

Avaliação de trilhos ferroviários utilizando uma abordagem multicritério

Danilo Ribamar Sá Ribeiro, Uilcilene da Rocha Vieira, Nilmar Xavier de Almeida Neto, Amanda Moares
Correia, Fernando Antônio Forcellini

Resumo: No cenário competitivo em que as empresas estão envolvidas, a melhor decisão é considerada um fator para o sucesso além de uma grande vantagem em relação às concorrentes. No setor ferroviário, as empresas estão sempre à procura de maior capacidade e menor custo para o transporte, por isso a grande relevância desse tema, que aborda a escolha de trilhos ferroviários, um componente de extrema importância para a existência das ferrovias, utilizando uma abordagem multicritério aplicada a partir do *software* MACBETH para a escolha do melhor trilho. Neste sentido, o objetivo deste artigo consiste em construir um modelo para a escolha da marcas dos trilhos utilizados nas ferrovias.

Palavras chave: Análise Multicritério, Abordagem MACBETH, Trilhos.

Rail Track's Evaluation Using a Multicriteria Approach

Abstract: In the competitive scenario in which companies are involved, the best decision is considered a success factor and a great advantage over competitors. In the rail sector, companies are always looking for higher capacity and lower cost for transport, so the great relevance of this theme, which addresses the choice of rail tracks, an extremely important component for the existence of railways, using an approach multicriteria applied from MACBETH software for choosing the best rail. In this sense, the aim of this paper is to build a model for the choice of rail markings used in railways.

Key-words: Multicriteria Analysis, MACBETH Approach, Rails.

1. Introdução

Em termos de infraestrutura, um dos setores mais afetados pelo desafio de crescimento econômico do país é o de transportes. Sabendo-se que o cenário atual dos meios de transporte no Brasil ainda se apresenta muito deficiente, o que resulta em um aumento acentuado do preço final dos produtos transportados, nota-se a necessidade de reorganização do sistema e ampliação da concorrência de mercado, tendo em vista o desenvolvimento do país (FÉLIX *et al.*, 2018).

Dentro deste conteto, o transporte de cargas e passageiros no Brasil mantém a característica rodoviária, que se caracteriza como o principal modal utilizado no país. O transporte ferroviário se classifica como o segundo modal mais utilizado no país, devido ao custo baixo de transporte de grandes volumes à longas distâncias. Apesar de que durante muito tempo não houve investimentos na ampliação, após a privatização houve uma retomada na manutenção e na ampliação das ferrovias, mas está longe de alcançar os índices de qualidade e desempenho internacionais (DOS SANTOS *et al.*, 2018).

Segundo dados da Associação Brasileira da Indústria Ferroviária (Abifer), nos últimos oito anos o investimento em ampliação e modernização das unidades existentes, além da construção de novas instalações fabris e em tecnologia, somou R\$ 1,1 bilhão. Os números dão a dimensão da expansão desse setor que está crescendo. Desde 2006, ao menos 127 empresas começaram a operar no mercado ferroviário brasileiro, entre elas indústrias metalúrgicas, de

auto-peças, multinacionais e grupos recém-criados. Todas atraídas por um mercado que, segundo a Abifer, irá demandar a construção de 40 mil vagões, 45 mil carros de passageiros e 2.100 locomotivas em dez anos.

A fim de que os aumentos de produção e produtividade continuem, é necessário o contínuo aperfeiçoamento do ambiente regulatório, com destaque para a defesa da concorrência e a ênfase em regras que incentivem o investimento em produtividade, tecnologia e expansão do sistema ferroviário. Frente a esta realidade, emergiu a decisão de desenvolver um modelo de avaliação adequado, a ser utilizado, para avaliar a escolha da marca dos trilhos que serão utilizados nas vias ferroviárias (MARTINS e CAIXETA FILHO, 1999).

Este artigo aborda a análise multicritério de alguns dos elementos que influenciam diretamente o desempenho do processador. Foi realizado um estudo bibliográfico sobre o assunto para apoiar a construção do modelo no programa MACBETH.

O restante do artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta o referencial teórico, a Seção 3 apresenta a metodologia utilizada para elaboração do modelo; a Seção 4 apresenta como o modelo foi estruturado; a Seção 5 apresenta os resultados e análises do modelo. E por fim, a Seção 6 apresenta as conclusões.

