

Proposta de otimização do transporte de resíduos sólidos urbanos coletados no Distrito Federal

RESUMO

Victor Alexander Oliveira Silva
victor.alexander@aluno.unb.br
Programa de Pós-Graduação em
Tecnologia Ambiental e Recursos
Hídricos, Universidade de Brasília,
Brasil

Francisco Contreras
pineda@unb.br
Programa de Pós-Graduação em
Tecnologia Ambiental e Recursos
Hídricos, Universidade de Brasília,
Brasil

Otimizar o transporte de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) é um dos principais desafios em se tratando dos sistemas de gerenciamento, visto que esta etapa representa uma grande fração dos custos municipais, além de uma contribuição significativa nos impactos ao meio ambiente. É notório que o consumo de combustível resume de maneira adequada as duas principais preocupações associadas ao transporte de RSU, uma vez que constitui papel fundamental nos custos e é o principal causador das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Dessa forma, este trabalho visa otimizar os roteiros de transporte de RSU no Distrito Federal, com base na minimização do consumo de combustíveis pelos veículos utilizados, baseado na aplicação de programação linear. Os resultados obtidos indicam que a proposta otimizada proporciona redução anual de 8,24% no consumo de combustíveis, implicando na economia anual de mais de R\$ 400.000,00 com compra de diesel e redução das emissões de GEE em mais de 9.000 toneladas de CO₂-equivalente por ano.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos sólidos urbanos. Otimização. Transporte. Programação linear.

INTRODUÇÃO

Dentre os diversos problemas associados ao rápido crescimento populacional nas últimas décadas encontra-se a geração dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE (2016), o Brasil produziu no ano de 2016 aproximadamente 78,3 milhões de toneladas de RSU, dos quais 71,3 milhões de toneladas foram coletadas, resultando em um índice de cobertura de coleta de 91%.

Nesse sentido, é evidente a necessidade de gerenciamento adequado dos resíduos sólidos gerados. Usualmente as atividades de gerenciamento de RSU englobam desde a separação na fonte geradora até a disposição final, incluindo as etapas de coleta e transporte, assim como tratamento.

Dentro dessas etapas de gerenciamento, a coleta e transporte consistem em uma das principais questões, uma vez que constituem uma grande parcela dos custos. Segundo o Banco Mundial (The World Bank, 2012) essas etapas representam, aproximadamente, entre 80 e 90% dos custos municipais com o gerenciamento de RSU em países de baixa renda e entre 50 e 80% em países de renda média.

Segundo Silva (2018), no Distrito Federal o transporte dos RSU coletados consiste na etapa de gerenciamento que mais contribui para as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), principalmente em função das grandes distâncias entre os centros urbanos e os locais de destino dos resíduos sólidos coletados e da logística não-otimizada de transporte.

Tendo em vista o desenvolvimento de sistemas de gerenciamento econômica e ambientalmente adequados, é evidente a necessidade de otimizar os roteiros de transporte dos resíduos sólidos coletados, de forma a diminuir os custos associados a esta etapa, além do impacto ambiental, em termos de emissões de GEE na atmosfera.

Dentro dessa perspectiva, pode-se afirmar, segundo Tavares et al. (2009) que o consumo de combustível tem um papel fundamental dentro das planilhas de custos dos sistemas de gerenciamento de resíduos sólidos. No Distrito Federal (DF), por exemplo, os serviços de coleta de RSU correspondem a 32% dos gastos com serviços de limpeza urbana, enquanto a transferência de RSU coletados implica em 17% dos gastos dos serviços complementares (SLU, 2018a).

Também é válido ressaltar que as emissões atmosféricas na etapa de transporte são decorrentes da queima de combustíveis fósseis no motor dos veículos. Portanto, como o consumo de combustíveis é diretamente ligado às duas principais preocupações acerca do transporte de RSU, é razoável otimizar os roteiros de transporte na perspectiva de redução do consumo de combustíveis.

Assim, este trabalho tem como objetivo otimizar a etapa de transporte dos resíduos sólidos urbanos coletados no Distrito Federal, com base na minimização do consumo de combustível pelos veículos utilizados.

