



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ANDERSON BEZERRA DA SILVA

**MODELO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA PRIORIZAÇÃO DE
COMPONENTES CRÍTICOS ATRAVÉS DE MEDIDAS DE IMPORTÂNCIA**

Caruaru
2019

ANDERSON BEZERRA DA SILVA

**MODELO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA PRIORIZAÇÃO DE
COMPONENTES CRÍTICOS ATRAVÉS DE MEDIDAS DE IMPORTÂNCIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Otimização e Gestão da Produção.

Orientador: Prof. Dr. Thalles Vitelli Garcez

Caruaru
2019

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Paula Silva - CRB/4 - 1223

S586m Silva, Anderson Bezerra da.
Modelo de decisão multicritério para priorização de componentes críticos através de medidas de importância. / Anderson Bezerra da Silva. – 2019.
60 f.; il.: 30 cm.

Orientador: Thalles Vitelli Garcez.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2019.
Inclui Referências.

1. Avaliação de necessidades (Brasil). 2. Administração de risco (Brasil). 3. Confiabilidade. 4. Manutenção. 5. Processo decisório por critério múltiplo. I. Garcez, Thalles Vitelli (Orientador). II. Título.

CDD 658.5 (23. ed.) UFPE (CAA 2019-052)

ANDERSON BEZERRA DA SILVA

**MODELO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA PRIORIZAÇÃO DE
COMPONENTES CRÍTICOS ATRAVÉS DE MEDIDAS DE IMPORTÂNCIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Aprovada em: 28 / 02 / 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Thalles Vitelli Garcez (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Rodrigo Sampaio Lopes (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Rodrigo José Pires Ferreira (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Ao Senhor, meu Deus, santo e trino, que merece todo louvor do mundo e com seu Amor nunca desistiu de mim, providenciando todas as condições necessárias para que eu pudesse viver os anos mais desafiantes de minha vida, chegando ao ápice com a conclusão deste trabalho. O amor me explicou tudo!

À Comunidade Católica Shalom e a todos os (as) meus(as) irmãos(ãs) de vocação que em seus cuidados sustentam os meus passos e me fazem encontrar e viver a plenitude da felicidade dia após dia: Alex, meu irmão de outra mãe; Gabriel, significado de que vale a pena ofertar a vida em vista do próximo; e, de maneira especial, à pessoa do José Antônio, amigo e expressão do amor de Deus por mim.

Às pessoas que, diariamente, “dobram o meu paraquedas”: Sylvania, minha mãe; Amilton, meu pai; Amanda, minha irmã; e Maria Eduarda, minha namorada e maior incentivadora da minha felicidade. Vocês são para mim o significado real, vivo e humano do que é amor. A todos os meus familiares que desde sempre, com a graça de Deus, proporcionaram condições para que eu pudesse crescer e lutar pelos meus objetivos.

Aos meus amigos de Universidade, que me acompanham desde a graduação, e juntos comigo concluem mais uma etapa de nossas vidas: Laiany, Wesley e, de maneira especial, Heitor, que sempre me ajudou e é para mim uma referência. Ao meu grande amigo Édipo, que me auxilia a ser uma pessoa melhor desde o ensino fundamental. Aos meus amigos e companheiros de PPGE-CAA e de maneira especial aos colegas de laboratório que na convivência do dia a dia fizeram me sentir humano e que, sem eles, este trabalho não seria possível.

Aos professores do PPGE-CAA que com dedicação se esforçam para formar profissionais de qualidade. Especialmente ao meu orientador Thalles que me orientou com destreza e paciência, principalmente nos momentos mais difíceis.

Por fim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desta pesquisa.

Rezem por mim!

RESUMO

O desempenho eficiente de um sistema é uma condição necessária para que uma organização se mantenha competitiva no mercado em que atua. Medidas de importância de componentes são índices utilizados em contextos de risco, confiabilidade e manutenção para realizar a análise de desempenho do sistema e identificar quais componentes são mais críticos para a operação segura e eficiente do conjunto. Tais medidas são capazes de analisar o sistema sob a ótica de diferentes critérios de desempenho, como confiabilidade, segurança e custo, por exemplo. Os critérios mencionados, dentre outros, caracterizam aspectos específicos do sistema, construindo assim, o seu caráter multidimensional e que deve ser levado em consideração no processo de tomada de decisão. O objetivo deste trabalho é propor um modelo de tomada de decisão multicritério que incorpore as preferências do decisor às informações dadas pelas medidas de importância ao longo de três diferentes etapas de um sistema: projeto, operação e manutenção. Em seguida, foram caracterizadas as preferências do decisor e, diante disso, o método ELECTRE II foi aplicado. Um sistema de armazenamento de fluidos foi utilizado para validação do modelo de decisão. Para cada um dos três cenários, foi apresentado o componente mais crítico a partir do método de sobreclassificação ELECTRE II. Como método de elicitação dos pesos foi utilizado o método ROC e os limites de concordância e discordância do modelo foram definidos com base no conhecimento a priori existente. Como critérios foram definidas as medidas de potencial de melhoria e RRW para a fase projeto; Birnbaum e RAW para a fase de operação; e importância crítica e RAW para a fase de manutenção. Além das medidas de disponibilidade e custo que foram utilizadas em todas as fases. O modelo se apresenta como uma ferramenta gerencial útil para a tomada de decisão sobre quais componentes são considerados mais impactantes dentro de um sistema, em diferentes contextos, de forma que seja feito o menor esforço possível e se obtenha o maior retorno desejado.

Palavras-chave: Medidas de importância. Risco. Confiabilidade. Manutenção. Multicritério.

ELECTRE II.

ABSTRACT

The efficient performance of a system is a necessary condition for an organization to remain competitive in the market in which it operates. Component importance measures are indices used in risk, reliability and maintenance contexts to perform system performance analysis and identify which components are most critical to the safe and efficient operation of the set. Such measures are capable of analyzing the system from the standpoint of different performance criteria, such as reliability, safety and cost. The mentioned criteria, among others, characterize specific aspects of the system, thus building its multidimensional character and that must be considered in the decision-making process. The objective of this work is to propose a multicriteria decision-making model that incorporates the decision maker's preferences to the information given by the measures of importance along three different stages of a system: design, operation and maintenance. Next, the preferences of the decision maker were characterized and, on the basis of this, the ELECTRE II method was applied. A fluid storage system was used to validate the decision model. For each of the three scenarios, the most critical component was presented using the ELECTRE II outranking method. As method of elicitation of the weights was used the ROC method and the thresholds of agreement and disagreement of the model were defined based on existing a priori knowledge. As criteria the potential improvement measures and RRW were defined for the project phase; Birnbaum and RAW for the operation phase; and critical and RAW importance to the maintenance phase. In addition to the measures of availability and cost that were used in all phases. The model presents itself as a useful management tool for decision making about which components are considered most impacting within a system, in different contexts, so that the least possible effort is made and the desired return is obtained.

Keywords: Measures of importance. Risk. Reliability. Maintenance. Multicriteria. ELECTRE II.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Metodologia de pesquisa	15
Figura 2 –	Framework do modelo de decisão	37
Figura 3 –	Sistema utilizado para validação do modelo.....	42
Figura 4 –	Sistema utilizado para exemplificação	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Quadro resumo das MI's de Confiabilidade	21
Tabela 2 –	Relação entre as fases do sistema e as MI's	35
Tabela 3 –	Pesos de cada critério, calculados através do ROC	39
Tabela 4 –	Limiares de concordância e discordância	39
Tabela 5 –	Parâmetros de desempenho do sistema	42
Tabela 6 –	Resultados fornecidos pelas MI's na fase de projeto	43
Tabela 7 –	Índice de concordância para a fase de projeto	43
Tabela 8 –	Índice de discordância para a fase de projeto	43
Tabela 9 –	Relações de sobreclassificação para a fase de projeto	44
Tabela 10 –	Resultados fornecidos pelas MI's na fase de operação	44
Tabela 11 –	Índice de concordância para a fase de operação	45
Tabela 12 –	Índice de discordância para a fase de operação	45
Tabela 13 –	Relações de sobreclassificação para a fase de operação	45
Tabela 14 –	Resultados fornecidos pelas MI's na fase de manutenção	46
Tabela 15 –	Índice de concordância para a fase de manutenção	46
Tabela 16 –	Índice de discordância para a fase de manutenção	46
Tabela 17 –	Relações de sobreclassificação para a fase de manutenção	47
Tabela 18 –	Alteração dos limiares de utilizados na análise intra-critério	48
Tabela 19 –	Quantidade absoluta de vezes em que cada componente foi ordenado como o mais crítico	49
Tabela 20 –	Quantidade absoluta de vezes em que cada componente foi ordenado como o menos crítico	50
Tabela 21 –	Valores assumidos como parâmetros para exemplificação dos cálculos de cada medida de importância	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	JUSTIFICATIVA.....	13
1.2	OBJETIVOS	14
1.2.1	Objetivos específicos	14
1.3	METODOLOGIA	14
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	MEDIDAS DE IMPORTÂNCIA EM ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE	17
2.1.1	Medidas de importância de confiabilidade	19
2.1.1.1	Medida de importância de Birnbaum	20
2.1.1.2	Medida de importância crítica	20
2.1.1.3	Medida de importância potencial de melhoria	21
2.1.2	Medidas de importância de risco	22
2.1.2.1	Risk Achievement Worth (RAW)	22
2.1.2.2	Risk Reduction Worth (RRW)	22
2.1.3	Medida de importância de disponibilidade	23
2.1.4	Medida de importância de custo	24
2.1.4.1	Potencial de melhoria baseado no custo	24
2.2	MÉTODOS DE APOIO À DECISÃO MULTICRITÉRIO	25
2.2.1	Problemática do processo decisório e racionalidade do decisor	25
2.2.2	O método ELECTRE II	26
2.2.2.1	Avaliação intra-critério	27
2.2.2.2	Avaliação inter-critérios	28
2.2.2.3	Relações de sobreclassificação	29
3	REVISÃO DA LITERATURA	31
3.1	CONTEXTO E APLICAÇÕES	31
3.2	POSICIONAMENTO DA PESQUISA	33
4	MODELO PROPOSTO	37
4.1	FASE PRELIMINAR	37
4.2	MODELAGEM DE PREFERÊNCIAS E ESCOLHA DO MÉTODO	38

4.3	FINALIZAÇÃO	40
5	APLICAÇÃO NUMÉRICA	41
5.1	DESCRIÇÃO DO SISTEMA	41
5.2	PROJETO	43
5.3	OPERAÇÃO	44
5.4	MANUTENÇÃO	46
5.5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5.6	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	48
6	CONCLUSÕES	51
	REFERÊNCIAS	53
	APÊNCIDE A – DEMONSTRATIVO DE COMO CALCULAR CADA MEDIDA DE IMPORTÂNCIA	58

1 INTRODUÇÃO

Diante da constante evolução da competitividade mundial, aumenta-se a necessidade das organizações em possuírem e manterem seus sistemas eficientes e eficazes que operem a níveis desejados definidos pela alta gerência. Diante das inúmeras variáveis que afetam sua performance, um dado sistema pode operar abaixo dos níveis desejados. Surge então a necessidade de análise de desempenho de sistemas.

Essa análise de desempenho de sistemas se torna útil e necessária para que sejam identificadas oportunidades de melhoria, ora através de reprojeto, substituição ou manutenção dos componentes mais críticos para o sistema, buscando um aumento nos níveis de performance global através de soluções efetivas (COMPARE; BELLORA; ZIO, 2017). Tal análise pode ser feita a partir do estudo de diferentes critérios de desempenho, tais como confiabilidade, risco e custo.

A preocupação em lidar com a análise de confiabilidade e alocação de redundâncias é encontrada em trabalhos da literatura há algumas décadas, como a publicação de Sakawa (1978), onde o autor propõe um modelo matemático para lidar com a maximização da confiabilidade e a minimização do custo a cada etapa de um sistema em série. Inagaki (1978) também apresenta um modelo multiobjectivo para lidar com a alocação de confiabilidade em um sistema em série, considerando a melhor programação para atividades de manutenção preventiva.

A todo tempo, os gestores estão preocupados ora em maximizar alguns objetivos - como confiabilidade e disponibilidade - ora minimizar outros - como custo, volume, tempo - transformando assim, a situação em um problema de decisão multicritério (INAGAKI, 1978).

Para entender melhor o sistema e melhorar o seu desempenho, a literatura faz uso de medidas de importância em diferentes áreas, tais como, risco, confiabilidade e manutenção (*Risk, Reliability, Maintenance* - RRM) que, Shayesteh e Hilber (2016) argumentam que uma pergunta fundamental para a priorização de estratégias de manutenção em sistemas com vários componentes é: como a confiabilidade total do sistema será afetada se a confiabilidade do componente for alterada? Essa pergunta pode ser respondida pelas medidas de importância.

Além disso, medidas de importância são amplamente utilizadas para identificar os componentes mais fracos do sistema e para apoiar atividades de melhoria em RRM através da priorização de esforços (DUI et al., 2017). Apesar de terem sido criadas no contexto de confiabilidade (BIRNBAUM, 1968), atualmente existem medidas de importância que são

utilizadas para estudos nas áreas de disponibilidade, risco e custos, devido a necessidade de análise do caráter multidimensional da eficiência do sistema (DE ALMEIDA et al., 2015).

Diante dessa multidimensionalidade dos impactos apresentadas pelos sistemas, faz-se necessário a utilização de uma abordagem que seja capaz de analisar a criticidade de cada componente, considerando o desempenho geral, para assim integrar as informações fornecidas por cada medida de importância em uma única ordem.