2. Referencial teórico

2.1 Tomada de Decisão Multicritério

A análise de decisão multicritério visa criar um processo replicável e formal para a tomada de decisão por meio da aplicação de modelagem matemática, a auxiliar na resolução de problemas dos quais existem diversas soluções a serem consideradas (ASSOLARI, 2011).

Existem diferentes métodos, que podem ser recomendados de acordo com as condições encontradas no ambiente da tomada de decisão (análise do contexto, atores e estrutura de preferências associadas ao problema). Em linhas gerais, tais métodos auxiliam na avaliação das alternativas em cada um dos critérios estabelecidos e na avaliação geral das alternativas (MAGALHÃES *et al.*, 2016).

o Apoio Multicritério à Decisão pode ser definido como um conjunto de técnicas de apoio à tomada de decisão, que têm a finalidade de investigar um número de alternativas, considerando múltiplos critérios e objetivos em conflito. É possível gerar soluções de compromisso e uma hierarquização das alternativas, de acordo com o grau de atração destas para o tomador de decisão (DE MELLO, GOMES e LINS, 2002; DHOUIB, 2014).

2.2 Ferrovias e seus componentes

O apoio e a superfície de rolamento para os veículos ferroviários são compostos basicamente por três elementos, o lastro, os dormentes e os trilhos, que em conjunto formam a via permanente. Constituída pela via permanente, a superestrutura ferroviária está sujeita a ação de desgaste das rodas dos veículos e do meio envolvido (intempéries). Quando esse desgaste ultrapassa níveis de tolerância exigidos para manutenção da segurança do transporte, a superestrutura pode ser reparada ou até substituída (BRINA, 1979; AGUIAR, 2011).

O trilho é elemento da superestrutura que constitui a superfície de rolamento para as rodas dos veículos ferroviários e tem a função de transmitir esforços ao dormente (DNITT, 2011). Os trilhos possuem características que propiciam um trabalho correto e qualidade na via.

Sempre com o objetivo de melhorar o desempenho dos trilhos, os fabricantes: (i) Modificam constantemente a composição química dos trilhos, oferecendo, conseqüentemente os melhores produtos a seus clientes; (ii) Realizam testes, em laboratório e na via, com diversos materiais químicos, a fim de avaliar os padrões de qualidade do produto oferecido.

O trilho é um componente ferroviário suscetível a falhas, devido ao seu processo de soldagem (elétrica ou soldagem aluminotérmica), à alta pressão no contato com as rodas e à variação térmica, que mantém os trilhos alinhados.

De acordo com Macêdo (2009), o trilho é tecnicamente o principal elemento da superestrutura ferroviária, já que é responsável por guiar os veículos ao longo da via permanente e detém o maior custo absoluto dentre todos os elementos. É composto por dois perfis metálicos paralelos que são fixados aos dormentes através de acessórios especiais, além de possuir um perfil que pode ser dividido ilustrativamente em três partes distintas, o boleto, a alma e o patim. A forma e o comprimento dos trilhos evoluíram gradativamente, de acordo com as necessidades de transporte que também aumentaram com o tempo.

3. Metodologia

O método abaixo descreve o processo de construção de um modelo de avaliação de escolha da marca de trilhos a ser utilizado em vias férreas por meio da Abordagem MACBETH (KARANDE e CHAKRABORTY, 2014; DEMESOUKA, VAVATSIKOS e ANAGNOSTOPOULOS, 2016)

Ela consiste em medir a atratividade por uma técnica de avaliação baseada em categorias COSTA & VANSNICK (1999). Foi desenvolvido por Carlos Bana e Costa e Jean Claude Vansnick na década de 90. A principal diferença entre o Macbeth e outros métodos de análise de decisão com múltiplos critérios é que o programa requer apenas julgamentos qualitativos sobre as diferenças de atratividade entre elementos, para gerar pontuações para as opções em cada critério e para ponderar os critérios. O *MACBETH* é abordado através de uma ferramenta que possui parâmetros claros, de fácil interpretação, além de ser humanista, interativo e construtivista (BANA E COSTA e VANSNICK, 1994). As categorias semânticas de diferença de atratividade são: nula, muito fraca, fraca, moderada, forte, muito forte e extrema.

