

MC1: Modelos de Decisão em Confiabilidade, Manutenção e Risco

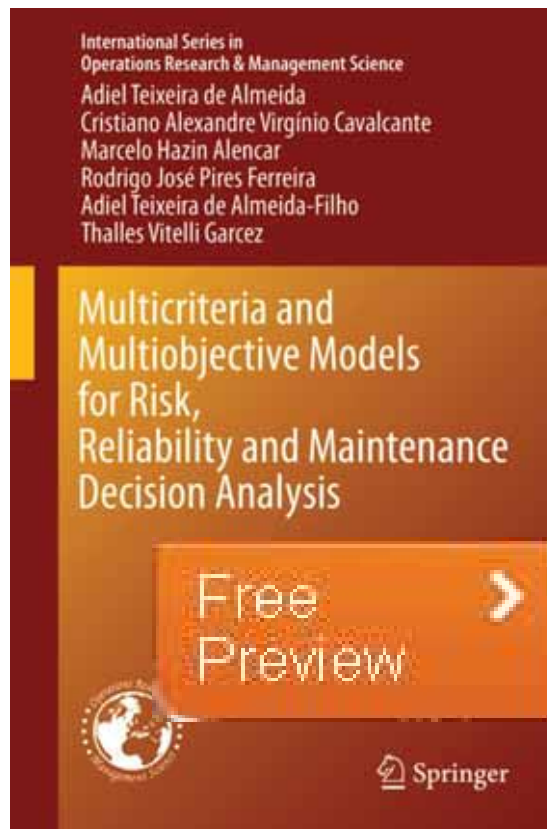
Adiel T de Almeida, Cristiano Cavalcante,
Marcelo Alencar, Rodrigo Ferreira,
Adiel Almeida-Filho, Thalles Garcez

Introdução

Processo de Decisão Multicritério

Springer

**International Series in Operations Research &
Management Science. Vol 231**



Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis

Authors: **de Almeida, A.T., Cavalcante, C.A.V., Alencar, M.H.,
Ferreira, R.J.P., de Almeida-Filho, A.T., Garcez, T.V.**

<http://www.springer.com/us/book/9783319179681>

Outros apresentações relacionadas

2015:

- Sessão específica no MCDM Int Conference
- Sessão específica no INFORMS
 - sponsored pela **Quality, Statistics and Reliability Section**
 - sponsored pela **MCDM Section**

2016

- Tutorial no IEEE – RAMS
- Outros: EURO, INFORMS,

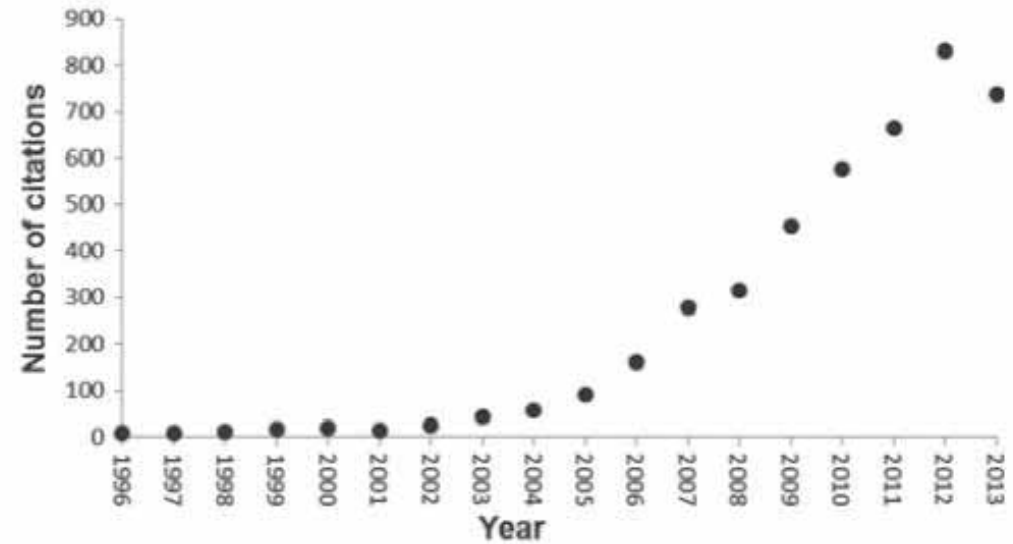
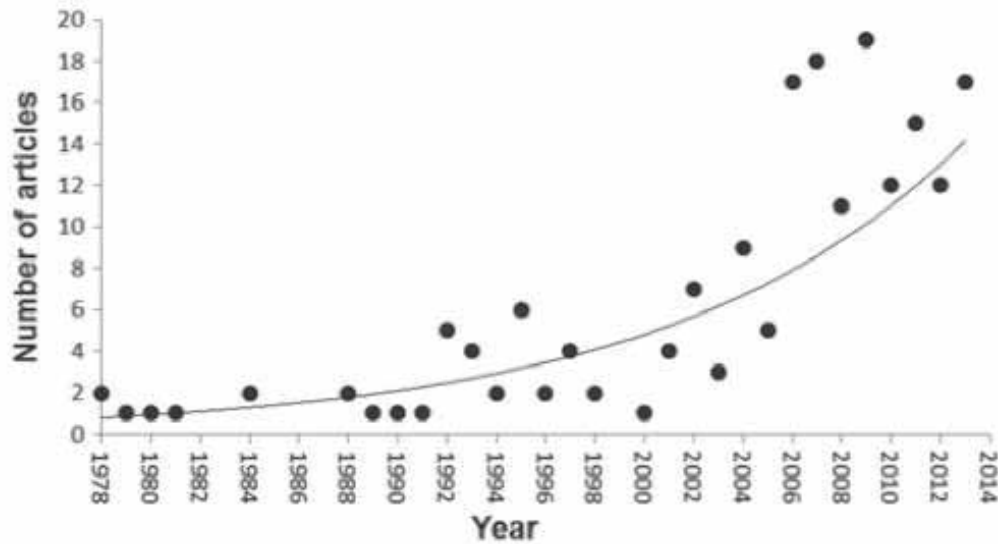
Tópicos

- Introdução
- Processo de Decisão Multicritério
- Aplicações de modelos de decisão: análise e gerenciamento de risco
- Decisões em
 - Manutenção Preventiva
 - Manutenção Baseada na condição
 - Dimensionamento de sobressalentes
 - Terceirização
 - Outros problemas em Manutenção

Introdução

- Revisão da Literatura MCDM em Confiabilidade e Manutenção
- Alguns dos resultados encontrados
- de Almeida A.T., Ferreira R.J.P., Cavalcante C.A.V. (2015) “A review of multicriteria and multiobjective models in maintenance and reliability problems”. IMA Journal of Management Mathematics, 26, 249–271

Modelos MCDM em Confiabilidade e Manutenção



170 papers published until 2012 were analysed.

They had received 4333 citations by 2013 according to Scopus database
an average of 25.49 citations per paper.

an annual average of 4.01 citations per article.

When the date of publication of the paper (i.e. its age) is considered and the number of citations is divided by the age, the result is

Journals com mais publicações no tema

<i>Reliability Engineering & System Safety</i>	63	33.9
<i>IEEE Transactions on Reliability</i>	18	9.7
<i>Journal of Quality in Maintenance Engineering</i>	14	7.5
<i>European Journal of Operational Research</i>	13	7.0
<i>Computers & Industrial Engineering</i>	10	5.4
<i>International Journal of Production Economics</i>	9	4.8
<i>Electric Power Systems Research</i>	8	4.3
<i>International Journal of Electrical Power & Energy Systems</i>	8	4.3
<i>Journal of Structural Engineering</i>	8	4.3
<i>IEEE Transactions on Power Delivery</i>	6	3.2
<i>IEEE Transactions on Power Systems</i>	6	3.2
<i>Structural Safety</i>	6	3.2
<i>Microelectronics and Reliability</i>	5	2.7
<i>Computers & Operations Research</i>	4	2.2
<i>Expert Systems with Applications</i>	4	2.2

Modelos MCDM em Confiabilidade e Manutenção

Distribuição Regional



Modelos MCDM em Confiabilidade e Manutenção

In which **research areas** are MCDM approaches predominantly applied in maintenance?

Nature of the problem analysed	<i>n</i>	%
Preventive maintenance	42	22.6
Redundancy allocation	35	18.8
Design selection	31	16.7
Maintenance strategy selection	18	9.7
Power system planning	14	7.5
Condition based maintenance	12	6.5
Outsourcing	5	2.7
Prioritization of failures	3	1.6
Risk analysis	3	1.6
Service restoration	3	1.6
Spare parts	3	1.6
Others	17	9.1

Modelos MCDM em Confiabilidade e Manutenção

Which **criteria** and how many criteria were evaluated?

Almost half the publications considered used only two criteria and around 30% used three criteria.

Only 10% used four criteria and 4.3% used five criteria.

Terms for criteria	<i>n</i>	%
Cost	127	68.3
Reliability	70	37.6
Availability	32	17.2
Time	22	11.8
Weight	15	8.1
Safety	9	4.8
Risk	5	2.7

Modelos MCDM em Confiabilidade e Manutenção

Which **MCDM approaches** are most often applied?

MCDM method	
Pareto-front (90)	48.38%
MAUT (19)	10.22%
AHP (18)	9.68%
Other MAVT(16)	8.60%
Goal Programming (6)	3.23%
ELECTRE (5)	2.69%
PROMETHEE (4)	2.15%
TOPSIS (2)	1.08%
Others (40)	21.51%

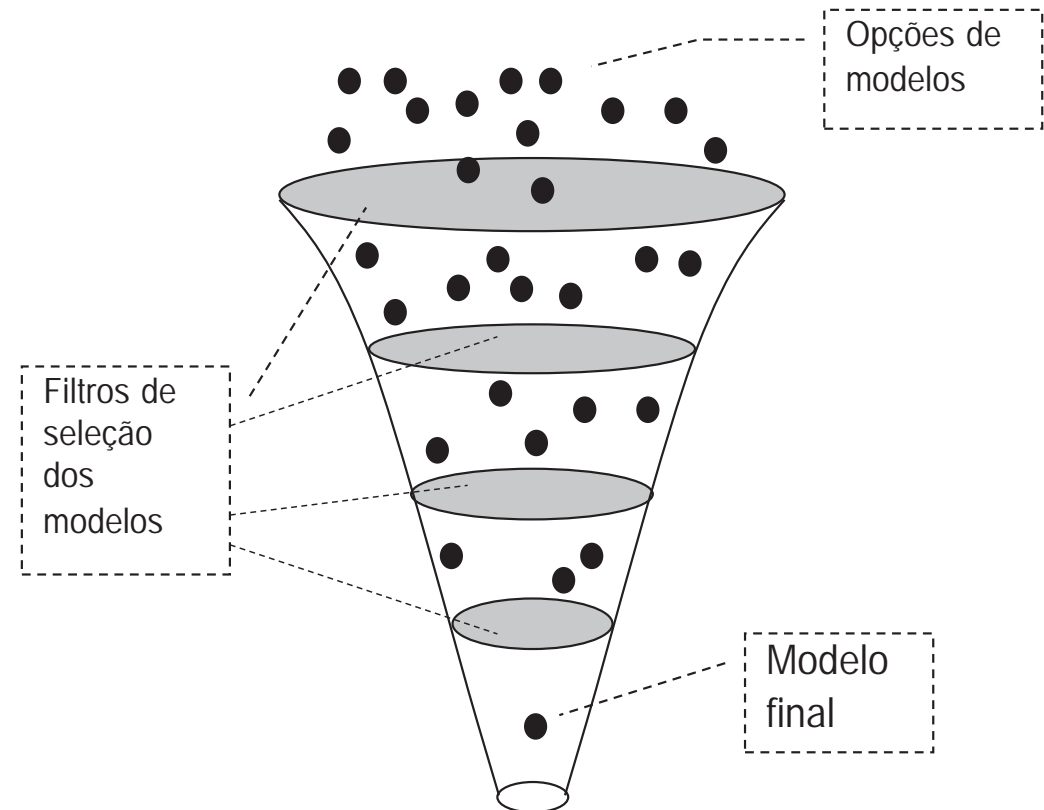
Processo de Decisão

Construção de Modelos de Decisão Multicritério

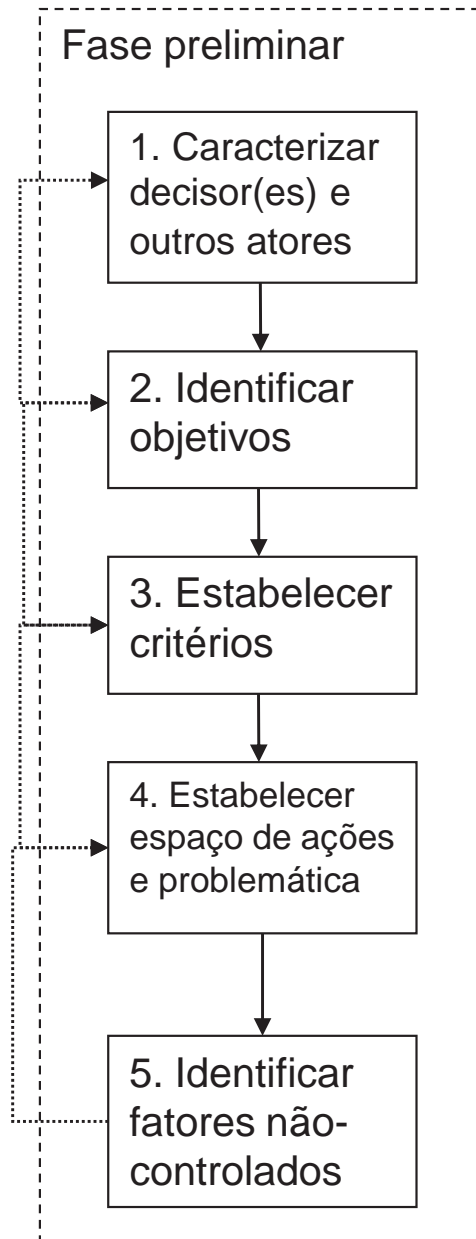
Construção de Modelo de Decisão Multicritério

- Na Figura, observa-se um filtro, que elimina algumas possibilidades de modelos,
 - a cada decisão tomada pelo analista.
- Estas decisões consistem:
 - numa abordagem escolhida numa etapa qualquer do processo,
 - hipóteses assumidas em relação ao problema em estudo, ou
 - outros fatores em relação à decisão analisada.
- Na passagem por cada filtro, há um número menor de possíveis formas de representar o problema,
 - ou seja, os modelos, que são representados pelos círculos.
- Alguns modelos podem nem ser percebidos pelo analista,
 - que os elimina a partir das definições e hipóteses que vai estabelecendo ao longo do processo.