Para alcançar esse propósito, são encontrados na literatura os métodos multicritério de apoio à decisão (em inglês, *Multi-Criteria Decision Making* – MCDM), que auxiliam os decisores a avaliar um conjunto de alternativas, considerando múltiplos critérios e a estrutura de preferência do decisor, com o objetivo de selecionar a melhor dentre elas; classificar em um subconjunto ou ordenar os elementos do conjunto de acordo o desempenho em cada critério estabelecido (ALMOGHATHAWI et al., 2017).

De Almeida; Ferreira; Cavalcante (2015) realizaram uma revisão da literatura na qual apresentam uma visão geral dos modelos multicritérios construídos para lidar com problemas de confiabilidade e manutenção. Os autores identificam modelos utilizados principalmente no contexto de seleção de projetos, alocação de redundâncias e manutenção preventiva. Por fim, ainda apresentam critérios mais frequentemente utilizados em publicações na área. A saber, custo, confiabilidade, disponibilidade, tempo, peso, segurança e risco.

O presente trabalho analisa o desempenho do sistema sob três pontos de vista diferentes, que representam três estágios de um sistema de produção: projeto, operação e manutenção. Esses cenários são definidos baseados em Nokland e Aven (2013). Podemos associar esses cenários às áreas em que a literatura MCDM apresenta maior destaque no contexto de manutenção e análise de confiabilidade, segundo De Almeida; Ferreira; Cavalcante (2015).

Visto a grande necessidade que as organizações apresentam de entenderem o sistema e a maneira como ele funciona, através das relações entre seus componentes, faz-se necessário a construção de modelos voltados para a tomada de decisão em situações onde são utilizadas medidas de importância em RRM. Nesse contexto, o presente trabalho se propõe a construir um modelo multicritério de decisão capaz de lidar com as informações conflitantes fornecidas pelos critérios de desempenho de um sistema, representados pelas medidas de importância na fase de projeto, operação e manutenção de sistemas.

1.1 JUSTIFICATIVA

Visto que a análise de desempenho do sistema é de suma importância para uma organização que busca eficiência e eficácia em seus processos e que o desempenho de um sistema pode ser visto sob diferentes perspectivas (multidimensionalidade), tais como: confiabilidade, disponibilidade, risco e custo; a utilização de medidas de importância se apresenta como uma ferramenta bastante útil para estudos em engenharia de confiabilidade.

Na literatura são encontradas várias proposições e aplicações de medidas para a quantificação da importância de componentes dentro de um sistema binário reparável. No entanto, na maioria das suas aplicações na literatura considera apenas um critério e, a partir dele estabelecem uma ordem de priorização de acordo com a medida de desempenho utilizada (BARALDI et al., 2013; CATELANI et al., 2016; GAO; MARKESET, 2010).

Outra parte das aplicações realizam a análise de desempenho através da aplicação de mais de uma medida e apresentam as diferentes ordens apresentadas por cada ordem (ALLA; PAHUJA; LATHER, 2014; NOKLAND; AVEN, 2013; VAN DER BORST; SCHOONAKKER, 2001).

Diferentes medidas de importância apresentam diferentes perspectivas e, por isso, geram diferentes ordens de criticidade das medidas de desempenho, logo, resultam em diferentes decisões. Caracteriza-se assim o problema de tomada de decisão multicritério: como explorar o conflito entre as diferentes informações para se chegar a uma decisão final (ALMOGHATHAWI et al., 2017; COMPARE; BELLORA; ZIO, 2017).

Apesar da multidimensionalidade apresentada pelo desempenho de um sistema e da necessidade de considerar as informações fornecidas para se chegar a uma ordenação final, os trabalhos encontrados na literatura relacionados a medidas de importância, em sua grande maioria, não consideram o problema como uma tomada de decisão multicritério, ou seja, não consideram a existência de múltiplos objetivos na qual o decisor deseja atingir quando da tomada de decisão e, conseqüentemente, a não consideração da estrutura de preferências do decisor.

Essa necessidade motivou a elaboração deste trabalho. Desta maneira, pretende-se construir um modelo útil que demonstre a aplicabilidade destes dois conceitos juntos – medidas de importância e modelos de decisão multicritério – e que ajude a preencher a lacuna existente na intersecção destes dois campos.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal desenvolver um modelo de análise de decisão multicritério a fim de que os componentes mais críticos – aqueles que mais impactam o desempenho do sistema – sejam ordenados e priorizados considerando diferentes etapas do sistema: projeto, operação e manutenção.

1.2.1 Objetivos específicos

- Investigar na literatura as principais medidas de importância utilizadas no contexto de engenharia de confiabilidade;
- Identificar as medidas de importância de acordo com o critério analisado pelo decisor: medidas de confiabilidade, medidas de disponibilidade, medidas de risco e medidas de custo;
- Identificar abordagens de cálculos de criticidade de componentes para diversas medidas de importância;
- Formular um modelo de tomada de decisão multicritério agregando o desempenho das medidas de importância e a estrutura de preferências do decisor para a construção de um ordenamento completo;
- Determinar os componentes mais críticos de acordo com o ordenamento final, através da aplicação do modelo em um caso hipotético.

1.3 METODOLOGIA

Essa seção apresenta a estruturação metodológica do trabalho, contendo a classificação da pesquisa quanto aos seus objetivos, a abordagem utilizada, o delineamento, o procedimento técnico e os instrumentos de coleta de dados. O fluxograma apresenta os passos adotados pela pesquisa, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1- Metodologia de pesquisa



Fonte: O autor (2019)

Os parâmetros do sistema são de natureza quantitativa enquanto a ênfase na perspectiva do indivíduo que está sendo estudado e a sua interpretação sobre os fatos, caracterizam uma pesquisa qualitativa. Sendo assim, a abordagem combinada, segundo Miguel et al. (2010), caracteriza esse trabalho.

Quanto aos objetivos, caracteriza-se como exploratório, que é um tipo de abordagem combinada (MIGUEL et al., 2010) e que tem como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a constituir hipóteses.

A técnica de modelagem representa o delineamento da pesquisa, pois através de um modelo, o pesquisador manipula as variáveis e os seus níveis, mas não a realidade, podendo haver ou não o uso de computadores (MIGUEL et al., 2010).

Quanto ao procedimento técnico, a pesquisa se caracteriza como experimental, pois estuda a relação entre duas ou mais variáveis, através da manipulação dos seus parâmetros, sob condições controladas pelo pesquisador (MIGUEL et al., 2010).

Por fim, a coleta de dados aconteceu através da revisão da literatura e da avaliação subjetiva do analista sobre o problema em questão. As medidas de importância revisadas na literatura foram categorizadas de acordo com o critério que avaliam (confiabilidade, risco, disponibilidade e custo) e de acordo com o cenário em que mais se adequam (projeto, operação e manutenção).

Dentre um grande número de medidas de importância encontradas na literatura, as escolhidas para este trabalho foram aquelas voltadas para a área de RRM e que apresentaram aspectos de generalização a qualquer caso, visto que a aplicação aqui se dá em um caso hipotético. Algumas medidas que apresentam essas características não foram consideradas porque outras apresentam as mesmas características analíticas.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Após a parte introdutória, é apresentada, no capítulo 2 a fundamentação teórica sobre medidas de importância e métodos de tomada de decisão multicritério. Em seguida, no capítulo 3 encontra-se a revisão da literatura com trabalhos relacionados às medidas de importância em RRM e à aplicação de métodos MCDM. A metodologia da pesquisa está no capítulo 4, precedendo o framework do Modelo Proposto, apresentado no capítulo 5. No capítulo seguinte, são apresentados os Resultados e Discussões no capítulo 6. Logo após as Conclusões no capítulo 7.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção são abordados os principais conceitos necessários para construção do modelo multicritério de apoio a decisão no contexto da análise de criticidade dos componentes.

Primeiramente, são apresentadas as medidas de importância. Os critérios do modelo de decisão para a priorização de componentes críticos foram levantados na revisão da literatura, que são: confiabilidade, risco, disponibilidade e custo.

Cada medida de importância, dentro de um mesmo critério, é capaz de lidar com aspectos diferentes da performance do componente. Através da informação fornecida por cada medida, os scores individuais são agregados para a construção de uma única ordem de criticidade para todo o sistema. Para facilitar o entendimento da forma de cálculo de cada medida de importância, são apresentados exemplos numéricos no Anexo deste trabalho.

Por fim, é apresentada a caracterização do problema de tomada de decisão multicritério e do método que é utilizado nesse trabalho.

2.1 MEDIDAS DE IMPORTÂNCIA EM ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE

Engenharia de confiabilidade compreende todas as atividades realizadas para se alcançar a confiabilidade correta de um sistema, através de suas várias fases do ciclo de vida (AVEN, 2017). Confiabilidade é a capacidade do sistema desempenhar a função pretendida, sendo um atributo fundamental para uma operação segura de qualquer sistema tecnológico moderno (AVEN, 2017; ZIO, 2009).

Medidas de importância são amplamente utilizadas para identificar os componentes mais fracos de um sistema e para apoiar atividades de melhoria em engenharia de confiabilidade (DUI; SI; YAM, 2017).

O conceito de medida de importância foi primeiramente apresentado por Birnbaum (1968). Essa medida quantifica a contribuição da confiabilidade do componente sobre a confiabilidade do sistema (SI et al., 2012) e é constantemente utilizada na indústria para diferentes propósitos (BARALDI; COMPARE; ZIO, 2013). A partir de então, muitas outras medidas de importância ainda são amplamente utilizadas em análises de confiabilidade e segurança de um sistema (NOROOZIAN et al., 2018).

Tais medidas são utilizadas durante todo o ciclo de vida do sistema, para ajudar os gestores a identificar os pontos mais fracos do sistema, indicar modificações que aumentarão o desempenho do conjunto, minimizar os custos de manutenção e prolongar a vida do sistema

(DUI; SI; YAM, 2017; ESPIRITU; COIT; PRAKASH, 2007; GUPTA et al., 2013; NOURI QARAHASANLOU et al., 2017), através do ordenamento dos componentes, ou seja, um arranjo crescente ou decrescente de importância de acordo com a contribuição individual para o desempenho do sistema (BARABADY; KUMAR, 2007; BARALDI; COMPARE; ZIO, 2013; GAO; BARABADY; MARKESET, 2010; GUPTA et al., 2013).

Nokland e Aven (2013) argumentam que para várias situações na vida real a escolha das medidas de importância se dá basicamente entre quatro categorias de medidas: i) medidas que refletem mudanças no desempenho do sistema devido a pequenas mudanças no desempenho do componente; ii) medidas que refletem mudanças no desempenho do sistema devido a melhorias no desempenho do componente; iii) medidas que refletem mudanças no desempenho do sistema devido a grandes reduções no desempenho do componente e iv) medidas que relacionam as incertezas do desempenho do componente e as incertezas do desempenho do sistema.

Diferentes situações requerem diferentes medidas. Na fase de operação, medidas da categoria i) e iv) são as mais adequadas, na fase de projeto medidas da categoria ii) e iv) e para manutenção medidas da categoria iii) e iv) se sobressaem (NOKLAND; AVEN, 2013).

Van Der Borst e Schoonakker (2001) apresentam três diferentes situações onde é necessário a escolha das medidas mais adequadas: atividades de teste e manutenção, controle de configuração diário e (re)projeto de plantas de energia nuclear. Diante disso, Nokland e Aven (2013) propõem uma diretriz baseado na categorização das situações de decisão: projeto, operação e manutenção.

Dui, Si e Yam (2017) argumentam que através da utilização dessas medidas de importância na fase de projeto, os engenheiros podem entender como a falha de cada componente afeta a confiabilidade do sistema, para a partir daí alocar recursos para os componentes mais críticos na fase de operação e manter a confiabilidade do sistema a um certo nível. Já na fase de manutenção e controle diário, as medidas de importância auxiliam os engenheiros a minimizarem os custos de manutenção e prolongar a vida útil do sistema.

Compare, Bellora e Zio (2017) acrescentam que na fase de projeto os projetistas podem também comparar diferentes soluções, provar a robustez do sistema e reduzir o tempo gasto em atividades de melhorias.

Segundo Catelani, Ciani e Venzi (2016), o primeiro passo para realizar uma análise de medidas de importância é representar o sistema através de um diagrama de blocos de modo a conhecê-lo. O diagrama de blocos é uma técnica de cima para baixo baseada em um diagrama funcional de todos os componentes que constituem o conjunto e mostra como cada componente

contribui para falha ou funcionamento do sistema, com uma correspondência um-a-um entre eles e suas conexões com o resto do sistema. Os componentes que apresentam os maiores valores de importância são considerados como os mais críticos dentro do sistema.

Como citado anteriormente, existe um grande número dessas medidas, porém, as que são apresentadas e utilizadas nesse trabalho são aplicadas em sistemas binários (apresentam apenas dois estados possíveis: operando ou em falha) reparáveis (os reparos tornam os componentes tão bom quanto novo) (BARABADY; KUMAR, 2007; WU; COOLEN, 2013). Além disso, outras condições também precisam ser atendidas:

- O sistema é coerente, ou seja, a falha de um ou mais componentes não pode levar a uma melhoria no funcionamento;
- O comportamento do funcionamento de cada componente no sistema é mutualmente independente estatisticamente;
- Quando um componente está esperando para ser reparado, ele não envelhece nem se deteriora;
- Assume-se taxas e parâmetros constantes

A seguir, são apresentadas as medidas de importância utilizadas nesse trabalho. As medidas se dividem de acordo com o critério que avaliam. Portanto, serão divididas em medidas de confiabilidade, disponibilidade, risco e custo. Tais índices foram escolhidos devido ao seu caráter generalista, visto que o sistema apresentado aqui é um sistema hipotético. Vale salientar que as medidas apresentadas não são exaustivas, muitas outras medidas podem ser encontradas na literatura.