A partir dos julgamentos do avaliador, uma escala de pontuações em cada critério e pesos relativos são sugeridos e discutidos posteriormente. Uma pontuação global é calculada para cada opção, fazendo a soma ponderada das suas pontuações. Essa pontuação reflete a atratividade da opção respectiva no conjunto de todos os critérios. Com essas análises será possível compreender o problema em profundidade, de ajustar o modelo e de formar convicções sobre as prioridades e estabelecer opções a selecionar.

Este artigo foi estruturado e organizado para cada etapa do processo *MACBETH* de apoio a tomada de decisões:

- Estruturação: Estrutura os pontos de vista e identifica os critérios, define as opções a serem avaliadas e suas performances;
- Avaliação: Avalia a atratividade de cada opção em cada critério e pondera os critérios;
- Recomendações: Analisa a atratividade global de cada opção e explora os resultados do modelo, analisa a sensibilidade e a robustez aos resultados do modelo à luz de vários tipos de incerteza nos dados.

4. Modelo

4.1 Fase de Estruturação

Inicialmente, realizou-se a fase de estruturação teve em vista a identificação e discussão dos aspectos considerados pelos interlocutores como importantes para avaliar os trilhos. Esses aspectos foram estruturados em forma de árvore. A estruturação em árvore (ou árvores de valores) permite visualizar de forma organizada a totalidade dos aspectos importantes ao problema. Magalhães *et al.* (2016) ressaltam a importância que o mapeamento é para a execução da análise, pois facilita o entendimento do tomador de decisão com relação ao contexto da decisão a ser tomada, além de clarificar convicções e permitir buscar compromisso entre os interesses e aspirações de cada ator no processo.

A Figura 1 mostra a árvore *MACBETH* que foi construída para a pesquisa. Os nós que se encontram abaixo do nó inicial ou Global ('Trilhos') correspondem aos pontos de vista considerados relevantes para a escolha da marca dos trilhos, ou seja, critérios para a avaliação dos trilhos.

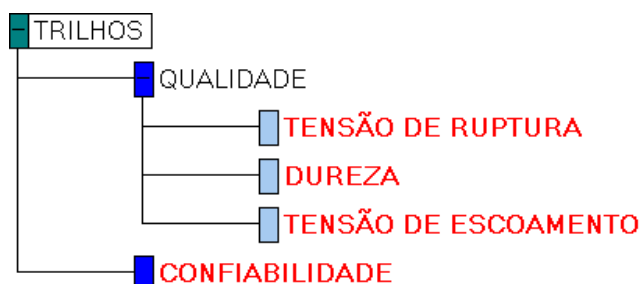
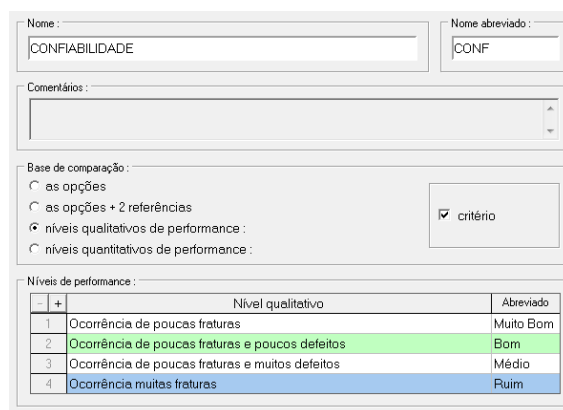


Figura 1 – Árvore de Decisão e Nós-critério

A seguir, definiu-se as propriedades de cada nó. Para os nós Tensão de Ruptura, Dureza e Tensão de escoamento utilizou-se como base de comparação o níveis quantitativos de performance e para o nó Confiabilidade utilizou nível qualitativo, conforme a Figura 2.