Funil na modelagem, provocando a seleção dos modelos a cada condição assumida no processo

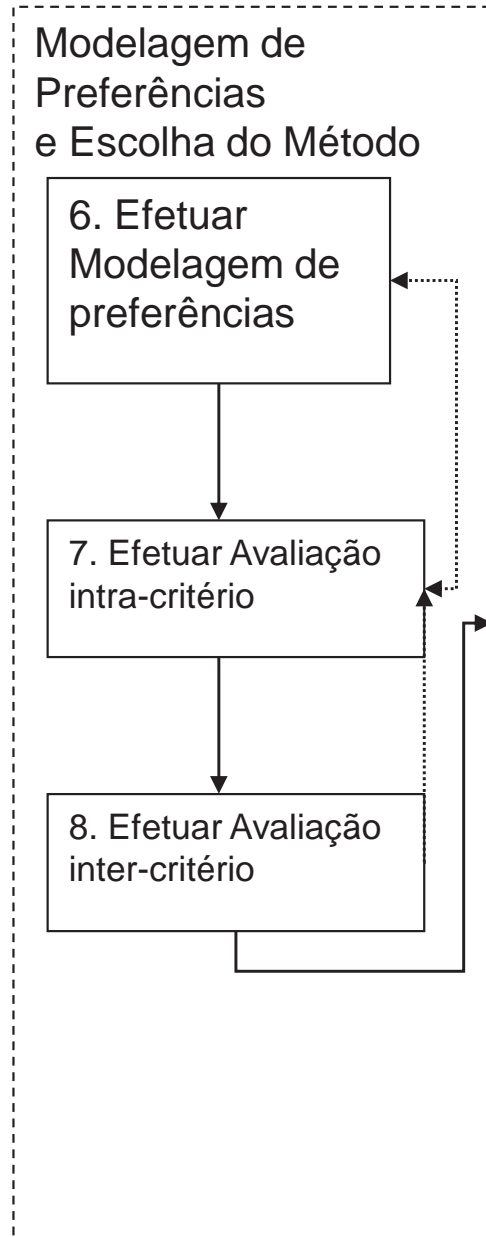


Primeira fase



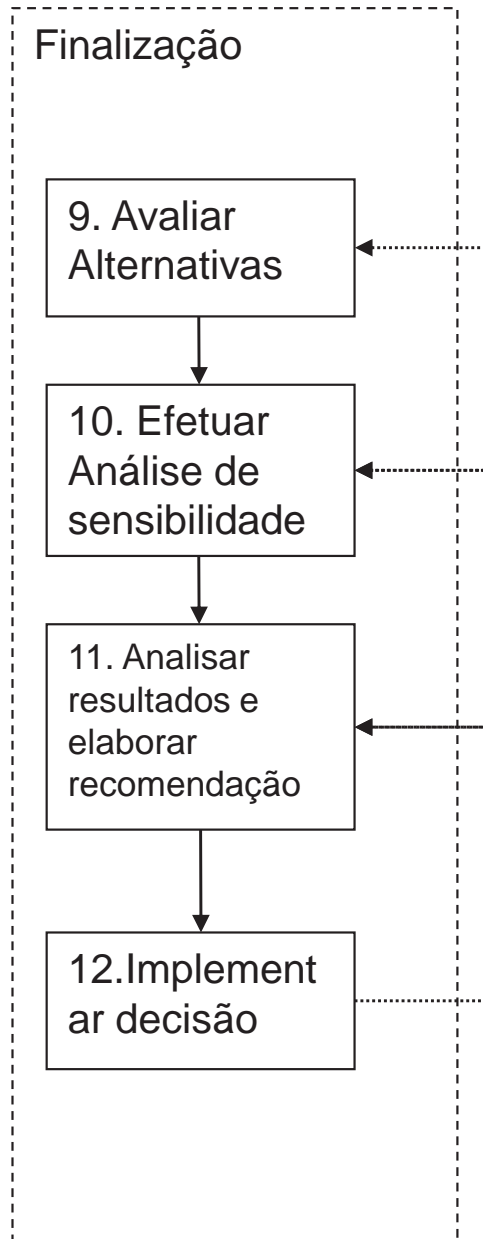
- inclui cinco etapas preliminares
- elementos básicos para a formulação do problema de decisão são estruturados.
- podem influenciar de modo definitivo o modelo final
- número elevado de opções de modelos de decisão para um problema específico.

Segunda fase



- são estruturados os fatores que provavelmente têm mais influência sobre a escolha do método de decisão multicritério.
- A modelagem de preferências é desenvolvida.
- seqüenciamento mais flexível do que em outros casos,
 - embora a flexibilidade e o uso da abordagem de refinamentos sucessivos devem ser explorados, sempre que possível.
- Ao final desta segunda fase
 - o método de decisão é escolhido e
 - o modelo de decisão é construído,
 - embora revisões sejam possíveis

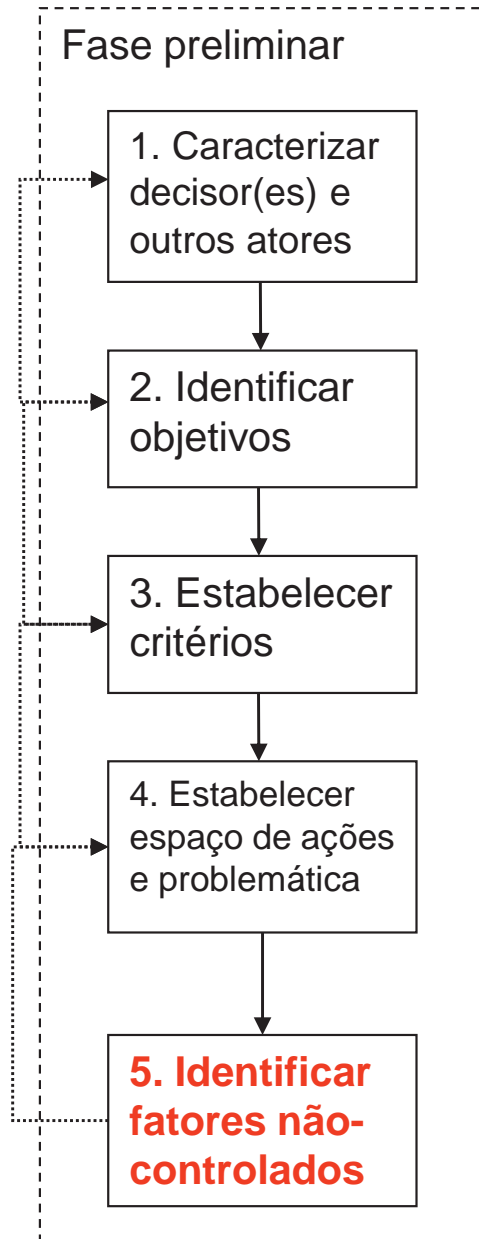
Terceira fase



- modelo já está consolidado
- final do funil
- etapas finais para a resolução do problema
 - e implementação da ação recomendada.
- ainda se pode retornar às fases anteriores e efetuar modificações ou revisões no modelo de decisão.
 - várias razões na abordagem de refinamento
 - em especial devido à etapa de análise de sensibilidade

Alguns destaques

Etapa 5 - Identificar fatores não-controlados



- Fatores relevantes que não estão sob o controle do Decisor.
- Estado da Natureza, θ ,
 - ingredientes na formulação de problemas com Teoria da Decisão (análise de decisão).
- Modelagem probabilística
 - participação do especialista – conhecimento a priori

Escolha do método

Visão dos pesquisadores da área
comportamental

Como as pessoas decidem em problemas multicritério

- No geral, **os decisores escolhem** suas estratégias de forma a **balancear**:
 - **o esforço em tomar a decisão** e a **precisão desejada** no processo (Payne et al, 1993).

escolha de um método

uma das etapas no processo de
construção do modelo de decisão

escolha de um método

- Fator decisivo
 - estrutura de preferência do decisor
 - Se não for compatível com a estrutura escolhida para representar a forma de escolhas do decisor,
 - então já se está a meio caminho de se construir um modelo de decisão inadequado.
- questões contextuais da organização
- Condicionantes organizacionais ou do contexto do próprio problema
 - podem impor a escolha de um método.

escolha de um método

- A imposição de um método
 - preferência do analista
 - grande distorção a ser evitada.
 - conhecimento restrito a este método
 - vantagens comerciais
 - postura dogmática

Métodos Multicritério

Conjuntos de Métodos (Roy, 1985; Vincke, 1992)

- Métodos que agregam critérios em um único critério de síntese;
- Métodos de Sobreclassificação
 - (Outranking); superação, prevalência ou subordinação;
- Métodos Interativos

Etapa 6- Modelagem de preferências

Avaliar que sistema de preferências é mais adequado para o decisor;
Testar propriedades básicas para preferências

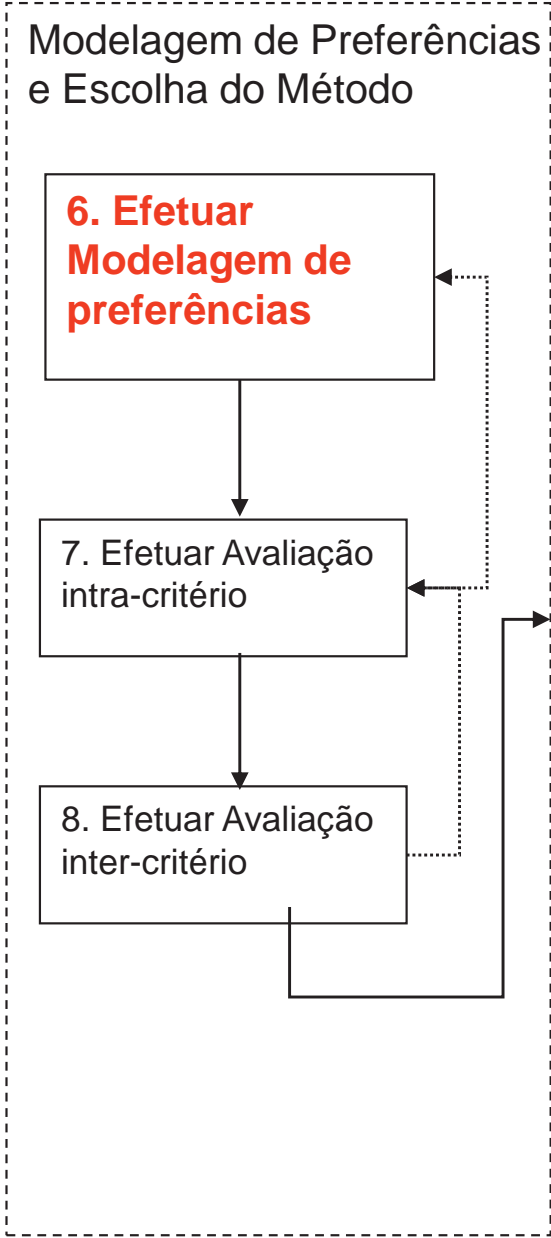
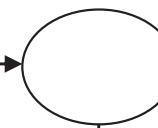
Que tipo de racionalidade é mais adequada para o decisor?

Não-Compensatória

Compensatória

Seleção preliminar do método; Métodos aplicáveis: ordinal; sobreclassificação, outros

Seleção preliminar do método; Métodos aplicáveis: MAUT; MAVT; outros



Preferências não Compensatórias

Em preferências não compensatórias:

- A preferência entre x e y depende apenas dos subconjuntos de atributos favorecendo x ou y .
- Não depende das diferenças entre os vários níveis para cada atributo; avaliação intra-critério.

Compensação Entre Critérios

- Intuitivamente a compensação entre critérios envolve o quanto se pode contra-balancear (compensar) uma desvantagem em um critério por uma vantagem em outro.
- Propostas de definições em Bouyssou (1986).
- Exemplo típico de método compensatório: modelo aditivo.

Relação não-compensatória entre Critérios

- Exemplo de métodos não-compensatórios: ELECTRE e PROMETHEE
- Um método não-compensatório requer, como informação inter-critérios, o grau de importância relativa entre os critérios.

Compensação Entre Critérios

- Estes métodos favorecem ações bem balanceadas em detrimento de ações que são muito boas para algum critério e muito ruim para algum outro.
- O decisor, geralmente, diante de métodos que agregam critérios em um único critério de síntese, usa uma racionalidade que envolve compensação entre critérios.