Área de estudo

O estudo foi realizado no DF, uma das vinte e sete unidades federativas do Brasil. O DF possui área de 5,779 km² e é dividido em 31 Regiões Administrativas (RA) (GDF, 2019) Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2017), a população estimada do DF no ano de 2017 era de 3.039.444 habitantes.

Desde a década de 1960, a gestão de RSU NO DF foi caracterizada, principalmente, pela disposição final realizada no segundo maior lixão em operação no mundo (SLU, 2010).

Em janeiro de 2017, foi inaugurado o primeiro aterro sanitário da capital federal, o Aterro Sanitário de Brasília (ASB), com uma área de 32 hectares e capacidade de atender toda a população por 13 anos. Um ano após a abertura do ASB, em janeiro de 2018 as atividades no lixão foram encerradas, permitindo apenas a disposição de resíduos da construção (SLU, 2010).

Em 2017, foram coletadas pelo Serviço de Limpeza Urbana do Distrito Federal – SLU/DF, órgão responsável pelos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos urbanos e pelo gerenciamento dos resíduos sólidos do DF, 810.339 toneladas de resíduos sólidos domiciliares e resíduos de varrição (SLU - Serviço de Limpeza Urbana do Distrito Federal, 2010).

O sistema de tratamento de RSU do DF possui duas usinas de tratamento mecânico-biológico (UTMB) em funcionamento, uma localizada na Avenida L4 Sul, com capacidade de processamento de 100 t por dia e outra localizada no Setor P Sul, em Ceilândia, com capacidade de processamento de 600 t diariamente. Além disso, estão em funcionamento cinco instalações de recuperação de resíduos (IRR), que se definem como usinas de triagem de material proveniente da coleta seletiva de resíduos recicláveis operadas por cooperativas de catadores (F. L. da Silva, 2017; SLU - Serviço de Limpeza Urbana do Distrito Federal, 2010).

Segundo o SLU (2017), existem três unidades de transferência de resíduos sólidos no DF, chamadas de estações de transbordo. Estas estão localizadas nas Regiões Administrativas (RAs) Sobradinho, Brazlândia e Gama. Nestas instalações, os resíduos sólidos coletados por meio de caminhões compactadores são transferidos para carretas de maior capacidade e menor consumo de combustível, visando à viabilidade econômica das operações de transporte dos resíduos sólidos para as unidades de tratamento e disposição final. Além dessas três unidades onde se realiza exclusivamente a operação de transferência, a UTMB da Asa Sul também realiza este tipo de operação. As unidades de gerenciamento de RSU existentes no DF podem ser visualizadas na Figura 1.

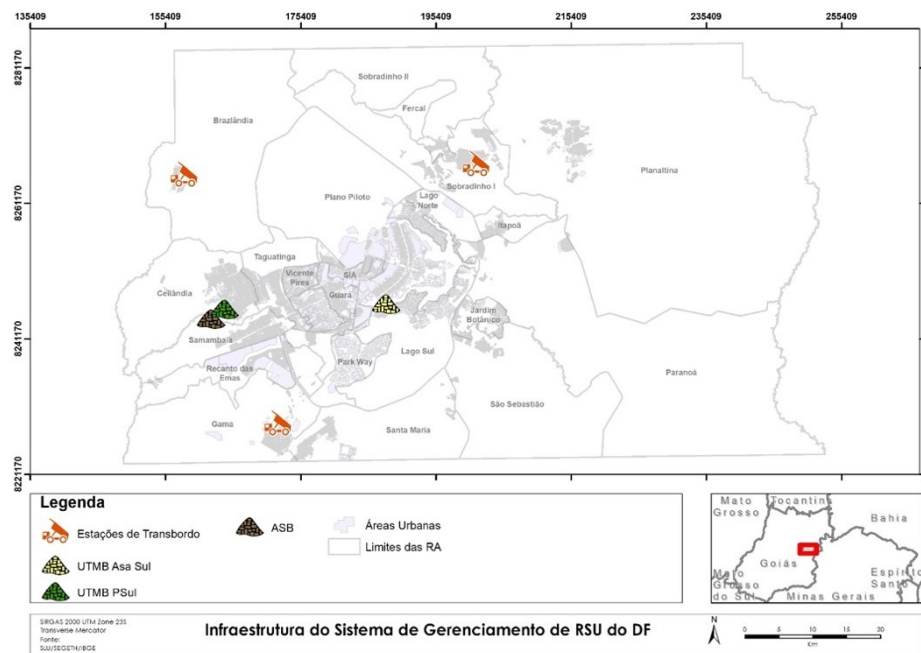


Figura 1: Mapa de infraestruturas do sistema de gerenciamento de RSU do DF.

