



7th INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION Academic

“CLEANER PRODUCTION FOR ACHIEVING SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS”

Aplicação da Programação por Metas em Estudos sobre Sustentabilidade: Transporte de Soja no Brasil

RICHARD SILVA, T. ^{a,b,*}, AGOSTINHO, F. ^a, MORENO GARCÍA, R.R. ^c, SEVEGNANI, F. ^a

a. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Paulista, São Paulo, Brasil

b. Faculdade de Tecnologia “Rubens Lara”, Santos, Brasil

c. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba

**Corresponding author, thamesilva@hotmail.com*

Resumo

Richard Silva et al. (under review) estudaram a sustentabilidade dos sistemas rodoviário e ferroviário no transporte da soja Brasileira entre os centros produtor e exportador (1.982 km), utilizando o modelo multicritério de sustentabilidade dos cinco setores (5 SEnSU). Dos dez indicadores avaliados simultaneamente pelo modelo 5 SEnSU, os resultados indicaram maior sustentabilidade para o transporte ferroviário. Entretanto, devido à abordagem multimétrica utilizada, a interpretação gráfica dos resultados pode tornar-se uma tarefa difícil e que exige ferramentas estatísticas como suporte. Neste sentido, este trabalho aplica a filosofia da programação por metas nos resultados obtidos por Richard Silva et al. (under review) para avaliar quantitativamente a sustentabilidade dos sistemas de transporte de soja rodoviário e ferroviário, integrando todos os indicadores previamente obtidos pelo modelo 5SEnSU em um único indicador sustentabilidade global (WSI). Os resultados mostram que enquanto o sistema ferroviário possui WSI de 3,47, o rodoviário possui 3,55, sendo o ferroviário o ligeiramente mais sustentável. Espera-se que, além de fornecer subsídios aos tomadores de decisão sobre o transporte de soja no Brasil, este trabalho possa ser considerado como referência de um método multicritério de avaliação da sustentabilidade de outros sistemas de transporte.

Palavras-chave: multicritério, programação por metas, soja, sustentabilidade, transporte.

1. Introdução

Richard Silva et al. (under review) avaliaram os sistemas de transporte da soja Brasileira entre os centros produtor e exportador com base em um modelo multicritério de avaliação de sustentabilidade denominado 5 SEnSU. Este modelo permite a utilização de indicadores relacionados aos setores ambiental, social e econômico, apresentando o resultado por meio de leitura gráfica; os indicadores são inicialmente normalizados e representados em um gráfico radar. Para sua interpretação, indicadores com critério de minimização são invertidos a fim de relacionar a maior área do gráfico com o sistema mais sustentável sendo comparado. Apesar de que esta abordagem permite, na maioria dos casos, que o analista identifique o sistema mais sustentável, em alguns casos a interpretação gráfica pode ser considerada difícil. Assim, para auxiliar na interpretação e decisão sobre qual sistema é o mais sustentável, o gráfico em radar pode ser substituído por uma abordagem multicritério de decisão.

Segundo Kumar et al. (2017), a análise de decisão multicritério é uma ferramenta valiosa na resolução de problemas caracterizada por múltiplos atores, critérios e objetivos. Os problemas avaliados pelo processo de decisão multicritério (MCDM) incluem o objetivo, preferências do tomador de decisão, alternativas, critérios, e resultados. Quando se deseja avaliar a sustentabilidade de sistemas de

“CLEANER PRODUCTION FOR ACHIEVING SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS”

produção, utilizar o MCDM pode se tornar complexo devido ao envolvimento de fatores incluindo técnicas institucionais, padrões sociais, econômicos e partes interessadas. O procedimento pode permanecer controverso porque os objetivos podem levar a diferentes soluções em diferentes momentos com base nas metas estabelecidas pelos tomadores de decisão ou pessoas envolvidas no procedimento. Dentro do MCDM são incorporadas várias categorias, e dentro das categorias pode-se ter diferentes métodos matemáticos. Segundo Forés et al. (2014), a programação por metas (goal programming, GP) é um método matemático classificado como um ramo da categoria de programação matemática multifuncional. Para Zhuang (2017), o GP é uma abordagem analítica importante para auxiliar na resolução de muitos problemas de decisão. A forma padrão de GP foi desenvolvida originalmente por Charnes e Cooper (1961).

Entre outras aplicações, o GP vem sendo utilizado em estudos relacionados à logística e/ou sustentabilidade. Zhang (2016) aplicou o GP na cidade de Xizang, China, para estabelecer a ordem de prioridade de metas nas áreas social, econômica e ambiental em busca do desenvolvimento do turismo sustentável. Além do GP, os autores aplicaram o processo de rede analítica e o método Delphi para estabelecer critérios, indicadores e pesos que alimentam o modelo GP. Os resultados apontaram que os aspectos econômicos devem ser priorizados, seguidos pelos sociais e ambientais. Yang et al. (2011) utilizaram o GP para criar um modelo de otimização de rede intermodal para avaliar a competitividade de 36 roteiros alternativos para o transporte de mercadorias dentre a China e quatro destinos diferentes na Índia. As variáveis custo, tempo, e confiabilidade foram consideradas no modelo GP, e os resultados indicaram que a distância não é um elemento crucial nos custos totais, mas a variável tempo tem grande influência e deve ser controlada. Choudhary e Shankar (2014) desenvolveram um modelo baseado em GP para auxiliar na avaliação de problemas de limitação de espaço para armazenamento de produtos. As variáveis de decisão consideradas foram tamanho de lote que o comprador deseja, custo, seleção da transportadora e fornecedor. O modelo determina os melhores períodos de entrega, lotes de compra e tipos de transportadores que devem ser escolhidos para maximizar a logística. Jayaraman et al. (2015) propuseram um planejamento estratégico para os setores econômicos dos Emirados Árabes Unidos baseado no GP para alcançar metas relacionadas aos objetivos de desenvolvimento sustentável até o ano 2030. O modelo GP objetivou indicar onde alocar recursos humanos e econômicos para elevar o PIB, a geração e disponibilização de eletricidade, e a redução de emissões de gases que causam efeito estufa. Cristobal (2012) desenvolveu um modelo GP aplicado na economia da Espanha que combina relações entre efeitos econômicos (PIB), energéticos (demanda de carvão), sociais (disponibilidade de empregos), e ambientais (emissões de GHGs e resíduos sólidos) na economia da Espanha. O modelo forneceu informações para stakeholders em busca da sustentabilidade nacional. Nhantumbu et al. (2001) utilizam o GP para gerenciar os recursos naturais de uma floresta em Moçambique por meio da comunidade local e governo buscando sua sustentabilidade. O estabelecimento de metas para o GP deu-se por meio de avaliação de especialistas e interesses do governo e população, sem ter um modelo conceitual de sustentabilidade suportando essas escolhas; buscou-se o equilíbrio entre o uso das áreas e a geração de empregos provenientes da exploração dos recursos naturais.