Compensação Entre Critérios

Situações bem conhecidas
no mundo, onde ocorrem
avaliação com métodos
não-compensatórios

Jogo de vôlei

Time:	A	B
SET 1	25	23
SET 2	25	20
SET 3	11	25
SET 4	17	25
SET 5	15	11

Jogo de vôlei

Time:	A	B	Vencedor do SET
SET 1	25	23	A
SET 2	25	20	A
SET 3	11	25	B
SET 4	17	25	B
SET 5	15	11	A
Total de pontos (Modelo aditivo)	A=93	B=104	

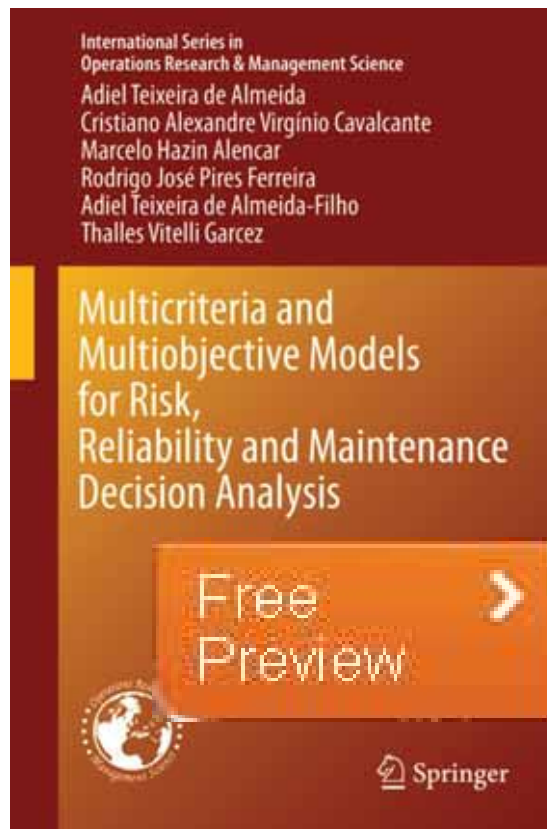
MC1: Modelos de Decisão em Confiabilidade, Manutenção e Risco

Adiel T de Almeida, Cristiano Cavalcante, Marcelo Alencar, Rodrigo Ferreira, Adiel Almeida-Filho, Thalles Garcez

Aplicações e modelos de decisão: análise e gerenciamento de risco

Springer

**International Series in Operations Research &
Management Science. Vol 231**



Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis

Authors: **de Almeida, A.T., Cavalcante, C.A.V., Alencar, M.H.,
Ferreira, R.J.P., de Almeida-Filho, A.T., Garcez, T.V.**

<http://www.springer.com/us/book/9783319179681>

Outline

- Justifying the Use of the Multidimensional Risk
- An MCDM/A Model - Flooding
- Risk Evaluation in Natural Gas Pipelines Based on MAUT
- Risk Evaluation in Natural Gas Pipelines Based on ELECTRE Method and Utility Function
- Multidimensional Risk Evaluation in Underground Electricity Distribution System

Justifying the Use of the Multidimensional Risk

- In recent decades, the term ‘risk’ has been applied in the literature in different contexts:
 - environmental, financial, occupational health, natural hazards, counter-terrorism, supply chain, and industrial sites.

One-dimensional risk analysis is an aspect widely observed in different contexts. However, such analysis does not address risk in the most appropriate manner (Garcez & de Almeida, 2014a).

Justifying the Use of the Multidimensional Risk

- Recent events observed have proven that multidimensional risk analysis has become of greater importance.
- Additionally, ethical requirements demanded by society call into question measuring the value of the life or health of a person by means of a monetary scale.

Justifying the Use of the Multidimensional Risk

- Given this perspective, multicriteria decision analysis leads to decision making being more consistent.
- This includes taking into account multiple risk dimensions such as safety, political, economic, environmental, social and technical issues, such that conflicts can be reduced in a risk management framework.

Justifying the Use of the Multidimensional Risk

- Decision problems related to multidimensional risk analysis, using MCDM, are considered in different contexts, such as:
 - Pipelines;
 - Counter-terrorism;
 - Power electricity systems;
 - Etc.

An MCDM/A Model that Evaluates the Risk of Flooding

- An MCDM/A model is described (Priori Jr. et al. 2015) focusing on specific aspects.
- Financial, human, environmental, and infrastructure are considered as consequence dimensions.

Risk Evaluation in Natural Gas Pipelines Based on MAUT

- Pipeline is one of the **most secure** modes of transportation;
- The **frequency** of accidents is low;
- When a failure occurs, it can generate **catastrophic** consequences;
- Different approaches have been applied to estimate risk in pipelines (However, most of the studies consider only issues related to a **single** dimension).

Risk Evaluation in Natural Gas Pipelines Based on MAUT

Model Characteristics

- The model developed by Brito & de Almeida (2009) is applied in order to **identify the risk priority ordering** of the pipeline and then parameters are analyzed;
- **Three dimensions are considered:** Financial, Human and Environmental;
- The **probabilistic modeling** uses MAUT ;

Risk Evaluation in Natural Gas Pipelines Based on MAUT

Risk results

–A Loss function may be defined in terms of utility and its consequences (Brito and de Almeida, 2009)

$$L(\theta_{jk}, a_i) = -U\left(P(p|\theta_{jk}, a_i)\right)$$

Risk Evaluation in Natural Gas Pipelines Based on MAUT

Risk results

- Risk is considered as the expected value of loss;
- Based on Berger (1985), to provide a risk measure is used the expected value all losses associated with each pair of section and scenario

$$r(a_i) = E_{\theta}[L(\theta_{jk}, a_i)] = \sum_j \sum_k [L(\theta_{jk}, a_i) \pi_i(\theta_{jk})] + (-1) \cdot \pi_i(\theta_N)$$

Risk Evaluation in Natural Gas Pipelines Based on MAUT

Risk results

– risk can be defined as (See Brito and de Almeida, 2009; de Almeida et al., 2015):

$$r(a_i) = \left\{ \sum_j \sum_k \left\{ - \left[\begin{array}{l} \int_h f(h|\theta_{jk}, a_i) k_h U(h) dh \\ + \int_e f(e|\theta_{jk}, a_i) k_e U(e) de \\ \int_f f(f|\theta_{jk}, a_i) k_f U(f) df \end{array} \right] \cdot \pi_i(\theta_{jk}) \right\} + (-1) \cdot \pi_i(\theta_N) \right\}$$

Risk Evaluation in Natural Gas Pipelines Based on MAUT

Sensitivity Analysis

- When a multicriteria decision model is constructed it is critical to carry out sensitivity analysis.
- Checking inconsistencies, identifying the parameters that most affect the output of the model are some of the contributions provided by the sensitivity analysis;

ADM-03 - Apoio à Decisão Multicritério. QUARTA-FEIRA - 26/08/2015 - 15:00 às 16:00

Análise de sensibilidade global baseada em simulação de Monte Carlo aplicada ao estudo de riscos multidimensionais em sistemas de gás natural

Risk Evaluation in Natural Gas Pipelines Based on ELECTRE Method and Utility Function

- Three main issues should be highlighted, when compared with the previous model (Brito et al. 2010)¹:
 1. It is a non-compensatory approach, taking into account a specific kind of DM's rationality.
 2. The problem consists of a sorting problematic, since the managerial issues in this application is distinct from the previous.
 3. It integrates the ELECTRE method with utility theory, in order to incorporate the DM's behavior regarding to risk (prone, neutral or averse) into ELECTRE.

¹Brito, J.A.; de Almeida, A.T.; Mota, C.M.M. A multicriteria model for risk sorting of natural gas pipelines based on ELECTRE TRI integrating Utility Theory. European Journal of Operational Research. Volume 200, Issue 3, 1 February 2010, Pages 812–821. doi:10.1016/j.ejor.2009.01.016 3740

Risk Evaluation in Natural Gas Pipelines Based on ELECTRE Method and Utility Function

- In several situations, it is **quite difficult** (or even incoherent) for the DM to confront directly or indirectly monetary losses on non-monetary losses such as **loss of life, injury to people, environmental damage, company image losses** (Faber and Stewart, 2003) and **social impacts**.
- Specifically, in the risk management context, according to the DM, a low risk in a given criterion (with higher weight) does not compensate directly a high risk in another criterion, as should happen in an aggregation procedure with compensation.
 - Therefore, it is considered that the **DM feels more comfortable using a non-compensatory rationality approach.**

Risk Evaluation in Natural Gas Pipelines Based on ELECTRE Method and Utility Function

- Moreover, one can consider some incomparability that may arise in the process of inter-criteria evaluation, due to a particular context (Brito et al. 2010).
- The sorting of the natural gas pipeline sections into categories allows the DM to organize particular management approaches for each risk category (Brito et al. 2010).
 - Hence, the outranking approach, including methods of ELECTRE's family, is more appropriated in the inter-criterion evaluation of risks to natural gas pipelines.

Risk Evaluation in Natural Gas Pipelines Based on ELECTRE Method and Utility Function

- The **ELECTRE TRI method** deals with a sorting problematic, assigning each alternative s_i from a set S to a category or class pre-defined C_k .
 - For the context of this model, s_i represents sections of natural gas pipeline to be sorted, and the profiles b are comparison sections for the categories of risk.
 - The profiles b that define the particular risk categories, depend essentially on the perception that the DM has on different risk levels related to his system, the availability of resources, the occurrence of previous accidents, society pressures, as well as being dependent on the number of different strategies, policies, and measures that the company possesses to deploy among the categories.

Risk Evaluation in Natural Gas Pipelines Based on ELECTRE Method and Utility Function

- The integration between the **ELECTRE TRI method** and **utility theory**, in order to incorporate the DM's behavior regarding to risk (prone, neutral, averse).
 - The utility theory presents an axiomatic approach that can assess the DM's behavior with regard to the risk (Keeney and Raiffa 1976) when there are accidents consequences.
- Objective:
 - The model application makes an evaluation of several sections of pipeline according to their multiple risk dimensions, which allows a comparison of these sections with the risk profiles in order to classify the sections into risk categories defined by the natural gas transportation/distribution company's management

Numerical Application

- Pipeline system was segmented into 12 different sections, based on Brito *et al.* (2010).
 - These sections were divided according to several technical factors such as age of the pipeline section, pressure, land occupation, soil characteristics, degree of third-party interference and demographic concentration on the surface area surrounding each section, etc.
- In addition, it was considered 10 hazard scenarios (*Event Tree Analysis*):
 - Detonation/Deflagration; Fireball/Jet Fire; Confined Vapor Cloud Explosion (CVCE); Flash Fire; Gas Dispersion to both failure modes: rupture and puncture.
- The payoffs used in this application involve the human (H), environmental (M) and financial (N) consequences of an accident caused by the release of gas.

Numerical Application

- The one-dimensional utility functions $U(h)$, $U(m)$ and $U(n)$ may be obtained from the elicitation of some utility values in each dimension, using a lottery procedure (Keeney and Raiffa 1976).

$$U(p) = e^{-\mu_p \cdot p}$$

where $p = h, m$ or n .

$$r_p(s_i) = \sum_{\theta} \pi_i(\theta) \cdot \left(- \int_p P(p | \theta, s_i) e^{-\mu_p \cdot p} dp \right) + (-1) \cdot \pi_i(\theta_N)$$

Numerical Application

- Subsequently, the DM wishes to sort those sections pipelines in risk categories, ordered by decreasing levels of risk, these are:

- High Risk (C1)
- Medium Risk (C2)
- Low Risk (C3).

First category demand **higher states of alert**, and thus **financial resources would be assigned preferentially** to this category in order to increase measures of physical protection and to intensify the monitoring of the high risk sections.

Numerical Application

- Subsequently, the DM wishes to sort those sections pipelines in risk categories, ordered by decreasing levels of risk, these are:

– High Risk (C1)

– Medium Risk (C2)

– Low Risk (C3).

First category demand **higher states of alert**, and thus financial resources

This category involves pipeline sections which, although they do not lay claim to such intensive care as those in the previous class, do demand more attention thorough **planning for preventive measures** in order to **avoid neglect in relation to maintaining their safety levels**

Numerical Application

- Subsequently, the DM wishes to sort those sections pipelines in risk categories, ordered by decreasing levels of risk, these are:

- High Risk (C1)

First category demand **higher states of alert**, and thus financial resources

- Medium Risk (C2)

This category involves pipeline

- Low Risk (C3).

Low Risk category, the **maintenance of routine inspection actions** is planned in order to **keep these sections with low risk levels** within the human, environmental and financial dimensions of possible outcomes

Numerical Application

- Subsequently, the DM wishes to sort those sections pipelines in risk categories, ordered by decreasing levels of risk, these are:

– High Risk (C1)

First category demand **higher states of alert**, and thus financial resources

– Medium Risk (C2)

This category involves pipeline

– Low Risk (C3).

