas	Caminhões	Grupos
276,9357	0,2963	934,6463	10	15	6
291,6034	0,4083	714,1128	2	11	7
297,8970	0,5892	505,5827	3	7	2
322,1149	0,4690	686,8121	2	6	9
815,7777	2,0263	402,5947	1	3	1

Na Tabela 5.8, dispõe-se os valores encontrados para R_C . Observa-se que o menor valor encontrado refere-se ao tempo de 815,7777 minutos, cujo cenário apresentou quantidade reduzida de recursos. Mesmo assim, o tempo de entrega foi 115 vezes menor que o pior caso e apenas 3 vezes maior que o melhor caso. Para este caso, R_C indica o menor custo em termos de complexidade para cada minuto de permanência do pedido no sistema.

Valores altos de complexidade podem refletir tamanho expressivo da fila e consequentemente maior tempo de espera (Tabela 5.8), se o tempo de entrega for elevado. Porém, alta complexidade também pode ser indicativo de configurações ótimas para o sistema, em cenários com maior eficiência. Desta maneira, o número de conexões ativas observado no cálculo da complexidade pode expressar tanto a formação de fila quanto a utilização dos recursos para carregamento e transporte dos pedidos (Tabela 5.5). Assim, torna-se necessário a utilização de R_C para verificar se o valor alto de complexidade é indicativo de fila ou de plena operação, como apresentado em (5.5).

$$\begin{cases} \gamma \uparrow & T_e \uparrow & \text{fila} \\ \gamma \uparrow & T_e \downarrow & \text{operação} \end{cases} \quad (5.5)$$

5.3 Centro de Emergência Hospitalar

O modelo do Centro de Emergência Hospitalar foi simulado com o fluxo processual: i) os pacientes chegam ao Centro de Emergência em intervalos de tempo t_5 , ii) aguardam na fila Q_1 por atendimento médico, iii) realizam consulta médica durante tempo t_6 , iv) após consulta, 1% dos pacientes são liberados e 99% são encaminhados para v) realizar procedimentos básicos, sendo que 40% dos pacientes aguardam em fila Q_2 para receber medicação por período de tempo t_7 e 60% dos pacientes aguardam em fila Q_3 para realizar exames durante o intervalo de tempo t_8 , vi) após medicação ou exames, 10% dos pacientes são liberados, 40%, realizam novos exames ou tomam mais medicação, e 50%, aguardam em fila Q_4 para retornar ao médico, sendo que o novo atendimento dura período de tempo t_9 , vii) após nova consulta médica, 40% dos pacientes são encaminhados para novos exames ou medicação, ou saem do sistema, sendo que 40% deles são internados e 20% são liberados (GOMES et al., 2016).

As distribuições probabilísticas utilizadas para geração de cada tempo t_n deste estudo de caso e os respectivos valores para seus parâmetros em minutos estão dispostos na Tabela 5.9. Estas distribuições probabilísticas foram escolhidas com base na literatura de sistemas a eventos discretos, onde estas distribuições são utilizadas para modelar processos de chegada em filas de atendimentos. Na Tabela 5.9 as variáveis \bar{m} e σ são as médias e os desvios padrão, respectivamente.

Tabela 5.9 - Distribuições probabilísticas adotadas para o Centro de Emergência Hospitalar.

Tempo	Distribuição	Parâmetros
t_5	Exponencial	$\bar{m}: 5$
t_6	Normal	$\bar{m}: 15, \sigma: 5$
t_7	Normal	$\bar{m}: 20, \sigma: 5$
t_8	Normal	$\bar{m}: 15, \sigma: 5$
t_9	Normal	$\bar{m}: 10, \sigma: 5$

A quantidade de médicos, técnicos de exames, e enfermeiros utilizada na simulação variou de 3 a 8, de 2 a 10 e de 5 a 15, respectivamente, formando combinação de

594 cenários diferentes. A simulação foi realizada por 180 dias para cada cenário, considerando 24 horas diárias de funcionamento. Nos 594 cenários simulados, foram calculados o tempo de permanência no Centro de Emergência t_p , em minutos, e a complexidade $\gamma(p)$ do sistema.

A menor complexidade obtida de todos os cenários, $\gamma(p) = 0,2407$, ocorreu quando havia o número máximo de recursos, ou seja, 8 médicos, 15 enfermeiros e 10 técnicos de exame. E a maior complexidade, $\gamma(p) = 0,8105$, quando havia o número mínimo de recursos, ou seja, 3 médicos, 5 enfermeiros e 2 funcionários de exame, e portanto maior formação de filas. Na Figura 5.7, a menor complexidade encontrada corresponde ao último cenário e a maior complexidade, ao primeiro cenário.

