

DESENVOLVIMENTO DE UM COMITÊ DE TOMADA DE DECISÃO E APLICAÇÃO NA SELEÇÃO DE CODUTORES PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO AÉREA

Douglas Angelo Teixeira

Instituto Federal do Norte de Minas Gerais
Rua Dois, 300 - Village do Lago I - 39404-058 Montes Claros, MG, Brasil
e-mail: douglas.teixeira@ifnmg.edu.br

Marcos Felipe de Oliveira Ribeiro

Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha - 31270-901 Belo Horizonte, MG, Brasil.
e-mail: marcosfeliper@gmail.com

Edino Barbosa Giudice Filho

CEMIG Distribuição S. A.
Av. Barbacena 2000 Belo Horizonte
e-mail: edino@cemig.com.br

João Antônio Vasconcelos

Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha - 31270-901 Belo Horizonte, MG, Brasil.
e-mail: vasconcelos.joao.antonio@gmail.com

RESUMO

Neste trabalho é proposto um comitê de tomada de decisão para a seleção de condutores de linha de Transmissão Aérea (LT). O comitê é formado por três métodos de tomada de decisão distintos: o Smarter, Promethee II e Bellman-Zadeh. Durante o projeto de uma linha de transmissão a escolha do condutor possui fundamental importância devido ao impacto direto no preço da instalação. As características físicas desses condutores ditam o comportamento da LT em regime normal de operação, define seus parâmetros elétricos e respondem por aproximadamente um terço do custo da LT. Os critérios utilizados para a avaliação de cada condutor são: Seção Transversal, Peso Nominal, Carga de Ruptura, Resistência Elétrica e Ampacidade. Assim, são realizadas simulações computacionais em três diferentes cenários: distribuição igualitária dos pesos entre os critérios, priorização do custo da instalação e priorização das perdas por efeito joule.

PALAVRAS CHAVE. Tomada de Decisão, Linha de Transmissão Aérea, Condutores.
Área Principal: ADM – Apoio à Decisão Multicritério

ABSTRACT

In this work is presented a committee of decision-making for conductor's selection of overhead transmission Lines (LT). The committee is composed of three different decision-making methods: Smarter, Promethee II and Bellman-Zadeh. During the project of a transmission line, the choice of the conductor is of fundamental importance due its impact on the installation's price. The conductor's physical characteristics contribute for the transmission line's behavior under normal operation; they define the electrical parameters and correspond for approximately one third of the LT's cost. The criteria used for evaluation of each conductor are Cross-sectional Area, Nominal Weight, Tensile Strength, Electrical Resistance and Ampacity. Thus, computer simulations are performed in three different scenarios: equal distribution of weights among criteria, prioritization of the installation's cost, and prioritization of losses by Joule effect.

KEYWORDS. Decision Making, Overhead Transmission Line, Electrical Conductor.
Main Area: Multicriteria Decision Support

1. Introdução

A decisão é uma atividade que, por englobar múltiplos critérios e perspectivas, necessita que seja feito um balanceamento de todos os fatores envolvidos no processo. A consideração desses diversos fatores impede, principalmente no caso de decisões complexas, que uma decisão possa ser tomada ao se considerar apenas um critério. Daí a importância de metodologias para a tomada de decisão que considerem todos os aspectos que são entendidos como relevantes para um dado problema (Roy, 1993).

Em relação à tomada de decisão multicritério, existem duas principais linhas de pensamento: as Escolas Americana e Francesa (ou Europeia) (Parreiras, 2006).

Na Escola Americana, a tomada de decisão é baseada na Teoria da Utilidade Multiatributo. Esta mapeia matematicamente a preferência do decisor e aplica uma função utilidade de modo que, para cada alternativa, seja atribuída uma nota. Dessa forma as alternativas são ordenadas da melhor, a que possui uma nota mais alta, ou seja, maior valor na função utilidade, até a pior delas. Assim, os métodos baseados nesta teoria auxiliam o decisor na construção da função utilidade de acordo com suas preferências para cada critério do problema.

A Escola Francesa baseia-se no conceito de “sobreclassificação”, com métodos compostos basicamente de duas etapas. Primeiro são realizadas comparações entre cada uma das alternativas possíveis com as demais, de maneira que dada duas alternativas “a” e “b” do conjunto citado, se “a” é tão boa quanto “b”, ela sobreclassifica “b”. Depois executa-se uma ordenação destas através de um conjunto de diretrizes, que classifica as alternativas.

Uma outra abordagem para a tomada de decisão é utilizar lógica fuzzy. Nesta abordagem considera-se um conjunto de critérios adaptados à função de pertinência (fuzzificação). Após a avaliação de cada critério é retornado o resultado e feita a interseção entre os valores dos critérios (defuzzificação).

Para a formação do comitê de tomada de decisão será utilizado um método da escola francesa, um da americana e um baseado em lógica nebulosa. O resultado apresentado por esses três métodos são utilizados no comitê para a obtenção dos resultados finais.