Low Risk category, the maintenance of routine inspection actions is planned in order to keep these sections with low risk levels within the human, environmental and financial dimensions of possible outcomes

Parameter

b_1 (divides the High Risk from the Medium Risk category)

b_2 (divides the Medium Risk from the Low Risk group)

weight

q (indifference threshold)

p (strict preference threshold)

Numerical Application

- Final Sorting

Section pipeline	Category
S ₁	C ₃
S ₂	C ₂
S ₃	C ₁
S ₄	C ₃
S ₅	C ₂
S ₆	C ₂
S ₇	C ₂
S ₈	C ₃
S ₉	C ₂
S ₁₀	C ₂
S ₁₁	C ₁
S ₁₂	C ₂

Numerical Application

- Final Sorting

Section pipeline	Category
S1	C3
S2	C2
S3	C1
S4	C3
S5	C2
S6	C2
S7	C2
S8	C3
S9	C2
S10	C2
S11	C1
S12	C2

Numerical Application

- Final Sorting

Section pipeline	Category
S1	C3
S2	C2
S3	C1
S4	C3
S5	C2
S6	C2
S7	C2
S8	C3
S9	C2
S10	C2
S11	C1
S12	C2

Numerical Application

- Final Sorting

Section pipeline	Category
S ₁	C3
S ₂	C2
S ₃	C1
S ₄	C3
S ₅	C2
S ₆	C2
S ₇	C2
S ₈	C3
S ₉	C2
S ₁₀	C2
S ₁₁	C1
S ₁₂	C2

- Sensitivity Analysis

- The parameters were varied by 10% of the initial value specified by the DM.
- It was concluded to be robust for the majority of parameters, such as weights and profiles for environmental and financial risk criteria.
 - Nevertheless, it was observed changes for parameters related to weight and profiles for the human risk criterion (r_h).

Multidimensional Risk Evaluation in Underground Electricity Distribution System

- The use of underground electricity distribution networks is increasing worldwide due to various advantages such as (Garcez & de Almeida, 2014a)¹:
 - Major safety for the population;
 - Major protection from the elements of nature (storm, wind, etc.);
 - Aesthetic benefits to the city;
 - Property appreciation of the vicinity;
 - Reduction of the impacts in accidents involving vehicles;
 - Significant improvement of the accessibility of people with disabilities;
 - Etc.

¹Garcez, T.V.; de Almeida, A.T., "Multidimensional Risk Assessment of Manhole Events as a Decision Tool for Ranking the Vaults of an Underground Electricity Distribution System," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol.29, no.2, pp.624,632, April 2014 3755

Multidimensional Risk Evaluation in Underground Electricity Distribution System

- In contrast:
 - It requires a more complex infrastructure requiring greater initial investment and incurring higher costs associated with maintenance;
 - Difficulty in fault detection and troubleshooting;
 - Difficulty to access to the underground system;
 - Difficulties upgrade the system,
 - Operation and maintenance in the auxiliary ventilation systems, etc.
- Thus, the underground networks are only feasible in urban areas with medium or high population density, or when the use of air network type is not applicable or even for technical or regulatory reasons is imposed the use of an underground system.

Multidimensional Risk Evaluation in Underground Electricity Distribution System

Companhia ¹	Número de Compartimentos Subterrâneos (Câmaras transformadoras + Caixas de Inspeção)	Número de Incidentes por ano	Taxa de incidentes ao ano por 1000 compartimentos subterrâneos
Alabama Power	250	5	20
Florida Power and Light	220	3	14
Texas Utilities	3500	24	7
GPU Energy (PA)	286	2	7
Boston Edison	3000	12	4
ConEdison	275000	1219	4
NYSED	250	1	4
Tampa Electric	500	1	2
Jacksonville Electric Authority	1400	2	1,4
Light S.E.S.A. (2010)²	15391	17	1,1
Pepco	57000	38	0,7
Durquesne Light	1800	1	0,6
Virgínia Power	2400	1	0,4
Southern Company	2937	1	0,3

Stone & Webster. (2001). Assessment of the Underground Distribution System of the Potomac Electric Power Company. Formal Case No. 991 – Investigation into Explosions Occurring in or Around the Underground Distribution System of the Potomac Electric Power Company.

Light. (2011). Rede de Distribuição Subterrânea. Retrieved from <http://www.light.com.br/web/relatorio-sistema-distribuicao-subterraneo.pdf>

Multidimensional Risk Evaluation in Underground Electricity Distribution System

- An "atmosphere" of fear in pedestrians, it is not known when and where will occur the next accidental event.
- One of the main causes of faults and difficulties are caused by (Light, 2008):
 - Difficult accessibility (because of slums, lack of security, etc.) for maneuvering and maintenance services
 - Access complexity to underground chambers, traffic detours, etc .;
 - Occupation unordered residences (sometimes even illegal),with illegal connections;
 - Shared use, disordered and highly congested ground with other public and private utility companies (water, sewer, telephone, cable TV, gas, signaling etc.);
 - compounded by the lack of an integrated register of subsoil occupation
 - Climate conditions (the transformer vaults must have permanent ventilation in order to maintain an internal temperature);
 - Procedures for locating faults in underground networks, requiring greater complexity, cost, technology and skilled personnel, compared to an air network;
 - Due to the flooding of the underground and clandestine dumping of sewage.

Multidimensional Risk Evaluation in Underground Electricity Distribution System

- The infrastructure of electricity distribution system is critical because it is an asset that is essential so that society and the economy can function well.
 - It shares a mutual dependence on numerous other critical infrastructures, including but not limited to the infrastructure that supports the supply of gas, water, and telecommunications, the financial services industry, public safety services, public health, agriculture, and transportation systems.
- Any disruptions to these systems, from accidents, result in direct and indirect losses.
 - The effects of power outages can include economic, social, physical and psychological impacts; such consequences on providers and customers include premature death, injury, and indirect and direct economic losses (Castillo, 2014).

Multidimensional Risk Evaluation in Underground Electricity Distribution System

- These events accidental can cause various consequences, such as:
 - Fatalities and injuries to people;
 - Fires in nearby locations;
 - Disruptions in local vehicle traffic;
 - Financial loss;
 - Loss of company image;
 - These accidents leave the local population afraid (uncertainty of when and where an underground vault will explode);
 - And other consequences which cannot be measured financially

Multidimensional Risk Evaluation in Underground Electricity Distribution System

- Managerial decisions
 - Under a management approach to keep the system adequately safe, the decision maker (DM) needs to answer some questions (Garcez & de Almeida, 2014b)²:
 - What underground vault system is considered to have the highest risk?
 - What is the intensity level of consequences that really is important to the DM?
 - What underground vaults or set of vaults should be considered when allocating hazard prevention resources or scheduling mitigation actions?

²Garcez T. V. e de Almeida A. T. (2014a), A risk measurement tool for an underground electricity distribution system, considering the consequences and uncertainties of manhole events. Reliability Engineering & System Safety 124:68–80. 3761

Multidimensional Risk Evaluation in Underground Electricity Distribution System

- Managerial decisions
 - In various situations DMs are faced with problems that are about needing to allocate or assign additional (financial, safety, time, staff, technology, etc.) resources of electric power companies to a given set of alternatives, when these resources are scarce and limited and may not have been distributed equitably.
 - Hence, the DM faces a problem of choosing or prioritizing alternatives to determine which alternative will be chosen (prioritized) from the perspectives of the company's needs (Garcez & Almeida, 2014b).

Multidimensional Risk Evaluation in Underground Electricity Distribution System

- Managerial decisions
 - Managing risk in networks of distributed systems requires the analysis of large numbers of alternatives, hazard scenarios, consequences and uncertainties regarding the occurrence of an accident, mainly due to the wide diversity of characteristics in the areas surrounding the system.
 - Therefore, the decision making process needs to be analyzed in a more complex way.

Multidimensional Risk Evaluation in Underground Electricity Distribution System

- Managerial decisions
 - If decisions are to be taken more rationally, the uncertainties inherent in the context of risk itself must be addressed as must how best to aggregate the decision maker's preferences, related to the possible consequences resulting from hazards.
- Decision theory jointly with a multidimensional view of risk enables these issues to be dealt with.
- In this context, Multiple-Criteria Decision-Making (MCDM) methodologies can be extremely useful to aggregate these aspects so the most appropriate decision may be taken both at the comprehensive and local level (Roy 1996);

Numerical Application

- A realistic numerical application of the proposed multicriteria decision model is presented, with a view to assessing and ranking the risks from underground vaults, based in Garcez & Almeida (2014a)¹
- For this specific study, seven underground vaults were analyzed, which represent possible scenarios found in electricity distribution companies.

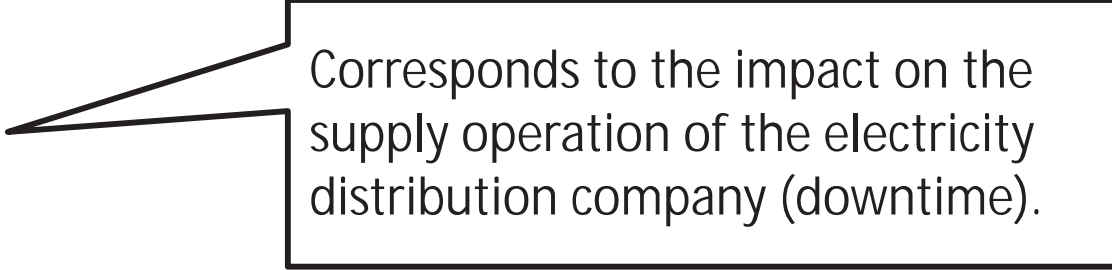
	DESCRIPTION OF THE EXTERNAL VICINITY	Localization of manhole cover
1	Commercial Area 2	Street
2	Commercial Area 3	Sidewalk
3	Residential Area 1	Sidewalk
4	Residential Area 2	Street
5	Residential Area 3	Sidewalk
6	Commercial Area 4	Street
7	Commercial Area 5	Street

¹Garcez, T.V.; de Almeida, A.T., "Multidimensional Risk Assessment of Manhole Events as a Decision Tool for Ranking the Vaults of an Underground Electricity Distribution System," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol.29, no.2, pp.624,632, April 2014

Numerical Application

- The study evaluated the consequences (c) from four dimensions:

- operational impacts (c_O)
- financial impacts (c_F)
- disruptions to vehicular traffic (c_T)
- human impacts (c_H)



Corresponds to the impact on the supply operation of the electricity distribution company (downtime).

Numerical Application

- The study evaluated the consequences (c) from four dimensions:

- operational impacts (c_O)

Corresponds to the impact on the supply operation of the electricity

- financial impacts (c_F)

c_F is about any kind of monetary compensation related to an accident occurring

- disruptions to vehicular traffic (c_T)

- human impacts (c_H)

Numerical Application

- The study evaluated the consequences (c) from four dimensions:

- operational impacts (c_O)
- financial impacts (c_F)
- disruptions to vehicular traffic (c_T)
- human impacts (c_H)

Corresponds to the impact on the supply operation of the electricity

c_F is about any kind of monetary compensation related to an accident occurring

The c_T is evaluated by the process of how traffic jams form on the streets around the accident area.

Numerical Application

- The study evaluated the consequences (c) from four dimensions:

- operational impacts (c_O)
- financial impacts (c_F)
- disruptions to vehicular traffic (c_T)
- human impacts (c_H)

Corresponds to the impact on the supply operation of the electricity

c_F is about any kind of monetary compensation related to an accident occurring

The c_T is evaluated by the process of how traffic jams form on the streets

The c_H deals with injuries caused by the projection of manhole covers and burns of at least the second degree due to exposure to incident energy from an arc flash

Numerical Application

- Hazard Area Calculation
 - Equiprobable Intervals method (Keeney and Raiffa 1976), based on results of Walsh and Black (2005), were used to estimate the distance projection of the manhole cover.
 - Other hazard zone, calculated by IEEE Standard 1584 (IEEE1584 2002), also known as the Flash Protection Boundary, can be calculated as the minimum distance from the arc flash at which people could be safely exposed to incident energy without suffering second-degree burns.

Numerical Application

- Results

Rank	V_q
1 st	V_{q2}
2 nd	V_{q5}
3 rd	V_{q3}
4 th	V_{q4}
5 th	V_{q7}
6 th	V_{q1}
7 th	V_{q6}

- The underground vault V_2 is at the top of the ranking
 - Consequently, it should receive more attention (to have priority) when additional resources are available for allocating to safety and maintenance activities and system improvement (upgrade)

Numerical Application

- Results

Rank	V_q
1 st	V_{q2}
2 nd	V_{q5}
3 rd	V_{q3}
4 th	V_{q4}
5 th	V_{q7}
6 th	V_{q1}
7 th	V_{q6}

- Risk Difference analysis

- For example, by analyzing the differences between the risks and total risk range, the conclusion may be drawn that the difference between the risk values of vaults V_3 and V_4 corresponds to about 47% of the total range of risk $\left(\frac{r(q_3)-r(q_4)}{r(q_2)-r(q_6)} \approx 47\%\right)$, which indicates a large increase in the risk between these vaults.