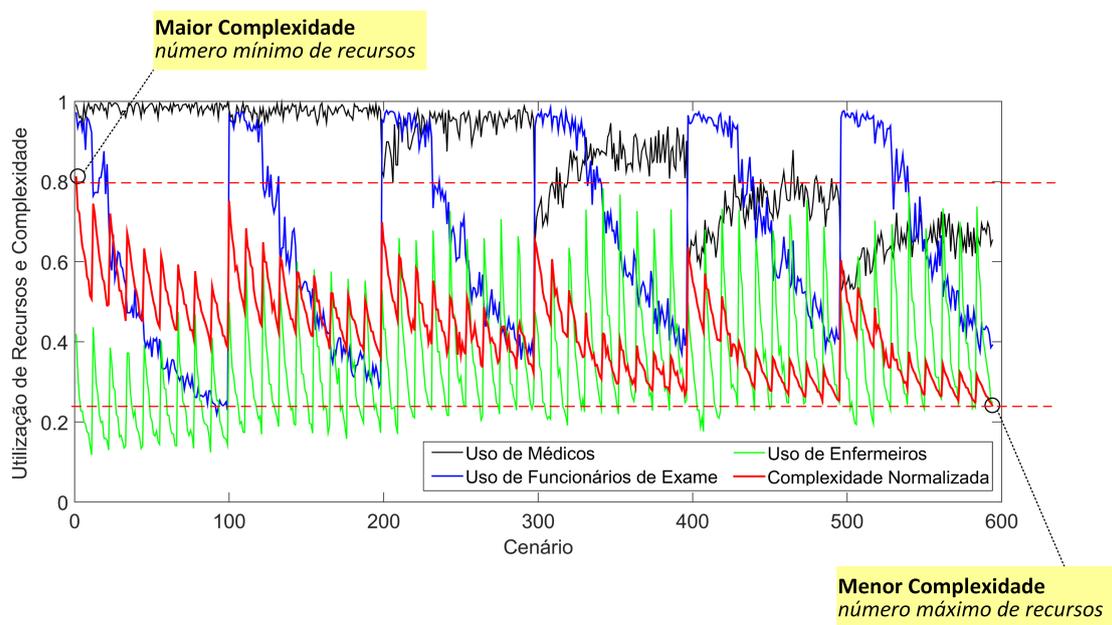


Figura 5.7 - Menor e maior complexidade para o Centro de Emergência Hospitalar.

Considerando que a simulação combinou as quantidades de médicos, técnicos de exames e enfermeiros, nessa ordem, a Figura 5.8 apresenta os valores percentuais de utilização dos recursos (eficiência) e a medida de complexidade normalizada para os cenários simulados. Pode-se observar que nos primeiros 200 cenários, em que havia menos de 5 médicos, a utilização deste recurso (médico) foi máxima, com valores entre 0,9 e 1.

Os valores de complexidade foram menores quando havia maior quantidade de re-

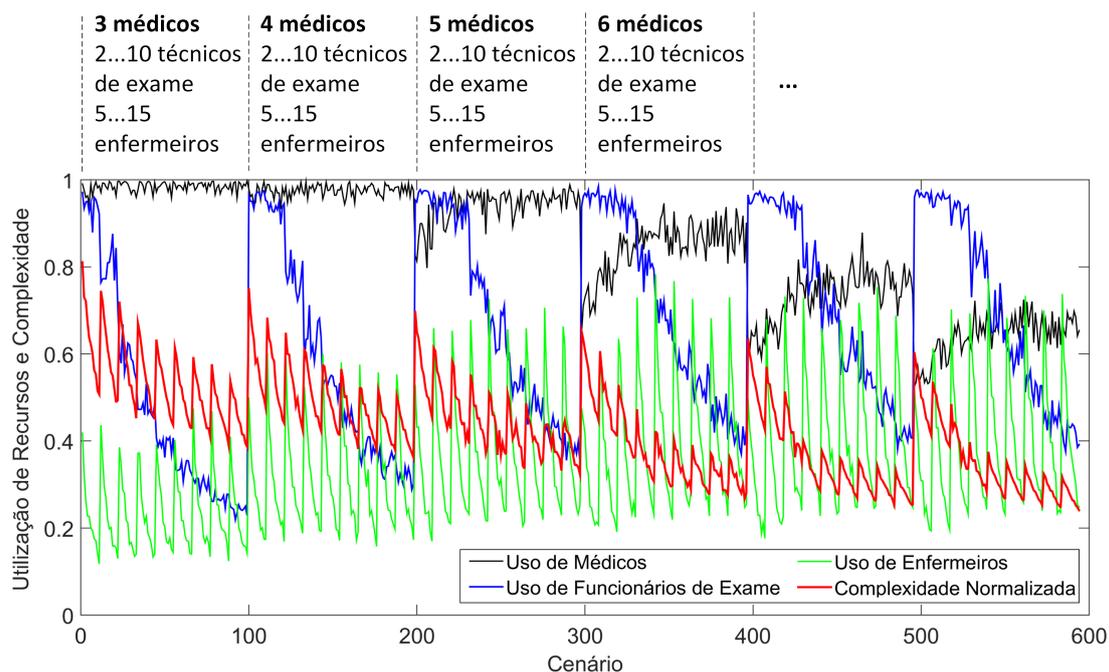


Figura 5.8 - Utilização percentual de recursos e complexidade para o Centro de Emergência Hospitalar.

recursos, sendo que os picos de $\gamma(p)$ (em vermelho) ocorrem sempre que há acréscimo na quantidade de médicos, porém havia número mínimo de enfermeiros e técnicos de exames, aumentando o tamanho das filas Q_2 de medicação e Q_3 de exames. Este fato pode ser observado na Figura 5.9.