2.1.1 Medidas de importância de confiabilidade

Em especial, essa classe de medidas indica, de acordo com Daemi e Ebrahimi (2012), o potencial para aumento da confiabilidade que pode ser útil para estudos que focam em determinar quais componentes devem ser melhorados ou substituídos por um novo e mais confiável; possibilidades de eventos que levam aos piores casos e seleção de componentes para inspeção ou manutenção preventiva; e a sensibilidade da confiabilidade do sistema em relação à confiabilidade do componente que é valioso para o projeto de um sistema que seja robusto e não sensível a esses componentes.

Aqui são apresentadas três Medidas de Importância (MI): Birnbaum, Importância crítica, e Potencial de Melhoria

2.1.1.1 Medida de importância de BIRNBAUM

Birnbaum (1968) apresentou o primeiro conceito de medida de importância. Analiticamente, é definida na Equação 1 (ESPIRITU; COIT; PRAKASH, 2007).

$$I_i^B(t) = \frac{\partial R_s(t)}{\partial R_i(t)} = R_s(t; R_i(t) = 1) - R_s(t; R_i(t) = 0) \quad (1)$$

onde $I_i^B(t)$ é o índice de Birnbaum do componente i , $R_s(t)$ é a confiabilidade do sistema no tempo t , $R_i(t)$ é a confiabilidade do componente i no tempo t ; $R_s(t; R_i(t) = 0)$ é a confiabilidade do sistema no tempo t dado que o componente i está em estado de falha e $R_s(t; R_i(t) = 1)$ é a confiabilidade do sistema no tempo t dado que o componente está funcionando perfeitamente. O componente mais fraco é o mais importante (maior valor).

A medida de importância de Birnbaum representa a máxima perda na confiabilidade do sistema quando o componente i alterna da condição de perfeito funcionamento para uma condição de falha certa. Então, essa medida indica a criticidade do componente para o funcionamento do sistema de um ponto de vista estrutural (DAEMI; EBRAHIMI, 2012).

Daemi e Ebrahimi (2012) argumentam que um ponto fraco dessa medida é que ela não depende da confiabilidade ou da função acumulada de falha do componente i , nem considera os custos relacionados às falhas. Portanto, dois componentes podem apresentar valores iguais para a medida de Birnbaum, mesmo que apresentem níveis de confiabilidade diferentes.

Resumindo, para Cheok, Parry e Sherry (1998), a importância de Birnbaum (também chamada Importância de Confiabilidade) é completamente dependente da estrutura do sistema e é independente da probabilidade atual do evento básico.

2.1.1.2 Medida de importância crítica

A medida de importância crítica é relacionada à importância de Birnbaum. Entretanto, a probabilidade de falha do evento básico e o atual nível de risco também são considerados nessa medida de importância (CHEOK; PARRY; SHERRY, 1998).

Todos os componentes de uma estrutura em paralelo têm a mesma importância. A Importância Crítica inclui a função densidade acumulada do componente, ao contrário da medida de Birnbaum. Matematicamente, é expressa na equação 2 (ESPIRITU; COIT; PRAKASH, 2007):

$$I_i^{IC}(t) = I_i^B(t) \frac{F_i(t)}{F_s(t)} = R_s(t; R_i(t) = 1) - R_s(t; R_i(t) = 0) \frac{F_i(t)}{F_s(t)} \quad (2)$$

onde $F_i(t)$ é a função densidade acumulada de falhas do componente i no instante t e $F_s(t)$ é a função densidade acumulada do sistema no instante t .

2.1.1.3 Medida de importância potencial de melhoria

Potencial de melhoria (onde o valor 0 representa nenhuma melhoria) da reposição de um componente i , com confiabilidade $R_i(t)$, pelo componente em estado de plena confiabilidade sobre a confiabilidade do sistema. Esse índice é definido como na equação 3:

$$I_i^{PM}(t) = R_s(t, R_i(t) = 1) - R_s(R_i(t)) \quad (3)$$

onde I_i^{PM} é o índice Potencial de Melhoria do componente i no tempo t , $R_s(t)$ é a confiabilidade do sistema no instante t e $R_i(t)$ é a confiabilidade do componente i no instante t .

O índice Potencial de Melhoria define o quanto da confiabilidade do sistema aumentaria ao transformar um equipamento em um completamente confiável (CATELANI; CIANI; VENZI, 2016). Um ponto fraco desse índice de confiabilidade é que na verdade não é possível melhorar a confiabilidade do componente a 100% então a melhoria suposta não é fisicamente alcançável. Por essa razão uma nova medida de importância foi apresentada por Catelani, Ciani e Venzi (2016), o CIP, que resolve o problema descrito ao utilizar uma confiabilidade $R_i^+(t)$ que representa a confiabilidade correspondente ao estado da arte desse tipo de componente. A Tabela 1 sintetiza os conceitos de cada medida de confiabilidade.

Tabela 1 – Quadro resumo das MI's de Confiabilidade

Medida de Importância	Definição
$I_i^B(t)$	Representa a máxima perda na confiabilidade do sistema quando o componente i alterna da condição de perfeito funcionamento para uma condição de falha certa.
$I_i^{IC}(t)$	Mede a contribuição do componente i ter causado a falha do sistema, dado que o sistema está inoperante no tempo t .
$I_i^{PM}(t)$	Mede a diferença entre a confiabilidade do sistema com um componente perfeito e a confiabilidade do sistema com a confiabilidade atual do componente.

Fonte: O autor (2019).

2.1.2 Medidas de importância de risco

Nessa seção serão apresentadas duas medidas de importância que quantificam a importância de um componente sob a visão do risco (probabilidade de falha).

2.1.2.1 Risk Achievement Worth (RAW)

RAW é comumente utilizado para identificar a importância de um evento básico para o risco total do sistema. A importância de um evento básico é avaliada através da alteração de sua probabilidade normal até o valor extremo 0 (ALLA; PAHUJA; LATHER, 2014; CHEOK; PARRY; SHERRY, 1998).

Podendo ser medido em uma escala intervalar ou de razão, o RAW de um sistema ou componente também pode estar relacionado ao impacto da manutenção sobre o objeto em estudo. O impacto de manutenção quantifica o ganho de restaurar um componente falho (VESELY; DAVIS, 1985). Essa medida quantifica o aumento percentual máximo da probabilidade de falha de um sistema gerado por um componente particular (ESPIRITU; COIT; PRAKASH, 2007).

Objetos que possuem o maior RAW são de particular interesse para programas de gerenciamento de riscos, programas de qualidade e atividades de inspeção e pode ser medido através de um escala intervalar ou de razão (VESELY; DAVIS, 1985). O índice é expresso na equação 4:

$$I_i^{RAW}(t) = \frac{1 - R_s(t; R_i(t) = 0)}{1 - R_s(t)} \quad (4)$$

2.1.2.2 Risk Reduction Worth (RRW)

O RRW quantifica o ganho de um componente em reduzir mais o nível de risco. É naturalmente medido determinando a redução do nível de risco se o componente fosse otimizado ou perfeitamente confiável (VESELY; DAVIS, 1985).

O RRW fornece a razão do caso base em relação ao modelo com probabilidade de falha do evento básico i ajustada igual a 0 e representa o máximo decréscimo no risco devido à uma melhoria no componente associado ao evento básico. Essa medida é particularmente útil para identificar melhorias na confiabilidade de elementos que mais contribuem para redução do risco (CHEOK; PARRY; SHERRY, 1998). A equação 5 define essa medida:

$$I_i^{RRW}(t) = \frac{1 - R_s(t)}{1 - R_s(t; R_i(t) = 1)} \quad (5)$$

Para ambas as medidas, definir qual escala será utilizada depende da aplicação. A escala intervalar mede mudanças absolutas, então é útil para comparar ganhos entre diferentes plantas. A escala de razão mede mudanças relativas e é mais útil para avaliar objetos dentro de uma planta (VESELY; DAVIS, 1985).

Daemi e Ebrahimi (2012) ainda argumentam que o RRW é apropriado para substituir ou melhorar componentes para aumento da confiabilidade e RAW pode ser usado para inspeção e manutenção preventiva.

Essas medidas de importância de risco são relativamente medidas grosseiras de importância e geralmente apresentam as seguintes deficiências: medem mudanças no risco e na importância de eventos básicos apenas nos extremos (0,1) do intervalo definido de probabilidade e elas não consideram a incerteza nas probabilidades dos eventos (DAEMI; EBRAHIMI, 2012).

2.1.3 Medida de importância de disponibilidade

Em muitos casos é comum que a disponibilidade de um sistema esteja em níveis inadequados devido à muitas falhas e/ou muitos atrasos associados à manutenção (RICHARD CASSADY, 2004). Barabady e Kumar (2007) indicam que as medidas de importância de disponibilidade podem ser aplicadas para desenvolver uma estratégia para o aumento da disponibilidade e que seus valores dependem da configuração do sistema.

A disponibilidade de um subsistema/componente pode ser desenvolvida utilizando-se componentes de maior qualidade, componentes redundantes ou reduzindo as cargas operacionais e ambientais (NOURI QARAHASANLOU et al., 2017).

A medida de importância de disponibilidade é uma função do tempo, das características de falha e de reparo ou dos parâmetros MTBF e MTTR e da estrutura do sistema. Tal medida atribui um valor entre 0 e 1 para cada subsistema ou componente, sendo o valor 1 a maior importância. A medida de importância do componente i em um sistema de n componentes é dada pela equação 6 (BARABADY; KUMAR, 2007):

$$I_i^A(t) = \frac{\partial A_s(t)}{\partial A_i(t)} = A_s(t; A_i(t) = 1) - A_s(t; A_i(t) = 0) \quad (6)$$

De acordo com a equação 6, a disponibilidade do componente não interfere na medida de importância do componente. O componente com maior valor apresenta o maior efeito sobre a disponibilidade do sistema. Para esses componentes, os recursos devem ser priorizados em vista da maximização da melhoria.

2.1.4 Medida de importância de custo

As medidas de importância existentes preocupam-se pouco com os custos incorridos em manter sistemas binários e seus componentes dentro de um dado período de tempo (WU; COOLEN, 2013).

Gupta et al. (2013) observam que parte financeira desempenha papel vital e, conseqüentemente, uma medida de importância baseada na probabilidade e seus respectivos custos pode ser uma melhor escolha para determinar quais componentes tem maior importância para a alocação de recursos e melhoria da planta de produção.

No atual ambiente competitivo industrial, os custos operacionais e do sistema, bem como a necessidade de atender requisitos da operação, podem ser fatores decisivos para o sucesso organizacional (GAO; BARABADY; MARKESSET, 2010).

As medidas de importância escolhidas para essa classe são medidas simples, de fácil compreensão e que podem ser aplicadas a sistemas gerais, visto que para esse trabalho o sistema apresentado é um sistema genérico. As outras medidas de custo propostas na literatura serão melhor detalhadas na Revisão da Literatura, seção 3.

2.1.4.1 Potencial de melhoria baseado no custo

Uma medida de importância de custo utilizada nesse estudo será o Potencial de melhoria baseado no custo proposto por Wu e Coolen (2013). O índice Potencial de Melhoria apresenta a diferença entre a confiabilidade do sistema com um componente perfeito k , e a confiabilidade do sistema com o componente atual k , como expresso na equação (3)

Segundo Wu e Coolen (2013), uma possível extensão é incorporar os custos na medida citada, de acordo com a equação 8:

$$I_i^{PMBC}(t) = CR_s(t; R_i(t) = 1) - CR_s(t) \quad (8)$$

onde $CR_s(t; R_i(t) = 1)$ mostra o custo de manter o sistema quando a confiabilidade do componente k é aumentada para 1 e a confiabilidade dos componentes restantes permanecem a mesma, e $CR_s(t)$ significa o custo de manter o sistema quando a confiabilidade de todos os componentes permanecem a mesma. Em outras palavras a medida baseada no custo apresenta a diferença entre o custo de manter o sistema com um componente k perfeito e o custo de manutenção com o componente k atual. Portanto, como exceção à regra, o componente que apresenta o menor índice de importância é considerado o mais importante de acordo com o critério custo.

2.2 MÉTODOS DE APOIO À DECISÃO MULTICRITÉRIO

O objetivo desta seção é apresentar as características de um problema de decisão multicritério, como as problemáticas mais comuns - focando na problemática de ordenação e na racionalidade do decisor.

MCDM/A são abordagens que auxiliam os tomadores de decisão, mediante as ações viáveis, a avaliar e formar um conjunto de alternativas, para selecionar a melhor dentre elas, classificar em subconjunto ou ordenar os elementos do conjunto de acordo com os interesses particulares, obedecendo aos critérios estabelecidos (ALMOGHATHAWI et al., 2017).

Ahmadi e outros (2010) definem MCDM como métodos que lidam com análises conflitantes e fornecem um meio, através de uma ação, para se chegar a uma solução satisfatória em um processo transparente através da otimização que é o processo de determinação da melhor solução viável de acordo com os critérios estabelecidos.

2.2.1 Problemática do processo decisório e racionalidade do decisor

Roy (1996) apresenta quatro categorias de referência para as problemáticas existentes em um problema de decisão multicritério. O autor destaca que cada problema pode apresentar uma ou mais de uma dessas problemáticas.

- Problemática de escolha $P.\alpha$: auxilia o analista a escolher a melhor ação dentre o conjunto A ou a desenvolver um procedimento de escolha;
- Problemática de classificação $P.\beta$: auxilia o analista a dividir as ações do conjunto A em conjuntos menores baseado em normas ou a construir um procedimento de alocação;
- Problemática de ordenação $P.\gamma$: auxilia o analista a ordenar as ações do conjunto A em ordem decrescente de preferência ou a construir um procedimento de ordenação. Esta será a problemática utilizada neste trabalho, visto que o objetivo é obter uma relação de ordem de importância entre os componentes.
- Problemática de descrição $P.\delta$: auxilia o analista a descrever as ações do conjunto A e suas consequências em um método formal e sistemático ou a desenvolver um procedimento cognitivo.