Numerical Application

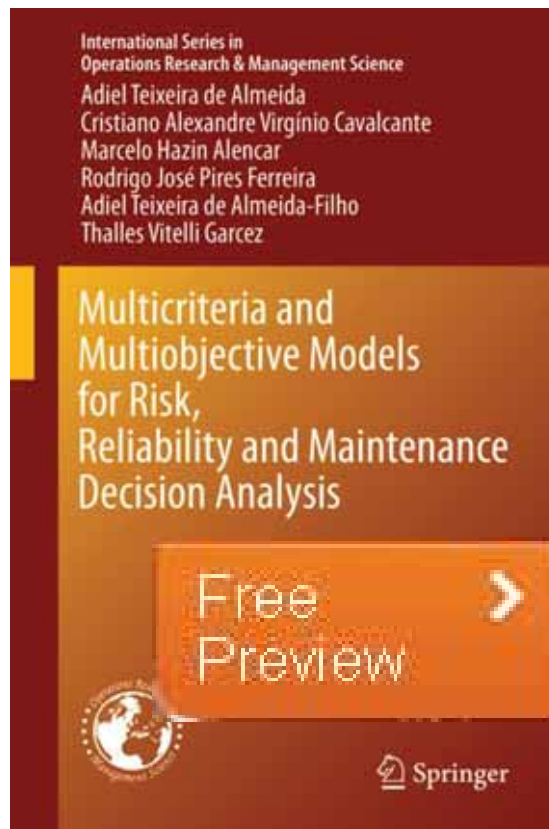
- Another source of strategic information is the comparison of **increments of intra-criterion risk**.
 - This analysis allows to highlight what is the criterion (dimension) that contributes most to the difference in risk between two alternatives
- For example: on comparing the alternatives pair-to-pair under the inter-criterion approach, and on evaluating the alternatives V_2 and V_5 ; there are major influences between the consequences of the financial and operational impacts and human loss (in descending order).
 - Therefore, one can conclude that some preventive and mitigating actions that act on loss, for example, in disturbances to traffic, do not generate any change in the values of the difference in risk between these two alternatives. However, focusing on preventive and mitigating actions in the operational dimension of alternative V_2 , would result in reducing the amount of risk compared to alternative V_5 . Thus, resources can be redirected to manage risk more effectively

MC1: Modelos de Decisão em Confiabilidade, Manutenção e Risco

Adiel T de Almeida, Cristiano Cavalcante, Marcelo Alencar,
Rodrigo Ferreira, Adiel Almeida-Filho, Thalles Garcez

Springer

**International Series in Operations Research &
Management Science. Vol 231**



Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis

Authors: **de Almeida, A.T., Cavalcante, C.A.V., Alencar, M.H.,
Ferreira, R.J.P., de Almeida-Filho, A.T., Garcez, T.V.**

<http://www.springer.com/us/book/9783319179681>

Tópicos

1. Introdução
2. Modelos de Manutenção Preventiva;
3. Um modelo Multicritério de suporte a manutenção preventiva;
4. Manutenção baseada na condição;
5. O Conceito de delay time;

Tópicos

6. Um modelo Multicritério de manutenção baseada na condição;
7. Um estudo de caso;
8. Decisões relativas a sobressalentes;
9. Modelo multicritério de definição de quantitativo de sobressalentes;
10. Pontos para discussão.

Introdução

Mudanças

- A crescente mecanização. O que tem reduzido o custo direto com mão-de-obra, tendo aumentado, contudo, a importância da manutenção de equipamento;
- Crescente complexidade dos equipamentos. O que repercute na exigência de habilidades altamente especializadas na execução das atividades de manutenção;
- Crescentes partes e suprimentos de inventário. Na verdade é uma consequência direta dos dois primeiros fatores;
- Controle mais rigoroso da produção. Embora venham reduzindo bastante o estoque de material em processamento, um controle mais estreito da produção tem aumentado o impacto de interrupções de quaisquer operações;

Introdução

Mudanças

- A programação de entregas mais rigorosas. O que tem reduzido o estoque de produtos acabados e tem melhorado o serviço ao consumidor. Por outro lado, tem aumentado também os efeitos das interrupções no processo produtivo;
- O aumento dos requisitos de qualidade. Enquanto proporciona um incremento do potencial de venda através de uma maior atratividade, também enfatiza a necessidade de uma resposta mais imediata de qualquer anormalidade do produto.
- Crescimento da preocupação em relação as questões ambientais e de dano ao ser humano;
- Crescimento do setor de serviços.

Introdução

Os objetivos principais e comuns nos vários setores em que a manutenção é empregada:

- Estender a vida útil de ativos;
- Reduzir custos;
- Assegurar níveis de disponibilidade satisfatórios;
- Assegurar prontidão operacional para todos os equipamentos requeridos para o uso em emergências a qualquer tempo;
- Prover a segurança das pessoas que fazem uso das instalações.

Introdução

Finalidade

- O nível de manutenção empregado em distintos processos varia substancialmente.
- Há sistemas cujos parâmetros de manutenção são normatizados;
- Mesmo equipamentos idênticos podem ser submetidos a níveis bastante diferentes de manutenção;
- Questões relativas ao Contexto que se presta o equipamento : Cível => Lucratividade; Militar => Proteção e segurança;
- Questões relativas ao sistema produtivo:
 - Produto
 - Serviço

Modelos de Manutenção Preventiva

- Um dos problemas mais importantes na área de manutenção, diz respeito à definição de frequência com que as ações de manutenção preventiva devem ser realizadas;
- Glasser (1969) apresenta a substituição por idade e em bloco como dois métodos bastante úteis para definição de programa de manutenção preventiva.
- Apesar de estes métodos terem sido explicado antes por outros autores (Barlow e Hunter 1960; Cox 1962), a principal contribuição de Glasser (1969) foi o foco sobre os impactos desses métodos em questões gerenciais.

Modelos de Manutenção Preventiva

- De acordo com Glasser (1969), o principal problema da manutenção preventiva está associada com a incerteza sobre o momento exato em que o item irá falhar.
- Esta incerteza estabelece uma dificuldade de garantir a eficácia da substituição, que em algumas vezes pode ocorrer em antecipação a uma falha (substituição preventiva), em outras depois (substituição devido a falha).

Modelos de Manutenção Preventiva

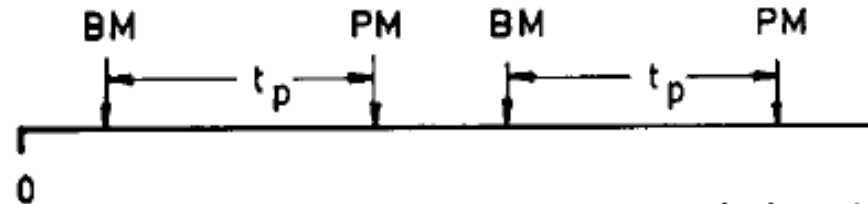
- O tempo até a falha é uma variável randômica cuja distribuição é chamada de distribuição/lei de falha do equipamento;
- Na literatura de manutenção, comumente é mencionado que PM não pode ser aplicada indiscriminadamente para qualquer parte de equipamento. Os benefícios provenientes da aplicação da PM devem superar aqueles provenientes da aplicação unicamente de atividades emergenciais (BM);
- Para justificar a aplicação de PM, duas condições importantes devem ser satisfeitas:
 - i – De forma geral, quando há uma vantagem para antecipação;
 - ii – A taxa de falha do equipamento deve ser crescente com o tempo.

Modelos de Manutenção Preventiva

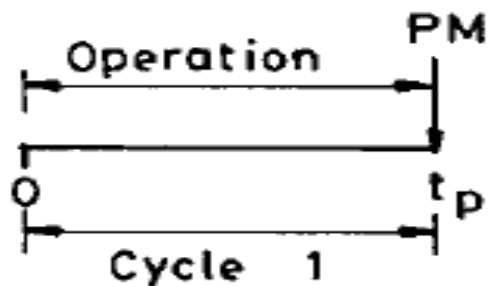
- A realização de PM envolve a substituição de uma dada peça de equipamento ou parte por outro de mesmo tipo que fornece o mesmo serviço.
- Isso conduz diretamente ao conceito de ciclo de PM. A questão principal é qual o comprimento ótimo de um ciclo de forma a minimizar o custo esperado de substituição por unidade de tempo.
- O modelo de substituição por idade consiste em substituir um item, se este chegar a um tempo t_p (idade de substituição) ou se falhar antes, por um adicional que será submetido às mesmas regras que o antigo.

Modelos de Manutenção Preventiva

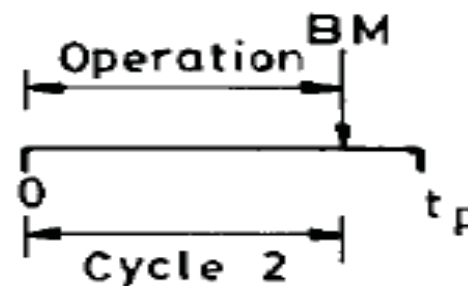
- t_p é a idade ou intervalo ótimo para Substituição;



- Da figura pode-se observar que o modelo de substituição incorpora dois possíveis ciclos de operação: uma ciclo é determinado quando o equipamento alcança a idade de substituição planejada t_p , e o outro é decorrente da falha antes do tempo de substituição planejada. Estes dois possíveis ciclos são ilustrados na figura.



(a)

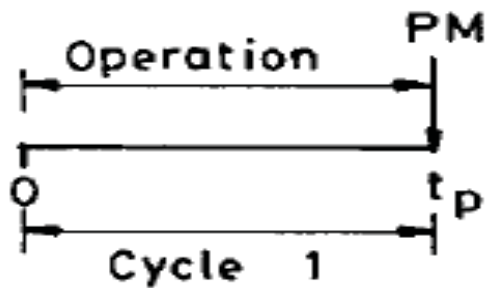


(b)

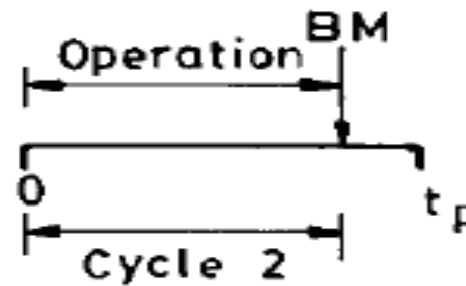
Modelos de Manutenção Preventiva

- Existem dois custos associados a esse exemplo:
- C_a = custo de substituição após a falha;
- C_b = custo de substituição antes da falha.
- Como foi dito, só tem significado o método de substituição por idade se $C_a > C_b$ ou se o custo relativo K (C_a/C_b) for maior que 1.

Modelos de Manutenção Preventiva



(a)



(b)

$$C(t) = c_a \int_0^t f(x) dx + c_b \int_t^{\infty} f(x) dx$$

$$= c_a F(t) + c_b [1 - F(t)] \quad (1)$$

$$T(t) = \int_0^t xf(x) dx + t \int_t^{\infty} f(x) dx$$

$$= \int_0^t xf(x) dx + t[1 - F(t)] \quad (2)$$

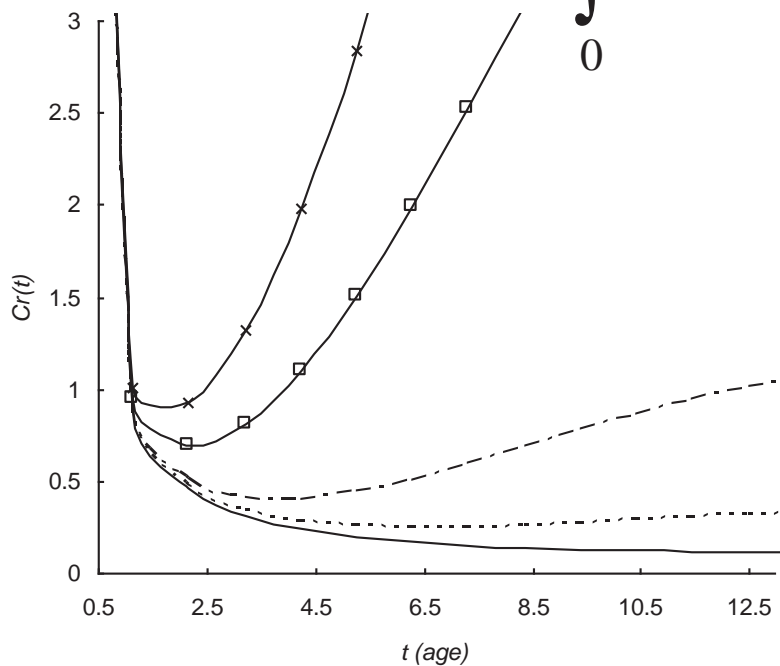
a) Ciclo de Substituição preventiva

b) Ciclo de substituição por falha

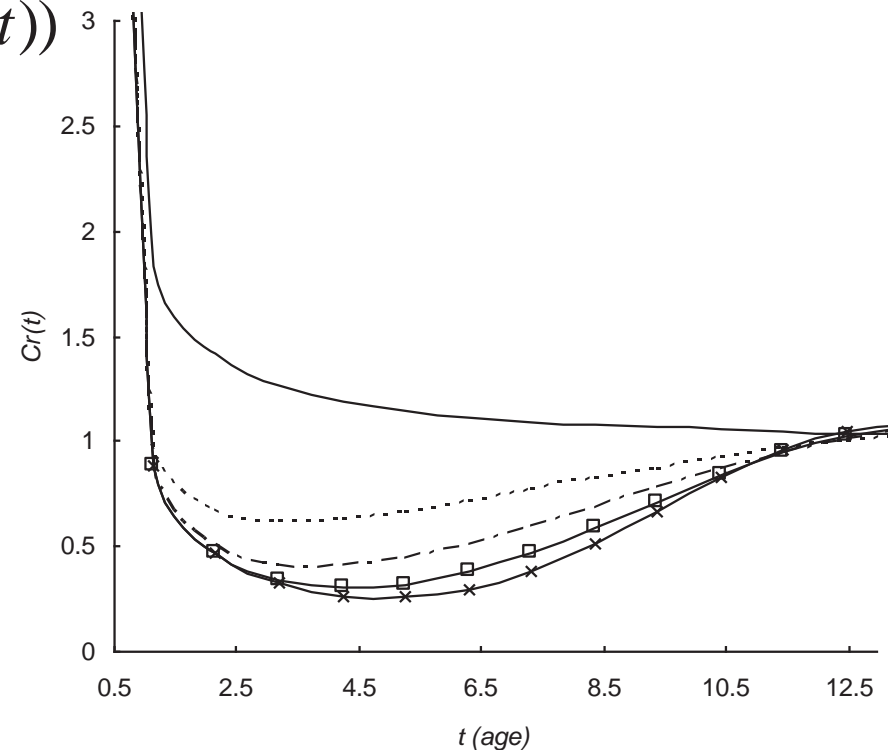
Modelos de Manutenção Preventiva

- É muito comum o uso da razão de custo por unidade de tempo. Esta razão é representada, aqui, por $Cr(t)$ e tem o comportamento descrito pelas Figuras abaixo

$$cr(t) = \frac{c_a(1 - R(t)) + c_b R(t)}{\int_0^t x f(x) dx + t(R(t))}$$



The cost rate function for $c_a=10, c_b=1, \eta=10$ and different values of β : $\beta=1$ (—); $\beta=2$ (.....); $\beta=3$ (-·-); $\beta=4$ (-□-); $\beta=5$ (-×-)