No cenário com menor complexidade, os tempos médios t_p que os pacientes ficaram no Centro de Emergência Hospitalar até serem liberados ou internados, são aproximadamente 14, 9; 58, 7; 71, 13 e 74, 07 minutos para os que saíram: i) sem exame nem medicação t_{p1} , ii) após realizar exames e/ou medicação t_{p2} , iii) após ser atendido pelo médico mais de uma vez t_{p3} e iv) para internação t_{p4} , respectivamente. Para o cenário com maior complexidade, estes tempos médios foram 774, 68; 1032, 20; 1191, 25 e 1128, 28 minutos, respectivamente. Os dados dos tempos médios e da complexidade para este estudo de caso, estão dispostos na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Complexidade e tempos médios do Centro de Emergência Hospitalar.

$\gamma(p)$	t_{p1}	t_{p2}	t_{p3}	t_{p4}	Médicos	Técnicos	Enfermeiros
0, 2407	14, 9	58, 7	71, 13	74, 08	8	10	15
0, 8105	774, 68	1032, 20	1191, 25	1128, 28	3	3	5

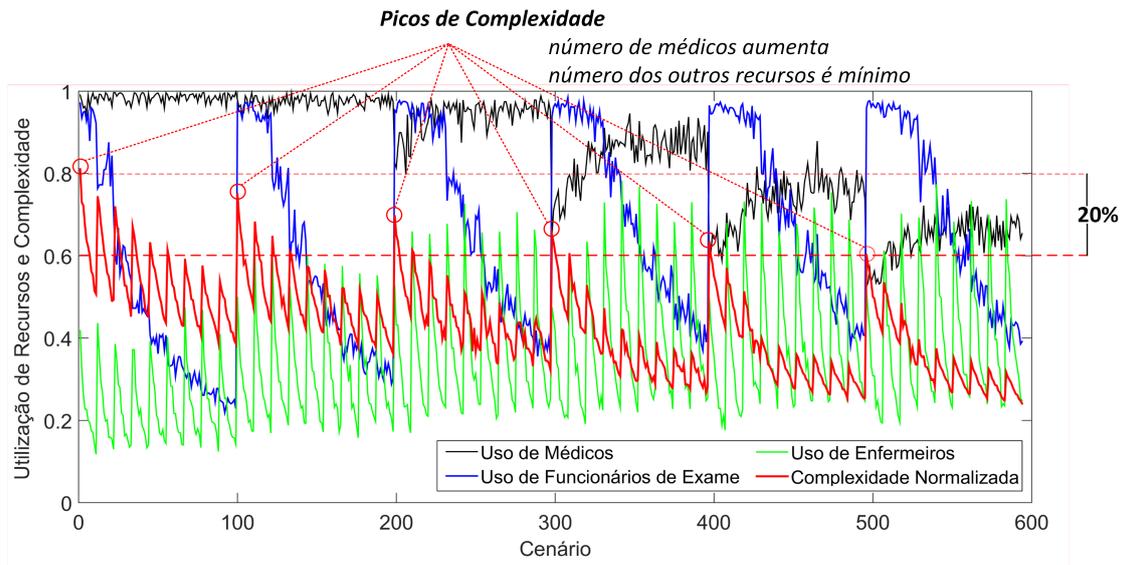


Figura 5.9 - Picos de complexidade para o Centro de Emergência Hospitalar.

Houve aumento de aproximadamente 336% no valor da complexidade do melhor para o pior caso. Em média houve aproximadamente 30% de redução de recursos do melhor para o pior caso, ocasionando aumento expressivo nas filas.

Analisando as Figura 5.7, Figura 5.8, Figura 5.9, e a Tabela 5.10, é possível desenvolver métrica análoga à expressa em (5.4), porém agora considerando como medida de desempenho os tempos médios t_p que os pacientes permaneceram no Centro de Emergência Hospitalar até serem liberados ou internados, dada pela expressão (5.6).

$$R_H = \frac{t_p}{\gamma(p)} \quad (5.6)$$

A Tabela 5.11 dispõe os valores aproximados para R_{H_1} , R_{H_2} , R_{H_3} e R_{H_4} obtidos pela aplicação da expressão (5.6) aos tempos médios t_{p1} , t_{p2} , t_{p3} e t_{p4} , respectivamente, para a menor e maior complexidade do sistema.

Tabela 5.11 - Relação entre tempos de permanência no Centro de Emergência Hospitalar \times complexidade.

$\gamma(p)$	R_{H_1}	R_{H_2}	R_{H_3}	R_{H_4}	Médicos	Técnicos	Enfermeiros
0,2407	3711	14636	18976	18462	8	10	15
0,8105	57349	76413	88187	83526	3	3	5

Os menores valores obtidos para R_{H_1} , R_{H_2} , R_{H_3} e R_{H_4} , a complexidade e o número de recursos de cada cenário correspondente estão dispostos na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 - Menores valores para relação entre tempos de permanência e complexidade.