Outra característica de um problema de decisão multicritério é a racionalidade do decisor em relação à maneira que a agregação dos critérios deve ser feita (DE ALMEIDA et al., 2015). Desse modo, os métodos podem ser divididos em compensatórios e não compensatórios (ROY,

1996). Sejam dois elementos x e y , a estrutura de preferências do decisor é não compensatória se a preferência entre os dois elementos depender apenas do subconjunto de critérios em favor de x e y . Para essa classe de métodos, não importa o nível de desempenho de x ou y em cada critério (DE ALMEIDA et al., 2015).

Para uma relação compensatória entre dois elementos, importa o nível de desempenho da alternativa para cada critério, onde cada valor individual será considerado no modelo de agregação para fornecer um score global da alternativa. Em outras palavras, para um método compensatório, a desvantagem de um critério pode ser compensada pela vantagem em outro critério (DE ALMEIDA et al., 2015).

Para modelagem do modelo de decisão, adota-se neste trabalho um decisor com racionalidade não-compensatória, visto que em geral, não há compensação entre o desempenho nos critérios no contexto onde as medidas de importância em RRM são aplicadas. Para isso, os métodos de sobreclassificação são indicados.

2.2.2 O método ELECTRE II

O método de análise multicritério utilizado neste trabalho pertence à família de métodos de sobreclassificação ELECTRE. Dentre eles, o método que mais se adequa ao problema de decisão em questão é o ELECTRE II, considerando que o objetivo do problema está na ordenação das alternativas e que existe uma racionalidade não compensatória entre os critérios. Além disso, ainda sobre a estrutura de preferência, considera-se que para uma alternativa ser preferível à outra é necessário que ela atenda aos critérios de concordância e discordância, de maneira que não se permita que duas alternativas possam se sobrepor. Tal requisito é suportado pela estruturação matemática do método ELECTRE II.

O ELECTRE II pertence ao grupo dos métodos de sobreclassificação, assim como todos os métodos da família ELECTRE (ROY, 1991). O ELECTRE II tem por objetivo, através da relação de sobreclassificação (fraca e forte), baseada no conceito de concordância e discordância, ordenar alternativas da melhor para a pior, considerando também os casos de indiferença entre elas (ARMAGHAN; RENAUD, 2012).

Uma relação de sobreclassificação é uma estrutura de preferências que considera quatro situações (ROY, 1996):

- Preferência forte: corresponde a existência de razões claras e contundentes que justificam preferência significativa em favor de uma ação em detrimento de outra;

- Preferência fraca: corresponde a existência de razões claras e contundentes que invalidam a preferência forte em favor de uma ação em detrimento de outra, mas que são insuficientes para deduzir preferência forte em favor de outra ação ou indiferença entre as duas ações;
- Indiferença: corresponde a existência de razões claras e contundentes que justificam a equivalência entre duas ações;
- Incomparabilidade: corresponde a uma ausência de razões que justifiquem qualquer uma das três relações anteriores.

O significado de “razões claras e contundentes” está relacionado ao conceito de concordância e discordância (FIGUEIRA et al., 2013), próprio dos métodos ELECTRE.

Os métodos ELECTRE apresentam duas fases (GOVINDAN; JEPSEN, 2016): agregação e exploração. Na primeira fase, através de um procedimento de agregação multicritério, os conceitos de concordância e discordância são utilizados para realizar comparações par a par das alternativas, de acordo com o desempenho de cada uma em cada critério. Na problemática de ordenação, as alternativas são comparadas entre si.

Para tomar como verdadeira a relação aSb , leia-se “a sobreclassifica b”, sendo a e b duas alternativas, é necessário a utilização de dois índices (ROY, 1991): o índice de concordância $C(a, b)$ e o índice de discordância $D(a, b)$. Nessa família de métodos, os pesos utilizados para a realização da avaliação inter-critério podem ser interpretados como grau de importância (DE ALMEIDA et al., 2015).

2.2.2.1 Avaliação intra-critério

O índice $C(a, b)$ é definido através do somatório dos pesos dos critérios em que a alternativa a é preferível a alternativa b , de acordo com a equação 9. Dessa forma, o índice de concordância $C(a, b)$ é um valor entre 0 e 1.

$$C(a, b) = \sum p_i; \forall_i / g_i(a) > g_i(b) \quad (9)$$

O método ELECTRE II apresenta dois limiares de concordância c^+ e c^- , entre 0 e 1, tal que $c^+ > c^-$, através dos quais são construídas as relações de sobreclassificação forte e fraca. Belton e Stewart (2002) argumentam que se faz necessário estabelecer os valores de c altos, mas não tão altos, para que sejam limiares úteis, caso contrário, a construção das relações de sobreclassificação será muito restritiva.

O índice de discordância $D(a, b)$ indica o grau de discordância em relação à afirmação aSb . Caso esse índice seja superior a um nível máximo tolerado, a afirmativa aSb deixa de ser

verdadeira. Por isso, $D(a, b)$ apresenta poder de veto em relação ao índice $C(a, b)$ (ROY, 1991). O índice de discordância é definido matematicamente de acordo com a equação 10 e também é um número compreendido entre 0 e 1:

$$\max \left[\frac{g_i(b) - g_i(a)}{\text{escala}_i} \right] \forall_i / g_i(b) > g_i(a) \quad (10)$$

sendo o denominador definido na equação 11:

$$\text{escala}_i = g_i(c) - g_i(d) \forall_i, c, d \quad (11)$$

Além disso, para se estabelecer as condições de discordância, são necessários a definição de dois limiares de discordância d^+ e d^- , entre 0 e 1, tal que $d^+ < d^-$. Belton e Stewart (2002) argumentam que se faz necessário estabelecer os valores de d baixos, mas não tão baixos, para que também sejam limiares úteis, que não restrinjam a comparação par a par a um nível alto.

Os valores de c e d são escolhidos de acordo com o julgamento do analista. Também é necessário adicionar a restrição $C(a, b) \geq C(b, a)$, evitando assim sobreclassificação mútua entre as alternativas a e b (BELTON; STEWART, 2002).

2.2.2.2 Avaliação inter-critérios

Para a realização da avaliação inter-critérios em métodos de sobreclassificação é utilizado o conceito de “poder de voto”, que atribui o maior valor ao critério que apresenta a maior importância relativa dentro do conjunto de critérios (BELTON; STEWART, 2002). Dentre os um dos métodos utilizados para essa avaliação, existe o método *ROC – Rank Ordered Centroid* (BARRON; BARRETT, 1996; HUTTON BARRON, 1992). Uma vez que existe apenas a informação acerca da ordem de importância de cada critério, definida pelo decisor, o ROC se utiliza do cálculo do centroide para definir os valores dos pesos.

Sendo w_i o peso relativo a cada critério i , considerando n critérios e que $w_1 > w_2 > w_3 > w_4 > \dots > w_n$, a expressão utilizada para calcular o peso w de cada critério i é dada pela equação 12:

$$w_i = 1/n \sum_{j=i}^n 1/j \quad (12)$$

Apesar da simplicidade do método ROC, Belton e Stewart (2002) argumentam que o método define valores que apresentam um intervalo relativamente grande entre um critério e o seu próximo sucessor menos importante. Diferença essa que por vezes não diz respeito à realidade estudada.

2.2.2.3 Relações de sobreclassificação

Por fim, para se estabelecer as relações de sobreclassificação forte ($aS^F b$) e fraca ($aS^f b$), o procedimento a seguir é utilizado, considerando que Σp_i , onde $i: g_i(a) \geq g_i(b)$, seja maior que Σp_i , onde $i: g_i(a) \leq g_i(b)$:

$$aS^F b \text{ se } \rightarrow C(a, b) \geq c^+, D(a, b) \leq d^+ \text{ e } C(a, b) \geq C(b, a)$$

$$aS^f b \text{ se } \rightarrow C(a, b) \geq c^-, D(a, b) \leq d^- \text{ e } C(a, b) \geq C(b, a)$$

A segunda fase consiste em um procedimento de exploração específico para o método ELECTRE em questão. Esse procedimento é utilizado para explorar as relações de sobreclassificação previamente construídas pelo procedimento de agregação e objetiva construir e apresentar os resultados esperados de acordo com a problemática dada (FIGUEIRA et al., 2013).

Para o ELECTRE II, o procedimento de exploração consiste na construção de duas ordens: o primeiro, iniciando da melhor alternativa até a pior em uma ordem decrescente e, o segundo, começando com a pior, seguindo uma ordem ascendente (BELTON; STEWART, 2002).

1. Definir o conjunto A de alternativas;
2. Determinar o conjunto F de A composto pelas alternativas que não são fortemente sobre classificadas por nenhuma outra;
3. Determinar o conjunto F' referente às alternativas que não são fracamente sobre classificadas por nenhum outro membro de F ;
4. Deletar as alternativas de F' e repetir o procedimento do passo 2, até que todas as alternativas sejam classificadas, gerando assim a ordem decedente.
5. Determinar o conjunto G de A das alternativas que não sobre classificam nenhuma outra;
6. Dentro de G , determinar o conjunto G' de alternativas que não sobreclassificam fracamente nenhuma outra;
7. Deletar as alternativas de G' , e repetir o procedimento do passo 5, até que todas as alternativas sejam classificadas, gerando assim, a ordem ascendente.

Após isso, as duas ordens precisam ser comparadas. Diferenças significantes entre elas apontam para alternativas discrepantes. A interseção das duas ordens, conhecida como “ordem mediana” ou “ordem final” é um método usual para a construção de um ordenamento único final. (BELTON; STEWART, 2002).

Uma vez apresentados, nesta seção, os conceitos necessários para a construção do modelo multicritério, são apresentados na sequência, os trabalhos encontrados na literatura acerca do tema em que esta pesquisa se enquadra. Também é realizado o posicionamento da pesquisa diante de outros trabalhos que abordam a mesma problemática.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Esta seção trata do contexto em que as medidas de importância são utilizadas, bem como a contribuição de cada estudo ao tema. Por fim, é apresentado um artigo que apresenta a união entre os dois conceitos e, partir daí, é realizado o posicionamento do presente trabalho. É importante destacar que esta seção não exaure todas as medidas de importância em RRM, dado que muitas são as propostas de aperfeiçoamento e criação de novas medidas. As medidas aqui referenciadas foram escolhidas por apresentarem maior grau de coerência com a proposta do trabalho.

3.1 CONTEXTO E APLICAÇÕES

Os setores em que essas medidas são utilizadas variam bastante: sistemas de transmissão elétricos (ESPIRITU; COIT; PRAKASH, 2007; SHAYESTEH; HILBER, 2016), sistemas de energia nuclear (DAEMI; EBRAHIMI, 2012; VAN DER BORST; SCHOONAKKER, 2001), sistema de distribuição de água (BARALDI; COMPARE; ZIO, 2013), sistema de óleo e gás (GAO; BARABADY; MARKESET, 2010), projetos de construção civil (ALJASSMI; HAN, 2013), subestação de sistemas de automação (ALLA; PAHUJA; LATHER, 2014), extração mineral (GUPTA et al., 2013; NOURI QARAHASANLOU et al., 2017).

No trabalho de Espiritu; Coit e Prakash (2007) medidas como Birnbaum, Criticidade RAW, RRW e Fussell-Vesely foram adaptadas para o caso de um Sistema de transmissão de eletricidade (STE), porque, segundo O autor, as medidas propostas na literatura não podem ser aplicadas diretamente a tais sistemas visto que existe um período de tempo definido para o sistema, ao contrário de um STE que não possui um tempo de vida definido. Além disso, para um STE, a confiabilidade do componente e do Sistema são expressas em termos das taxas de indisponibilidade e não das probabilidades de falha.

Alla, Pahuja e Lather (2014) propõe duas medidas de importância (Potencial de melhoria e *Advanced RAW*) para ordenar os componentes de uma subestação do sistema de automação. *Advanced RAW* é proposto em termos da medida de Birnbaum.

Apesar de ter sido criado no contexto da confiabilidade, o conceito de medidas de importância estendeu-se para análises em outros campos, como risco, disponibilidade e custo. Muitas dessas novas medidas são baseadas nos conceitos originais das medidas de confiabilidade.

Como exemplo, a medida desenvolvida por Barabady e Kumar (2007), derivada da Medida de Birnbaum, mostra o efeito da disponibilidade do subsistema ou componente i sobre a disponibilidade do sistema completo. O subsistema ou componente com maior valor de importância possui o maior efeito sobre a disponibilidade do sistema. O autor também define medidas de importância baseadas na taxa de falha e na taxa de reparo.

Cassady (2004) apresentaram um conjunto de medidas de disponibilidade e foi aplicado a uma classe geral de sistemas binários reparáveis, durante a fase de projeto e de operação. Em geral, mostrou-se que o foco em reduzir a ocorrência de falhas do sistema proporciona maiores benefícios do que aumentar a velocidade de reparo do equipamento.

A medida de importância de disponibilidade apresentada no artigo de Nouri Qarahasanlou *et al.* (2017) inclui a confiabilidade e a manutenibilidade em um certo intervalo de tempo baseado nas condições ambientais em que atuam os equipamentos da mina. O autor considera as condições ambientais as quais os equipamentos são operados, como temperatura, umidade, poeira, como fatores que exercem grande influência sobre a confiabilidade / manutenibilidade do equipamento. Dessa forma, esses fatores foram representados por covariáveis.