Durante o projeto de uma linha de transmissão aérea (LT), uma etapa muito importante é a escolha do condutor que irá transmitir energia elétrica. As características físicas desses condutores ditam o comportamento da LT em regime normal de operação, e define seus parâmetros elétricos.

O cabo condutor pode ser considerado o principal elemento da linha de transmissão por representar um terço do custo total dessa, e deve portanto, possuir características bem definidas. A especificação adequada desse componente é de extrema importância para o dimensionamento da linha, pois não só depende disso o bom desempenho na operação, como também importantes implicações de natureza econômica (Carvalho, 2007).

Desse modo, a partir das características dos cabos presentes em catálogos de fabricantes é possível selecionar características mais relevantes que direcionem para a escolha do condutor. Neste trabalho são analisadas as seguintes características: Seção Transversal Útil (mm^2) que está relacionada diretamente ao custo, Peso Nominal (kg/km) relacionado aos esforços estruturais, Carga de Ruptura (kgf) relacionada à resistência mecânica do condutor, Resistência Elétrica ($\text{k}\Omega/\text{km}$) relacionada às perdas por efeito Joule e Ampacidade (A), relacionada à máxima transmissão de corrente.

Ao considerar cada uma dessas características, pode-se dizer no geral, que uma boa opção de condutor deve possuir: uma seção transversal mínima, pois com o aumento da seção transversal ocorre um aumento do custo do condutor; peso nominal mínimo, já que com o aumento do peso do condutor se aumenta os esforços nas estruturas; carga de ruptura elevada, por permitir mais segurança na operação do condutor e utilização de flechas menores, o que leva a um menor comprimento do condutor utilizado por vão; resistência elétrica mínima, uma vez que com o aumento da resistência elétrica também ocorre o aumento das perdas na linha e, por fim, uma maior ampacidade, para possibilitar a condução de mais corrente e portanto mais energia pela LT.

2. Comitê de Tomada de Decisão

O comitê de Tomada de Decisão busca a solução mais adequada dentre as alternativas disponíveis para um determinado problema, a partir da utilização de dois ou mais métodos de tomada de decisão. O comitê de tomada de decisão do presente trabalho consiste em uma avaliação simultânea de três métodos com diferentes características: Smarter (Escola Americana), Promethee II (escola francesa) e Bellman-Zadeh (lógica fuzzy). A seguir cada um dos métodos é descrito em detalhes.

2.1 Smarter - Simple Multi-attribute Rating Technique Exploiting Ranks

Este método é similar ao Smarts, que aproxima as funções utilidade por funções lineares e estima o peso de cada critério por uma técnica chamada *Rank Order Centroid (ROC)* (Edwards, 1994).

O método Smarter pode ser descrito através dos passos a seguir (Parreiras, 2006).

- Construir uma tabela de avaliações de consequências. As consequências podem corresponder a características elétricas e/ou mecânicas dos condutores da linha de transmissão.
- Eliminar as alternativas dominadas em todos os critérios por outras soluções e verificar se algum dos intervalos $[f_{min}, f_{max}]$ diminuiu.
- Transformar os dados da tabela em funções utilidades u_i para cada critério. Para isso, é necessário verificar se os valores de $u_i(f_i(x_j))$, $\forall j = 1, \dots, n$ podem ser aproximados por funções lineares, conforme Figuras 1 e 2.

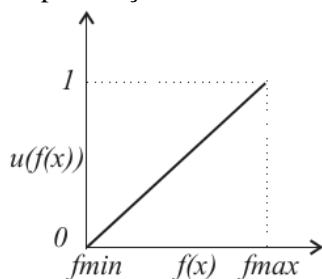


Figura 1: Função utilidade que cresce com o aumento de $f(x)$.

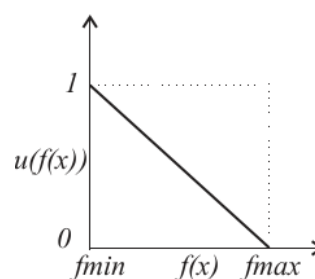


Figura 2: Função utilidade que cresce com o decréscimo de $f(x)$.

- Para agregar os critérios em um funcional que represente a preferência global do decisor, pode-se adotar o modelo aditivo, apresentado pela equação 1, que é o mais simples.

$$U_a = \sum_{i=1}^m w_i u_i(a_i) \quad (1)$$

- Antes de se fixar os pesos w_i , primeiramente os critérios são ordenados da maior para a menor prioridade.
- A determinação dos pesos de cada critério. O Smarter baseia-se na distribuição de pesos aproximados pelo "*Rank Order Centroid*" (ROC).

$$w_k = \frac{1}{m} \sum_{i=k}^m \frac{1}{i} \quad (2)$$

- Tomar a Decisão.