	Nível qualitativo	Abreviado
1	Ocorrência de poucas fraturas	Muito Bom
2	Ocorrência de poucas fraturas e poucos defeitos	Bom
3	Ocorrência de poucas fraturas e muitos defeitos	Médio
4	Ocorrência muitas fraturas	Ruim

Figura 2 – Propriedade dos nós

As opções introduzidas no modelo com os respectivos valores de cada marca por nó critério são as seguintes: Mittal, Voest Alpine, Nippon e Niobrás (Tabela 1). O estudo será baseado principalmente nesses quatro tipos de trilhos, por serem considerados os melhores no cenário ferroviário. Sendo que os mesmos abrangem todas as características necessárias para o estudo. Os três primeiros são considerados *benchmark* no cenário mundial, o ultimo é um componente produzido no Brasil pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN).

Nome	Nome Abreviado	Custo
MITTAL	MTL	4.5
VOEST ALPINE	APN	4.8
NIPPON	NPN	5.4
NIOBRÁS	NBR	3.1

Tabela 1 – Definição de opções

4.2 Fase de Pontuação

Nesta fase, ordenou-se as opções ou níveis de performance para cada critério. As tabelas de comparação par a par dos nós- critérios são apresentadas na Figura 3. Conforme já mencionado, para o nó de Confiabilidade utilizou-se julgamentos qualitativos de diferença de atratividade no critério.

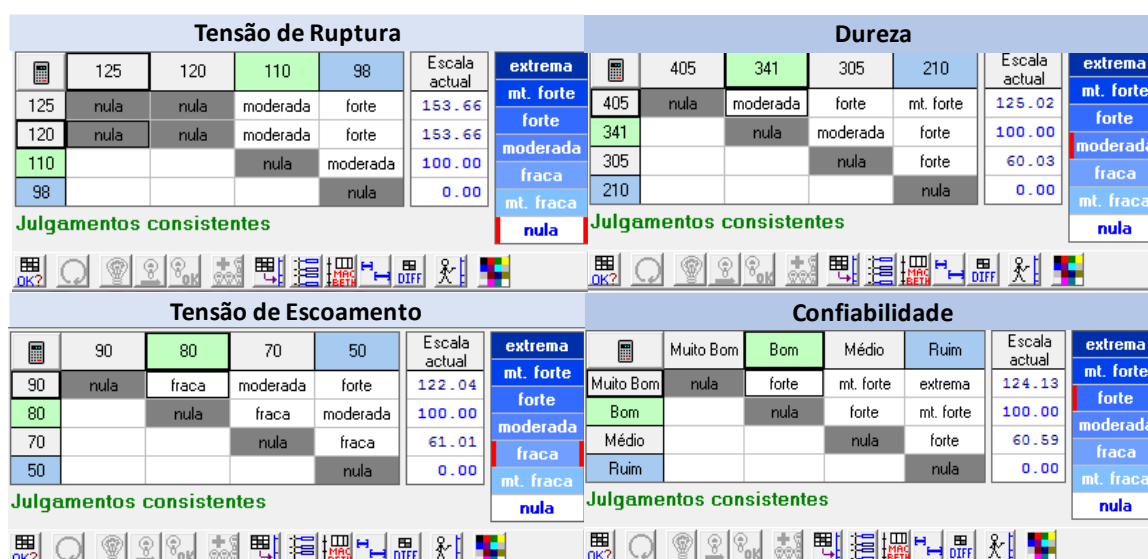


Figura 3 – Ordenação num critério

À medida que cada julgamento é introduzido na matriz de julgamentos, o MACBETH verifica automaticamente a sua compatibilidade. Em caso de incompatibilidade, o programa ajuda a resolver as inconsistências detectadas, o que não foi o caso do exemplo.

A seguir, a Figura 4 mostra os gráficos correspondente função de valor linear nos troços, com níveis quantitativos de performance representados no eixo horizontal e as pontuações respectivas no eixo vertical. Para a quantificação da atratividade por comparação de níveis qualitativos de desempenho, fez-se uma escala de pontuação a partir dos julgamentos introduzidos na matriz. As pontuações de referência definidas por defeito para todos os critérios variam de 0 a 100.