	R_H	$\gamma(p)$	Médicos	Técnicos	Enfermeiros
R_{H_1}	1147	0,3174	8	8	7
R_{H_2}	10081	0,3522	7	7	6
R_{H_3}	12651	0,3595	7	7	5
R_{H_4}	12706	0,3659	7	6	6

Com relação à eficiência no uso dos recursos do Centro de Emergência Hospitalar, as Tabela 5.13 e Tabela 5.14 dispõem os percentuais de utilização mínimo e máximo simulados, respectivamente, para os recursos do sistema.

Tabela 5.13 - Menores eficiências no uso dos recursos.

Recurso	Utilização [%]	Quantidade
Médicos	52,50%	8
Técnicos	21,89%	10
Enfermeiros	11,75%	15

Tabela 5.14 - Maiores eficiências no uso dos recursos.

Recurso	Utilização [%]	Quantidade
Médicos	99,76%	3
Técnicos	98,43%	2
Enfermeiros	78,30%	5

5.4 Complexidade \times Risco

Risco é a combinação entre possibilidade de ocorrência de situações indesejáveis e sua respectiva repercussão, caso esta situação ocorra (WILDE, 2005). Se a possibilidade de ocorrência de determinada situação for remota, porém a repercussão de sua ocorrência for negativa, existe alto risco. Se a repercussão de determinada situação não é negativa porém sua possibilidade de ocorrência é alta, também considera-se alto risco (LOWRANCE, 1976).

No caso do risco operacional, as situações indesejáveis são aquelas relacionadas à

possibilidade de falha na operação do sistema. Quanto maior o número de conexões presentes no sistema, mais pontos de falha existem. Se a métrica de complexidade proposta é baseada em conexões, então ela pode ser utilizada como indicador de risco na operação de sistemas. O risco operacional depende do funcionamento do sistema. O sistema que apresentar maior número de conexões durante sua operação, apresenta maior risco operacional. Desta forma, a métrica de complexidade proposta pode auxiliar na escolha da melhor abordagem operacional deste sistema.

O risco financeiro está relacionado à situações onde existe possibilidade de prejuízo econômico. Quando os recursos do sistema são subutilizados, há prejuízo em termos de custos, pois seria possível manter a mesma dinâmica de funcionamento com número menor de recursos. A métrica de complexidade proposta pode ser utilizada em conjunto com a medida de desempenho do sistema para dimensionamento de recursos e valoração de sistemas, como pode ser observado nas relações R_C e R_H .

Métodos de apoio à decisão podem ser utilizados como ferramentas na gestão de risco. Abramczuk (2000) define que existem quatro tipos de métodos de apoio à decisão: determinísticos, heurísticos, estocásticos e inferenciais. Os métodos determinísticos são aplicáveis à problemas onde os eventos estão ligados por relações de causalidade, ou seja, o problema é bem conhecido. Métodos heurísticos são utilizados quando o problema admite solução aproximada, baseada em conhecimentos anteriores (empíricos). Os métodos estocásticos são aplicáveis à problemas cujo estado futuro não é totalmente determinado pelo estado presente. Os métodos inferenciais podem ser aplicados à problemas nos quais eventos passados ocorridos sob determinadas condições tendem a ocorrer no futuro sob as mesmas condições.

De acordo com Abramczuk (2000) existe correlação entre complexidade, incerteza e métodos de apoio à decisão, como ilustra a Figura 5.10. No eixo das abscissas, nos pontos próximos à 0 a incerteza é baixa, e nos pontos próximos à 1,00 a incerteza é alta. No eixo das ordenadas, nos pontos próximos 0 a complexidade é baixa, e nos pontos próximos à 1,00 a complexidade é alta. A relação entre complexidade e incerteza define o método de apoio à decisão mais apropriado para a resolução do problema.

Ao sobrepor a Figura 5.10 com a Figura 3.1, obtém-se a Figura 5.11. Para resolução de problemas localizados na região da simplicidade, métodos determinísticos são adequados e suficientes. Para problemas complicados, podem ser utilizados métodos

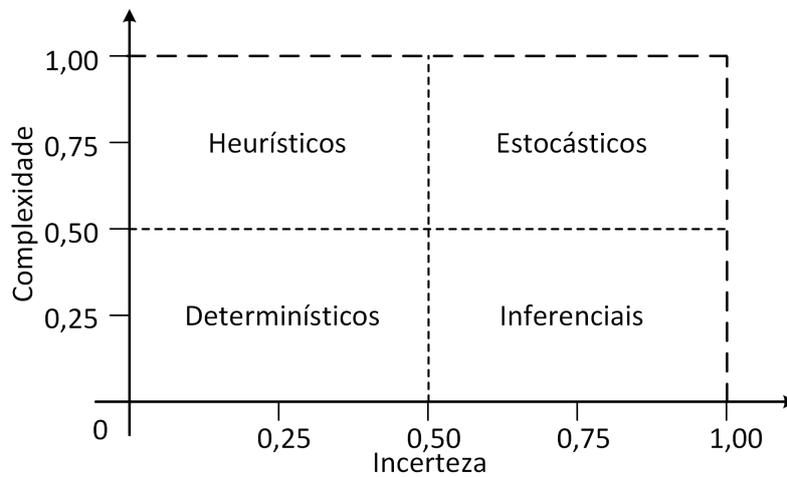


Figura 5.10 - Correlação entre complexidade, incerteza e métodos de apoio à decisão.

determinísticos, heurísticos e inferenciais, de acordo com o nível de desacordo e incerteza dos mesmos. Problemas complexos podem demandar métodos heurísticos, estocásticos ou inferenciais. Os problemas localizados na região caótica necessitam de métodos estocásticos.