A maioria dos trabalhos encontrados em literatura científica que desenvolveram modelos baseados em GP objetivando alcançar metas em busca de sustentabilidade, não apresentam modelos conceituais de sustentabilidade que suportem a escolha de determinados indicadores em detrimento de outros. Isso levanta dúvidas sobre a verdadeira relação que os indicadores, variáveis e metas adotadas possuem com a definição de sustentabilidade, pois muitas vezes eles são escolhidos de forma subjetiva, parcial e individual. Neste sentido, a utilização da filosofia da programação por metas em conjunto com o modelo 5 SEnSU pode fornecer indicadores de sustentabilidade mais robustos e de fácil interpretação.

Este trabalho objetiva aplicar a filosofia do GP nos indicadores de sustentabilidade do transporte da soja no Brasil calculados por Richard Silva et al. (under review). O uso combinado do modelo 5SenSU com o GP pode auxiliar tomadores de decisão em direção ao desenvolvimento sustentável.

2. Método

2.1. Modelo Multicritério de Sustentabilidade dos Cinco Setores (5 SEnSU)

O grupo de pesquisa do Laboratório de Produção e Meio Ambiente da Universidade Paulista, Brasil, vem desenvolvendo nos últimos anos um modelo conceitual de sustentabilidade considerado mais robusto e alinhado aos objetivos de desenvolvimento sustentável estabelecido pela Organização das

Nações Unidas. Este modelo, denominado como Modelo Multicritério de Sustentabilidade dos Cinco Setores (5SenSU), vem sendo aplicado em estudos de caso para validar seu uso, avaliando vantagens e desvantagens. Até o momento, os trabalhos de Moreno García (2017) e Sevegnani et al. (2018) são os mais representativos, onde ambos foram considerados como referência por Richard Silva et al. (under review) no estudo da sustentabilidade do transporte de soja no Brasil.

Segundo Sevegnani et al. (2018), a concepção do modelo 5 SEnSU baseia-se em três axiomas básicos (a., b., c. descritos abaixo) relativos aos limites dos recursos naturais em relação aos ritmos que esses recursos são explorados e consumidos para garantir a atual taxa de desenvolvimento, bem como outros três axiomas (d., e., f.) adicionados pelos autores. Os cinco axiomas são descritos a seguir:

- a. Nenhum recurso renovável deve ser usado com uma taxa maior do que sua geração;
- b. Nenhum poluente deve ser produzido à uma taxa superior à que pode ser reciclada, neutralizada ou absorvida pelo meio ambiente;
- c. Nenhum recurso não renovável deve ser usado mais rápido do que o necessário para substituí-lo por um recurso renovável;
- d. Deve haver um equilíbrio entre o meio ambiente como fornecedor de recursos e como destinatário de resíduos e poluentes, com boas práticas de produção limpa e cuidados ambientais e conservação prevaletentes;
- e. A produção de bens e serviços deve limitar-se às restrições impostas pela exploração sustentável dos recursos naturais e pelo consumo responsável da sociedade, o que garante sua sustentabilidade;
- f. Para o homem como um ser social, seu relacionamento como um fornecedor de mão-de-obra e um receptor de produtos e serviços do setor econômico deve ser justo e benéfico.

Atendendo aos axiomas descritos e às três dimensões da sustentabilidade (meio ambiente, sociedade e economia), o modelo 5SenSU considera o meio ambiente como fornecedor e receptor; enquanto que no Setor #1 o meio ambiente possui a função de prover matérias-primas, no Setor #2 ele possui a função de receber resíduos gerados pelos processos antrópicos. Similarmente, a dimensão social atua como fornecedor de recursos socioeconômicos para a unidade de produção, trabalho, conhecimento e know-how (Setor #4), enquanto atua como receptor do dinheiro circulado e outros benefícios ou prejuízos sociais (Setor #5). Por fim, a dimensão econômica possui apenas um setor (Setor #3) que fornece produtos e serviços que serão consumidos pela sociedade recebendo em troca o pagamento por eles.

Ao todo tem-se 5 setores contemplando o modelo conceitual de sustentabilidade. Para cada um dos setores deve ser atribuído pelo menos um indicador representativo do setor e do sistema de produção sendo estudado. A escolha dos indicadores depende dos objetivos do analista, mas muitas vezes podem ser obtidos por abordagens participativas (como o método Delphi) ou mesmo por planos governamentais pré-estabelecidos e aceitos pelos stakeholders. Após calculados os indicadores, tem-se um diagnóstico multimétrico da sustentabilidade do sistema de produção. Maiores detalhes do modelo 5SenSU pode ser visto em Moreno García (2017) e Sevegnani et al. (2018).

2.2. Estudo de Caso

Para aplicação da programação por metas foi considerado o estudo de Richard Silva et al. (under review) que avaliou a sustentabilidade do transporte da soja no Brasil por rodovias e ferrovias. Os sistemas avaliados têm como origem as regiões produtoras de soja no Estado de Mato Grosso e como destino o porto de Santos onde estão localizados os terminais especializados no embarque da soja, perfazendo aproximadamente 2000 km. Em relação ao transporte ferroviário, inicialmente ocorre o transporte rodoviário dos 14 municípios produtores de soja em Mato Grosso até o terminal de Rondonópolis (chamado de rota #1, 534 km), havendo o transbordo para vagões e seu transporte até a região de Santos (rota #2; 1446 km). Em relação ao transporte rodoviário a soja é totalmente transportada dos 14 municípios produtores até o porto de Santos (rota#3; 1891 km). Detalhes dos cálculos estão disponibilizados em Richard Silva et al. (under review).