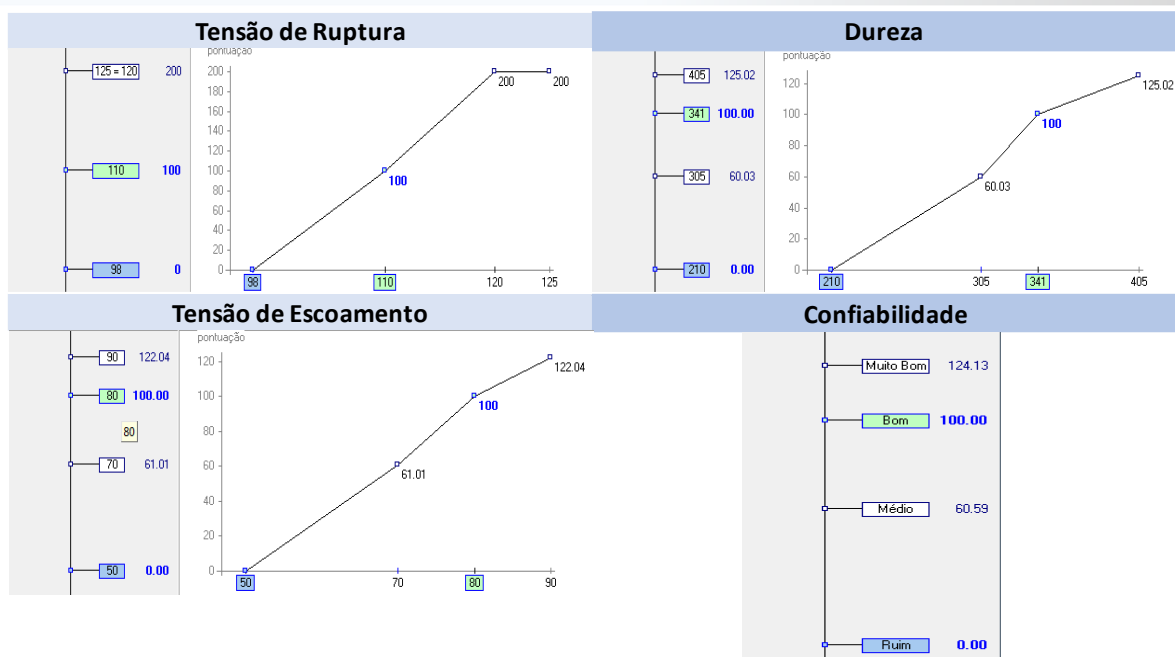


Figura 4 – Quantificação de atratividade por critério

4.3 Fase de Ponderação

Delimitou-se os limites de escala de acordo com a necessidade da via férrea. Na ponderação foram definidas em cada critério duas referências de ponderação (uma ‘superior’ e uma ‘inferior’), conforme a Figura 5.

Referências globais	TDR	DUR	TDE	CONF
[TDR]	125	405	90	Muito Bom
[DUR]	120	341	80	Bom
[CONF]	110	305	70	Médio
[TDE]	98	210	50	Ruim
[tudo inf.]				

Figura 5 – Fase de ponderação

Após, foi introduzido julgamentos qualitativos de diferença de atratividade global entre referências globais realizando o julgamento critério X critério, conforme consta na Figura 6. Nota-se que os critérios TDR e DUR estão no mesmo nível e são moderadamente mais ‘valiosos’ do critério CONF de acordo com a Escala. A partir da matriz de julgamentos de ponderação tem-se uma escala de ponderação.

	[TDR]	[DUR]	[CONF]	[TDE]	[tudo inf.]	Escala actual		
[TDR]	nula	nula	moderada	moderada	positiva	36.84	extrema	
[DUR]	nula	nula	moderada	moderada	positiva	36.84	mt. forte	
[CONF]			nula	moderada	positiva	21.05	forte	
[TDE]				nula	positiva	5.27	moderada	
[tudo inf.]					nula	0.00	fraca	
Julgamentos consistentes								mt. fraca
								nula

Figura 6 – Ponderação de Julgamento

5. Resultados

Após a construção do modelo, obteve-se uma tabela de pontuações (Tabela 2) na qual pode se analisar os resultados obtidos.