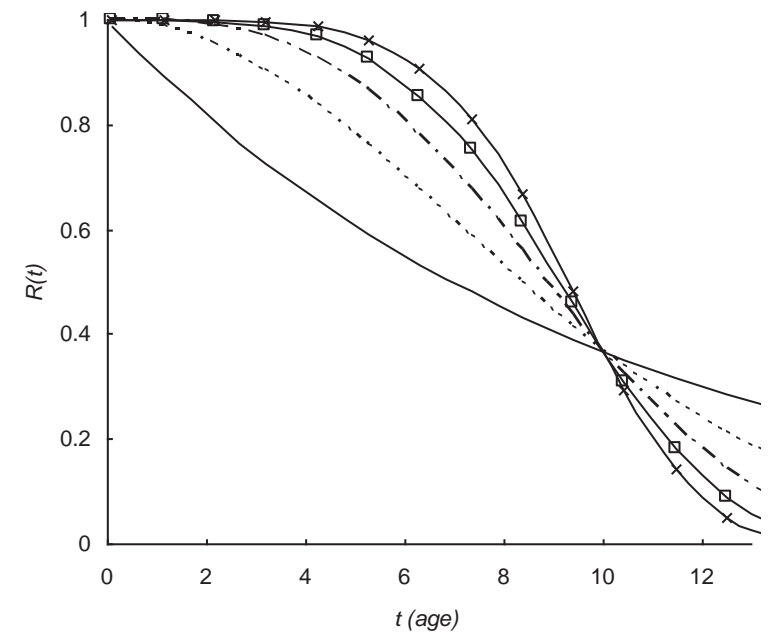
The cost rate function for $c_b=1, \eta=10$ and different values of c_a : $c_a=1$ (—); $c_a=3$ (.....); $c_a=10$ (-·-); $c_a=50$ (-□-); $c_a=100$ (-×-)

Um modelo Multicritério de suporte a manutenção preventiva

- Como ilustração um modelo multicritério para suportar o planejamento de manutenção para uma empresa de fornecimento de energia é descrito.
- Para sistemas de fornecimento de serviço a continuidade do fornecimento de serviço é muitas vezes associado a aspectos de qualidade. Dessa forma, a disponibilidade é um dos aspectos essenciais.
- Por outro lado, a nível de componente, as ações de manutenção são predominantemente relacionadas com a substituição

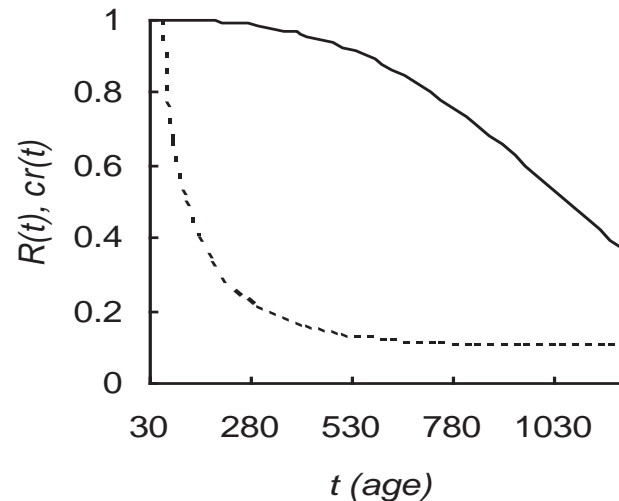
Um modelo Multicritério de suporte a manutenção preventiva

- Por vezes, a confiabilidade é usada como uma restrição. No entanto, pode ser útil para distinguir as alternativas, para além do nível de restrição. Além disso, a estrutura de preferência do DM sobre este aspecto deve ser considerada de modo a ser refletida nos resultados MCDM/A.



Um modelo Multicritério de suporte a manutenção preventiva

- O conflito entre os critérios



- O conjunto de alternativas corresponde a um conjunto de tempos.
- Para o caso específico, é um conjunto discreto de intervalos.

Um modelo Multicritério de suporte a manutenção preventiva

- Modelando a preferência
 - Neste passo um dos principais aspectos referente a estrutura de preferências do decisor é definir sua racionalidade.
- Avaliação Intracritério
 - Para a avaliação intracritério, uma função logística foi encontrado para a confiabilidade a $u(R)$ e uma função exponencial para o $u(Cr)$ atributo custo. A função de utilidade logística para a confiabilidade mostra que o DM considera pequena a variação de $R > 0,9$, e julga ser importante as mudanças de $R < 0,8$. No entanto, para o custo como maior é o custo, menor é a utilidade, o que revela o comportamento de aversão ao risco do DM.
- Avaliação Intercritério
 - Com relação à avaliação intercritérios, o processo de elicitación (Keeney e Raiffa 1976) incluiu a validação de alguns axiomas sobre a estrutura preferencial da DM, portanto, a função de utilidade multilinear é aplicada.

$$U(cr, R) = K_1U(cr) + K_2U(R) + K_3U(cr)U(R)$$

Um modelo Multicritério de suporte a manutenção preventiva

● Resultados

- Os resultados mostram o valor mais alto na função de utilidade multiatributo para $t = 600$ dias, o que corresponde a 20 meses. Aplicando o modelo de otimização clássico, apenas o critério razão custo, o tempo de ótimo (t^*) é $t = 780$, o que corresponde a 26 meses.
- Para este ponto, pode ser calculada a confiabilidade, $R(780)$, que é em torno de 0,75. Por conseguinte, pode ser demasiado arriscados seguir uma política de manutenção com base apenas no custo, considerando o contexto do serviço de fornecimento de energia eléctrica.
- Consequentemente, a confiabilidade para este item não deve ser negligenciada.

Manutenção baseada na condição

Manutenção baseada na condição

- Na manutenção baseada na condição o objetivo é identificar o real estado de um item com base em dados numéricos originários da medição de parâmetros relativos ao funcionamento do mesmo. As decisões resultantes da observação do estado são tomadas independentemente do tempo de uso.
- Além disso, a manutenção baseada na condição tenta evitar tarefas de manutenção desnecessárias, isto porque as decisões são baseadas na observação do estado do sistema;
- Como o estado real do sistema não é conhecido, há erros são inerentes ao processo de inspeção:
 - O falso positivo, quando uma inspeção identifica algum problema inexistente;
 - O falso negativo, quando uma inspeção deixa de identificar um problema existente;

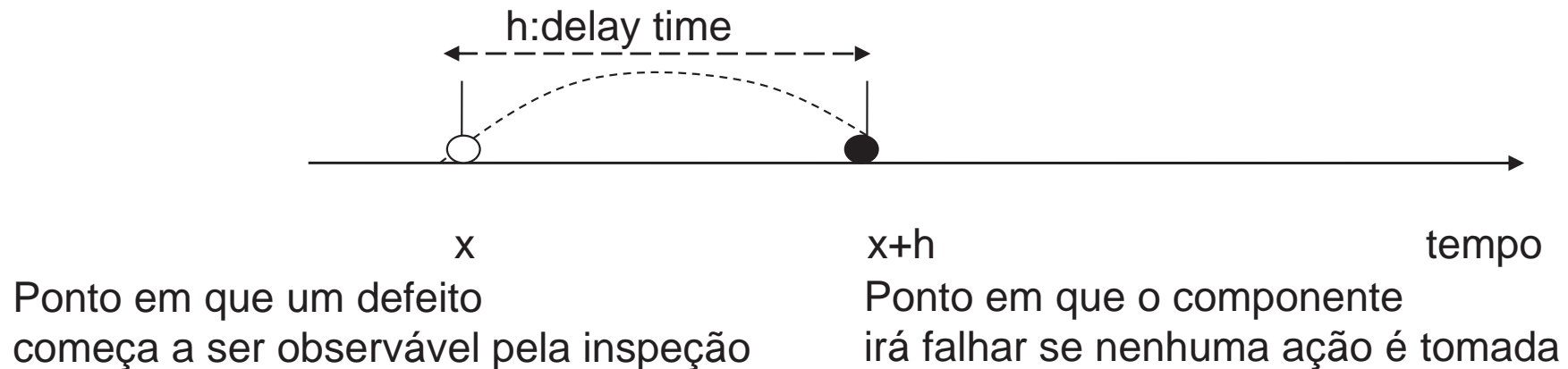
Manutenção baseada na condição

- De acordo com Badia (2002) e Lam Yen (2003) a maioria das políticas de manutenção assume que a falha pode ser detectada tão logo esta ocorra;
- Por outro lado, há situações em que a falha ou o mal funcionamento de um dispositivo só pode ser identificado por meio de inspeção (Barlow and Prochan, 1965);
- Muitas destas situações estão relacionadas ao regime irregular de operação dos sistemas. Por exemplo, sistemas de proteção, alarme, stand-by.
- Nesse sentido, qualquer tipo de processo que ajude na identificação destes itens defeituosos/falhos é útil para evitar que consequências maiores ocorram;

Conceito de Delay time

Delay Time (h) é o tempo decorrido desde o momento em que a presença do defeito foi notada pela primeira vez (x) até o momento em que o reparo não pode ser mais postergado, uma vez que a falha irá ocorrer (Christer & Waller, 1984).

Se uma **inspeção** é realizada **durante** o delay time, o **defeito será identificado**



*Figura - representação delay time
(adaptada de (Christer & Waller, 1984))*

Um modelo Multicritério de manutenção baseada na condição

Um modelo Multicritério de manutenção baseada na condição

- No que diz respeito a uma subestação, é bastante plausível a consideração desta como um sistema complexo. Mesmo para o caso em que se faça a subdivisão dos subconjuntos principais, ainda assim, pode-se considerar cada subconjunto como um sistema complexo.

Dessa forma, as seguintes suposições são válidas:

1. Uma inspeção é realizada a cada T unidades de tempo e dura um tempo constante d_j ;
2. As inspeções são perfeitas. Qualquer defeito que ocorra após a última inspeção será observado na próxima. Uma vez que os defeitos sejam identificados, os reparos são feitos imediatamente ainda enquanto a inspeção está em curso.
3. Os defeitos surgem a uma taxa constante por unidade de tempo (λ).
4. O *delay time* (h), é independente do ponto inicial de u ;
5. A distribuição $f_h(h)$ dos *delay times* é conhecida.

Um modelo Multicritério de manutenção baseada na condição

- Usando tais Pressupostos, a probabilidade de que um defeito venha a se transformar em falha é:

$$b(T) = \int_0^T \frac{(T-u)}{T} fh(u) du$$

Um modelo Multicritério de manutenção baseada na condição

- O tempo de inspeção é d_i . Este é o tempo para inspecionar determinado subsistema, realizando os reparos necessários, quando da identificação do item defeituoso;
- O tempo de recolocação de uma subestação no estado operacional (d_{ro}) devido a uma falha. Este é o tempo de ação emergencial, tendo em vista que a falha já ocorreu. Observa-se que, para uma subestação, há um tempo necessário para deslocamento em que a equipe deverá acessar as instalações da subestação para poder realizar o reparo. Dessa forma, pode-se dizer que o tempo de recolocação da subestação em operação é o total relativo à soma do tempo logístico d_l e o tempo de reparo d_r .
- Assim que uma falha ocorra, esta é identificada de imediato. Nessas condições, supõe-se $d_{ro} \ll T$.
- Com base nas considerações apresentadas o *downtime* é dado por

$$D(T) = \frac{d_i + d_{ro} \lambda T b(T)}{T + d_i}$$

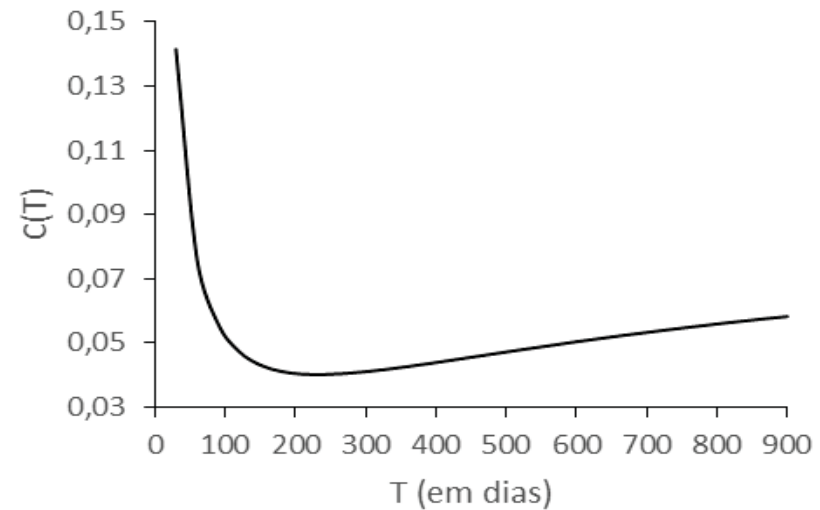
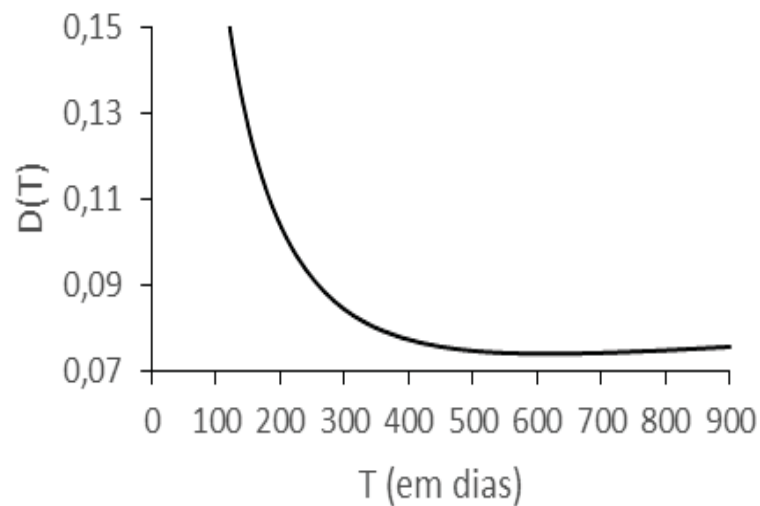
Um modelo Multicritério de manutenção baseada na condição