O modelo de Gao e Markeset (2010) apresenta uma nova medida de importância de custo. Esse índice considera tanto os custos fixos das falhas quanto os custos variáveis. Esse artigo propõe uma medida de importância de custo que considera as informações de confiabilidade e manutenibilidade do sistema.

A proposta do trabalho de Gupta *et al.* (2013) é uma medida de importância de custo para ordenar os eventos básicos visando construir uma lista de preferências para inspeção, manutenção e reparo de componentes da planta.

Zhang, Huo e Kezunovic (2007) propõe uma nova medida de importância de custo para sistemas de proteção digital, que considera a localização do componente no sistema, a taxa de falha do componente em questão, o custo de aumentar a confiabilidade do componente e a perda causada pelas falhas operacionais do sistema de proteção.

Dui, Si e Yam (2017) apresentam em seu artigo uma medida de importância para o custo, que considera o tempo e o custo da manutenção.

Essas medidas de custo apresentadas até então, foram propostas para sistemas muito específicos. Wu e Coolen (2013) propõe o Potencial de Melhoria Baseado no custo, que é a diferença entre o custo de manutenção com um componente perfeito e o custo de manutenção com o mesmo componente no estado atual.

Catelani et al. (2017) apresentam o Potencial de Melhoria Credível Baseado no Custo, que propõe uma relação entre um fator k , relativo ao custo, e o Potencial de Melhoria Credível. Ambos os trabalhos realizam a aplicação dos seus respectivos índices, comparando os componentes dentro do sistema de acordo com sua importância relativa. Essas duas medidas serão utilizadas no presente trabalho como Medidas de Importância de Custo.

No cálculo das medidas de importância, é assumido que os valores dos parâmetros são perfeitamente conhecidos. Entretanto, imprecisões desses valores são tipicamente encontradas em aplicações práticas. Por isso, Baraldi, Compare e Zio (2013) propõem um modelo para quantificar o efeito de incertezas epistêmicas nas medidas de importância e evitar vieses nas informações.

Daemi, Ebrahimi (2012) apresentam um modelo de Rede Bayesianas para propor um modelo de cálculo das medidas de importância em um sistema de transmissão de energia, justificando que, apesar da técnica de simulação de Monte Carlo ser bastante utilizada para o cálculo de medidas de importância em sistemas complexos, ela necessita de muito tempo e esforço computacional, pois precisa calcular várias vezes diferentes medidas para cada componente.

Noroozian et al. (2019) também utilizam redes Bayesianas para um caso de tomada de decisão sob risco. O autor argumenta que o uso da árvore de falha, para casos de sistemas que apresentam relações complexas entre os componentes, precisa ser combinado com outros métodos, como, por exemplo, lógica fuzzy, para modelar a incerteza.

Os trabalhos de Kuo e Zhu (2012) e de Nokland e Aven (2013) analisaram as relações entre as diferentes medidas de importância. Embora forneçam bases para justificar as diferenças entre as ordens fornecidas, estes trabalhos não fornecem uma abordagem formal para a tomada de decisão.

3.2 POSICIONAMENTO DA PESQUISA

O artigo de Compare, Bellora e Zio (2017) apresenta uma agregação de ordens baseado nas medidas de importância do componente, para auxiliar o decisor a definir ações nas fases de projeto e manutenção. No referido trabalho, métodos de agregação de ordens são utilizados, como o Método de Borda e o de Condocert, para construir uma só ordem absoluta agregando os diferentes desempenhos das medidas de importância. Também é realizada uma comparação com uma abordagem MCDM, onde as medidas de importância são definidas como funções objetivo a serem maximizadas e o conjunto de Pareto com valores não dominados é encontrado.

Almoghathawi et al. (2017) formulam um modelo de tomada de decisão multicritério para medidas de importância de redes de infraestrutura. O autor considera seis medidas de importância – o que resulta em diferentes informações acerca da rede - e a partir do score produzido por cada uma é utilizado o método TOPSIS para realizar a agregação desses valores a fim de que seja construído um único ordenamento para toda a rede. O autor ainda utiliza os métodos PROMETHEE II e o Coperland Score para comparar os resultados fornecidos pelo TOPSIS. O PROMETHEE II foi utilizado para obter uma ordem completa das alternativas e foi adotado uma função de preferência linear em formato de V.

Percebe-se a ausência de trabalhos que relacionem as preferências do decisor com a construção de uma ordem global para o sistema, considerando as medidas de importância em RRM existentes na literatura. Lacuna essa que o presente trabalho visa preencher, considerando os diversos scores fornecidos por esses índices.

Além disso, vê-se que a maioria das pesquisas que abordam o conceito de medidas de importância utilizam apenas um critério de desempenho para o sistema. E as poucas pesquisas que estudam o sistema sob um ponto de vista multicritério não consideram a presença do decisor e nem a construção de uma ordem única para todo o sistema. Sabendo que um sistema opera sob os mais diversos critérios de desempenho, uma abordagem multicritério é mais adequada e menos simplista.

Vale destacar que todas as medidas de importância apresentadas nessa seção são aplicáveis somente para casos onde o sistema é coerente e binário. Dado a tendência crescente da utilização de modelos complexos, outras medidas de importância foram propostas para sistemas não coerentes, sistemas multiestados, sistemas contínuos e sistemas reparáveis (WAY KUO; XIAOYAN ZHU, 2012).

Este trabalho se distingue do trabalho de Almoghathawi et al. (2017) na proposta de utilizar as medidas de importância para análise de risco e confiabilidade (RRM) associadas ao método multicritério ELECTRE II. Com a utilização do ELECTRE II, o índice de discordância funciona como veto ao índice de concordância evitando assim que haja sobreposição mútua de duas alternativas.

Considerar-se-á também no presente trabalho, a análise de risco e confiabilidade em diferentes cenários, assim como em Nokland e Aven (2013), o que significa que para cada cenário os critérios possuirão diferentes pesos. A Tabela 2 descreve os referidos cenários. Em cada cenário considerado, cada critério apresenta uma ordem de importância (peso) diferente dos demais.

Tabela 2 - Relação entre as fases do sistema e as MI's

Decisão	Medida de importância tradicional
a) Projeto	Ordenamento de acordo com medidas que refletem mudanças no desempenho do sistema devido a Grandes (máxima) melhorias no desempenho do componente. - Medidas de importâncias correlacionadas: Potencial de melhoria e RRW
b) Operação	Ordenamento de acordo com medidas que refletem mudanças no desempenho do sistema devido a Pequenas mudanças no desempenho do componente. - Medidas de importância correlacionadas: Birnbaum e RAW
c) Manutenção	Ordenamento de acordo com medidas que refletem mudanças no desempenho do sistema devido a Grandes (máxima) reduções no desempenho do componente. - Medidas de importâncias correlacionadas: Importância crítica e RAW

Fonte: NOKLAND & AVEN, 2013.

- Projeto (otimização da configuração): nessa fase existe um alto nível de liberdade para configurar e reconfigurar o sistema, porque o sistema, que ainda não foi construído, se encontra no estágio inicial do planejamento. Apesar da prática industrial fornecer recomendações estruturadas, nessa fase é muito mais fácil remover ou adicionar componentes do que em outras fases do projeto (NOKLAND; AVEN, 2013).
- Operação (redução do risco): o sistema nessa fase se encontra em operação, ou seja, todos os componentes estão localizados no sistema e as opções de reconfiguração são limitadas. O principal objetivo é a implementação de medidas capazes de reduzir o risco total do sistema (NOKLAND; AVEN, 2013).
- Manutenção (consequência da falha): o foco nessa fase está na maneira como falhas potenciais ou quebras repentinas podem afetar a confiabilidade do sistema. O interesse está em planejar diferentes atividades de manutenção de acordo com a criticidade do componente (NOKLAND; AVEN, 2013).

Nokland e Aven (2013) mostram que os resultados apresentados por medidas que pertencem à mesma classe são iguais e que de um ponto de vista prático é suficiente considerar apenas uma de cada categoria. As diretrizes propostas pelo autor não prescrevem qual medida usar visto que diferentes analistas possuem diferentes preferências. As medidas Fussel-Vesely e Birnbaum apresentam os mesmos resultados; bem como importância crítica e potencial de melhoria.

Vale destacar que a diretriz proposta considera apenas medidas de confiabilidade e risco, por serem as mais populares e possuírem aplicações mais vastas na literatura. No presente trabalho, um exemplo de medida de disponibilidade e custo será utilizada para incorporar

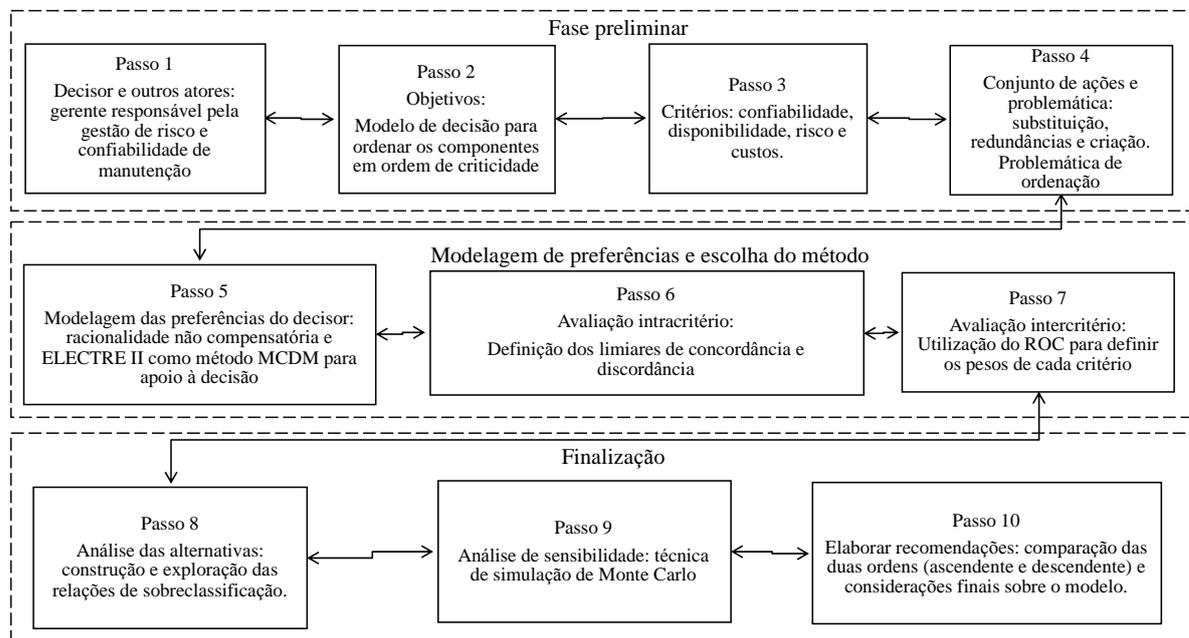
informações mais amplas sobre o sistema em análise. Dessa forma, obtém-se uma diretriz adaptada que é utilizada como suporte a problemática apresentada por este trabalho.

Sendo assim, feito o posicionamento da pesquisa e apresentados os fundamentos necessários para a construção do modelo, a próxima seção apresenta a construção e aplicação do modelo, assim como as análises de sensibilidade realizadas para a verificação da consistência da modelagem.

4 MODELO PROPOSTO

Nesta seção, é discutida cada etapa do modelo proposto por este trabalho. O presente modelo se baseia no framework de tomada de decisão apresentado por De Almeida et al. (2015), dividindo-se em três principais estágios: fase preliminar, modelagem de preferências e escolha do método e finalização. A Figura 2 apresenta o framework proposto desta pesquisa.

Figura 2- Framework do modelo de decisão



Fonte: O autor, 2019.

Nota: Adaptado de De Almeida et al. (2015).

Vale destacar que esses estágios seguem um processo iterativo e recursivo, permitindo ao decisor voltar a uma fase precedente sempre que necessário. A subseção a seguir detalha os passos para a construção do modelo, baseado no framework proposto por De Almeida et al. (2015).

4.1 FASE PRELIMINAR

O primeiro passo dessa fase é definir o decisor e outros atores. Essa fase tem por objetivo descrever e tipificar o decisor e os outros atores do processo decisório. Para o presente caso, o

decisor é o gerente responsável que tem por objetivo alcançar a eficiência de um sistema em análise.

Na sequência, é necessário definir os objetivos do problema de decisão multicritério. É o passo mais importante de todo processo, pois influencia todas as etapas subsequentes (DE ALMEIDA et al., 2015). O objetivo do presente trabalho é a priorização de esforços para componentes críticos através da construção de uma ordem de criticidade, de acordo com os cenários construídos, considerando-se as necessidades específicas de cada cenário.

Na terceira etapa é necessário a definição dos critérios/atributos. A ligação entre essa etapa e a etapa anterior (definição dos objetivos) é essencial para a representação dos objetivos no modelo de decisão completo (DE ALMEIDA et al., 2015). Os atributos aqui escolhidos serão: confiabilidade, disponibilidade, risco e custo. Cada um desses atributos possui diferentes graus de importância para o decisor, de acordo com o cenário considerado. Tais critérios são representados pelas medidas de importância.

O quarto passo se refere à definição do conjunto de ações para solucionar o problema de decisão e da problemática que caracteriza o processo (DE ALMEIDA et al., 2015). A problemática de ordenação define o problema de priorização de componentes considerado nesse estudo. Como conjunto de ações, considera-se a intervenção necessária (substituição, criação de redundâncias stand-by ou reparos) para aumentar a eficiência do componente crítico e consequentemente a eficiência do sistema.

No framework apresentado por De Almeida et al. (2015) é apresentada a etapa de definição dos estados da natureza, que significa o conjunto de fatores que não está sob o controle do decisor e que influenciam os resultados do processo. Porém, para efeitos de simplificação, neste trabalho não se considera a existência desses fatores aleatórios.