Opções	Global	TDR	DUR	TDE	CONF
MTL	122.5	200	60.03	107.27	100
APN	91.7	100	100	100	60.59
NPN	151.14	200	125.02	100	124.13
NBR	1.13	0	0	21.35	0
[tudo sup.]	100	100	100	100	100
[tudo inf.]	0	0	0	0	0
	Pesos :	0.3684	0.3684	0.0527	0.2105

Tabela 2 – Pontuações

A Tabela 3 apresenta a performance dos trilhos!!

Opções	TDR	DUR	TDE	CONF
MTL	120	305	83.3	Bom
APN	110	341	80	Médio
NPN	125	405	80	Muito Bom
NBR	98	210	57	Ruim

Tabela 3 – Performances

Para permitir uma melhor compreensão dos resultados do modelo, o *software* permite analisar a contribuição da pontuação de uma opção num critério para sua pontuação global. As marca Nippon teve destaque maior em relação às outras através da escala, seguida da marca Mittal.

Na Figura 7, as barras mostram as diferenças de pontuações nos critérios entre a marca Nippon e a marcam Mittal, ambas tiveram destaque sobre as demais. As diferenças positivas correspondem aos critérios em que o desempenho da primeira são mais atrativas que as da

segunda opção e as diferenças negativas representam os critérios que a performance da segunda foram mais atrativos que da primeira.

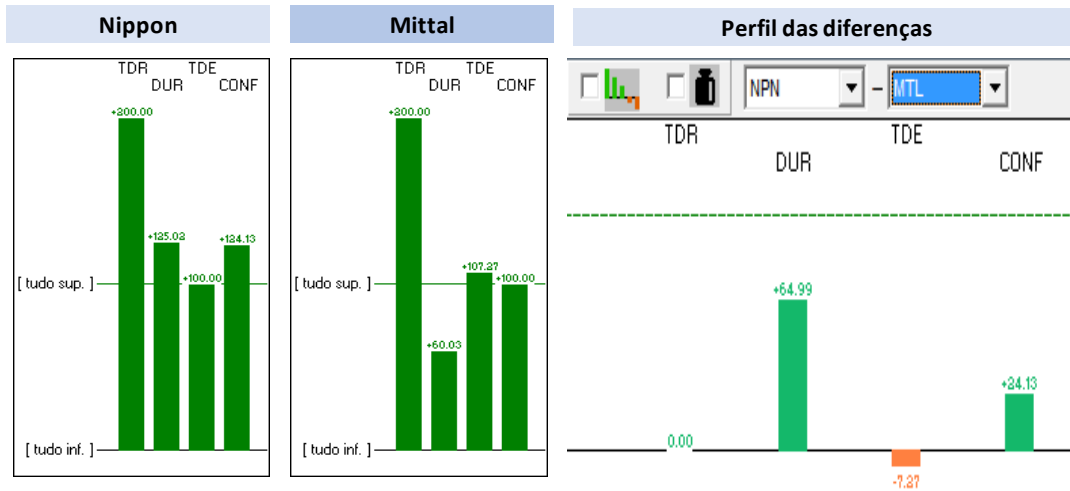


Figura 7 – Perfil das opções e diferenças

5.1 Análise de Custo- Benéfico

Para a criação do gráfico bidimensional de custo-benefício (Figura 8) que contrasta a pontuação global de cada opção (benéfico) com seu respectivo custo. Foi necessário introduzir o custo de cada marca de trilho, como já foi mostrado no artigo.