2.2 Promethee II - Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations

Este é um método desenvolvido pela escola francesa. Usa o conceito de fluxo de rede da teoria de grafos para construir as relações de sobreclassificação e ordenar as alternativas da

melhor até a pior. Esse método admite situações em que a preferência do decisor é indefinida e as alternativas são consideradas incomparáveis (Buchanan, 2006).

Nesta classe de métodos, o resultado da comparação entre duas alternativas quaisquer a e b é expresso em termos de uma função preferência que deve refletir, para cada critério, o nível de preferência de a em relação a b . Assim, levando-se em conta apenas a avaliação segundo o critério c_i , tem-se que:

- $p_i(a, b) = 0$: indica indiferença entre a e b ;
- $p_i(a, b) = 1$: indica preferência de a em relação a b .

A função $p_i(\cdot)$ é uma função da diferença entre avaliação das consequências de ambas alternativas. Para a escolha do condutor com as melhores características considera-se $p_i(a, b) = p_i(d_i)$. Quando o problema é de minimização, a curva referente a $p_i(d_i)$ deve ser não-decrescente para $d_i > 0$ e nula para $d_i \leq 0$. Assim neste trabalho utilizou-se a função de preferência do critério usual apresentado na figura 3 e equação 4.

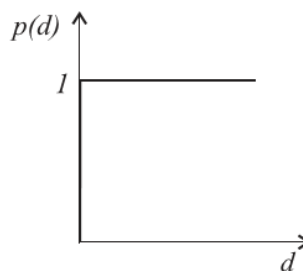


Figura 3 – Critério Usual.

$$p_i(d_i) = \begin{cases} 0, & \text{se } d_i \leq 0, \\ 1, & \text{se } d_i > 0. \end{cases} \quad (3)$$

Tendo especificado uma função $p_i(d_i)$ e um peso w_i para cada critério, de modo que $\sum_{i=1}^m w_i = 1$, calcula-se então o índice de preferência multicritério $\Pi(a, b)$, que reflete a intensidade da preferência global (para todos os critérios) da alternativa a em relação a b :

$$\Pi(a, b) = \sum_{i=1}^m w_i p_i(a, b) \quad (4)$$

As comparações entre as alternativas podem ser representadas através de grafos direcionados em que cada nó corresponde a uma alternativa e cada arco, a uma relação de preferência global. Entre dois nós a e b existem sempre dois arcos, aos quais são associados os índices $\Pi(a, b)$ e $\Pi(b, a)$, conforme mostra a Figura 4.

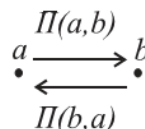


Figura 4. Arcos entre as alternativas a e b .

Nesse grafo, o fluxo total que entra no nó a é calculado por:

$$\varphi_{in} = \sum \Pi(b, a) \quad (5)$$

Analogamente, o fluxo total que sai do nó pode ser calculado por:

$$\varphi_{out} = \sum \Pi(a, b) \quad (6)$$

Enfim, o fluxo de rede no nó a é definido como a diferença entre o fluxo que sai e o que entra:

$$\varphi(a) = \varphi_{out}(a) - \varphi_{in}(a) \quad (7)$$

- se e somente se $\varphi(a) > \varphi(b)$, então a é preferida a b ;
- se e somente se $\varphi(a) = \varphi(b)$, então a é indiferente a b .

2.3 Bellman-Zadeh

O método fuzzy segundo a abordagem de Bellman-Zadeh exige que os valores dos critérios de cada alternativa sejam representados a partir de conjuntos nebulosos (Bellman and Zadeh, 1970). São aceitáveis apenas as funções de pertinência capazes de refletir fielmente o grau em que a alternativa atinge o ponto ótimo do objetivo em questão, sendo recomendado o uso de funções de pertinência do tipo (Ekel, 2002):

- para maximização: $\mu_{f_i}(x) = \frac{f_i(x) - f_{min_i}}{f_{max_i} - f_{min_i}}$,
- para minimização: $\mu_{f_i}(x) = \frac{f_{max_i} - f_i(x)}{f_{max_i} - f_{min_i}}$,

Em ambas equações, f_{min_i} e f_{max_i} correspondem, respectivamente, aos valores mínimo e máximo das características dos condutores e cada um dos critérios avaliados para cada alternativa.

Tendo definido os conjuntos nebulosos para cada critério, esses podem ser combinados por meio do operador interseção em um único conjunto D , que permite ordenar as alternativas conforme a preferência do decisor, levando-se em conta, simultaneamente, todos os critérios. Assim, a função de pertinência μ_D é obtida pela aplicação do operador min , conforme mostra a Equação 8.

$$\mu_D = \min(\mu_{f_1}^{w1}, \dots, \mu_{f_m}^{wm}) \quad (8)$$

A interseção utilizando o operador de minimização, busca o menor valor de cada critério por alternativa da função de pertinência. Após esta etapa é considerada a melhor alternativa, aquela que recebeu a maior nota. Por exemplo, suponha que determinado trabalhador tenha que escolher entre 4 propostas de emprego que possua a função de pertinência apresentada na Tabela 1:

Tabela 1: Relação de critérios e alternativas para as quatro propostas de emprego.