A aplicação do modelo 5 SEnSU resultou nos dez indicadores apresentados na **Tabela 1**. Como os indicadores possuem dimensões e escalas diferentes, eles foram inicialmente normalizados para permitir comparação e, em seguida, apresentados em um gráfico em radar para auxiliar na interpretação (**Fig. 1**). Neste gráfico, os indicadores que se desejam minimizar foram invertidos permitindo desta forma identificar o sistema de maior desempenho por meio da maior área

apresentada pelo gráfico. Importante enfatizar que, neste trabalho, todos os indicadores possuem a mesma importância para o conceito de sustentabilidade, portanto pesos diferentes não foram considerados.

Tabela 1. Resumo dos indicadores obtidos por Richard Silva et al. (under review) na avaliação da sustentabilidade dos sistemas de transporte ferroviário e rodoviário de soja no Brasil.

Indicador por setor do 5EnSU*	Unidade	Sistema	Sistema	Ferroviário/ rodoviário
	/ton km	ferroviário	rodoviário	
Energia	K11 sej	114 E+05	6,22 E+05	18.3
Área de influência	K12 m ²	11,4	34,9	0.3
Potencial de aquecimento global (GWP)	K21 kgCO _{2eq.}	395	1326	0.3
Potencial de acidificação (AP)	K22 kgSO _{2eq.}	1,29 E-03	2,12 E-03	0.6
Receita do transportador	K31 R\$	1591	1361	0.9
Lucro por empregado	K32 R\$	16,9	1,4	12.1
Disponibilidade de empregos	K41 unidade	0,11	0,09	1.2
Horas de trabalho	K42 h	177	21	8.4
Emissão de CO	K51 kgCO	6,04 E-01	7,98 E-01	0.8
Salário médio pago aos trabalhadores	K52 R\$	2230	1897	1.2

* Indicador K_{i,j} lê-se indicador j-ésimo do setor i do 5EnSU

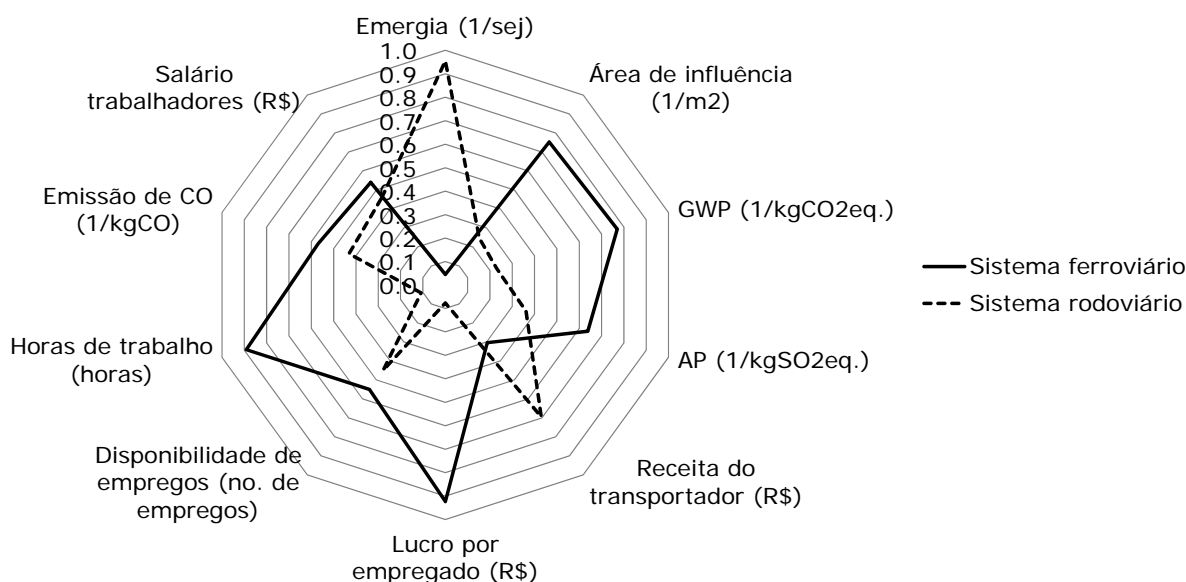


Fig. 1. Gráfico radar dos indicadores para cada setor do modelo 5EnSU obtido por Richard Silva et al. (under review) na avaliação da sustentabilidade dos sistemas de transporte ferroviário e rodoviário de soja no Brasil. Valores por tonelada de soja transportada em um quilômetro (ton km).

Observa-se na **Fig. 1** que a área correspondente ao transporte de soja por ferrovias é maior do que a área obtida pelo transporte rodoviário, por conseguinte, pode-se dizer que no Brasil o transporte de soja ferroviário é mais sustentável que o rodoviário. Esta interpretação é de certa forma simples devido às características dos sistemas avaliados e da abordagem metodológica considerada neste trabalho, porém, pode-se perceber na **Fig. 1** que o sistema rodoviário possui melhor desempenho para dois indicadores (energia e receita) quando comparado ao sistema ferroviário. Dependendo da magnitude deste melhor desempenho, assim como dos outros indicadores, poderia ser difícil fazer a leitura gráfica sobre qual sistema possui maior área. Assim, para facilitar a interpretação gráfica e aliar cada indicador à uma meta desejável, pode-se obter resultados mais alinhados à sustentabilidade e facilitar o uso dos resultados pelos decisores. Desta forma, a programação por metas é considerada neste trabalho como um procedimento posterior aos resultados da **Tabela 1** e **Fig. 1**.

2.3. Filosofia da Programação Meta Aplicada ao Modelo 5 EnSU

Moreno García (2017) e Sevegnani et al. (2018) apresentam os conceitos e teoria da aplicação da filosofia da programação por metas no modelo 5EnSU. Enquanto o primeiro utiliza sistemas de produção de arroz no Brasil como estudo de caso, o segundo considera o desempenho da sustentabilidade dos países do mercosul. Ambos trabalhos são considerados como pioneiros do grupo

de pesquisa em Produção e Meio Ambiente da Universidade Paulista, e são usados como referências para este presente trabalho.

No modelo 5SEnSU, a sustentabilidade é um conceito multidimensional baseado em cinco setores ou dimensões associadas às três dimensões clássicas do desenvolvimento sustentável: Ambiental (Setores #1 e #2), Econômico (Setor #3) e Social (Setores #4 e #5). A representação gráfica (**Fig. 2**) do modelo 5SEnSU, como o modelo clássico de desenvolvimento sustentável, baseia-se no equilíbrio que deve existir entre as dimensões do modelo expressado pelos indicadores selecionados para medir seu desempenho. Nesta representação, vários cenários podem ser identificados de acordo com o desempenho de cada um dos cinco setores: um cenário ideal (EI) que corresponde a um equilíbrio perfeito entre os cinco setores do modelo, um cenário meta (EM) que representam as aspirações, objetivos, ou metas dos indicadores (GI) de cada setor e, de um cenário real (ER) onde os valores reais de cada indicador (K) estão localizados, obtidos a partir das medidas das variáveis selecionadas.