METODOLOGIA

O cenário atual foi caracterizado a partir de informações acerca da destinação dos RSU de cada RA obtidas junto ao SLU/DF. É importante salientar que as informações são baseadas nos atuais contratos de prestação de serviços firmados entre o SLU e empresas privadas vigentes no ano de 2018.

Realizou-se o estudo de otimização por meio de Programação Linear Inteira Binária (PLIB), de acordo com as etapas descritas a seguir.

Considerações iniciais

Para formulação do problema em questão, considerou-se que:

- A otimização seria voltada apenas à etapa de transporte dos resíduos já coletados. Não se aplica aos circuitos de coleta;
- O consumo de combustíveis fósseis é função da massa transportada e da distância percorrida;
- É possível dividir o transporte dos RSU coletados em duas etapas: (trecho 1) partindo do centro de massa populacional até o local de transferência (transbordo) ou tratamento – realizada com caminhões do tipo compactador; (trecho 2) do local de destino na etapa 1 até o local de destinação final (aterro sanitário) – realizada com caminhões do tipo carreta;

- Foram desconsideradas as capacidades de desvio de resíduos do aterro sanitário nas UTMB e considerou-se que todas as unidades de gerenciamento teriam limite de capacidade.

Modelagem matemática e definição da PLIB

Conforme as considerações iniciais, o consumo de combustíveis no transporte dos RSU coletados foi estimado por meio da equação 1 a seguir.

$$C = f_1 * \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_i * D1_{ij} + f_2 * \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^m P_i * D2_j \right) \quad (1)$$

Onde:

C é o consumo anual de combustível – diesel (l/ano);

f_1 é o fator de consumo de combustível do caminhão compactador, igual a 0,15 l/ton.km (MERRILD et. al, 2012);

f_2 é o fator de consumo de combustível do caminhão carreta, igual a 0,03 l/ton. (MERRILD et. al, 2012);

P_i é o total de RSU coletados na RA i ;

$D1_{ij}$ é a distância entre o centro de massa da RA i até a unidade de transbordo/tratamento j ;

$D2_j$ é a distância entre a unidade de transbordo/tratamento j e o aterro sanitário;

A função objetivo da programação linear aplicada é descrita pela equação 2 e as restrições são apresentadas pelas equações 3 e 4.

$$FO = MIN \left[f_1 * \sum_{i=1}^{31} \sum_{j=1}^6 P_i * D1_{ij} * X_{ij} + f_2 * \sum_{j=1}^6 \left(\sum_{i=1}^{31} P_i * D2_{ij} * X_{ij} \right) \right] \quad (2)$$

Sujeita a:

$$\sum_{j=1}^6 X_{ij} = 1; \forall i, j \quad (3)$$

$$X_{ij} \in I \mid X_{ij} \in [0,1]; \forall i, j \quad (4)$$

Onde:

C é o consumo anual de combustível – diesel (l/ano);

f_1 é o fator de consumo de combustível do caminhão compactador, igual a 0,15 l/ton.km (MERRILD et. al, 2012);

f_2 é o fator de consumo de combustível do caminhão carreta, igual a 0,03 l/ton.km (MERRILD et. al, 2012);

P_i é o total de RSU coletados na RA i ;

$D_{1,i,j}$ é a distância entre o centro de massa da RA i até a unidade de transbordo/tratamento j ;

$D_{2,j}$ é a distância entre a unidade de transbordo/tratamento j e o aterro sanitário;

X_{ij} é a matriz de soluções, preenchida com valores binários, que indica se os RSU coletados na RA i serão ou não encaminhados à unidade j .