Critérios\Alternativas	A1	A2	A3	A4
Salário	0,1	0,3	0,5	0,7
Interesse	0,5	0,6	0,2	0,2
Distância	0,1	0,9	0,7	1,0

A aplicação do operador interseção por minimização retorna o menor valor de cada alternativa, considerando todos os critérios. Assim, as alternativas recebem as notas apresentadas pela Tabela 2. Desta forma, a alternativa escolhida é a que possui o maior valor após a interseção que neste caso foi a alternativa A2 com o valor de 0,3.

Tabela 2: Resultado após a aplicação do método de interseção por minimização.

A1	A2	A3	A4
0,1	0,3	0,2	0,2

2.4 Escolha da melhor solução

As alternativas serão avaliadas por cada um dos métodos de tomada de decisão descritos acima. De posse das notas dadas às alternativas por cada método, é feita uma normalização das alternativas. No caso dos métodos Smarter e Belman-Zadeh é realizada uma normalização em

relação ao indivíduo de maior valor. Para o método Promethee II antes da normalização é feito um deslocamento das alternativas mantendo a proporção entre os valores absolutos das notas das mesmas, conforme equação 9. Este procedimento é realizado, pois como ocorre uma subtração dos fluxos que saem e entram do nó podem ocorrer valores negativos caso os fluxos que entram sejam maiores do que os que saem. Assim, este deslocamento visa manter todas as avaliações com valores positivos mantendo a distância absoluta entre cada uma das avaliações. Após a normalização de cada método será feita a média das notas para a classificação final das alternativas.

$$\begin{aligned} Min_{pth} &= \min(Pth) \\ Pth_d &= Pth(i) + abs(Min_{pth}) \\ Pth_{dn} &= Pth_d / \max(Pth_d) \end{aligned} \quad (9)$$

Em que,

Pth : relação de sobreclassificação utilizando pelo método Promethee II.

Min_{pth} : menor valor dentre as alternativas avaliadas. Normalmente é um valor negativo.

Pth_d : relação de sobreclassificação deslocada.

Pth_{dn} : relação de sobreclassificação deslocada e normalizada.

3. Descrição do Problema

As linhas de transmissão aéreas utilizam cabos que possuem o aspecto semelhante ao apresentado na Figura 5. Este é um condutor de alumínio com alma de aço que tem o encordoado concêntrico composto de uma ou mais camadas e o núcleo de aço. Ele pode ser constituído por um único fio de aço ou diversos fios de aço encordoados conforme a dimensão do cabo. Os fios de alumínio representam sua seção transversal útil, importante para a condução da corrente elétrica e diminuição da resistência elétrica. Já o cabo de aço dá ao condutor uma maior resistência mecânica aumentando sua carga de ruptura.

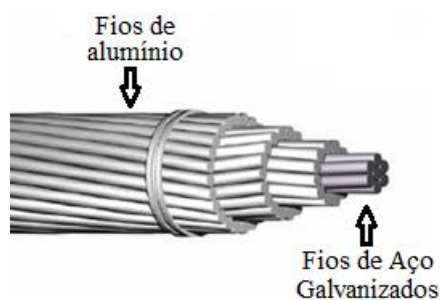


Figura 5. – Cabo de alumínio com alma de aço.

Diversas opções de cabos para linhas de transmissão estão disponíveis no mercado. Tanto nos cabos existentes quanto nos novos arranjos de condutores desenvolvidos busca-se uma relação eficiente entre o custo para a aquisição e perdas aceitáveis durante o período em que a linha esteja em operação. Assim, as seguintes características são desejáveis para estes cabos:

- Alta condutibilidade elétrica (baixa resistência elétrica) - para que as perdas por efeito Joule possam ser mantidas, economicamente, dentro de limites aceitáveis ao longo da operação da linha de transmissão, normalmente, acima de 30 anos;
- Baixo custo (mínima seção transversal útil) - o custo dos cabos condutores absorve parcela do investimento total de uma linha, incluindo, portanto, no custo do transporte da energia;
- Alta resistência mecânica (elevada carga de ruptura) - assegurar integridade mecânica da linha, garantindo continuidade de serviço e segurança das propriedades e das vidas;
- Baixo peso específico - as estruturas de suporte são dimensionadas para absorver os esforços mecânicos transmitidos pelos condutores, e um desses é seu peso. Por isso,

quanto maior for seu peso, mais robustas e caras serão as estruturas;

- Elevada ampacidade - considerando que a tensão de transmissão é fixa se um condutor possui a capacidade de conduzir uma corrente mais elevada é possível transmitir mais energia com a mesma linha.

Apesar de desejadas, as condições mencionadas anteriormente não são atendidas simultaneamente por nenhum material em particular. Mas, com o intuito de buscar o condutor que possua uma boa relação entre estas características será aplicado o comitê de tomada de decisão desenvolvido.