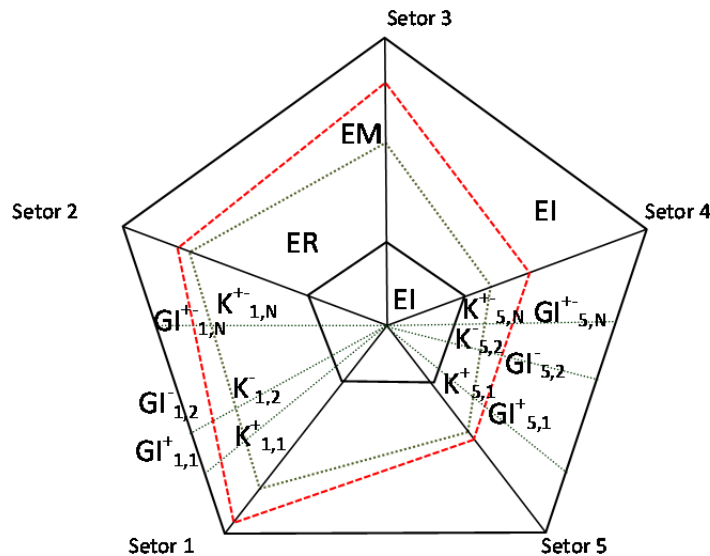


Fig. 2. Representação da filosofia da programação por metas aplicação ao modelo 5SEnSU. Fonte: Moreno García (2017).

A álgebra de cálculo do 5SEnSU baseia-se no uso da filosofia da programação meta (do inglês goal programming, GP) como uma ferramenta de análise multicritério para obter um indicador geral de sustentabilidade do sistema (chamado de WSI) considerando a metodologia formulada por Diaz-Balteiro e Romero (2008). Para expressar os resultados de acordo com a proximidade entre os valores relativos dos indicadores e seus objetivos foram feitas modificações para adaptá-lo ao 5SEnSU. A seguir é apresentado o desenvolvimento matemático da inclusão da programação por metas no modelo 5SEnSU, cuja descrição completa incluindo comentários pode ser observada em Moreno García (2017).

Considere, por exemplo, um problema de decisão no qual cada indicador de K_i possui uma meta G_i . Ao avaliar a situação de cada cenário, as variáveis indesejadas são diferentes dependendo do tipo de indicador (positivo + ou negativo -). Para indicadores positivos, a variável indesejada é o desvio negativo (N_{ijk}^+), tendo uma situação melhor cenários que atingem o nível de aspiração definido como meta ou têm um valor maior da variável de desvio positivo (P_{ijk}^+). Para indicadores negativos, a variável indesejada é a variável de desvio positivo (P_{ijk}^-) apresentando cenários de situação melhor que atingem o nível de aspiração definido como objetivo ou um valor maior da variável de desvio negativo N_{ijk}^- .

Para os indicadores positivos (+) do tipo “maior melhor”:

$$N_{ijk}^+ = \begin{cases} G_{jk}^+ - K_{ijk}, & K < G_{jk}^+ \\ 0, & K_{ijk} \geq G_{jk}^+ \end{cases} \quad \forall i \in \{1,2, \dots, NE\} \forall j \in \{1,2, \dots, NS\}, \forall k \in \{1,2, \dots, NI\} \quad (1)$$

$$P_{ijk}^+ = \begin{cases} K_{ijk} - G_{jk}^+, & K_{ijk} > G_{jk}^+ \\ 0, & K_{ijk} \leq G_{jk}^+ \end{cases} \quad \forall i \in \{1,2, \dots, NE\} \forall j \in \{1,2, \dots, NS\}, \forall k \in \{1,2, \dots, NI\} \quad (2)$$

Para os indicadores positivos (-) do tipo “menor melhor”:

$$P_{ijk}^- = \begin{cases} K_{ijk} - G_{jk}^-, & K_{ijk} > G_{jk}^- \\ 0, & K_{ijk} \leq G_{jk}^- \end{cases} \quad \forall i \in \{1,2, \dots, NE\} \forall j \in \{1,2, \dots, NS\}, \forall k \in \{1,2, \dots, NI\} \quad (3)$$

$$N_{ijk}^- = \begin{cases} G_{jk}^- - K_{ijk}, & K_{ijk} < G_{jk}^- \\ 0, & K_{ijk} \geq G_{jk}^- \end{cases} \quad \forall i \in \{1,2, \dots, NE\} \forall j \in \{1,2, \dots, NS\}, \forall k \in \{1,2, \dots, NI\} \quad (4)$$

$N_{ijk}, P_{ijk} \geq 0$ e $N_{ijk} \cdot P_{ijk} = 0$, Onde:

NE : quantidade de cenários (sistemas de transporte)

NS : quantidade de setores (1...5)

NI : quantidade de indicadores por setor

i : cenário (1... NE)

j : setores (1...5)

k : indicadores (1... NI)

K_{ijk} : valor do k -ésimo indicador no j -ésimo setor do i -ésimo cenário

N_{ijk}^+ ; N_{ijk}^- : variável de desvio negativa do indicador positivo e negativo respectivamente

P_{ijk}^+ ; P_{ijk}^- : variável de desvio positiva do indicador positivo e negativo respectivamente

G_{jk}^+ ; G_{jk}^- : valor da meta para o indicador positivo ou negativo respectivamente

Indicador Ponderado de Sustentabilidade Meta do indicador (ISM_{ijk}^+ e ISM_{ijk}^-), considerando as equações 1, 2, 3 e 4.

$$ISM_{ijk}^+ = \sum_{ijk} \frac{N_{ijk}^+}{W_{jk}^+ \cdot G_{jk}^+} + \sum_{ijk} \frac{P_{ijk}^+}{W_{jk}^- \cdot G_{jk}^+} \quad \forall i \in \{1,2, \dots, NE\} \forall j \in \{1,2, \dots, NS\}, \forall k \in \{1,2, \dots, NI\} \quad (5)$$

$$ISM_{ijk}^- = \sum_{ijk} \frac{N_{ijk}^-}{W_{jk}^- \cdot G_{jk}^-} + \sum_{ijk} \frac{P_{ijk}^-}{W_{jk}^+ \cdot G_{jk}^-} \quad \forall i \in \{1,2, \dots, NE\} \forall j \in \{1,2, \dots, NS\}, \forall k \in \{1,2, \dots, NI\} \quad (6)$$

Onde W_{jk}^+ e W_{jk}^- são valores ponderados ou "aspiração" que tem o indicador. É recomendado que para indicadores positivos $W_{jk}^+ < W_{jk}^-$ e para indicadores negativos $W_{jk}^+ > W_{jk}^-$, onde $0 < W_{jk}^+, W_{jk}^- \leq 100$.