- Para levantamento do critério razão de custo, os seguintes elementos são observados:
- Custo de Inspeção (c_i), que é o custo de identificar e reparar, ainda durante a inspeção, todos os defeitos ou anomalias encontradas.
- Custo de recolocação do sistema em estado operacional (c_{ro}) que corresponde a soma dos custos de reparo propriamente dito (c_r) com o custo logístico (c_l);
- Custo devido as potenciais consequências advindas da falha do dispositivo (c_o), estes são os valores médios relativos aos prejuízos de outra natureza. Em verdade, é importante observar que em muitas situações são estes que contabilizam os maiores fatores de custo;

$$C(T) = \frac{c_i + (c_{ro} + c_o)\lambda T b(T)}{T + d_i}$$

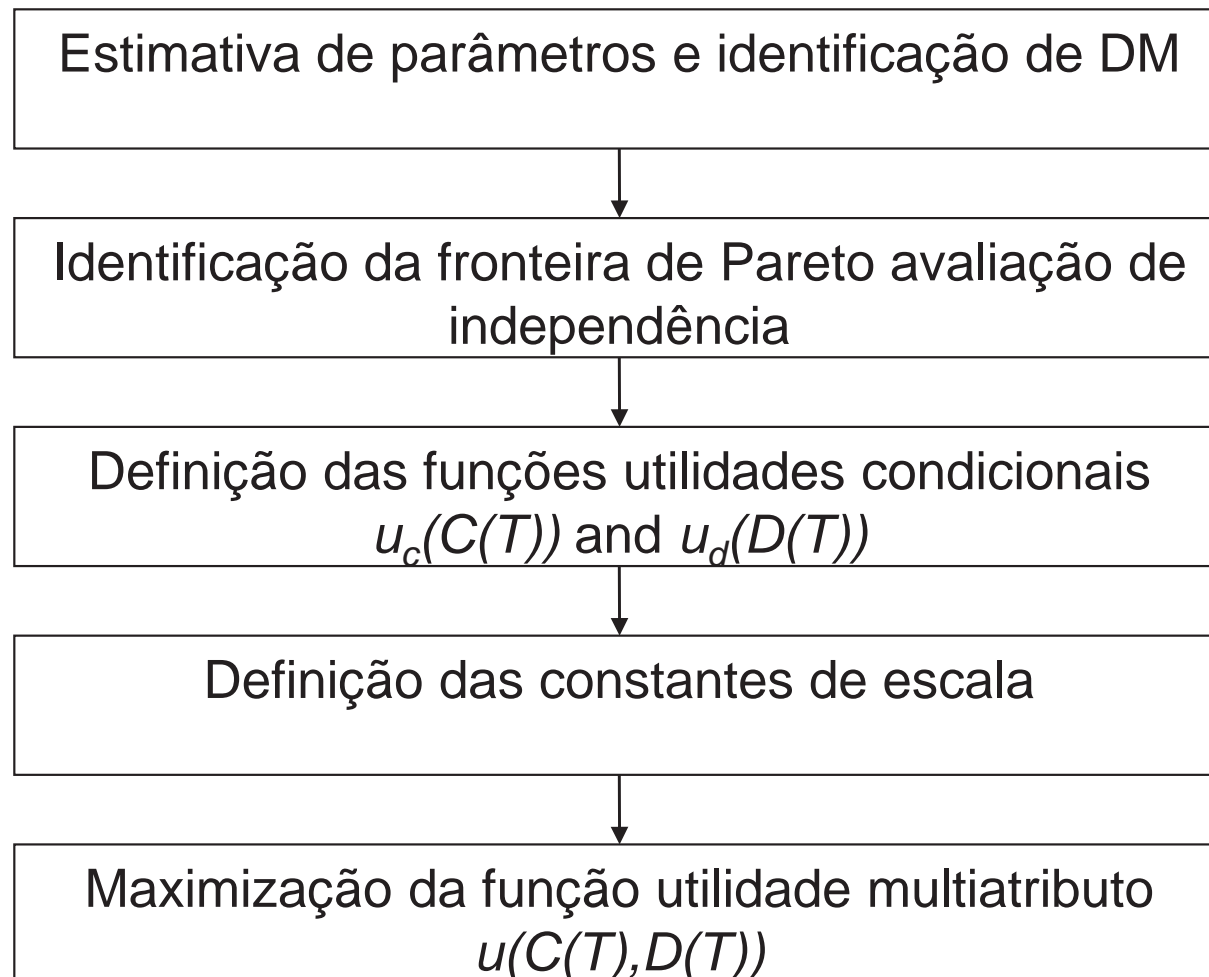
Um modelo Multicritério de manutenção baseada na condição

- Comportamento dos critérios



Um modelo Multicritério de manutenção baseada na condição

- Passos para construção do modelo



Um modelo Multicritério de manutenção baseada na condição

- A teoria da utilidade Multiatributo foi usada para lidar com o conflito entre o custo e o downtime, bem como, considerar de forma apropriada as preferências do tomador de decisão. Os resultados fornecem alternativas com um melhor compromisso entre custo e tempo de inatividade.
- O modelo de decisão proposto proporciona uma alternativa para superar algumas das principais dificuldades associadas com a abordagem clássica, ou seja a impossibilidade de representar os principais aspectos importantes envolvidos na tomada de decisões. Alguns custos associados com o problema são muito abstratos e muito difícil de estimar.
- Além disso, todas essas estimativas são muito questionáveis, já que não é possível garantir que o processo de fazer estimativas pode ser realizado com razoável precisão.

O DIMENSIONAMENTO DE SOBRESSALENTE

Decisões relativas a sobressalentes

- O dimensionamento de sobressalentes influencia diretamente os custos e a lucratividade da empresa.
- O planejamento das peças de reposição é essencial para garantir uma manutenção eficiente.
- O problema de dimensionamento de peças de reposição ocorre no planejamento de sistemas onde o ciclo de vida útil é focalizado
- É indispensável a utilização de métodos quantitativos nesse processo decisório.

Decisões relativas a sobressalentes



O Dimensionamento deve então garantir que as peças necessárias estarão disponíveis na quantidade e hora certas.

**ACHAR
PONTO
ÓTIMO**

Poucas peças = Longo tempo de parada, acarretando perdas na produção.

Muitas peças = Custos de compra e com o armazenamento do estoque.

Decisões relativas a sobressalentes

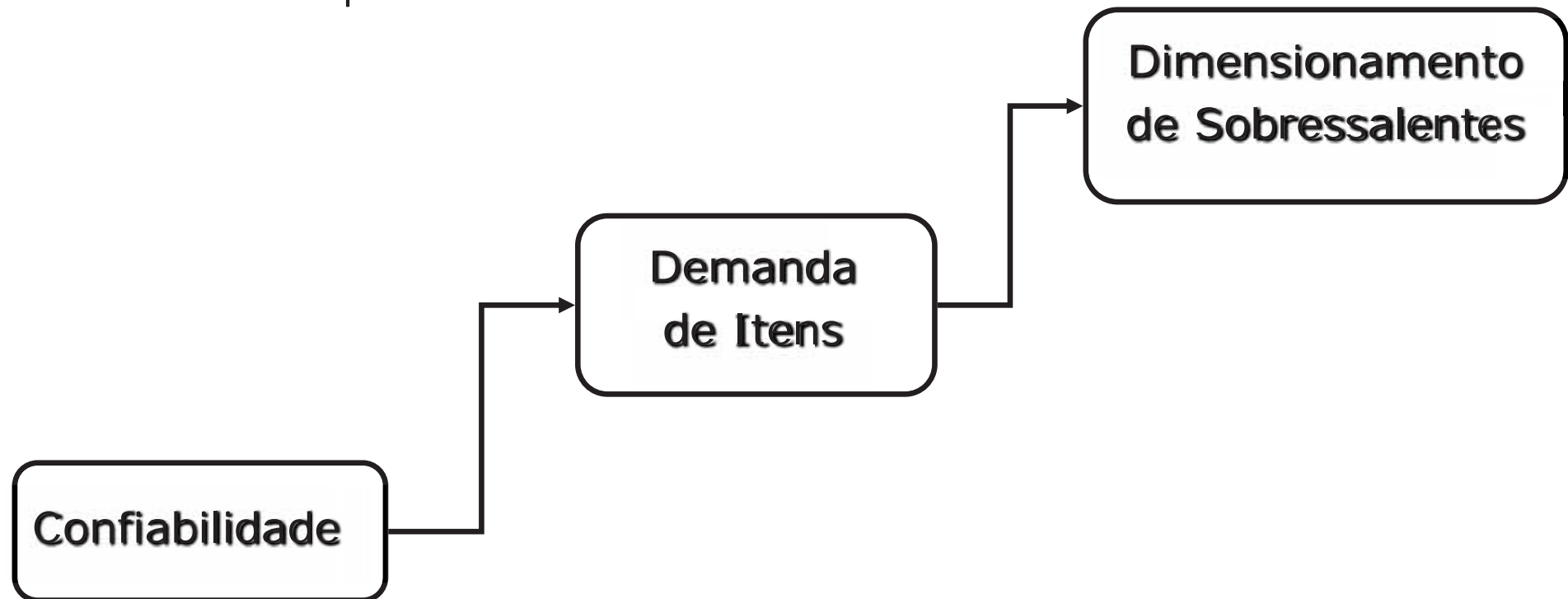
- O gerenciamento do estoque de sobressalentes tem dois grandes objetivos que são conflitantes:
 - *Contribuir para aumentar a disponibilidade dos equipamentos, através da aquisição de peças de reposição, isto é, assegurar o fornecimento dos sobressalentes na quantidade adequada para reduzir o tempo de interrupção*
 - *Reduzir custos de compra e armazenamento do estoque de peças*

Decisões relativas a sobressalentes

- Para sistemas reparáveis a variável a ser considerada é o tempo em que o item será reparado. Nesse caso o sistema é recuperado através da troca do item defeituoso por um outro já em estoque. A quantidade de sobressalentes em estoque será igual ao quantitativo N mais uma unidade. O item defeituoso volta ao estoque após o reparo.

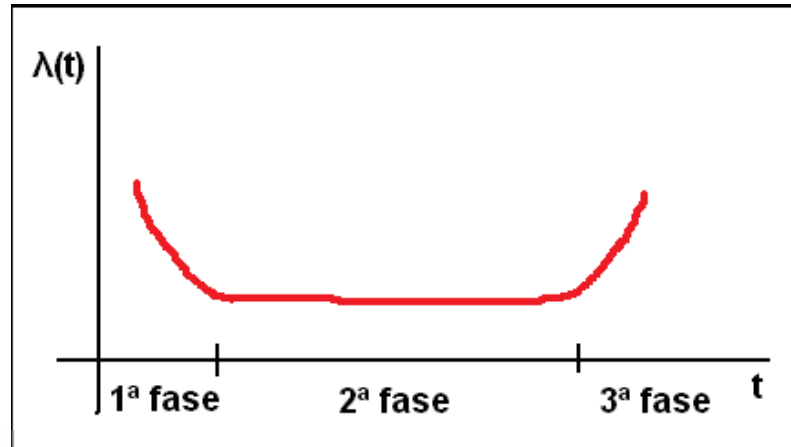
Decisões relativas a sobressalentes

O dimensionamento de sobressalentes deve considerar que o quantitativo de peças de reposição é função da demanda do número de itens requisitados.



O número de itens depende do número de falhas, ou seja, da confiabilidade do equipamento

Decisões relativas a sobressalentes



- A questão do dimensionamento de sobressalentes é tratada apenas no 2ª fase da vida do equipamento (fase operacional).
- Já na 1ª fase os equipamentos estão acobertados pela garantia do fabricante. As falhas são decrescentes com o tempo
- Na 3ª, e última fase, o tipo de falha que ocorre é devido ao desgaste do equipamento.