É importante ressaltar que serão analisadas as características físicas dos condutores apresentadas pelo catálogo de fabricante de cabos específicos para este fim (Nexans, 2013). Para a análise dos campos elétricos e magnéticos além da análise de ruído audível, rádio interferência e efeito corona seria necessário considerar a configuração de uma estrutura para a posição destes condutores no espaço, sendo assim uma proposta de trabalho futuro.

3.1 Seleção do campo de Busca para LT 138kV

A princípio, foram selecionados os cabos mais apropriados a serem utilizados em linhas de transmissão. Em linhas de 138 kV, são usados em geral os cabos 266,8 kCM chamado PARTRIDGE ou o cabo 397,5 kCM denominado IBIS (Cavassin, 2012). As estruturas metálicas destas linhas têm suas árvores de carregamento apropriadas para estes dois cabos.

Portanto, para evitar a necessidade de cálculo estrutural das torres foram selecionados, para a simulação, cabos com características mecânicas de peso, tração e diâmetro parecidas com os cabos mencionados. A composição de cada tipo de cabo é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Condutores para Linha de Transmissão de 138 kV.

Cabos de alumínio nu com alma de aço - CAA - Dados técnicos LT de 138 kV							
Nº	Condutor	kCM	Seção Transversal (mm ²)	Peso Nominal (kg/km)	Carga de Ruptura (kgf)	Resistência Elétrica (ohms/km)	Ampacidade (A)
1	Waxwing	266,8	135,07	430,7	3114	0,2584	504
2	Owl	266,8	135.18	507.9	4393	0.2553	512
3	Partridge	266,8	135.19	546.7	5121	0.2554	514
4	Ostrich	300,0	151.97	614.2	5751	0.2274	553
5	Merlin	336,4	170.42	543.5	3929	0.2051	583
6	Linnet	336,4	170.32	688.3	6396	0.2032	594
7	Oriole	336,4	170.50	784.3	7879	0.2013	601
8	Chickadee	397,5	201.36	642.2	4509	0.1734	648
9	Brant	397,5	201.43	761.9	6633	0.1742	653
10	Ibis	397,5	201.21	813.4	7387	0.1721	659
11	Lark	397,5	201.45	926.6	9252	0.1703	668
12	Pelican	477,0	241.72	770.9	5321	0.1448	726
13	Flicker	477,0	241.72	914.6	7802	0.1442	735

3.2 Seleção do campo de Busca para LT 230kV

Seguindo o mesmo procedimento utilizado anteriormente, foram selecionados cabos com características semelhantes aos que são utilizados para linha com este nível de tensão.

Em linhas de 230 kV são usados em geral os cabos 636 kCM chamado GROSBEAK ou o cabo 795 kCM denominado DRAKE (Cavassin, 2012). As estruturas metálicas destas linhas têm suas árvores de carregamento apropriadas para estes dois cabos. Então, foram selecionados para a simulação, cabos com características mecânicas de peso, tração e diâmetro parecidas com os cabos mencionados. A composição de cada tipo de cabo é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Condutores para Linha de Transmissão de 230 kV.

Cabos de alumínio nu com alma de aço - CAA - Dados técnicos LT de 230 kV							
Nº	Condutor	kCM	Seção Transversal (mm ²)	Peso Nominal (kg/km)	Carga de Ruptura (kgf)	Resistência Elétrica (ohms/km)	Ampacidade (A)
1	Gannet	666,6	337.76	1365.2	11958	0.1032	911
2	Stilt	715,5	362.78	1372.2	11566	0.096	949
3	Starling	715,5	362.62	1465.8	12841	0.0957	954
4	Redwing	715,5	362.43	1652.7	15692	0.0951	964
5	Cuckoo	795,0	402.86	1523.8	12639	0.0865	1014
6	Drake	795,0	402.92	1628.7	14266	0.0864	1018
7	Mallard	795,0	402.87	1838.4	17463	0.0858	1029
8	Tern	795,0	402.82	1333.4	9998	0.0876	1000
9	Condor	795,0	402.59	1523.1	12761	0.087	1011
10	Ruddy	900,0	456.01	1509.8	11103	0.0768	1086
11	Canary	900,0	456.00	1725.1	14453	0.0771	1091
12	Rail	954,0	483.32	1600.2	11768	0.0733	1120
13	Cardinal	954,0	483.38	1828.7	15321	0.0727	1132

4. Resultados das Simulações Computacionais

As simulações para a seleção do cabo foram realizadas para a linha de 138kV e para 230kV respectivamente. Para cada nível de tensão foram utilizados 13 tipos de cabos com características semelhantes aos condutores utilizados normalmente por estes projetos. Para tanto, são analisados cinco critérios que são: Seção transversal (mm²), Peso Nominal (kg/km), Carga de Ruptura (kgf), Resistência Elétrica (Ohm/km) e Ampacidade (A). Assim, receberá a maior nota o condutor que minimizar a Seção transversal, o Peso Nominal e a Resistência Elétrica, além de maximizar a carga de ruptura e a Ampacidade, simultaneamente.