O Indicador de sustentabilidade por setores do sistema ($ISMS_{ij}$), considerando as equações 5 e 6, se calcula como a somatória da diferença dos índices de sustentabilidade dos indicadores positivos e os índices de sustentabilidade dos indicadores negativos.

$$ISMS_{ij} = \sum_i \sum_j \sum_k (ISM_{ijk}^+ - ISM_{ijk}^-) \quad \forall i \in \{1,2, \dots, NE\}, \forall j \in \{1,2, \dots, NS\} \quad (7)$$

O indicador de sustentabilidade de cada cenário para cada setor é $ISMES_{ij}$, considerando a equação 7.

$$ISMES_{ij} = WS_j \sum_i \sum_j ISMS_{ij} \quad \forall i \in \{1,2, \dots, NE\}, \forall j \in \{1,2, \dots, NS\} \quad (8)$$

Onde WS_j é o valor ponderado ou peso relativo que tem cada setor do sistema tal que $0 < WS_j \leq 1$ e $\sum_j WS_j \leq 5 \quad \forall 0 < WS_j \leq 1$

O indicador de sustentabilidade global do sistema avaliado WSI_i , considerando (8), mostra o desempenho dos sistemas ao considerar a relação entre o valor dos indicadores, sua natureza, objetivos e importância relativa do sistema.

$$WSI_i = \sum_j^5 ISMES_{ij} \quad \forall i \in \{1,2, \dots, NE\} \quad (9)$$

Para avaliar o desempenho de vários sistemas bastaria um ordenamento ascendente dos valores de WSI_i , resultando como melhores cenários os que ocupam as primeiras posições. O indicador de

sustentabilidade alvo para cada cenário (WSIi) define um ranking de sustentabilidade que permite estabelecer prioridades de trabalho para reduzir as lacunas entre os diferentes sistemas.

Toda a modelagem matemática de inclusão da programação por metas dentro do modelo 5SEnSU foi inserida em uma planilha do Microsoft Excel® (utilizando linguagem de programação Visual Basic) para facilitar cálculos e simulações; este trabalho foi previamente desenvolvido por Moreno García (2017). A planilha em Excel permite que diferentes estudos sobre sustentabilidade possam ser realizados, independentemente do tipo e da quantidade de sistema de produção que estão sendo comparados, mas desde que sempre baseados nos princípios do modelo 5SEnSU.

3. Resultados e Discussões

A **Tabela 2** apresenta os setores, indicadores e respectivas metas. Deve-se determinar para cada indicador a intenção de maximizar ou minimizar dependendo do tipo de indicador e sua relação com o setor. Umarusman (2013) cita que o objetivo geral da programação meta é minimizar o desvio entre a realização dos objetivos e seus níveis de aspiração, ou seja, o valor real comparado à meta. O processo de minimização pode ser realizado com diferentes métodos (Romero, 1991), mas para definição das metas as duas principais abordagens são (i) adotar valores obtidos em literatura com características semelhantes ao sistema em estudo, (ii) ou pode-se estabelecer valores conforme as características dos sistemas analisados; neste último, o método Delphi poderia ser aplicado. Por se tratar de um estudo de caso envolvendo diversos indicadores relacionados aos transportes rodoviário e ferroviário com características específicas, não foi possível, até o momento, estabelecer metas a partir de dados de literatura. Desta forma, a experiência dos autores deste trabalho foi considerada para o estabelecimento das metas apresentadas na **Tabela 2**, onde o critério adotado foram os valores máximos e mínimos calculados para cada indicador; estes valores podem ser considerados como um benchmark para este primeiro ciclo da aplicação do sistema de melhoria contínua e, nos próximos ciclos, metas mais precisas podem ser estabelecidas.

Tabela 2. Definição das metas dos indicadores para cada setor do modelo 5SEnSU aplicado aos sistemas de transporte ferroviário e rodoviário de soja no Brasil.

Setor do modelo 5SEnSU	Indicador	Objetivo	Meta (G)
#1. Ambiente como doador	K11 – Emergia	Minimizar	6,22 E+5 sej
	K12 – Área de influência	Minimizar	11,4 m ²
#2. Ambiente como receptor	K21 – Potencial de aquecimento global	Minimizar	395 kgCO _{2eq.}
	K22 – Potencial de acidificação	Minimizar	1,29 E-03 kgSO _{2eq.}
#3. Produção	K31 – Receita do transportador	Maximizar	1.591 R\$
	K32 – Lucro por empregado	Maximizar	16,9 R\$
#4. Sociedade como doador	K41 – Número de empregos	Maximizar	0,11 unidade
	K42 – Horas de trabalho	Maximizar	177 h
#5. Sociedade como receptora	K51 – Emissão de CO	Minimizar	6,04 E-01 kgCO
	K52 – Salário pago aos funcionários	Maximizar	2.230 R\$

Para o tomador de decisão, a variável cujo desvio é considerado altamente indesejável apresenta um alto peso relativo (distante de zero), enquanto uma variável cujo desvio não seja tão indesejável apresenta um baixo peso relativo (próximo de zero); caso haja um sentimento de neutralidade em relação ao desvio, o peso será nulo (RENDER e STAIR, 1997). Mesmo que o uso de pesos para os desvios em relação às metas seja um procedimento utilizado em programação por metas para resultar em indicadores finais mais precisos aos tomadores de decisão, não existe um procedimento padrão para o estabelecimento destes pesos, não garantindo que a primeira solução encontrada pelo modelo seja a solução mais desejável. De acordo com a experiência dos autores deste trabalho, para os desvios indesejáveis dos indicadores emergia, potencial de aquecimento, potencial de acidificação, receita, lucro, empregos, horas de trabalho, emissão de CO, e salário, foram adotados respectivamente os pesos de 5, 4, 4, 4, 4, 3, 3, 4 e 3. O indicador emergia, cujo objetivo é sua minimização, merece um destaque especial obtendo o peso 5 para os desvios superiores as metas estabelecidas. A razão pela escolha de um maior peso para estes desvios deve-se ao fato de que a emergia pode ser considerada como um indicador mais robusto, incluindo uma abordagem em escala global (perspectiva holística) para a contabilização dos recursos necessários para prover um bem ou serviço. O peso 3 para os setores sociais do modelo 5SenSu justifica-se por serem mais facilmente alterados/gerenciados pelas empresas de transporte. O único indicador cujos pesos foram iguais (valor 1) tanto para os

desvios positivos e negativos foi a área de influência, pois não é possível alterar os valores de referências dos indicadores estabelecidos por lei.