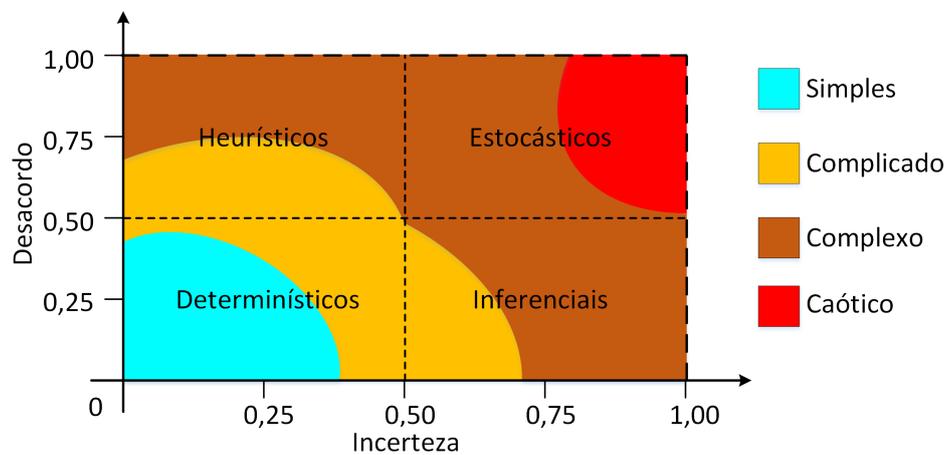


Figura 5.11 - Sobreposição métodos de apoio à decisão e Matriz de Stacey.

O posicionamento do problema nos diferentes níveis de complexidade da Matriz de Stacey pode definir qual o melhor método para sua resolução. Este posicionamento pode ser realizado a partir de resultados obtidos pela aplicação da métrica de complexidade apresentada.

Outra forma de analisar os dados para tomada de decisão, é a utilização da medida de sensibilidade de parâmetros em sistemas (PANNELL, 1997). Tomando como valor base (melhor chute) as quantidades de recursos: médico = 3, técnico de exame = 2 e enfermeiro = 5, pode-se construir o gráfico que representa qualitativamente a sensibilidade de cada parâmetro do sistema, gráfico aranha. A Figura 5.12 apresenta o gráfico aranha do Centro de Emergência Hospitalar.

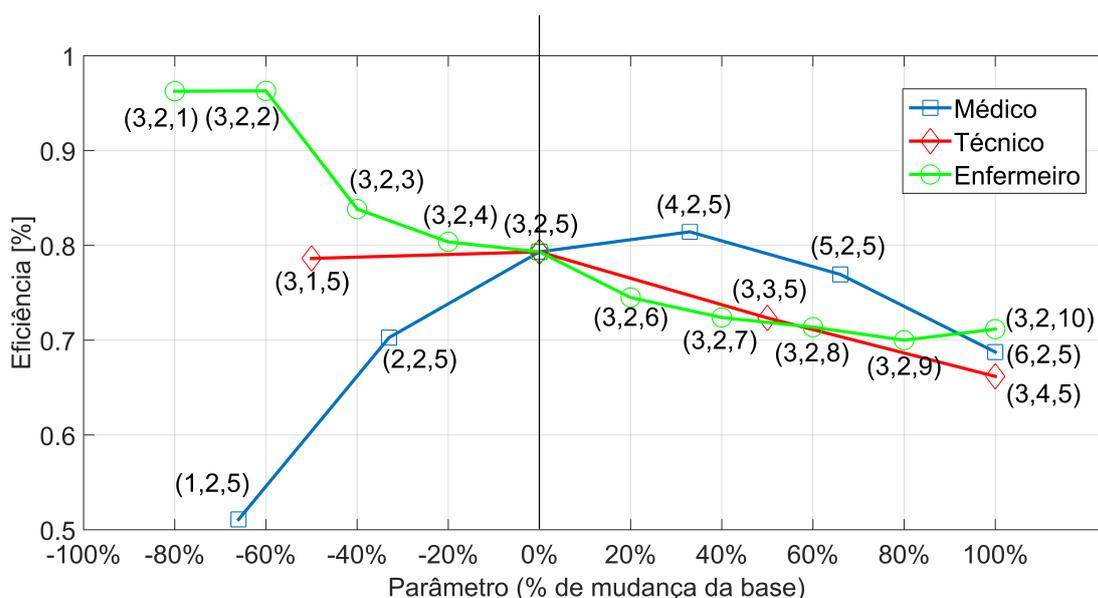


Figura 5.12 - Gráfico aranha do Centro de Emergência Hospitalar.