São avaliados três cenários para a escolha do condutor mais apropriado que são:

- Mesmo compromisso entre os critérios;
- Priorização do custo;
- Priorização das perdas por efeito joule.

A distribuição dos pesos para cada critério foi utilizado de forma que o seu somatório fosse um. Assim, para o cenário a) utilizou-se o peso de 0,2 para cada critério. Para os cenários b) e c) foi utilizado o método de distribuição de pesos ROC apresentado pela equação 2. A Tabela 5 apresenta a distribuição dos pesos após a definição da ordenação de cada critério.

Tabela 5 – Distribuição dos pesos para os cenários b) e c).

Critério	Priorização do custo	Priorização das perdas
Seção transversal	0,4567	0,04
Peso Nominal	0,2567	0,09
Carga de Ruptura	0,1567	0,1567
Resistência Elétrica	0,09	0,4567
Ampacidade	0,04	0.2567

As Tabelas 6 e 7 apresentam os resultados da simulação computacional para a seleção dos condutores para as linhas de 138 kV e 230kV, respectivamente. Em cada tabela é apresentado o resultado sem priorização de critérios, priorização de custo e priorização das perdas. Os cabos estão ordenados de forma decrescente, sendo que o cabo que recebeu a nota um é o cabo mais recomendado para determinado cenário.

No comitê, primeiramente as notas são retornadas por cada método já normalizadas para posteriormente serem somadas e então ser realizada uma normalização final. Assim, para terminar a avaliação, os cabos são ordenados de forma decrescente, sendo que o cabo que recebeu a nota um é o cabo mais recomendado para determinado cenário.

Tabela 6 – Resultado da simulação computacional para os cabos da linha de 138kV.

Classificação dos cabos de 138 kV					
Distribuição uniforme dos pesos		Priorização das Perdas		Priorização do Custo	
Nº Cabo	Nota	Nº Cabo	Nota	Nº Cabo	Nota
10	1.0000	10	1.0000	4	1.0000
7	0.9243	9	0.9250	2	0.9758
9	0.9078	8	0.8356	3	0.9659
6	0.8800	13	0.7815	6	0.8837
8	0.7714	7	0.7162	5	0.7899
13	0.7057	12	0.7030	7	0.7808
11	0.6679	11	0.6697	1	0.7429
4	0.6677	6	0.6283	10	0.5291
12	0.5616	5	0.4213	8	0.5264
5	0.5548	4	0.3098	9	0.5221
2	0.3573	3	0.1419	11	0.2663
3	0.3322	2	0.1404	13	0.1437
1	0.2499	1	0.0608	12	0.1370

Tabela 7 – Resultado da simulação computacional para os cabos da linha de 230kV.

Classificação dos cabos de 230 kV					
Distribuição uniforme dos pesos		Priorização do Custo		Priorização das Perdas	
Nº Cabo	Nota	Nº Cabo	Nota	Nº Cabo	Nota
11	1.0000	3	1.0000	11	1.0000
9	0.9817	4	0.9410	12	0.9368
6	0.9766	2	0.9124	10	0.9003
5	0.9208	9	0.7924	13	0.7556
4	0.8636	1	0.7242	6	0.7093
10	0.8500	5	0.7105	5	0.6304
3	0.7755	6	0.6351	9	0.6023
13	0.7733	8	0.5004	7	0.5281
7	0.6983	7	0.3542	4	0.3479
12	0.6307	10	0.3034	8	0.3037
8	0.4781	11	0.2774	3	0.2286
2	0.4714	12	0.1554	2	0.1464
1	0.4402	13	0.1210	1	0.0756

As Figuras 6, 7 e 8 apresentam os nomes e o desempenho de cada critério dos cinco melhores cabos para a linha de 138 kV e as figuras 9, 10 e 11 mostram os nomes e o desempenho de cada critério dos cinco melhores cabos para a linha de 230 kV. A legenda apresenta a ordem decrescente dos melhores cabos para cada cenário avaliado. Cada critério está normalizado e apresentado em valores entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de um melhor atende àquele critério. Por exemplo, deseja-se minimizar a seção transversal, então o cabo com menor seção transversal recebe a nota um e para o critério de maximizar a Ampacidade o cabo com maior Ampacidade também recebe a nota um.