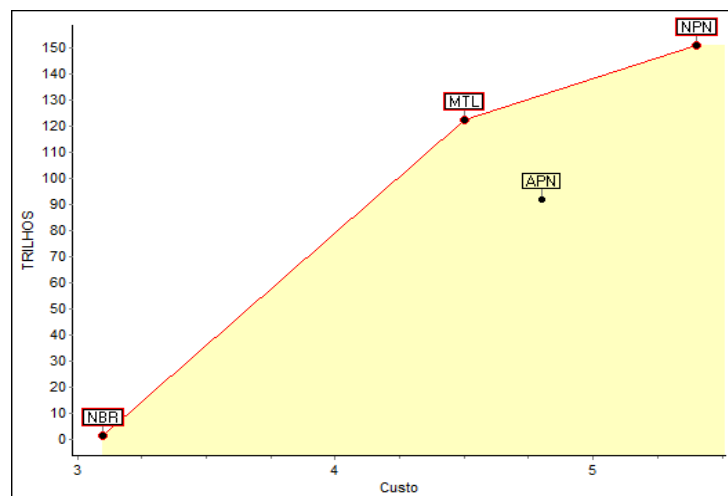


Figura 8 – Análise de Custo Benéfico

5.2 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade no peso do critério permite analisar em que medida as recomendações do modelo se alteram ao variar o peso do critério (mantendo as relações de proporcionalidade entre os restantes dos pesos). Na Figura 9, cada linha do gráfico mostra a variação da pontuação global da opção correspondente quando o peso do critério varia entre 0% a 100 % e a linha vertical no gráfico representa o peso atual do critério em análise (36.84 no critério TDR).

Se houve um aumento no peso referente a confiabilidade, o cenário de seleção das marcas apresentadas mudariam, mas para esse critério tivesse um maior peso seria necessário um estudo detalhado e de um certo período para que pudesse não somente nos basear em dados qualitativos e sim dados quantitativos que mostrariam a precisam da análise e consecutivamente aumentaria a importância desse critério no estudo.

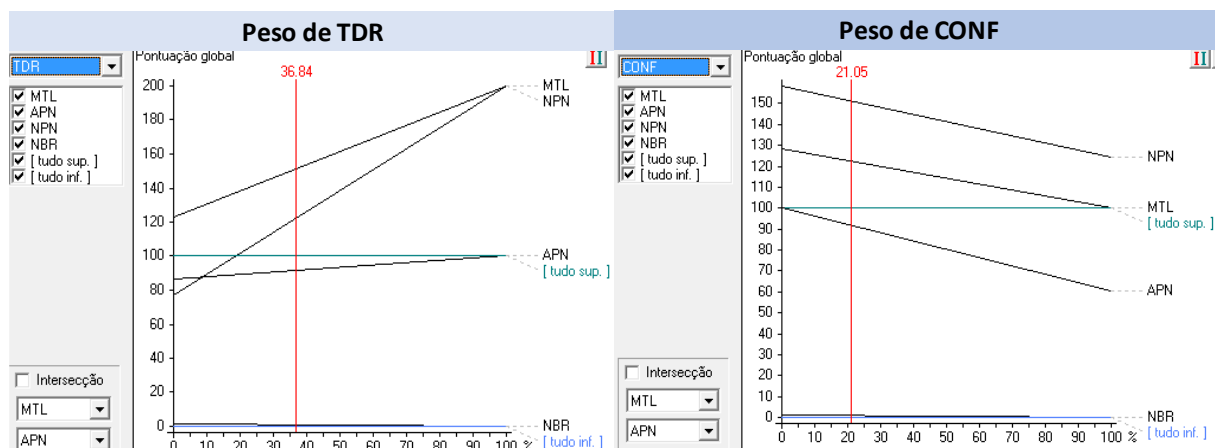


Figura 9 – Análise de Sensibilidade TDR e CONF

5.3 Análise de Robustez

A tomada de decisão envolve, com frequência, informação escassa, imprecisa ou incerta. Pode ser útil, por isso, analisar que as conclusões robustas se podem extrair do modelo para níveis variados de escassez, imprecisão ou incerteza na informação.

Os símbolos utilizados na janela de Análise de robustez são: triângulo que representa situação de ‘dominância’ e a cruz que representa situação de ‘dominância aditiva’. A partir da análise de robustez, apresentada na Figura 10, pode-se perceber que dependendo da alteração no trilho Mittal pode-se deixá-lo mais atrativo em relação aos demais tendo em consideração os critérios de qualidade e confiabilidade.

	MTL	APN	NPN	NBR	[tudo sup.]	[tudo inf.]
MTL	=	+		▲	+	▲
APN		=		▲		▲
NPN	+	▲	=	▲	▲	▲
NBR				=		▲
[tudo sup.]		▲		▲	=	▲
[tudo inf.]						=

Informação local				Informação global		
	ordinal	MACBETH	cardinal	ordinal	MACBETH	cardinal
TDR	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
DUR	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
TDE	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%
CONF	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0%

Figura 10 – Análise de Robustez

6. Conclusão

A abordagem MACBETH seguida nesse trabalho provou ser bastante adequada a este tipo de avaliação de multicritério embora tenha sido aplicada em pequenas dimensões. De fato, a

eficácia do estudo depende, essencialmente, da qualidade da estruturação de cada problema; e esta, diretamente, da informação de base disponível - quanto mais específica e precisa ela for, mais facilmente se encontram os pontos de vista relevantes.