4.2 MODELAGEM DE PREFERÊNCIAS E ESCOLHA DO MÉTODO

A modelagem de preferências do decisor inclui a definição da problemática e a escolha do método a ser utilizado a depender do objetivo que se deseja alcançar.

A racionalidade não-compensatória se adequa à proposta do estudo, visto que, para que haja a otimização do desempenho do sistema, todos os componentes devem operar a níveis satisfatórios em todos os aspectos considerados.

Tal racionalidade é própria dos métodos de sobreclassificação, os quais apresentam os métodos da família ELECTRE como um dos mais utilizados. Visto que, neste trabalho, a problemática de ordenação é a que caracteriza o problema de decisão, o método ELECTRE II

é o mais apropriado. Esse método também é utilizado para que não haja sobreclassificação mútua de alternativas, como pode acontecer em outros métodos de ordenação, como o PROMETHEE II, por exemplo.

Escolhido o método, faz-se necessário realizar a avaliação inter-critérios e a avaliação intra-critério. A avaliação intra-critério diz respeito à comparação par-a-par das alternativas dentro de um mesmo critério, enquanto a avaliação inter-critérios caracteriza a importância (peso) dada a cada atributo.

A avaliação inter-critérios será realizada através do método *Rank Ordered Centroid* (ROC). Cada critério possuirá uma importância relativa diferente, de acordo com o estágio considerado. A Tabela 3 apresenta a ordem de importância calculada para cada critério através do método ROC. Utilizando a equação 12, com $n = 4$, obtém-se os seguintes pesos:

Tabela 3 - Pesos de cada critério, calculados através do ROC

Decisão	Pesos dos critérios
a) Projeto	1°. Confiabilidade: 0,5208 2°. Risco: 0,2708 3°. Disponibilidade: 0,1458 4°. Custo: 0,0625
b) Operação	1°. Custo: 0,5208 2°. Risco: 0,2708 3°. Confiabilidade: 0,1458 4°. Disponibilidade: 0,0625
c) Manutenção	1°. Risco: 0,5208 2°. Confiabilidade: 0,2708 3°. Disponibilidade: 0,1458 4°. Custo: 0,0625

Fonte: O autor (2019).

Para finalizar, na etapa da avaliação intra-critério, seguindo a recomendação de Belton e Stewart (2002), é necessário definir os limiares de concordância, que devem ser altos, mas não tão altos e os limiares de discordância, que devem ser baixos, mas não tão baixos. A Tabela 4 apresenta os limiares escolhidos para o modelo.

Tabela 4- Limiares de concordância e discordância

Índice	Valor
c^+	0,7
c^-	0,4
d^-	0,6
d^+	0,3

Fonte: O autor (2019).

Tais valores, definidos subjetivamente, representam uma abordagem moderada em relação à restritividade das relações de sobreclassificação entre duas alternativas. A análise de sensibilidade, realizada através da técnica de Monte Carlo, auxiliará na avaliação de como alterações nos valores dos limiares influenciam na ordem final.

4.3 FINALIZAÇÃO

Diante da informação dada pelos índices de concordância e discordância, é realizada a avaliação das alternativas através da construção das relações de sobreclassificação. O método ELECTRE II fornece duas ordens: a ascendente (da pior para a melhor) e o descendente (da melhor para a pior). De posse dessas duas ordens, o decisor pode avaliar e escolher as alternativas mais críticas. Desde que não existam grandes discrepâncias, as duas ordens podem ser unificadas.

A análise de sensibilidade é conduzida aqui através da técnica de simulação de Monte Carlo. A simulação foi realizada no software Microsoft Excel (2013), que utiliza uma distribuição uniforme para a simulação dos valores. O intervalo adotado para os critérios confiabilidade, risco e disponibilidade foi de 0,5 a 1, pois representam valores verossímeis para a representação razoável dos níveis de desempenho da maioria dos sistemas no mundo real. O critério custo variou entre 1500 e 5000 unidades monetárias.

Os valores simulados são incluídos nos parâmetros de entrada do modelo. Através de 10.000 simulações, a frequência relativa dos componentes em cada posição possibilitará a inferência acerca da criticidade dos componentes mediante a configuração do sistema. A análise de sensibilidade fornece as recomendações finais para o decisor.

5 APLICAÇÃO NUMÉRICA

Nesta seção, são apresentadas as características do sistema escolhido bem como os resultados da modelagem realizada. Para cada critério, os resultados são apresentados individualmente. Por último, com a aplicação do método ELECTRE II, é construído um ordenamento final dos componentes mais críticos.

5.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O sistema aqui utilizado para a avaliação do modelo foi baseado do artigo de Nokland e Aven (2013): um tanque que funciona como buffer para o transporte de fluidos da fonte ao consumidor. O consumo do fluido é contínuo, não-constante e o nível do líquido varia. O sistema de controle consiste em três válvulas (V1, V2 e V3) e dois sensores (interruptor de nível alto (INA) e interruptor de nível alto-alto (INAA)).

Quando o líquido no tanque atinge uma altura específica então o INA é ativado e envia um sinal de fechamento para a válvula 1. Se o mecanismo não funcionar e o nível do líquido continua a aumentar até chegar a um nível anormalmente alto, então o sensor INAA será ativado e enviará um sinal de fechamento para a válvula 2. Ao mesmo tempo, o INAA envia um sinal de abertura à válvula V3 para então o fluido escoar. O sistema de escoamento possui vazão maior que o sistema de abastecimento.

O diagrama de blocos (Figura 3) representa o sistema, onde os componentes 1, 2 e 3 correspondem às válvulas 1, 2 e 3 respectivamente e os componentes 4 e 5 correspondem aos sensores INA e INAA, respectivamente.

Nesse contexto, a confiabilidade dos componentes é um parâmetro importante a ser considerado visando garantir níveis adequados de fluido no tanque para que a capacidade máxima não seja excedida nem para que o abastecimento seja interrompido, devido à falha de algum componente.

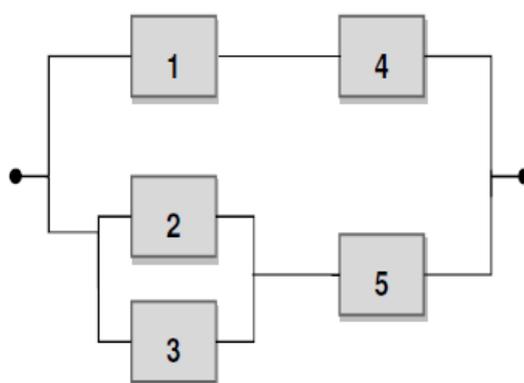
O risco do sistema se caracteriza na associação entre probabilidade e consequências possíveis relacionadas *i*) ao transbordamento do líquido (inundamento, danos ecológicos, danos materiais, danos aos operadores do sistema) ou *ii*) à interrupção do abastecimento devido à falta de líquido no tanque (demanda não atendida). Dessa forma, o risco é outro critério importante a ser considerado na análise desse sistema.

Níveis adequados de disponibilidade garantem que o sistema estará funcionando quando for requisitado. O que significa dizer que quando houver demanda do consumidor pelo fluido

dentro do tanque o sistema será capaz de suprir no mesmo instante. Da mesma maneira, quando for necessário controlar o alto nível de fluido os mecanismos estarão disponíveis para conter o avanço do nível evitando transbordamento. Assim sendo, o critério disponibilidade também é outro parâmetro essencial para esse estudo.

Os custos do sistema devido ao transbordamento estão relacionados, por exemplo, ao volume de fluido desperdiçado e aos danos materiais, humanos e ambientais que possam acontecer. A falta de líquido no tanque acarreta em custos devido à insatisfação dos consumidores que não foram atendidos, por exemplo. Por fim, de uma maneira geral, ainda existe os custos relacionados à manutenção dos componentes defeituosos. Dessa maneira, os custos do sistema é outro parâmetro indispensável para a análise de operação.

Figura 3 - Sistema utilizado para validação do modelo.



Fonte: Nokland e Aven (2013).

A Tabela 5 apresenta os valores dos parâmetros do sistema que serão utilizados para o cálculo das medidas de importância. Os valores de confiabilidade e risco são os mesmos utilizados por Nokland, Aven (2013). Os valores de disponibilidade e custos foram estimados a partir do julgamento do autor deste trabalho.

Tabela 5 - Parâmetros de desempenho do sistema

Componente	Confiabilidade	Risco	Disponibilidade	Custo
1	0,90	0,1	0,99	2500
2	0,95	0,05	0,9	2300
3	0,95	0,05	0,92	3200
4	0,99	0,01	0,95	2500
5	0,99	0,01	0,88	3000
Sistema	0,9986	0,0014	0,9924	1500

Fonte: O autor (2019).

A aplicação das medidas de importância e posterior análise de criticidade de cada componente serão realizadas em três estágios diferentes do sistema. Cada estágio apresenta diferentes preferências do decisor.

5.2 PROJETO

Os resultados da Tabela 6 mostram a importância de cada componente, em cada critério, de acordo com a fase de projeto. As medidas de disponibilidade e custo utilizadas foram as mesmas para todas as fases. As medidas de confiabilidade e risco variam de acordo com as definições feitas anteriormente: para esse cenário foram utilizadas Potencial de Melhoria e RRW.

Tabela 6 - Resultados fornecidos pelas MI's na fase de projeto

Componente	I^{PM}	I^{RRW}	I^A	I^{PMBC}
	Eq. (3)	Eq. (5)	Eq. (6)	Eq. (8)
1	0,0011	1,1900	0,1207	1000
2	0,0008	1,1350	0,0042	800
3	0,0008	1,1350	0,0052	1700
4	0,0056	5,9500	0,1258	1000
5	0,0059	7,5667	0,0590	1500

Fonte: O autor (2019).

A Tabela 7 mostra os resultados referentes ao índice de concordância; e a Tabela 8, ao índice de discordância de uma alternativa (coluna) em relação à outra (linha).

Tabela 7 - Índice de concordância para a fase de projeto

	C1	C2	C3	C4	C5
C1	-	0	0,0625	0,1458	0,0625
C2	0,9999	-	0,2083	0,2083	0,9999
C3	0,9374	0	-	0,1458	0,9374
C4	0,7916	0,7916	0,8541	-	0,8541
C5	0,9374	0	0,0625	0,1458	-

Fonte: O autor (2019).

Tabela 8 - Índice de discordância para a fase de projeto

	C1	C2	C3	C4	C5
C1	-	0,9839	0,9839	1,0000	0,6024
C2	0,0000	-	0	0,1403	0,0000
C3	0,7778	1	-	0,7778	0,2222
C4	0,0418	1	0,9914	-	0,5490
C5	0,5556	0,7778	0,7281	0,8684	-

Fonte: O autor (2019).

A partir dos índices de concordância e discordância são construídas as relações de sobreclassificação, mostradas na Tabela 9, que fornecem a ordem de prioridade de cada componente dentro do sistema.

Tabela 9 - Relações de sobreclassificação para a fase de projeto

	C1	C2	C3	C4	C5
C1	-	-	-	-	-
C2	S.Forte	-	-	-	S.Forte
C3	-	-	-	-	S.Forte
C4	S.Forte	-	-	-	S.Fraca
C5	S.Fraca	-	-	-	-

Fonte: O autor (2019).

Realizada a exploração dessas relações, as duas ordens fornecidas, ascendente e descendente, convergem para o mesmo resultado: componente 1 como o mais crítico, seguido do componente 5. Os componentes 2, 3 e 4 apresentam uma relação de indiferença entre si. Os espaços preenchidos com um hífen indicam que não existe relação de sobreclassificação, ou seja, a alternativa *a* não sobreclassifica nem fracamente nem fortemente a alternativa *b*.

5.3 OPERAÇÃO

Os resultados da Tabela 10 mostram a importância de cada componente, em cada critério, de acordo com a fase de operação. Para esse cenário, as medidas de confiabilidade e risco utilizadas foram Birnbaum e RAW, respectivamente.

Tabela 10 - Resultados fornecidos pelas MI's na fase de operação

Componente	I^B Eq. (1)	I^{RAW} Eq. (4)	I^A Eq. (6)	I^{PMBC} Eq. (8)
1	0,1078	16,8067	0,1207	1000
2	0,0054	1,6740	0,0042	800
3	0,0080	2,0705	0,0052	1700
4	0,1124	16,8067	0,1258	1000
5	0,0586	8,8106	0,0590	1500

Fonte: O autor (2019)

A Tabela 11 mostra os resultados referentes ao índice de concordância; e a Tabela 12, ao índice de discordância de uma alternativa em relação à outra.

Tabela 11 - Índice de concordância para a fase de operação

	C1	C2	C3	C4	C5
C1	-	0	0,5208	0,0625	0,9374
C2	0,9999	-	0,5833	0,9999	0,9999
C3	0,4791	0	-	0,4791	0,4791
C4	0,1458	0	0,5208	-	0,9374
C5	0,0625	0	0,5208	0,0625	-

Fonte: O autor (2019).

Tabela 12 - Índice de discordância para a fase de operação

	C1	C2	C3	C4	C5
C1	-	0,9582	0,9496	0,0109	0,5072
C2	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000
C3	0,7778	1,0000	-	0,7778	0,2222
C4	0,0418	1,0000	0,9914	-	0,5490
C5	0,9416	1,0000	1,0000	0,9436	-

Fonte: O autor (2019.)

A partir dos índices de concordância e discordância são construídas as relações de sobreclassificação, mostradas na Tabela 13, que fornecem a ordem de prioridade de cada componente.