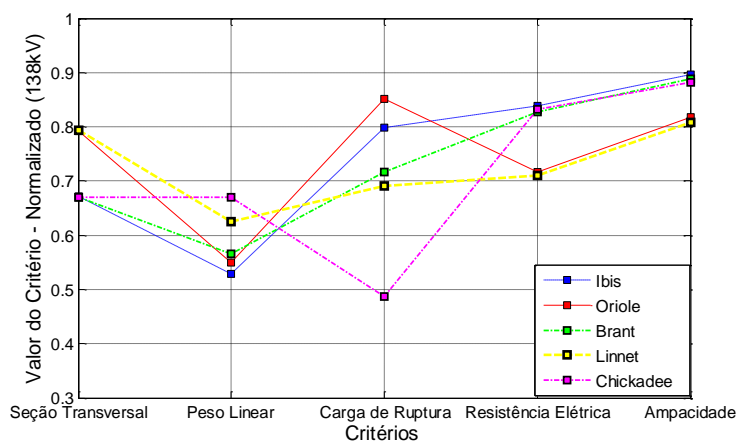


Figura 6 – Avaliação de cada critério para o cenário a) – mesma distribuição de pesos para cada um dos critérios para a linha de 138 kV.

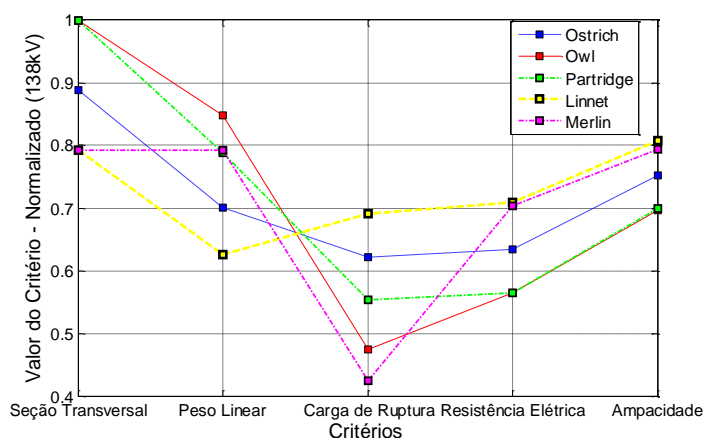


Figura 7 – Avaliação de cada critério para o cenário b) – priorização do custo do cabo para a linha de 138 kV.

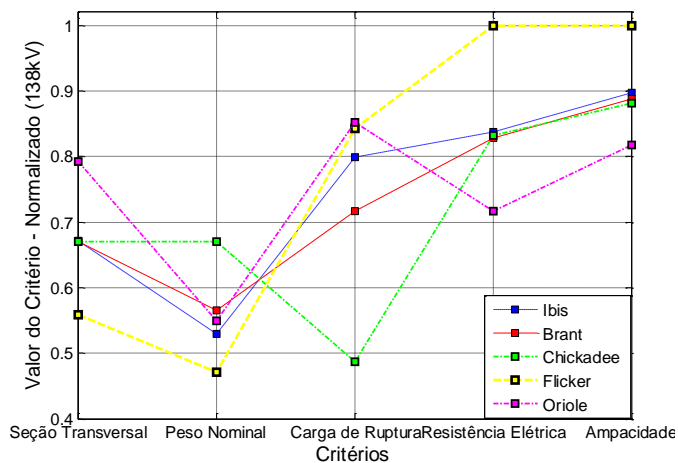


Figura 8 – Avaliação de cada critério para o cenário c) – priorização das perdas por efeito joule para a linha de 138 kV.

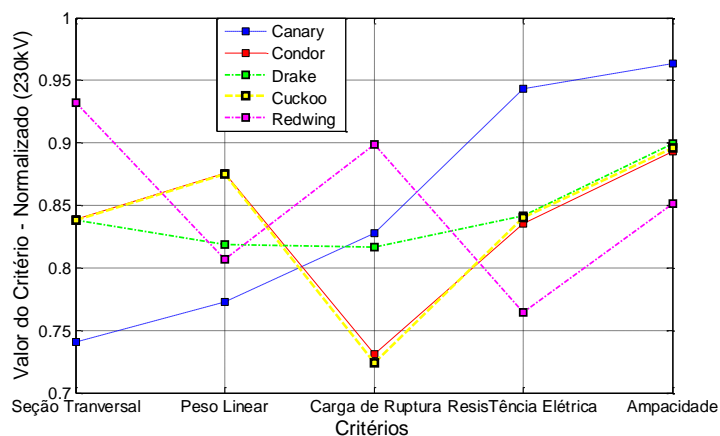


Figura 9 – Avaliação de cada critério para o cenário a) – mesma distribuição de pesos para cada um dos critérios para a linha de 230 kV.

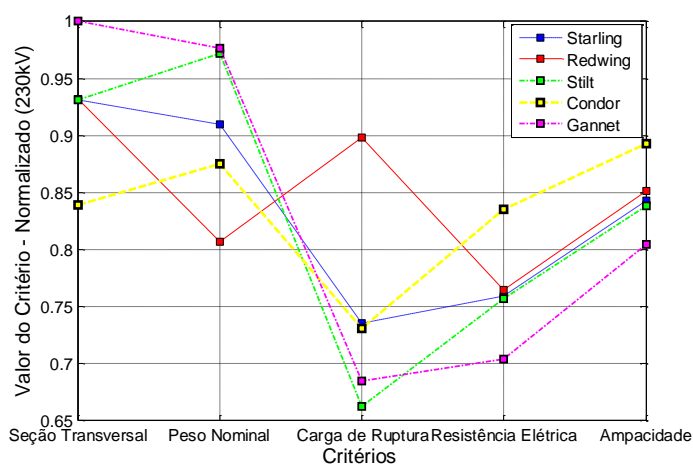


Figura 10 – Avaliação de cada critério para o cenário b) – priorização do custo do cabo para a linha de 230 kV.