Para a construção deste gráfico aranha, realiza-se a análise univariada, onde o valor base é considerado no eixo vertical no centro do gráfico e as variáveis são alteradas uma de cada vez em porcentagem variado de -100% a 100% no eixo das abscissas. No eixo das ordenadas encontra-se o valor da eficiência que é modificado toda vez que o valor da variável é alterado. A eficiência do sistema considerada é a média do percentual de utilização dos recursos. Desta forma é possível observar qual variável é a mais sensível no Centro de Emergência Hospitalar.

Da Figura 5.12 pode-se observar que as variáveis número de enfermeiros e número de médicos são as mais sensíveis e com menor sensibilidade, tem-se a variável número de técnicos de exame. A Tabela 5.15 apresenta a relação entre o número dos recursos (médico, técnico de exame e enfermeiro, nesta ordem), o percentual de variação com relação aos valores base considerados e a eficiência do sistema.

Tabela 5.15 - Relação entre o número de recursos e a eficiência.

Recursos	Varição em relação à base [%]	Eficiência [%]
(3,2,5)	(0%,0%,0%)	0,7932%
(1,2,5)	(-66%,0%,0%)	0,5109%
(2,2,5)	(-33%,0%,0%)	0,7027%
(4,2,5)	(33%,0%,0%)	0,8143%
(5,2,5)	(66%,0%,0%)	0,7964%
(6,2,5)	(100%,0%,0%)	0,6875%
(3,1,5)	(0%,-50%,0%)	0,7862%
(3,3,5)	(0%,50%,0%)	0,7235%
(3,4,5)	(0%,100%,0%)	0,6618%
(3,2,1)	(0%,0%,-80%)	0,9626%
(3,2,2)	(0%,0%,-60%)	0,9626%
(3,2,3)	(0%,0%,-40%)	0,8384%
(3,2,4)	(0%,0%,-20%)	0,8037%
(3,2,6)	(0%,0%,20%)	0,7450%
(3,2,7)	(0%,0%,40%)	0,7239%
(3,2,8)	(0%,0%,60%)	0,7138%
(3,2,9)	(0%,0%,80%)	0,7000%
(3,2,10)	(0%,0%,100%)	0,7117%

Analisando a Tabela 5.15 observa-se que a maior eficiência do sistema, 0,9626%, ocorre em dois cenários, quando os recursos apresentam maior utilização. A menor eficiência, 0,5109%, ocorrem em apenas um cenário, quando os recursos tem a menor utilização.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

A metodologia apresentada pode ser empregada para aferição de complexidade estática e dinâmica em sistemas, podendo ser aplicada em sistemas reais, desde que estes sejam modelados em termos de eventos e estados, que expressem as conexões existentes. Na métrica proposta para cálculo de complexidade, considera-se o conjunto de conexões ativas entre os elementos do sistema, que varia durante o funcionamento do mesmo, ao invés de utilizar características fixas como o número de elementos ou de funções desempenhadas pelo sistema. Com a medida sendo calculada utilizando as conexões, é possível mensurar a dinâmica do sistema. A partir da medida de complexidade estática, é possível mensurar a eficiência do sistema sem a necessidade de simulação. A medida de complexidade dinâmica traz a relação da complexidade no tempo para o sistema simulado. Medir a complexidade é importante quando se compara dois sistemas reais que realizam mesma tarefa, pois assim é possível produzir análise comparativa sobre eles. A complexidade estática indicou a complexidade máxima do sistema, limitando superiormente a complexidade dinâmica. No Problema do Centro de Distribuição, observou-se que a complexidade associada à medida de desempenho agregou conhecimento sobre o sistema, pois o menor valor da relação entre tempo de espera e complexidade foi relativa à configuração do sistema que apresentou alta complexidade, considerando que a mesma demanda foi atendida com menor quantidade de recursos. No problema do Centro de Emergência Hospitalar, observou-se que a complexidade diminui na medida em que a disponibilidade de recursos aumenta, pois com maior número de recursos o atendimento aos pacientes é mais ágil, e as filas são menores. A métrica de complexidade apresentada pode apoiar a tomada de decisões relativas à política de gestão de recursos e entidades, indicando cenários que denotem o quantitativo ou apontem a maximização de uso de recursos do sistema. Além disso, a complexidade pode ser levada em conta na política de segurança ou valoração de sistemas, que é o processo no qual atribui-se valor monetário ao sistema desenvolvido, como por exemplo um *software*, que pode ter seu valor de mercado mensurado a partir de sua complexidade.

6.1 Contribuições do Trabalho

As contribuições podem ser assim descritas:

- Proposta da matriz de relacionamento entre entidades, recursos e filas;
- Desenvolvimento de equacionamento para representar complexidade, probabilidade de conexão e número de conexões ativas do sistema;
- Desenvolvimento de métrica de complexidade para sistemas a eventos discretos com foco na transição de estados e mudança no conjunto de conexões ativas considerando a dinâmica do sistema;
- Obtenção das seguintes produções bibliográficas:

Artigo publicado em anais de evento internacional:

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.

GOMES V.; PAIVA, J.; FURRIEL G.; RODRIGUES B.; ANICETO B.; SILVA L.; CALIXTO W.; DOMINGUES E.; CRUZ JUNIOR G. Complexity Metric Applied to Discrete Events Systems. In: 6th International Conference on Nonlinear Science and Complexity.