Decisões relativas a sobressalentes

Modelo de Poisson

- Esse modelo é utilizado para analisar o comportamento da variável aleatória número de falhas x , a partir dessa análise, auxilia na questão dos sobressalentes.
- Se “ t ” segue uma distribuição exponencial, então o número de falhas “ x ” por período corresponde a um processo de Poisson e as seguintes hipóteses são consideradas:
 - Independência entre o número de falhas em intervalos diferentes;
 - A probabilidade de ocorrer uma falha em um pequeno intervalo é aproximadamente proporcional ao intervalo;
 - A probabilidade de ocorrer mais de um evento num intervalo pequeno é desprezível comparada com a probabilidade de ocorrer um evento.

Decisões relativas a sobressalentes

- Com base nessas hipóteses mostra-se que:

$$P(X(t)=x/\lambda) = (\lambda t)^x e^{-\lambda t} / x!$$

$$P(x \leq N) = \sum_{x=0}^N m^x e^{-m} / x!$$

- Onde:
 - $P(x \leq N)$ é a probabilidade de que o número de falhas x , no período de tempo t seja menor ou igual a N ;
 - $m = n \cdot \lambda \cdot t$, com λ sendo a taxa de falhas e n representando a quantidade de itens em exposição.

Decisões relativas a sobressalentes

- Na literatura específica, as seguintes abordagens podem ser encontradas para o problema do dimensionamento de peças sobressalentes:
 - Abordagem baseada no risco de quebra de estoque;
 - Abordagem segundo a restrição de custo;
 - Abordagem segundo uma função utilidade Multiatributo.

ABORDAGEM BASEADA NO RISCO DE QUEBRA DE ESTOQUE

- O objetivo dessa abordagem consiste em determinar uma quantidade de sobressalentes N , para um dado risco de quebra de estoque α , dentro de um intervalo de tempo T .
- Desse modo, o custo é considerado, de forma indireta, como consequência do cálculo. Temos que:
 - Risco $\alpha = \Pr[x > N]$
 - (Margem de Segurança): $MS = 1 - \alpha = 1 - \Pr[x > N] = \Pr[x \leq N]$
onde:
 - α = risco de quebra de estoque;
 - x = número de falhas;
 - N = quantitativo de sobressalentes calculado;
 - MS = margem de segurança.

ABORDAGEM BASEADA NO RISCO DE QUEBRA DE ESTOQUE

- Admitindo-se o processo de Poisson, para um sistema composto de n itens, tem-se:

$$- MS = \sum_{k=0}^N (\lambda_s T)^k e^{-\lambda_s T} / k! \text{ onde:}$$

- o n = quantidade de itens em exposição;
- o λ = taxa de falhas;
- o λ_s = taxa de falhas do sistema;
- o T = intervalo de tempo.

ABORDAGEM SEGUNDO A RESTRIÇÃO DO CUSTO

- O critério custo é visto como um fator limitante esse procedimento, pois para um determinado limite de custo, tenta-se minimizar o risco de quebra do estoque.
- O processo de cálculo consiste em se obter um quantitativo número (N) de sobressalentes, de forma que o custo total final seja menor ou igual aos recursos disponíveis.
- O procedimento consiste em encontrar o valor de N que minimize o risco, de forma e que atenda a condição previamente estabelecida pela restrição orçamentária.

ABORDAGEM SEGUNDO A RESTRIÇÃO DO CUSTO

- Sabendo que $C_T = N_1C_1 + N_2C_2 + \dots + N_jC_j$
- Queremos obter o vetor $N = [N_1, N_2, \dots, N_j]$ que minimiza o risco ou que maximiza a margem de segurança do sistema.
- Para essa abordagem, tem-se que a margem de segurança do lote é a probabilidade de que nenhum dos subestoques quebrem.
 - $MS[N] = MS_1[N_1] + \dots + MS_j[N_j]$
- Portanto, a solução consiste em maximizar $MS[N]$, de forma que o custo total seja menor ou igual ao custo inicial imposto como restrição, $C_T[N] \leq C_0$

ABORDAGEM SEGUNDO UMA FUNÇÃO UTILIDADE MULTIATRIBUTO

- Consiste de uma função utilidade composta por dois atributos que são o custo e o risco de quebra do estoque.
- A decisão a ser adotada nesse procedimento consiste em determinar valores para os atributos custo C e risco α , de modo a obter a maximização da função utilidade multiatributo da consequência que é também expressa por $u(\alpha, C)$.
- Temos que a maximização de $u(\alpha, C)$ é obtida através da maximização da utilidade esperada, em função da quantidade N de sobressalentes. Sendo formulada como:

- $$\text{Max}_{\lambda_0}^{\lambda_m} \int u(\lambda, T; N) \pi(\lambda) d\lambda$$

CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Deve-se salientar a importância do dimensionamento de sobressalentes para o planejamento da manutenção, considerando o seu impacto sobre a disponibilidade do sistema envolvido.
- O assunto requer um tratamento quantitativo adequado através de modelos apropriados e a utilização de algumas abordagens como foi citado anteriormente.

Outsourcing Decisions

Outsourcing Decisions

- Outsourcing decisions are requiring more and more attention since **the contract price is not the only aspect to be considered** by a DM (de Almeida, 2007)
- As noticed in other organizational areas such as Information Systems (IS), the trend towards outsourcing in maintenance has been greatly affected by **rapid changes in technology**

Outsourcing Decisions

- Murthy and Jack (2008) pointed out the role of technological advances:
 - It resulted in more **complex** and expensive equipment
 - Have increased the **level of specialties** and techniques needed to repair such equipment
 - Led to a variety of **work force specialties** and **diagnostic tools** that require constant upgrading

Outsourcing Decisions

- Maintenance Service Supplier Selection with Compensatory Preferences
 - Deterministic Administrative Time Model
 - Stochastic Administrative Time Model
- Maintenance Service Supplier Selection with Non Compensatory Preferences
- Maintenance Service Supplier Selection with Non Compensatory Preferences Including Dependability and Service Quality

Outsourcing Decisions

Maintenance Service Supplier Selection with Compensatory Preferences

- Consider these objectives to evaluate a maintenance service supplier:
 - Interruption Time (T)
 - Is explained by the Time to Repair (TTR) and by the Administrative Time (TD)
 - $TI(TD, TTR) = TD + TTR$
 - Cost (C)

Outsourcing Decisions

Maintenance Service Supplier Selection with Compensatory Preferences

- TTR is **stochastic** and usually considered for maintenance modelling¹

$$f(TTR) = ue^{-uTTR}$$

- TD is evaluated according to the assumptions that best fit the modelling process
 - It may be considered as **deterministic** or **stochastic**

¹de Almeida AT (2001a) Repair contract decision model through additive utility function. J Qual Maint Eng. Vol 7, p. 42-48

Outsourcing Decisions

Maintenance Service Supplier Selection with Compensatory Preferences

Deterministic Administrative Time Model¹

- TD is **deterministic** and assumes different values according to the service supplier and contract.
- DM's preference structure fits **MAUT** axiomatic requirements to be represented as an **additive utility function** $U(TI, C)$

$$U(TI, C) = k_{TI} u_{TI}(TI) + k_C u_C(C)$$

where k_{TI} and k_C are the respective scale constants

¹de Almeida AT (2001a) Repair contract decision model through additive utility function. J Qual Maint Eng. Vol 7, p. 42-48

Outsourcing Decisions

Maintenance Service Supplier Selection with Compensatory Preferences

Deterministic Administrative Time Model¹

- Considering the uncertainties referring to the states of nature only for MTTR, the DM shall maximize his/her expected utility value $E_u U(u, a_i)$
- $U(u, a_i)$ is the **utility of the state of the nature u and the action a_i** , which refers to a specific maintenance service supplier and contract representing the consequence (T_i, C_i) , consequently $U(u, a_i)$ is obtained.

$$E_u U(u, a_i) = \int_u U(u, a_i) \pi(u) du \quad (\text{De Almeida 2001a})$$

¹de Almeida AT (2001a) Repair contract decision model through additive utility function. J Qual Maint Eng. Vol 7, p. 42-48

Outsourcing Decisions

Maintenance Service Supplier Selection with Compensatory Preferences

Deterministic Administrative Time Model¹

- Since $\Pr(TTR|u, a_i)$ corresponds to $f(TTR)$ then

$$U(u, a_i) = \int_0^{\infty} [k_n u_n(TI) + k_c u_c(C)] u e^{-u(TTR)} dTTR$$

$$U(u, a_i) = \frac{k_n u}{A_1 + u} + k_c u_c(C)$$

$$E_u U(u, a_i) = \int_u \left[\frac{k_n u}{A_1 + u} + k_c e^{-A_2 C} \right] \pi_i(u) du$$

¹de Almeida AT (2001a) Repair contract decision model through additive utility function. J Qual Maint Eng. Vol 7, p. 42-48

Outsourcing Decisions

Maintenance Service Supplier Selection with Compensatory Preferences

Stochastic Administrative Time Model²

- *TTR* follows an **exponential distribution** for all service suppliers in all contracts
- *TD* follows an **exponential distribution** for all service suppliers in all contracts

$$f(TD) = \omega e^{-\omega TD}$$

ω is a parameter defined according to the service supplier contract **service level** and **spare provisioning**

²De Almeida AT (2001b) Multicriteria decision making on maintenance: Spares and contracts planning. Eur J Oper Res, Vol 129, p. 235–241. doi: 10.1016/S0377-2217(00)00220-

Outsourcing Decisions

Maintenance Service Supplier Selection with Compensatory Preferences

Stochastic Administrative Time Model²

- The sum of **two independent random variables**

$$f(TI) = \int_{-\infty}^{\infty} f(TD) f(TI - TD) dTD = \int_{-\infty}^{\infty} f(TTR) f(TI - TTR) dTTR$$

$$f(TI) = \frac{\varpi u}{u - \varpi} (e^{-\varpi TI} - e^{-u TI})$$

²De Almeida AT (2001b) Multicriteria decision making on maintenance: Spares and contracts planning. Eur J Oper Res, Vol 129, p. 235–241. doi: 10.1016/S0377-2217(00)00220-

Outsourcing Decisions

Maintenance Service Supplier Selection with Compensatory Preferences

Stochastic Administrative Time Model²

$$U(u, a_i) = k_n \frac{\varpi u}{u - \varpi} \left\{ \frac{1}{(A_1 + \varpi)} - \frac{1}{(A_1 + u)} \right\} + k_c u_c (C)$$

$$U(u, a_i) = k_n \frac{\varpi u}{(A_1 + \varpi)(A_1 + u)} + k_c e^{-A_2 C_i}$$

$$E_u U(u, a_i) = \int_u \left[k_n \frac{\varpi u}{(A_1 + \varpi)(A_1 + u)} + k_c e^{-A_2 C_i} \right] \pi(u) du$$

²De Almeida AT (2001b) Multicriteria decision making on maintenance: Spares and contracts planning. Eur J Oper Res, Vol 129, p. 235–241. doi: 10.1016/S0377-2217(00)00220-

Outsourcing Decisions

Maintenance Service Supplier Selection with Non Compensatory Preferences³

- This decision model presented by de Almeida (2002) is based on the **ELECTRE I**
- This decision model associates **Utility Theory** with the **ELECTRE I**

$$U(\varpi) = \int_{TI} U(TI) \Pr(TI | \varpi) dTI$$

$$U(\varpi) = \frac{u \varpi}{(A_1 + \varpi)(A_1 + u)}$$

³de Almeida AT (2002) Multicriteria modelling for a repair contract problem based on utility and the ELECTRE I method. IMA J Manag Math Vol 13, p. 29–37. doi: 10.1093/imaman/13.1.29

Outsourcing Decisions

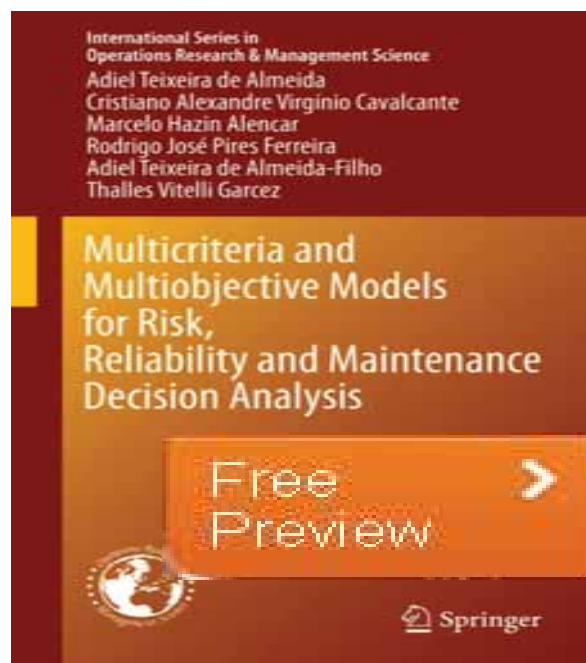
Maintenance Service Supplier Selection with Non Compensatory Preferences⁴

- Other important aspects to consider are **dependability (d_i)** and **service quality (q_i)**
 - **Dependability** is related to measuring the performance of the promised deliveries accomplishments (Slack and Lewis, 2002)
 - **Service quality reflects the degree of mistakes introduced** once a repair has been performed

⁴de Almeida AT (2005) Multicriteria Modelling of Repair Contract Based on Utility and ELECTRE I Method with Dependability and Service Quality Criteria. Ann of Oper Res, Vol 138, p. 113–126

Springer

**International Series in Operations Research & Management
Science. Vol 231**



Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis

Authors: **de Almeida, A.T., Cavalcante, C.A.V., Alencar, M.H.,
Ferreira, R.J.P., de Almeida-Filho, A.T., Garcez, T.V.**

<http://www.springer.com/us/book/9783319179681>