Tabela 13 - Relações de sobreclassificação para a fase de operação

	C1	C2	C3	C4	C5
C1	-	-	-	-	S.Fraca
C2	S.Forte	-	S.Fraca	S.Forte	S.Forte
C3	-	-	-	-	S.Fraca
C4	-	-	-	-	S.Fraca
C5	-	-	-	-	-

Fonte: O autor (2019).

As ordens ascendente e descendente, construídas após a exploração das relações de sobreclassificação, apontam para dois resultados levemente diferentes: a descendente define o componente 5 como o mais crítico; empatados na segunda posição os componentes 4, 1 e 3 e, menos importante, o componente 2. A ascendente define o componente 2 como o menos importante; seguido do componente 3; os componentes 1 e 4 aparecem junto com o componente 5, na posição de componentes mais críticos.

A intersecção das duas ordens leva à definição do componente 5 como o mais importante, seguido dos componentes 1, 3 e 4, que vem na segunda posição. E por fim, o componente 2.

5.4 MANUTENÇÃO

Os resultados da Tabela 14 mostram a importância de cada componente, em cada critério, de acordo com a fase de manutenção. As medidas Importância Crítica e RAW foram utilizadas como medidas de confiabilidade e risco, respectivamente.

Tabela 14 - Resultados fornecidos pelas MI's na fase de manutenção

Componente	I^C	I^{RAW}	I^A	I^{PMBC}
	Eq. (2)	Eq. (4)	Eq. (6)	Eq. (8)
1	0,1597	16,8067	0,1207	1000
2	0,1189	1,6740	0,0042	800
3	0,1189	2,0705	0,0052	1700
4	0,8319	16,8067	0,1258	1000
5	0,8678	8,8106	0,0590	1500

Fonte: O autor (2019).

A Tabela 15 mostra os resultados referentes ao índice de concordância; e a tabela 16, ao índice de discordância de uma alternativa em relação à outra.

Tabela 15 - Índice de concordância para a fase de manutenção

	C1	C2	C3	C4	C5
C1	-	0	0,0625	0,1458	0,5833
C2	0,9999	-	0,2083	0,7291	0,9999
C3	0,9374	0	-	0,6666	0,9374
C4	0,4166	0,2708	0,3333	-	0,8541
C5	0,4166	0	0,0625	0,1458	-

Fonte: O autor (2019).

Tabela 16 - Índice de discordância para a fase de manutenção

	C1	C2	C3	C4	C5
C1	-	0,9582	0,9496	1	0,5072
C2	0,0000	-	0,0000	0,1403	0,0000
C3	0,7778	1	-	0,7778	0,2222
C4	0,0418	1	0,9914	-	0,5490
C5	0,9416	1	1,0000	0,9416	-

Fonte: O autor (2019).

A partir dos índices de concordância e discordância são construídas as relações de sobreclassificação, mostradas na Tabela 17, que fornecem a ordem de prioridade de cada componente dentro do sistema.

Tabela 17 - Relações de sobreclassificação para a fase de manutenção

	C1	C2	C3	C4	C5
C1	-	-	-	-	-
C2	S.Forte	-	-	-	S.Fraca
C3	S.Forte	-	-	S.Fraca	S.Forte
C4	-	-	-	-	S.Forte
C5	S.Fraca	-	-	-	-

Fonte: O autor (2019).

Realizada a exploração dessas relações, as ordens fornecidas apresentam resultados diferentes. Para o ordenamento ascendente, tem-se 2 e 3 como componentes menos importantes; o componente 4 logo acima, seguido do componente 1 e do componente 5, definidos como os mais críticos. O ordenamento descendente aponta o componente 1 como o mais importante; o componente 5 logo em seguida; e, por fim, os componentes 2, 3 e 4 como os menos importantes.

A intersecção das ordens leva ao componente 1 como mais crítico; o componente 5 em segundo lugar; o componente 4 em terceiro lugar; e os componentes 2 e 3 como os menos importantes.

5.5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A alternativa 2 é uma alternativa dominada, pois não sobreclassifica nenhuma outra em qualquer fase do sistema (projeto, operação, manutenção) escolhido. A alternativa 3 sobreclassifica a alternativa 2 fracamente no critério disponibilidade na fase de operação. Porém, em todos os outros casos, é sobreclassificada pelas alternativas 1, 4 e 5.

Como apresentado anteriormente, os índices de confiabilidade, disponibilidade e custo guardam relação direta com a estrutura do sistema. A medida de importância de custo, entretanto, não se relaciona diretamente à maneira como o sistema está disposto.

Em se tratando das fases de projeto e manutenção, o componente 1 é aquele que mais influencia o desempenho global. O fato do critério custo não ser tão relevante nessa fase contribui para esse resultado, pois, caso fosse, o componente 5 apresentaria maior vantagem. O componente 1, de acordo com as medidas de confiabilidade e risco utilizadas, apresenta a maior capacidade para grandes alterações, próprias dessa fase.

Na fase de operação, o componente 5 é o mais importante. Conforme os resultados apresentados pelas medidas de importância, esse componente é o que apresenta maior tendência a pequenas alterações que melhorem o seu desempenho. Especificamente nessa, quando o custo é o critério mais importante, esse componente se destaca, pois, é capaz de produzir grandes

efeitos no desempenho de custos do sistema a partir de uma pequena alteração em seu custo de operação.

5.6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade para esse resultado foi conduzida através da alteração dos limiares utilizados para a avaliação intra-critério. Dessa forma, alterando-se os valores, foi possível realizar uma análise mais restritiva e outra análise menos restritiva. A Tabela 18 apresenta os componentes mais críticos de acordo com os novos valores considerados para cada limiar.

Tabela 18 - Alteração dos limiares de utilizados na análise intra-critério

	Ascendente			Descendente		
	Projeto	Operação	Manutenção	Projeto	Operação	Manutenção
c^+ 0,8 c^- 0,5 d^- 0,5 d^+ 0,2	1 e 5	1, 4 e 5	1 e 5	1 e 5	1, 3, 4 e 5	1 e 5
c^+ 0,9 c^- 0,6 d^- 0,4 d^+ 0,1	1 e 5	1, 4 e 5	1 e 5	1 e 5	1, 3, 4 e 5	1 e 5
c^+ 1 c^- 0,7 d^- 0,3 d^+ 0	1 e 5	1, 4 e 5	1 e 5	1 e 5	1, 3, 4 e 5	1 e 5
c^+ 0,65 c^- 0,55 d^- 0,45 d^+ 0,35	1 e 5	1, 4 e 5	1 e 5	1 e 5	1, 3, 4 e 5	1, 4 e 5
c^+ 0,6 c^- 0,5 d^- 0,5 d^+ 0,4	1 e 5	1, 4 e 5	1 e 5	1 e 5	1, 3, 4 e 5	1, 4 e 5
c^+ 0,55 c^- 0,45 d^- 0,55 d^+ 0,45	1 e 5	1, 3, 4 e 5	1, 4 e 5	1 e 5	5	1 e 5

Fonte: O autor (2019).

Os resultados mostram que os componentes 1 e 5, conjuntamente, são ordenados como os mais críticos na maioria das situações, independente dos valores de limiares preferência serem mais ou menos restritivos. Vale destacar que o componente 3 aparece em primeiro em quase todos os cenários do ordenamento descendente na fase de operação e em apenas um caso no ordenamento ascendente, na mesma fase. Isso mostra que esse componente apresenta um

comportamento de não ser sobreclassificado por nenhum outro componente (descendente), em contrapartida, não é capaz de sobreclassificar nenhum outro.

Outra análise de sensibilidade foi conduzida através da técnica de simulação de Monte Carlo. O objetivo foi analisar a frequência com que cada componente do sistema apresenta a posição mais crítica e menos crítica do sistema e se os resultados obtidos anteriormente estavam dentro dos valores mais esperados.

A Tabela 19 apresenta a quantidade absoluta de vezes em que cada componente foi ordenado como o mais crítico, de acordo com as ordens ascendente e descendente. Vale observar que dois ou mais componentes podem ocupar a mesma posição.

Percebe-se, de acordo com a Tabela 19, que o componente 5 se apresenta como o mais importante em todos os cenários nos dois ordenamentos, com exceção do estágio de manutenção, onde o componente 1 apareceu como o mais crítico em todas as 10000 simulações. Seguindo a ordem de criticidade, de acordo com a quantidade de vezes que cada componente surge na primeira posição, vem os componentes 1 e 4. Por fim, os componentes 2 e 3 são os que apresentam as menores frequências como componentes mais críticos.

Tabela 19 - Quantidade absoluta de vezes em que cada componente foi ordenado como o mais crítico

	Ascendente			Descendente		
	Projeto	Operação	Manutenção	Projeto	Operação	Manutenção
Componente 1	8105	6261	8589	2561	2420	10000
Componente 2	1288	2784	2423	722	204	162
Componente 3	1280	2721	1043	1137	493	0
Componente 4	6970	6241	5827	2445	2426	1603
Componente 5	9250	7633	9447	8510	8342	6029

Fonte: O autor (2019).

A Tabela 20 apresenta a quantidade absoluta de vezes em que cada componente foi ordenado como o menos crítico, de acordo com as ordens ascendente e descendente. Vale observar que dois ou mais componentes podem ocupar essa posição.

Analisando a Tabela 20, percebe-se que os componentes 2 e 3 são os mais frequentes como menos críticos, em todos os estágios, seguidos dos componentes 1 e 4, respectivamente. Por fim, o componente 5 aparece como o menos frequente na contagem de componentes menos importantes.

Tabela 20 - Quantidade absoluta de vezes em que cada componente foi ordenado como o menos crítico

	Ascendente			Descendente		
	Projeto	Operação	Manutenção	Projeto	Operação	Manutenção
Componente 1	1772	2323	445	6109	4426	0
Componente 2	7642	6249	4547	9209	7354	8840
Componente 3	7653	6095	7477	7956	7333	9625
Componente 4	2170	2337	1911	6194	4388	4771
Componente 5	608	1064	40	737	577	1370

Fonte - O autor (2019)

Os resultados apresentados mostram a dominância das alternativas 1 e 5 em relação as demais. Da mesma forma, apresentam os componentes 2 e 3 como alternativas dominadas. Esse fato se deve à configuração em paralelo, construída pelos componentes 2 e 3, serem, em geral, mais confiáveis (considerando confiabilidade, risco e disponibilidade) que estruturas em série, e não apresentarem, portanto, altos níveis de criticidade. Por fim, o componente 4 em posição intermediária.

Por serem os componentes mais críticos do sistema, a alocação de redundâncias pode ser feita aos componentes 1 e 5, de modo que se tornem componentes mais confiáveis e contribuam para uma melhor performance do sistema.

A construção e aplicação do modelo multicritério com a utilização de medidas de importância em um contexto de análise de confiabilidade e alocação de redundâncias se mostrou uma ferramenta adequada de apoio a decisão estratégica na planta analisada. Além disso, o modelo pode ser aplicado a sistemas com maior número de componentes e em situações onde as preferências dos decisores sejam diferentes das consideradas neste trabalho.

6 CONCLUSÕES

Foi apresentado um modelo de decisão multicritério para tomada de decisão no contexto de medidas de importância de componentes. Tais medidas de importância foram diferenciadas em classes e aplicadas em diferentes cenários, tomando como base, para validação, um sistema de distribuição e armazenagem de fluidos.

Para cada um dos três cenários, foi apresentado o componente mais crítico a partir do método de sobreclassificação ELECTRE II. Como método de elicitação dos pesos foi utilizado o método ROC e os limiares de concordância e discordância do modelo foram definidos com base no conhecimento a priori existente.

Seguindo a diretriz proposta por Nokland e Aven (2013), foram definidas as medidas de potencial de melhoria e RRW para a fase projeto; Birnbaum e RAW para a fase de operação; e importância crítica e RAW para a fase de manutenção. Além das medidas de disponibilidade e custo que foram utilizadas em todas as fases.

Realizadas as análises, para a fase de projeto, o componente mais importante foi o componente 1. Na fase de operação, o componente 5. E, por fim, na fase de manutenção, o componente 5 também foi ordenado como o mais crítico.

A análise de sensibilidade mostrou que os resultados obtidos estão dentro do esperado, pois o componente 5, majoritariamente, seguido do componente 1, aparecem como os mais críticos em todas as análises. Similarmente, os componentes 2 e 3 foram sempre ordenados como os menos importantes. Esse resultado pode ser explicado devido ao fato de tais componentes constituírem uma estrutura em paralelo, que é reconhecidamente uma configuração mais confiável, em geral, que uma configuração em série.

A utilização do método ELECTRE II permitiu uma avaliação mais detalhada sobre as relações de sobreclassificação ao não considerar em sua estrutura axiomática a sobreclassificação mútua de alternativas. Os ordenamentos ascendente e descendente mostraram resultados convergentes, com pouca alteração de ordem entre as alternativas intermediárias. As alternativas periféricas se mostraram estáveis nas duas ordens.

O modelo se apresenta como uma ferramenta gerencial útil para a tomada de decisão sobre quais componentes são considerados mais impactantes dentro de um sistema, em diferentes contextos, de forma que seja feito o menor esforço possível e se obtenha o maior retorno desejado.

De tal maneira, a aplicação desse modelo pode ser estendida a sistemas mais complexos e com um maior número de componentes, considerando, porém, que maior será o esforço e o tempo computacional exigido para serem realizados os cálculos.

Além disso, a aplicação desse modelo também pode abranger outras medidas de importância existentes na literatura. Medidas muito populares, como Fussel – Vesely e Risk Reduction, que não se encaixaram no escopo deste trabalho, podem ser incluídas em uma análise posterior, de modo a oferecer novos insights acerca do modelo.

REFERÊNCIAS

AHMADI, A. et al. Selection of maintenance strategy for aircraft systems using multi-criteria decision making methodologies. **International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering**, v. 17, n. 03, p. 223–243, jun. 2010.