A solução foi obtida por meio do algoritmo Simplex, utilizando o software LINGO®.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Verificou-se que os atuais destinos dos RSU coletados não constituem a alternativa ótima (vide Figura 2). Tomando por exemplo a RA São Sebastião, é visível que destinar os resíduos coletados nessa RA para a unidade de transbordo localizada na RA Sobradinho não é a melhor opção, uma vez que essa unidade é mais distante que a UTMB Asa Sul. Sendo assim, a soma dos deslocamentos dos trechos 1 e 2 dessa operação de transporte nos moldes atuais é bem maior que a soma dos deslocamentos em uma possível destinação na UTMB Asa Sul. Dessa forma, foi possível identificar inconsistências na elaboração dos roteiros de transporte, onde a distância entre os pontos de coleta e infraestrutura existente não foram considerados como um fator crítico.

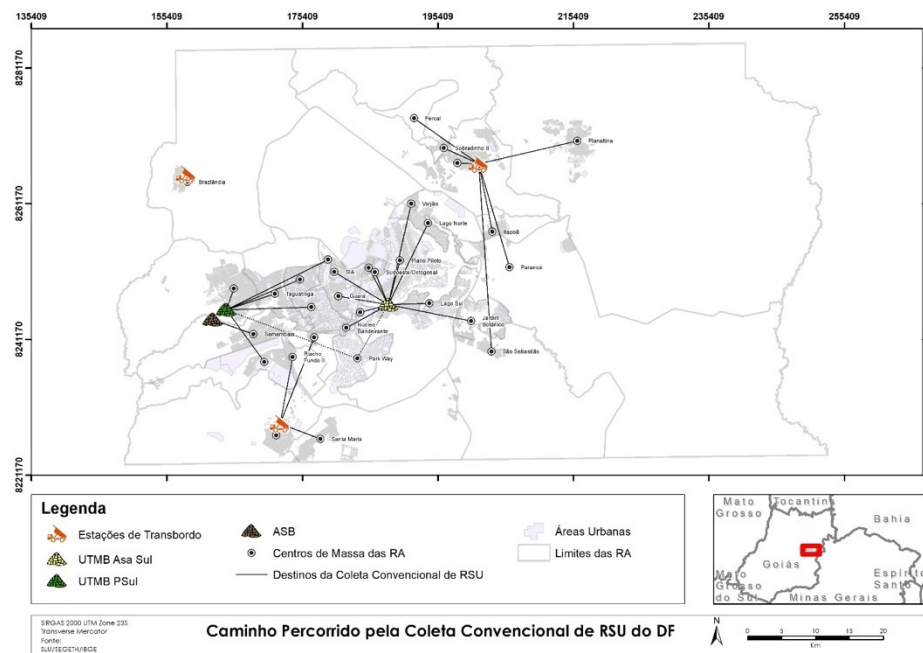


Figura 2: Atuais destinos dos RSU coletados no DF.

Fonte: (V. A. O. Silva, 2018; SLU, 2018b).

A proposta otimizada obtida por meio da programação linear aplicada é ilustrada na Figura 3. É possível observar que as mudanças nos destinos dos RSU coletados aconteceram nas RAs Paranoá, São Sebastião, Recanto das Emas, Riacho Fundo, Park Way e SCIA/Estrutural. O roteiro de transporte com maior impacto na distância percorrida no trecho 1 (redução de cerca de 20 km) foi o da RA São Sebastião, que passou a destinar os RSU para a UTM Asa Sul, enquanto que o trecho 2 foi mais impactado na RA Recanto das Emas (redução de 25 km), deixando de transportar os RSU do transbordo Gama para o ASB.

Entretanto, a proposta otimizada implicou em aumento na distância percorrida no trecho 2 nos roteiros das RAs Riacho Fundo e SCIA/Estrutural. Ambos os roteiros alteraram os destinos do trecho 1 da UTM P Sul para a UTM Asa Sul. Isso ocorreu devido a capacidade de tratamento das usinas e a operação de transbordo que ocorre na unidade da Asa Sul.

O consumo de combustíveis no atual cenário de transporte de RSU e na proposta otimizada – estimados pela equação 1 – são apresentados na Figura 4.