Adicionando os dados das **Tabelas 1 e 2** no modelo de programação meta no Excel[®], pode-se calcular os indicadores ponderados de sustentabilidade meta do indicador (ISM_{ijk}^+ e ISM_{ijk}^-), o indicador de sustentabilidade por setores do sistema ($ISMES_{ij}$), o indicador de sustentabilidade de cada sistema para cada setor $ISMES_{ij}$ e, finalmente, o WSI_i que permite avaliar o desempenho entre os sistemas de transporte de soja avaliados neste trabalho (**Tabela 3**). Valores mais baixos indicam menor desvio em relação à meta, portanto, maior grau de sustentabilidade. O **Apêndice A** apresenta uma visão do programa em Excel[®] utilizado para realizar os cálculos, assim como todos os indicadores obtidos.

Tabela 3. Indicador de sustentabilidade (por setores ISMES e global WSI) de cada sistema de transporte de soja no Brasil.

Sistema de transporte	ISMES para cada setor do modelo 5SEnSU					Indicador de sustentabilidade global (WSI)
	#1	#2	#3	#4	#5	
Ferroviário	3,47	0,00	0,00	0,00	0,00	3,47
Rodoviário	2,05	0,75	0,27	0,35	0,13	3,55

Com base nos valores de WSI de cada sistema de transporte (**Tabela 3**) tem-se que o sistema ferroviário apresenta maior grau de sustentabilidade (3,47) comparado ao sistema rodoviário (3,55); uma pequena diferença de aproximadamente 1,02 vezes superior, mas que devido às incertezas poderia ser considerado como iguais. Pode-se observar que, embora o ISMES para o setor #1 seja mais desfavorável para o sistema de transporte ferroviário (3,47), para os demais setores observa-se desvios iguais a zero, resultando no indicador de sustentabilidade global WSI de 3,47. O sistema rodoviário possui maior sustentabilidade para o setor #1 (2,05), mas possui pior desempenho para todos os outros setores, resultando em um WSI com pior desempenho que o do ferroviário. Este comportamento “perde-ganha” é uma característica de abordagens multimétrica, o que sustenta a importância de seu uso em avaliações de sustentabilidade. É importante lembrar que estes números, mesmo que a princípio sejam facilmente interpretados, são derivados da aplicação do modelo 5SEnSU que contemplou um total de dez indicadores diferentes (multimétrica) abrangendo as três dimensões do conceito de sustentabilidade. Adicionalmente, estes números finais são obtidos com auxílio da programação por metas (multicritério), onde as metas para cada indicador são previamente estabelecidas e respeitadas. Desta forma, um elevado grau de complexidade de conceitos e teorias converte-se, finalmente, em um número de fácil interpretação e que respeita as etapas anteriores desenvolvidas.

Com base na **Tabela 3**, pode-se sugerir ações em direção ao aumento da sustentabilidade dos sistemas avaliados. Focando no sistema rodoviário, alternativas para o setor 2 deve considerar reduzir as emissões de CO₂ e SO₂ equivalentes, talvez com o uso de combustíveis alternativos como gás natural comprimido ou liquefeito, biogás, bioetanol ou biodiesel; para o setor 3, deve-se buscar aumentar o frete cobrado pelas transportadoras rodoviárias em função das distâncias percorridas; para o setor 4, deve-se buscar a contratação de novos empregados que auxiliem no suporte aos motoristas como a escolha das melhores rotas e na logística de carga e descarga das mercadorias; para o setor 5, deve-se avaliar de forma similar ao setor 2, utilizando motores com maior tecnologia e uma remuneração salarial mais próxima ao setor ferroviário.

A **Fig.3** apresenta o desempenho de cada indicador considerado nos cinco setores, contemplando 10 indicadores no total. Neste diagrama, as metas são consideradas como referência (valor zero na borda externa do gráfico), logo, quanto mais longe estiver indicador da meta, pior será o desempenho; em outras palavras, quanto mais próximo ao centro do diagrama estiver o indicador, pior será seu desempenho em reação à meta estabelecida. Enquanto o indicador de sustentabilidade global WSI é importante para estabelecer o sistema mais sustentável, a análise da **Fig. 3** permite identificar os indicadores que apresentam menor desempenho de sustentabilidade, assim, ações podem ser realizadas com o objetivo de melhorá-los. Pode se observar que o sistema rodoviário apresentou melhor desempenho em relação ao ferroviário somente para o indicador energia, logo, para aumentar o grau de sustentabilidade do sistema ferroviário, ações deveriam ser dirigidas à redução de energia e material (ou mesmo sua substituição por outros de menor *unit emergy value*) que atualmente são necessários para este sistema de transporte. Para aumentar a sustentabilidade do sistema rodoviário,

esforços deveriam focar na redução da área de influência, uma tarefa mais difícil porque estes valores são estabelecidos por lei baseados em nas práticas construtivas das últimas décadas.