ALJASSMI, H.; HAN, S. Analysis of Causes of Construction Defects Using Fault Trees and Risk Importance Measures. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 139, n. 7, p. 870–880, jul. 2013.

ALLA, R. R.; PAHUJA, G. L.; LATHER, J. S. **Risk and reliability analysis of substation automation systems using importance measures**. 2014 Eighteenth National Power Systems Conference (NPSC). **Anais...IEEE**, dez. 2014Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7103846>>

ALMOGHATHAWI, Y. et al. A multi-criteria decision analysis approach for importance identification and ranking of network components. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 158, n. June 2015, p. 142–151, fev. 2017.

ARMAGHAN, N.; RENAUD, J. An application of multi-criteria decision aids models for Case-Based Reasoning. **Information Sciences**, v. 210, p. 55–66, nov. 2012.

AVEN, T. Improving the foundation and practice of reliability engineering. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability**, v. 231, n. 3, p. 295–305, 5 jun. 2017.

BARABADY, J.; KUMAR, U. Availability allocation through importance measures. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 24, n. 6, p. 643–657, 3 jul. 2007.

BARALDI, P.; COMPARE, M.; ZIO, E. Component Ranking by Birnbaum Importance in Presence of Epistemic Uncertainty in Failure Event Probabilities. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 62, n. 1, p. 37–48, mar. 2013.

BARRON, F. H.; BARRETT, B. E. The efficacy of SMARTER — Simple Multi-Attribute Rating Technique Extended to Ranking. **Acta Psychologica**, v. 93, n. 1–3, p. 23–36, set. 1996.

BELTON, V.; STEWART, T. J. **Multiple Criteria Decision Analysis**. Boston, MA: Springer US, 2002.

BIRNBAUM, Z. W. On The Importance of Different Components in a Multicomponent System. **Contract**, 1968.

CATELANI, M.; CIANI, L.; VENZI, M. Component Reliability Importance assessment on complex systems using Credible Improvement Potential. **Microelectronics Reliability**, v. 64, p. 113–119, set. 2016.

CATELANI, M.; CIANI, L.; VENZI, M. **Reliability importance assessment using cost-based credible improvement potential**. 2017 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE). **Anais...IEEE**, out. 2017Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/8088259/>>

CHEOK, M. C.; PARRY, G. W.; SHERRY, R. R. Use of importance measures in risk-informed regulatory applications. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 60, n. 3, p. 213–226, jun. 1998.

COMPARE, M.; BELLORA, M.; ZIO, E. Aggregation of importance measures for decision making in reliability engineering. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability**, v. 231, n. 3, p. 242–254, 9 jun. 2017.

DAEMI, T.; EBRAHIMI, A. Evaluation of Components Reliability Importance Measures of Electric Transmission Systems Using the Bayesian Network. **Electric Power Components and Systems**, v. 40, n. 12, p. 1377–1389, 15 ago. 2012.

DE ALMEIDA, A. T. et al. **Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis**. Cham: Springer International Publishing, 2015. v. 231

DE ALMEIDA, A. T.; FERREIRA, R. J. P.; CAVALCANTE, C. A. V. A review of the use of multicriteria and multi-objective models in maintenance and reliability. **IMA Journal of Management Mathematics**, v. 26, n. 3, p. 249–271, 1 jul. 2015.

DUI, H. et al. An importance measure for multistate systems with external factors. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 167, n. May, p. 49–57, nov. 2017.

DUI, H.; SI, S.; YAM, R. C. M. A cost-based integrated importance measure of system components for preventive maintenance. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 168, n. May, p. 98–104, dez. 2017.

ESPIRITU, J. F.; COIT, D. W.; PRAKASH, U. Component criticality importance measures for the power industry. **Electric Power Systems Research**, v. 77, n. 5–6, p. 407–420, abr. 2007.

FIGUEIRA, J. R. et al. An Overview of ELECTRE Methods and their Recent Extensions. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**, v. 20, n. 1–2, p. 61–85, jan. 2013.

GAO, X.; BARABADY, J.; MARKESET, T. Criticality analysis of a production facility using cost importance measures. **International Journal of Systems Assurance Engineering and Management**, v. 1, n. 1, p. 17–23, 8 mar. 2010.

GOVINDAN, K.; JEPSEN, M. B. ELECTRE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. **European Journal of Operational Research**, v. 250, n. 1, p. 1–29, abr. 2016.

GUPTA, S. et al. Cost-effective importance measure. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 30, n. 4, p. 379–386, 12 abr. 2013.

HUTTON BARRON, F. Selecting a best multiattribute alternative with partial information about attribute weights. **Acta Psychologica**, v. 80, n. 1–3, p. 91–103, ago. 1992.

INAGAKI, T.; INOUE, K.; AKASHI, H. Interactive Optimization of System Reliability Under Multiple Objectives. **IEEE Transactions on Reliability**, v. R-27, n. 4, p. 264–267, out. 1978.

MIGUEL, P. A. C. et al. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2010.

NOKLAND, T. E.; AVEN, T. On selection of importance measures in risk and reliability analysis. **International Journal of Performability Engineering**, v. 9, n. 2, p. 133–147, 2013.

NOROOZIAN, A. et al. System Risk Importance Analysis Using Bayesian Networks. **International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering**, v. 25, n. 01, p. 1850004, fev. 2018.

NOURI QARAHASANLOU, A. et al. Operating Environment-Based Availability Importance

Measures for Mining Equipment (Case Study: Sungun Copper Mine). **Journal of Failure Analysis and Prevention**, v. 17, n. 1, p. 56–67, 22 fev. 2017.

RICHARD CASSADY, C. Managing availability improvement efforts with importance measures and optimization. **IMA Journal of Management Mathematics**, v. 15, n. 2, p. 161–174, 1 abr. 2004.

ROY, B. The outranking approach and the foundations of electre methods. **Theory and Decision**, v. 31, n. 1, p. 49–73, jul. 1991.

ROY, B. **Multicriteria Methodology for Decision Aiding**. Boston, MA: Springer US, 1996. v. 12

SAKAWA, M. Multiobjective Optimization by the Surrogate Worth Trade-off Method. **IEEE Transactions on Reliability**, v. R-27, n. 5, p. 311–314, dez. 1978.

SHAYESTEH, E.; HILBER, P. **Reliability-centered asset management using component reliability importance**. 2016 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS). **Anais...IEEE**, out. 2016Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7764173/>>

SI, S. et al. Integrated Importance Measure of Component States Based on Loss of System Performance. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 61, n. 1, p. 192–202, mar. 2012.

VAN DER BORST, M.; SCHOONAKKER, H. An overview of PSA importance measures. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 72, n. 3, p. 241–245, jun. 2001.

VESELY, W. E.; DAVIS, T. C. Two Measures of Risk Importance and Their Application. **Nuclear Technology**, v. 68, n. 2, p. 226–234, 10 fev. 1985.

WAY KUO; XIAOYAN ZHU. Relations and Generalizations of Importance Measures in Reliability. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 61, n. 3, p. 659–674, set. 2012.

WU, S.; COOLEN, F. P. A. A cost-based importance measure for system components: An extension of the Birnbaum importance. **European Journal of Operational Research**, v. 225, n. 1, p. 189–195, fev. 2013.

ZHANG, P.; HUO, C.; KEZUNOVIC, M. **A Novel Measure of omponent Importance**

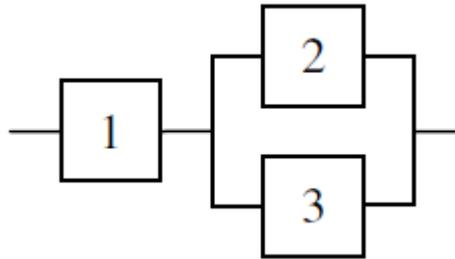
Considering Cost for All-Digital Protection Systems. 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting. **Anais...IEEE,** jun. 2007Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4275459/>>

ZIO, E. Reliability engineering: Old problems and new challenges. **Reliability Engineering & System Safety,** v. 94, n. 2, p. 125–141, fev. 2009.

APÊNDICE A – DEMONSTRATIVO DE COMO CALCULAR CADA MEDIDA DE IMPORTÂNCIA

Neste anexo são demonstrados exemplos de como se deve calcular cada medida de importância. A Figura 4 representa um sistema série-paralelo como auxílio para a realização dos cálculos.

Figura 4 - Sistema utilizado para exemplificação



Fonte: O autor (2019).

A tabela 21 apresenta os parâmetros para cada critério de desempenho. Os cálculos serão divididos de acordo com as classes de medidas: confiabilidade, risco, disponibilidade e custo.

Tabela 21 – valores assumidos como parâmetros para exemplificação dos cálculos de cada medida de importância.

Componente/Critérios	Confiabilidade	Risco	Disponibilidade	Custo
1	0,90	0,10	0,85	250
2	0,85	0,15	0,85	175
3	0,85	0,15	0,85	160
Sistema	0,88	0,12	0,83	150

Fonte: O autor (2019).

1. Medida de Confiabilidade

$$R_s = R_1 R_2 (1 - R_3) + R_1 R_3 (1 - R_2) + R_1 R_2 R_3 = 0,88$$

Aqui são exemplificadas as três medidas de confiabilidade utilizadas. A confiabilidade calculada do sistema é utilizada como input de cada medida. Os componentes que possuem os maiores valores são considerados como os mais críticos.

1.1 Birnbaum:

$$I_i^B(t) = \frac{\partial R_s(t)}{\partial R_i(t)} = R_s(t; R_i(t) = 1) - R_s(t; R_i(t) = 0)$$

$$I_1^B = 1 \times 0,85 \times (1 - 0,85) \times 2 + 1 \times 0,85 \times 0,85 - 0 = 0,98$$

$$I_2^B = I_3^B = 0,9 \times 1 \times 0,15 + 0,9 \times 0,85 + 0,9 \times 1 \times 0,85 - [0,9 \times 0,85 \times 1] = 0,14$$

1.2 Importância crítica:

$$I_i^{IC}(t) = I_i^B(t) \frac{F_i(t)}{F_s(t)}$$

$$I_1^{IC} = \left(\frac{0,1}{0,12} \right) \times 0,255 = 0,21$$

$$I_2^{IC} = I_3^{IC} = \left(\frac{0,15}{0,12} \right) \times 0,135 = 0,17$$

1.3 Potencial de melhoria:

$$I_i^{PM}(t) = R_s(t, R_i(t) = 1) - R_s(R_i(t))$$

$$I_1^{PM} = 1 \times 0,85 \times (1 - 0,85) \times 2 + 1 \times 0,85 \times 0,85 - 0,88 = 0,1$$

$$I_2^{PM} = I_3^{PM} = 0,9 \times 1 \times (1 - 0,85) + 0,9 \times 0,85 \times 0 + 0,9 \times 1 \times 0,85 - 0,88 \\ = 0,025$$

2. Medida de Risco

As medidas de risco são exemplificadas aqui. Note-se que podem ser assumidos valores maiores que um para essa classe. A confiabilidade calculada do sistema também é utilizada aqui como input de cada medida. Os componentes que possuem os maiores valores são considerados como os mais críticos.

2.1 Risk Reduction Worth:

$$I_i^{RRW}(t) = \frac{1 - R_s(t)}{1 - R_s(t; R_i(t) = 1)}$$

$$I_1^{RRW} = \frac{1 - 0,88}{1 - [1 * 0,85 * (1 - 0,85) * 2 + 1 * 0,85 * 0,85]} = 6$$

$$I_2^{RRW} = I_3^{RRW} = \frac{1 - 0,88}{1 - [0,9 * 1 * (1 - 0,85) + 0,9 * 0,85 * 0 + 0,9 * 1 * 0,85]} = 1,26$$

2.2 Risk Achievement Worth:

$$I_i^{RAW}(t) = \frac{1 - R_s(t; R_i(t) = 0)}{1 - R_s(t)}$$

$$I_1^{RAW} = 0$$

$$I_2^{RAW} = I_3^{RAW} = \frac{1 - (0,9 * 0,85 * 1)}{1 - 0,88} = 1,96$$

3. Medida de Disponibilidade

$$A_s = A_1 \times A_2 \times (1 - A_3) + A_1 \times A_3 \times (1 - A_2) + A_1 \times A_2 \times A_3 = 0,83$$

A medida de disponibilidade segue o mesmo raciocínio da medida de Birnbaum. A disponibilidade calculada do sistema é utilizada como input. Os componentes que possuem os maiores valores são considerados como os mais críticos.

$$I_i^A(t) = \frac{\partial A_s(t)}{\partial A_i(t)} = A_s(t; A_i(t) = 1) - A_s(t; A_i(t) = 0)$$

$$I_1^A = 1 \times 0,85 \times (1 - 0,85) \times 2 + 0,85 \times 0,85 \times 0,85 - 0 = 0,87$$

$$I_2^A = I_3^A = 0,85 \times 1 \times (1 - 0,85) \times 2 + 0,85^3 - 0,85 \times 0,85 \times 1 = 0,15$$

4. Medida de Custo

Por fim, é apresentada a exemplificação da medida de custo, que segue a mesma lógica da medida de confiabilidade potencial de melhoria, diferindo na incorporação do custo ao componente perfeito e ao componente em seu estado atual. Diferentemente das demais medidas, os componentes que possuem os menores valores são considerados como os mais críticos.

4.1 Potencial de melhoria baseado no custo:

$$I_i^{PMBC}(t) = CR_s(t; R_i(t) = 1) - CR_s(t)$$

$$I_1^{PMBC} = 250 - 150 = 100$$

$$I_2^{PMBC} = 175 - 150 = 25$$

$$I_3^{PMBC} = 160 - 150 = 10$$