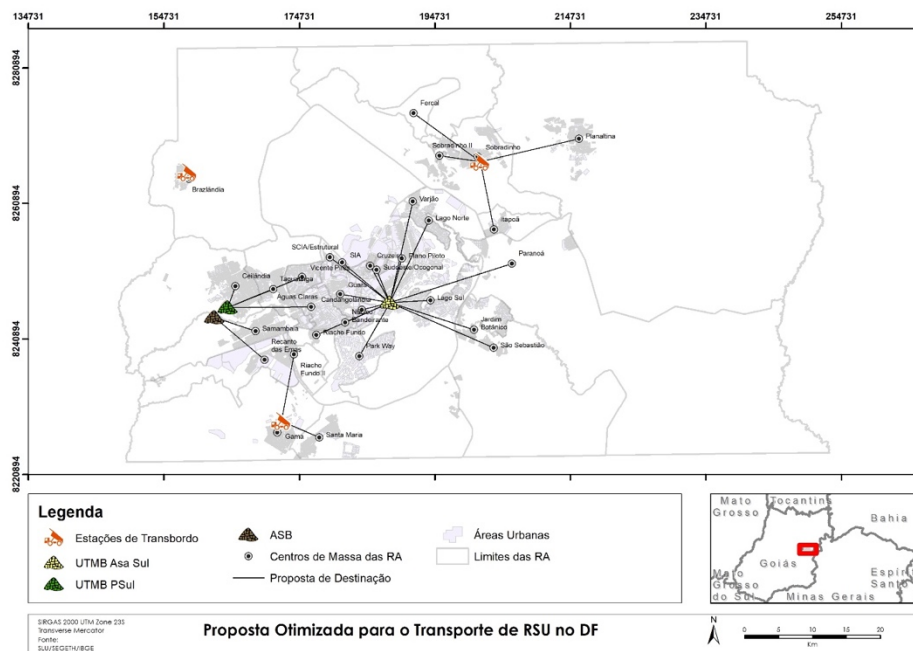


Figura 3: Proposta Otimizada para o Transporte de RSU no DF.

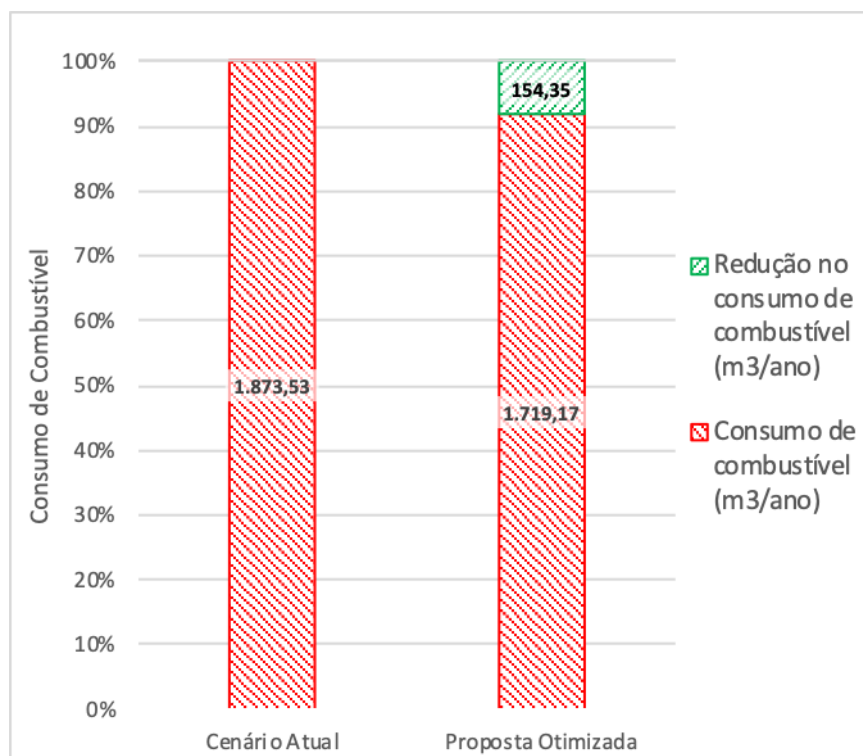


Figura 4: Comparação do consumo de combustíveis no transporte de RSU no DF na situação atual e na proposta otimizada.