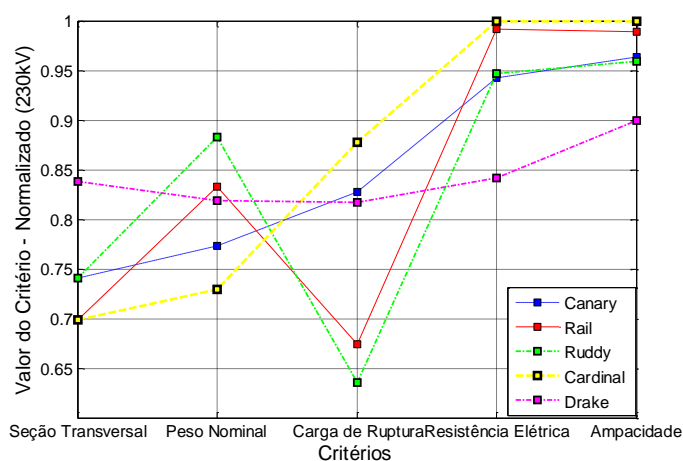


Figura 11 – Avaliação de cada critério para o cenário c) – priorização das perdas por efeito joule para a linha de 230 kV.

5. Conclusão

O comitê de tomada de decisão foi aplicado com a finalidade de auxiliar o projetista de linha de transmissão aérea a selecionar o condutor que melhor atenda as suas necessidades. Foram utilizadas três metodologias diferentes de tomada de decisão que foram o Smarter, Promethee II e o método fuzzy de Bellman-Zadeh.

A seleção do condutor da LT é uma parte importante do seu projeto, visto que responde por uma parcela considerável de seu custo total. A partir das simulações computacionais realizadas pode-se verificar a influência do cenário, ao qual deseja-se efetuar o projeto da LT, durante a seleção do condutor. Conforme apresentado, para um cenário em que não se deseja priorizar nenhum critério ou se deseja menores perdas ao longo da vida útil da linha de transmissão de 138 kV, a melhor escolha é o cabo IBIS e para a linha de transmissão de 230 kV é o cabo Canary. Caso se priorize um menor custo de instalação a alternativa recomendada é o condutor Ostrich para a linha de 138 kV e o Starling para a linha de 230 kV.

A escolha de qual o melhor condutor a ser utilizado depende das perspectivas futuras da empresa em priorizar o custo de implantação ou futuras recapacitações da linha caso haja um aumento de carga que justifique um novo projeto.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CEMIG Distribuição S. A., FAPEMIG e ANEEL por financiamento de parte desta pesquisa (Projeto de P&D APQ 03432-11).

6. Referências Bibliográficas

- Bellman, R. E., Zadeh, L. A.**, “Decision-making in a Fuzzy Environment, Management Science, vol. 17, pp. 141-164, 1970.
- Buchanan, L. Et Al.** A Brief History of Decision Making. Harvard Business Review, Boston, V.84, n.1. p32-41. Jan.2006.
- Carvalho, C. G.**, Características dos Parâmetros do Condutor Equivalente a um feixe de Subcondutores de Linhas de Transmissão: Análise Inicial. UNESP, Dissertação de Mestrado, 2007.
- Edwards, W., and Barron, F. H.**, “Smarts and Smarter: Improved Simple Methods for Multiattribute Utility Measurement”, Organizational Behavior and Human Decision Processes, vol. 60, pp. 306-325, 1994.
- Ekel, P. Y.**, “Fuzzy Sets and Models of Decision making”, Computers and Mathematics with Applications, vol. 44, pp. 863-875, 2002.
- Nexans**, Nexans Brasil: Catálogo de Condutores de Alumínio Nu, Acessado em 20/02/2014. Disponível http://www.nexans.com.br/eservice/Brazil-pt_BR/fileLibrary/Download_540134436.
- Parreiras, R. O.**, Algoritmos Evolucionários e Técnicas de Tomada de Decisão em Análise Multicritério. Tese de Doutorado. PPGEE-UFMG – Belo Horizonte 2006.
- Cavassin, R. S.**, Thelma S. Piazza Fernandes. “Uma Abordagem Multicritérios para Recapacitação de Linhas de Transmissão”, Revista Controle & Automação/Vol.23no.6/Novembro e Dezembro 2012, pg. 749-765.
- Roy, B.; Bouyssou, D.** Decision-aid: An Elementary Introduction with Emphasis on Multiple Criteria. Investigación Operativa, v.3, n.2 -3, p.175-190, 1993.