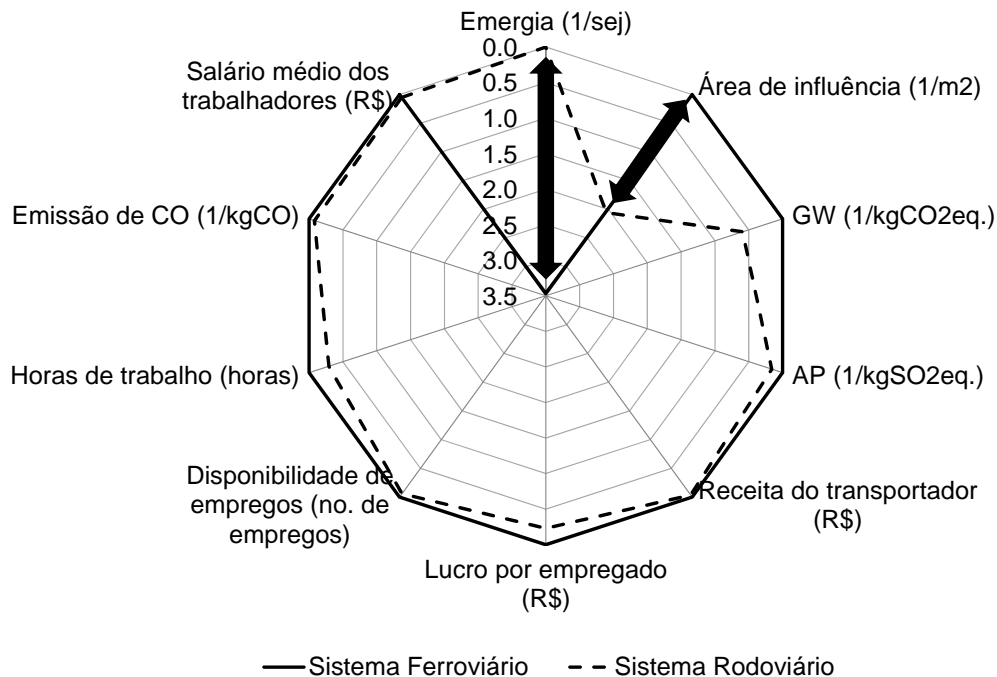


Fig. 3. Gráfico em radar apresentando a distância entre os indicadores ponderados de sustentabilidade meta (ISM) de suas respectivas metas. O valor “zero” indica a meta, logo, quanto mais longe da meta ou próximo ao centro do gráfico, menor será o grau de sustentabilidade para o indicador. As duas setas mostram os indicadores que resultaram em maior diferença entre os dois sistemas de transportes avaliados.

Interessante notar que o uso ou não da programação por metas apresenta resultados globais finais semelhantes, ou seja, o sistema ferroviário pode ser considerado mais sustentável que o rodoviário. Entretanto, quando analisando os indicadores de forma individual, os resultados apresentados na **Fig. 3** possuem comportamento diferente aos apresentados na **Fig. 1** (sem aplicação da programação por metas). Pode-se perceber que quando metas e pesos não são considerados (**Fig. 1**), o sistema ferroviário visualmente possui melhor desempenho geral (maior área no gráfico), com pior desempenho para os indicadores energia e receita do transportador. Aplicando a programação por metas (**Fig. 3**), o desempenho entre os sistemas é muito semelhante, exceto para energia e área de influência. Isso enfatiza que mesmo considerando importantes, os indicadores avaliados de forma absoluta como na **Fig.1** não receberam a influência dos “pesos de importância” como identificados pelos especialistas em análise da sustentabilidade de sistemas de transporte. Assim, para o planejamento estratégico sobre qual sistema de transporte deveria ser considerado para transportar soja do centro produtor ao centro exportador, os resultados da **Fig. 3** deveriam ser considerados para subsidiar as decisões.

É importante enfatizar que as metas foram estabelecidas em relação aos resultados primários encontrados, na tentativa de minimizar os efeitos negativos e maximizar os efeitos positivos; outra possibilidade seria o estabelecimento de metas baseadas em dados de literatura, o que poderia apresentar resultados diferentes. Desta forma, percebe-se que uma análise multicritério pode apresentar resultados distintos em função das metas e pesos estabelecidos, e isso pode ser entendido como uma limitação deste trabalho.

4. Conclusões

Comparando-se o WSI do sistema ferroviário (3,47) com o do rodoviário (3,55), conclui-se que o primeiro apresenta maior grau de sustentabilidade; embora as incertezas existentes nos procedimentos conduzam à igualdade no grau de sustentabilidade para ambos.

Para verificar o resultado obtido por Richard Silva et al. (under review) baseado na interpretação visual do gráfico radar, este trabalho utilizou a programação por metas que auxilia em decisões multicritério, e permite avaliar o desempenho dos diferentes sistemas em comparação com as metas estabelecidas

para cada indicador. Esta integração do modelo 5SEnSU com a programação por metas permitiu quantificar o desempenho sobre a sustentabilidade de cada sistema de transporte avaliado, de maneira a facilitar a interpretação dos tomadores de decisão.

Para aumentar o grau de sustentabilidade do sistema rodoviário, esforços deveriam ser direcionados para melhorar o desempenho dos indicadores relacionados aos setores 2, 4, 3 e 5, nesta ordem de prioridade. Para futuros trabalhos sugere-se que seja realizada uma análise de sensibilidade em relação aos indicadores de cada setor. Espera-se que esta análise permita avaliar em qual setor as alterações propostas possam exercer um resultado mais eficaz, direcionando-se desta forma políticas que permitam colocar em prática as ações necessárias em busca do aumento da sustentabilidade dos sistemas de transporte de soja avaliados.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro da Universidade Paulista e do CNPq (307422/2015-1).