Verificou-se que a proposta otimizada para o transporte dos RSU coletados no DF apresentada neste trabalho implica na redução do consumo de

combustíveis fósseis em 8,24%. Isso representa uma redução de 154,35 m³ em um único ano.

Apenas para fins de comparação, considerando o preço médio de comercialização combustível no Brasil para o ano de 2018 igual a R\$ 3,22/litro de diesel (Petrobras, 2018), a economia financeira proporcionada pela otimização no transporte seria de R\$ 497.013,00/ano, analisando apenas a diminuição na compra de diesel. Vale ressaltar que a economia financeira seria ainda maior, uma vez que o desgaste dos veículos utilizados seria menor com a redução na distância percorrida.

Em se tratando de emissões de GEE, considerando os fatores de emissão de CO₂-equivalente na combustão de diesel do Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (Brasil, 2011), a redução proporcionada pela otimização proposta seria de 9.478,41 toneladas de CO₂-equivalente/ano.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste trabalho evidenciaram que os atuais roteiros de transporte de resíduos sólidos urbanos coletados no Distrito Federal não são a alternativa ótima para esta etapa do gerenciamento.

Através de programação linear inteira binária foi possível otimizar a seleção do local de destino dos resíduos coletados em cada região administrativa do DF. A alternativa otimizada proposta promoveu redução de 8,4% no consumo de combustíveis pelos veículos utilizados para o transporte, o que implica na economia de R\$ 497.013,00 por ano com compra de diesel e na redução de emissões atmosféricas a 9.478,41 toneladas de CO₂ equivalente por ano.

Recomenda-se a realização de estudos de otimização que incorporem, além do consumo de combustível, a capacidade de tratamento das atuais unidades de gerenciamento do DF e a composição dos RSU coletados, de forma que os resíduos mais propícios ao tratamento sejam destinados às UTMB, enquanto os que contenham grande fração de rejeitos sejam encaminhados para a disposição final. Além disso, a integração entre roteiros de transporte otimizados e tecnologias de tratamento dos resíduos sólidos coletados, tais como Tratamento Mecânico-Biológico, reaproveitamento energético de RSU, compostagem, dentre outras, deve ser considerada.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2016, 2016.

BRASIL. I INVENTÁRIO NACIONAL DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS POR VEÍCULOS AUTOMOTORES RODOVIÁRIOS. 2011.

IBGE. Brasil em Síntese - Distrito Federal. Disponível em:
<<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/df/brasil/panorama>>. Acesso em: 20 jun.
2018.

MERRILD, H.; LARSEN, A. W.; CHRISTENSEN, T. H. Assessing recycling versus incineration of key materials in municipal waste: The importance of efficient energy recovery and transport distances. Waste Management, 2012.

PETROBRAS. Composição de preços ao consumidor. Disponível em:
<<http://www.petrobras.com.br/pt/produtos-e-servicos/composicao-de-precos-de-venda-ao-consumidor/diesel/>>.

SILVA, F. L. DA. Hierarquização de alternativas para o gerenciamento de resíduos sólido urbano reciclável no Distrito Federal. Universidade de Brasília, 2017.

SILVA, V. A. O. Análise de alternativas para minimização dos impactos no gerenciamento de resíduos sólidos urbanos - Estudo de caso no Distrito Federal. Universidade de Brasília, 2018.

SLU. Relatório de atividades. Brasília: 2017.

SLU. Tabela de Distribuição dos Serviços de Coleta Convencional.2018.

TAVARES, G. et al. Optimisation of MSW collection routes for minimum fuel consumption using 3D GIS modelling. Waste Management, 2009.

THE WORLD BANK. What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management. Washington: 2012.

Recebido: 28/02/2020

Aprovado: 09/04/2020

DOI: 10.3895/rts.v16n41.11696

Como citar: SILVA, V.A.O.; CONTRERAS,F. Proposta de otimização do transporte de resíduos sólidos urbanos coletados no Distrito Federal. *R. Tecnol. Soc.*, Curitiba, v.16, n.41, p. 153-162, Ed. Especial. 2020. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/11696>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