Constata-se que o modal ferroviário tem boas perspectivas de se firmar como um meio de locomoção alternativo bastante competitivo quando se tratar de redução de custos, agilidade e capacidade no transportes de mercadorias.

No estudo apresentado o trilho que melhor se destaca é Mittal, apesar do Nippon ser considerado o melhor, pois o Mittal supera todos os critérios e ainda na relação custo – benefício é considerado o melhor.

Referências

ABIFER - Associação Brasileira da Indústria Ferroviária. Dados Setoriais. Disponível em: < <https://abifer.org.br/dados-setoriais/estatisticas-de-producao/> > Acesso em: 20 set. 2019.

AGUIAR, L. T. Inspeção de via permanente: um fator determinante no processo de direcionamento da manutenção ferroviária. **Monografia apresentada ao curso de graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2009.**

ASSOLARI, A. C. P. P. Aplicação do método MACBETH para subsidiar migração de plataforma tecnológica de redes de Telecomunicações. Campinas, 83p., 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

BANA COSTA, C. A.; VANSNICK, J. C. The MACBETH approach: Basic ideas, software, and an application. In: **Advances in decision analysis**. Springer, Dordrecht, 1999. p. 131-157.

BRINA, H. L. Estradas de Ferro 1 – Via Permanente. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2 ed, 1979.

DEMESOUKA, O. E.; VAVATSIKOS, A. P.; ANAGNOSTOPOULOS, K. P. Using MACBETH multicriteria technique for GIS-based landfill suitability analysis. **Journal of Environmental Engineering**, v. 142, n. 10, p. 04016042, 2016.

DHOUIB, D. An extension of MACBETH method for a fuzzy environment to analyze alternatives in reverse logistics for automobile tire wastes. **Omega**, v. 42, n. 1, p. 25-32, 2014.

DNITT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Disponível em: < <http://www.dnit.gov.br/> > Acesso em: 20 set. 2019.

DOS SANTOS, D. B.; LIMA, R. C.; BASSI, R. E.; RODRIGUES, E. F.; MAIELLARO, V. R. A Infraestrutura no Transporte Ferroviário no Brasil. **South American Development Society Journal**, v. 4, n. 10, p. 38-51, 2018.

FELIX, J. C.; ALVES, C. D. F. B.; ALBUQUERQUE, S. C.; SANTOS, N. C. S.; BARBOSA, L. C. M. Proposição de melhorias em segurança por meio da aplicação do fmea: um estudo de caso em uma empresa do setor ferroviário. **Tecno-Lógica**, v. 22, n. 2, p. 147-156, 2018.

KARANDE, Prasad; CHAKRABORTY, Shankar. A facility layout selection model using MACBETH method. In: **Bali, Indonesia: Proceedings of the 2014 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (January 7-9)**. 2014.

MACÊDO, F. B. Estudo dos desgastes de trilhos ferroviários. Monografia apresentada ao curso de graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2009.

MAGALHÃES, L.B.; CASTRONEVES, T.; CHAVES, M. C. C.; GOMES, C. F. S.; PEREIRA, E. R. Estudo de apoio à decisão: a escolha do "Camisa 10" ideal baseado no método MacBeth. **RBFF-Revista Brasileira de Futsal e Futebol**, v. 8, n. 29, p. 113-128, 2016.

MARTINS, R. S.; CAIXETA FILHO, J. V. Subsídios à tomada de decisão da escolha da modalidade para o planejamento dos transportes no estado do Paraná. **Revista de Administração Contemporânea**, v. 3, n. 2, p. 75-96, 1999.

MELLO, J. C. C. B. S.; GOMES, E. G.; LINS, M. P. E. Análise Multicritério da presença da Universidade Federal Fluminense com o uso do Método Macbeth. **Production**, v. 11, n. 2, p. 53-67, 2001.