PAIVA, J.; GOMES, V.; OLIVEIRA, S.; DOMINGUES E.; ALVES, A.; CRUZ JUNIOR G.; CALIXTO, W. Calculation of system complexity based on the connections: methodology and applications. In: 16 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering.

Artigo publicado em anais de evento nacional:

PAIVA, J. R. B.; CALIXTO, W. P.; GOMES, V. M.; ANICETO, B. C. M. Métrica de Complexidade para Sistemas a Eventos Discretos. In: XII Congresso de Pesquisa, Ensino e Extensão da Universidade Federal de Goiás, 2015, Goiânia - GO. Luz, Ciência e Vida, 2015. p. 1317-1321.

Artigo aceito para publicação em anais de evento nacional:

PAIVA, J. R. B.; LOPES, V. H. L.; LEMES, M. T.; CALIXTO, W. P. Modelagem de Sistemas a Eventos Discretos Utilizando Cadeias de Markov In: VI SECITEC - Semana de Educação, Ciência e Tecnologia.

Artigo em fase de desenvolvimento para Periódico Internacional:

Periódico: International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

- a) Utilizar a métrica de complexidade para valoração de sistemas com intuito de comparar o custo de dois ou mais projetos diferentes;
- b) Utilizar a métrica de complexidade para otimização em conjunto com métodos determinísticos e heurísticos. A métrica de complexidade pode ser utilizada como restrição de parâmetros para a função de avaliação;
- c) Utilizar o cálculo da complexidade para análise de sensibilidade de parâmetros em sistemas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMCZUK, A. A. **A prática da tomada de decisão.** : Editora Atlas, 2000.

71

BAK, T. P.; WIESENFELD, K. Self-organized criticality: and explanation of 1/f noise. **Phys. Rev. Let**, v. 59, p. 381–384, 1987. 24

BALDAM, R.; VALE, R.; ROZENFELD, H. **Gerenciamento de Processos de Negócio-BPM: Uma referência para implantação prática.** : Campus, 2014. 26, 40

BAR-YAM, Y. Complexity rising: From human beings to human civilization, a complexity profile. **Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), UNESCO, EOLSS Publishers, Oxford, UK, 2002.** 25, 38, 39

BERTALANFFY, L. v. **General system theory: Foundations, development, applications.** : Braziller. New York, 1968. 23, 29

BINI, E. **Aristóteles: Metafísica.** 2. ed. : Edipro, 2012. 24

BOFFETTA, G.; CENCINI, M.; FALCIONI, M.; VULPIANI, A. Predictability: a way to characterize complexity. **Physics reports**, Elsevier, v. 356, n. 6, p. 367–474, 2002. 25

CASSANDRAS, C. G.; LAFORTUNE, S. **Introduction to discrete event systems.** Secaucus, NJ: Springer Science & Business Media, 2008. 29, 31

CASTI, J. L. **Complexification: Explaining a paradoxical world through the science of surprise.** Harper Perennial, 1995. 25, 39

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos.** 4. ed. : Campus-Elsevier, 2014. 29, 31, 34, 35, 48

CLARK, J. B.; JACQUES, D. R. Practical measurement of complexity in dynamic systems. **Procedia Computer Science**, Elsevier, v. 8, p. 14–21, 2012. 26

COSTA, E.; LIMA, A. **Sistemas Dinâmicos a Eventos Discretos: Fundamentos Básicos para a Moderna Automação Industrial, Ed.** Salvador, BA: EDUFBA, 2005. 29, 31

- CRUTCHFIELD, J. P. Between order and chaos. **Nature Physics**, Nature Publishing Group, v. 8, n. 1, p. 17–24, 2012. [25](#)
- CURY, J. E. R. Teoria de controle supervisorio de sistemas a eventos discretos. In: **V Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**. 2001. [31](#), [32](#), [33](#)
- DAHMEN, S. R. A obra de boltzmann em física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 28, n. 3, p. 281–295, 2006. [40](#)
- DIJKSTRA, E. W. Hierarchical ordering of sequential processes. **Acta informatica**, Springer, v. 1, n. 2, p. 115–138, 1971. [44](#), [45](#)
- GERSHENSON, C. Harnessing the complexity of education with information technology. **Complexity**, Wiley Online Library, v. 20, n. 5, p. 13–16, 2015. [25](#)
- 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. [25](#)
- GOMES, V.; PAIVA, J.; FURRIEL, G.; RODRIGUES, B.; ANICETO, B.; SILVA, L.; CALIXTO, W.; DOMINGUES, E.; JUNIOR, G. C. Complexity metric applied to discret events systems. In: **6th International Conference on Nonlinear Science and Complexity**. 2016. [66](#)
- HASSENE, A. M. E.; RADOUANE, L.; ALAA, C. Bayesian networks for the evaluation of complex systems availability. **CEUR Workshop Proceedings**, RWTH Aachen University, v. 1256, p. 113–119, 2014. [26](#)
- HOFSTAD, R. V. D. Random graphs and complex networks. **Eindhoven University of Technology - Department of Mathematics and Computer Science**, 2016. [26](#)
- HOLLAND, J. H. Studying complex adaptive systems. **Journal of Systems Science and Complexity**, Springer, v. 19, n. 1, p. 1–8, 2006. [25](#)
- _____. **Complexity: A very short introduction**. : Oxford University Press, 2014. [26](#), [39](#)
- LEMES, M. J. R. **Complexidade, acoplamento e criticalidade (C²A) como indicadores de risco em projetos de sistemas**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2012. [26](#), [29](#), [30](#), [34](#), [39](#), [40](#), [41](#), [43](#)