Referências

- Charnes, A., Cooper, W.W., 1961. Management model and industrial application of linear programming. New York: Wiley.
- Choudhary, D., Shankar R., 2014. A goal programming model for joint decision making of inventory lot-size, supplier selection and carrier selection. *Computers & Industrial Engineering* 71, 1-9.
- Cristobal, J.R.S., 2012. A goal programming model for environmental policy analysis: Application to Spain. *Energy Policy* 43, 303–307.
- Díaz-Balteiro, L., Romero, C., 2008. Making forestry decisions with multiple criteria: a review and an assessment. *Forest Ecology and Management* 255, 322-324.
- Forés, I.V., Bovea, M.D., Pérez-Belis, V., 2014. A holistic review of applied methodologies for assessing and selecting the optimal technological alternative from a sustainability perspective. *Journal of Cleaner Production* 70, 259-281.
- Jayaraman, R., Colapinto, C., La Torre, D., Malik, T., 2015. Multi-criteria model for sustainable development using goal programming applied to the United Arab Emirates. *Energy Policy* 87, 447-454.
- Kumar, A., Sah, B., Singh, A.R., Denga, Y., He, X., Kumar, P., Bansal, R.C., 2017. A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69, 596-609.
- Moreno García, R.R., 2017. Procedimento para uma gestão agroambiental sustentável da cadeia produtiva de arroz – estudos de caso Brasil e Cuba. Relatório final de pesquisa. Estágio de pós-doutorado. Universidade Paulista (UNIP), Brasil. Acesso restrito.
- Nhantumbu, I., Kowero, G., Dent, J.B., 2001. Goal programming: application in the management of the miombo woodland in Mozambique. *European Journal of Operational Research* 133, 310-322.
- Richard Silva, T., Agostinho, F., Moreno García, R.R., Almeida, C.M.V.B., Giannetti, B.F., under review. Sustainability assessment of soybean transportation for exportation in Brazil: application of multicriteria five sectors sustainability model. *Journal of Environmental Accounting and Management*.
- Render, B., Stair, R. M., 1997. Quantitative analysis for management. 6. ed. New Jersey: Prentice Hall.
- Romero, C., 1991. Handbook of Critical Issues in Goal programming. Pergamon Press New York.
- Sevegnani, F., Gianetti B.F., Almeida C.M.V.B, Agostinho F., Garcia R.M., Liu G., 2018. Five Sector Sustainability Model - a proposal for assessing sustainability of production systems. In: First Latin American SDEWES, Rio de Janeiro.
- Umarusman, N., 2013. Min-max goal programming approach for solving multi-objective De Novo programming problems. *International Journal of Operations Research* 10, 92–99.
- Yang, X., Low, J.M.W., Tang, L.C, 2011. Analysis of intermodal freight from China to Indian Ocean: A goal programming approach. *Journal of Transport Geography* 19, 515-527.
- Zhang, J., 2016. Weighing and realizing the environmental, economic and social goals of tourism development using an analytic network process-goal programming approach. *Journal of Cleaner Production* 127, 262-273.

Apêndice A. Exemplo da planilha contendo a programação por metas baseada no modelo 5SEnSU aplicada aos sistemas avaliados.

IDENTIFICAÇÃO										
INDICADORES AMBIENTAIS, Provedor (Setor 1)										
Sistemas	K11 - Emergia	Nij (K11)	Pij (K11)	ISM (K11)	K12 - Área influência	Nij (K12)	Pij (K12)	ISM (K12)	ISMES Sector 1	
Sistema FERROVIÁRIO	1.14E+07	0.00E+00	1.08E+07	3.46559	11.43	0.00	0.00	0.00000	3.46559	
Sistema RODOVIÁRIO	6.22E+05	0.00E+00	0.00E+00	0.00000	34.91	0.00	23.48	2.05424	2.05424	
Maior X(i)	1.14E+07				34.91					
Meta seleccionada	6.22E+05	6.22E+05	6.22E+05		11.43	11.43	11.43			
	0.00E+00				0.00					
	6.22E+05				11.43					
Peso da aspiração da meta		1	5			1	1			
Ação desejada	Minimizar				Minimizar					

INDICADORES AMBIENTAIS, Recetor (Setor 2)										
Sistemas	K21 - Aquecimento global	Nij (K21)	Pij (K21)	ISM (K21)	K22 - Acificação	Nij (K22)	Pij (K22)	ISM (K22)	ISMES Sector 2	
Sistema FERROVIÁRIO	394.68	0.00	0.00	0.00	1.29E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00000	0.0000	
Sistema RODOVIÁRIO	1326.27	0.00	931.59		0.59	2.12E-03	0.00E+00	8.30E-04	0.16085	0.7509
Maior X(i)	1326.27					2.12E-03				
Meta seleccionada	394.68	394.68	394.68		1.29E-03	1.29E-03	1.29E-03			
	0.00				0.00E+00					
	394.68				1.29E-03					
Peso da aspiração da meta		1	4			1	4			
Ação desejada	Minimizar				Minimizar					

INDICADORES ECONÓMICOS, Empresa (Setor 3)										
Sistemas	K31 - Receita	Nij (K31)	Pij (K31)	ISM (K31)	K32 - Lucro	Nij (K32)	Pij (K32)	ISM (K32)	ISMES Sector 3	
Sistema FERROVIÁRIO	1591.00	0.00	0.00	0.0000	16.95	0.00	0.00	0.00000	0.000	
Sistema RODOVIÁRIO	1361.60	229.40	0.00	0.0360	1.41	15.54	0.00	0.22920	0.265	
Maior X(i)	1591.00				16.95					
Meta seleccionada	1591.00	1591.00	1591.00		16.95	16.95	16.95			
	0.00				0.00					
	1591.00				16.95					
Peso da aspiração da meta		4	1			4	1			
Ação desejada	Maximizar				Maximizar					

INDICADORES SOCIAIS, Provedor (Setor 4)										
Sistemas	K41 - Empregos	Nij (K41)	Pij (K41)	ISM (K41)	K42 - Horas trabalho	Nij (K42)	Pij (K42)	ISM (K42)	ISMES Sector 4	
Sistema FERROVIÁRIO	0.11	0.00	0.00	0.00000	177.04	0.00	0.00	0.00000	0.000	
Sistema RODOVIÁRIO	0.09	0.02	0.00	0.06061	21.56	155.48	0.00	0.29274	0.353	
Maior X(i)	0.11				177.04					
Meta seleccionada	0.11	0.11	0.11		177.04	177.04	177.04			
	0.00				0.00					
	0.11				177.04					
Peso da aspiração da meta		3	1			3	1			
Ação desejada	Maximizar				Maximizar					

INDICADORES SOCIAIS, Consumidor (Setor 5)										
Sistemas	K51 - CO	Nij (K51)	Pij (K51)	ISM (K51)	K52 - Salário	Nij (K52)	Pij (K52)	ISM (K52)	ISMES Sector 5	WSI
Sistema FERROVIÁRIO	6.04E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00000	2230.13	0.00	0.00	0.00000	0.0000	3.47
Sistema RODOVIÁRIO	7.98E-01	0.00E+00	1.94E-01	0.08030	1897.33	332.80	0.00	0.04974	0.1300	3.55
Maior X(i)	7.98E-01				2230.13					
Meta seleccionada	6.04E-01	6.04E-01	6.04E-01		2230.13	2230.13	2230.13			
	0.00E+00				0.00					
	6.04E-01				2230.13					
Peso da aspiração da meta		1	4			3	1			
Ação desejada	Mimizar				Maximizar					