- LLOYD, S. Measures of complexity: a nonexhaustive list. **IEEE Control Systems Magazine**, v. 21, n. 4, p. 7–8, 2001. [26](#), [40](#), [43](#)
- LOWRANCE, W. W. Of acceptable risk: Science and the determination of safety. **Journal of The Electrochemical Society**, 1976. [70](#)
- LUCAS, C. Complexity philosophy as a computing paradigm. In: ROETZHEIM, W. (Ed.). **Why Things Are - How Complexity Theory Answers Life's Toughest Questions**. : Level 4 Press, Inc., 2007. cap. 8. [37](#)
- MALDONADO, C. E.; CRUZ, G.; NELSON, A. Biological hypercomputation: A new research problem in complexity theory. **Complexity**, Wiley Online Library, v. 20, n. 4, p. 8–18, 2015. [25](#)
- MARIOTTI, H. Complexidade e pensamento complexo (texto introdutório). **São Paulo**, 2000. [25](#)
- MARTIN, J. Systems are imaginary - systems are not real: Some thoughts on the nature of systems thinking. In: **INCOSE International Symposium**. San Diego, CA: , 2007. p. 24–28. [23](#)
- MARTINS, J. J. Teoria da complexidade: uma nova visão de mundo para a estratégia. **Revista Integra Educativa**, Instituto Internacional de Integración, v. 2, n. 2, p. 189–202, 2009. [25](#)
- MELLO, B. A. **Modelagem e Simulação de Sistemas**. 2007. [34](#)
- METZ, J.; CALVO, R.; SENO, E. R.; ROMERO, R. A.; LIANG, Z. Redes complexas: conceitos e aplicações. **Relatórios Técnicos do ICMC-USP São Carlos**, 2007. [26](#)
- MONTGOMERY, E. **Introdução aos Sistemas a Eventos Discretos e à Teoria de Controle Supervisório**. : Alta Books, 2004. [23](#), [34](#)
- NONAKA, I. Creating organizational order out of chaos: Self-renewal in japanese firms. **California Management Review**, Spring, v. 30, n. 3, p. 57–73, 1988. [24](#)
- 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. [57](#)

- PANNELL, D. J. Sensitivity analysis: strategies, methods, concepts, examples. **Agric Econ**, v. 16, p. 139–152, 1997. [73](#)
- PASCALÉ, R. Você está pronto para a complexidade. **HSM Management**, n. 46, p. 40–44, 2004. [25](#)
- PEREIRA, M. H. R. **Platão: A República**. : Calouste Gulbenkian, 2014. [24](#)
- PERROW, C. **Normal accidents: Living with high risk technologies**. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 2011. [25](#), [31](#), [39](#)
- RECHTIN, E.; MAIER, M. W. **The art of systems architecting**. : CRC Press, 2010. [23](#), [29](#)
- 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. [43](#)
- SAMMARCO, J. J. **A Normal Accident Theory-based complexity assessment methodology for safety-related embedded computer systems**. Tese (Doutorado) — College of Engineering and Mineral Resources, West Virginia University, 2003. [25](#)
- 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. [55](#)
- SHANNON, C. E. A mathematical theory of communication. **The Bell System Technical Journal**, v. 27, p. 379–423, 623–656, 1948. [40](#)
- SIFFERT, C. **Teoria do Caos e Complexidade**. 2006. [25](#)
- SIMON, H. A. The architecture of complexity. **Proceedings of the American Philosophical Society**, v. 106, n. 6, p. 467–482, 1962. [24](#)
- _____. How complex are complex systems? In: JSTOR. **PSA: Proceedings of the biennial meeting of the Philosophy of Science Association**. 1976. p. 507–522. [23](#), [24](#)
- _____. **Models of my life**. : MIT press, 1991. [23](#), [25](#)

SNOW, R. Ford - **O Homem que Transformou o Consumo e Inventou a Era Moderna.** : Editora Saraiva, 2014. [24](#)

STACEY, R. D. **Strategic Management and Organisational Dynamics: The challenge of complexity to ways of thinking about organisations.** 6. ed. : Prentice Hall, 2011. [25](#), [37](#), [38](#)

STEEN, M. van. An introduction to graph theory and complex networks. **Copyrighted material**, 2010. [26](#)

SUSSMAN, J. M. Ideas on complexity in systems—twenty views. **Retrieved October**, v. 3, p. 2008, 2000. [26](#)

WEINBERG, G. M. An introduction to general systems thinking. Wiley New York, 1975. [23](#)

WILDE, G. J. S. **O Limite Aceitável do Risco.** : Casa do Psicólogo, 2005. [70](#)