

Definição da matriz de compatibilidade entre pares de aeroportos para o transporte de órgãos

Bruno Athayde Carrara¹, Glaydston Mattos Ribeiro², Ilton Curty Leal Junior³,
Leonardo Macedo Rodrigues Cascardo⁴ e Evelyn Heizen⁵

Resumo: Problemas logísticos são responsáveis por parte da não efetivação de doações de órgãos no Brasil. Uma das causas desses problemas é falta de ferramentas que auxiliem na tomada de decisão para escolha de voos para o transporte dos órgãos dentro de um período adequado. Assim, o objetivo desse artigo é apresentar e aplicar um modelo matemático, baseado no problema do caminho mínimo, para análise da compatibilidade entre pares de aeroportos de origem e destino, para transporte de órgãos para transplante pelo modo aéreo, utilizando voos de empresas aéreas regulares em território brasileiro. Após pesquisa bibliográfica e realização de entrevistas com responsáveis da Central Nacional de Transplantes desenvolveu-se o modelo matemático com aplicação em vinte e cinco casos reais. Consideraram-se trinta e dois dos principais aeroportos brasileiros para os quais se estabeleceu uma matriz origem-destino e os pares de compatibilidade para o transporte de órgãos para transplante. Verificou-se que em 52% dos casos o órgão foi transportado para o primeiro receptor da lista de espera. Acredita-se que a decisão de enviar o órgão para receptores que não sejam os primeiros da lista poderia estar relacionada, também, à falta de uma ferramenta de suporte para identificação de possibilidade de ligações entre origens e destinos, o que poderia ser evitado caso houvesse disponibilidade da matriz de compatibilidade proposta.

Palavras-chave: logística, transportes de órgãos, transporte aéreo.

Abstract: Logistical problems are responsible for non-fulfillment of organ donations in Brazil. There are not tools to assist a decision making for choice of flights that allow the transport of organs within a period appropriate. This paper aims to present and apply a mathematical model based on the shortest path problem, to peer compatibility analysis of origin and destination airports to transport organs for transplantation by air mode, using regular airline flights in Brazil. After literature review and interviews with officials of the National Transplant Center, the mathematical model was developed with application in twenty-five real cases. We considered thirty-two of the main Brazilian airports for which established an origin-destination matrix and the compatibility of couples to transport organs for transplantation. It was found that in only 52% of cases, the organ was transported to the first receiver the waiting list. It is believed that the decision to send the organ to receivers other than the first one in the list could be also related to the lack of a support tool for identifying potential connections between sources and destinations, which could be avoided if there were proposed compatibility matrix.

Keywords: logistics, organ transportation, air transportation.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui o segundo maior sistema de transplante de órgãos do mundo sendo o mesmo custeado pelo governo federal por meio do seu Sistema Único de Saúde – SUS (ABTO, 2012; *Consejo de Europa*, 2012). Assim como nos Estados Unidos, maior sistema do mundo, a grande dimensão territorial do Brasil dificulta o atendimento de todas as demandas das regiões do país de forma eficaz e igualitária (Nunes, 2010).

Em setembro de 2013, as listas de espera por órgãos sólidos apresentavam os seguintes números de pacientes ativos: rim - 19556; fígado - 1448; coração - 221; pulmão - 186; pâncreas - 16; e pâncreas/rim - 411.

Alguns estados das regiões norte, nordeste e centro-oeste do Brasil apresentam as menores taxas de doação por milhão de população (pmp) em seus territórios, enquanto os estados das regiões sudeste e sul possuem as maiores taxas de doadores do país (ABTO, 2013).

Estados com números baixos de doações efetivadas apresentam problemas além daqueles relacionados à identificação de doadores como, por exemplo, problemas logísticos, que são a causa da não efetivação de 5% a 10% das doações potenciais (ABTO, 2009). Mesmo que esses problemas não sejam as principais causas da não efetivação de doações, cabe ressaltar que eles implicam na possibilidade de perda de vidas humanas.

Assim, o transporte do órgão entre doador e receptor é um dos fatores que podem contribuir para o fracasso de uma operação de transplante, segundo informações coletadas em entrevista com a Central Nacional de Transplantes – CNT, principalmente em decorrência do tempo que se passa entre a retirada do órgão e a realização do transplante.

Para diminuir os problemas na logística dos órgãos, em dezembro de 2013, em substituição a um acordo de cooperação técnica vigente desde 2009 (Ministério da Saúde, 2009), um novo acordo foi firmado entre empresas aéreas, o Ministério da Saúde - MS e órgãos ligados à aviação (Ministério da Saúde, 2013). O acordo teve como objetivo viabilizar o transporte aéreo gratuito de órgãos, tecidos e partes extraídas de corpo de pessoas falecidas, com fins de transplante, assim como o transporte de equipes responsáveis

¹ Bruno Athayde Carrara, Programa de Engenharia de Transportes, UFRJ. (bruno.carrara@pet.coppe.ufrj.br)

² Glaydston Mattos Ribeiro, Programa de Engenharia de Transportes, UFRJ. (glaydston@pet.coppe.ufrj.br)

³ Ilton Curty Leal Junior, Programa de Pós-Graduação em Administração, Universidade Federal Fluminense (iltoncurty@gmail.com)

⁴ Leonardo Macedo Rodrigues Cascardo, Programa de Engenharia de Transportes, UFRJ. (leonardocascardo@pet.coppe.ufrj.br)

⁵ Evelyn Heizen, Programa de Pós-Graduação em Gerontologia, Universidade Católica de Brasília. (evelynh@saude.gov.br)

pela retirada, acompanhamento e transplante desses órgãos em seus potenciais receptores.

Embora esse acordo esteja vigente, existe a necessidade de se avaliar, em situações reais, a compatibilidade entre a localidade de origem e de destino do órgão para evitar atrasos no processo de transporte. Com isso, o presente estudo aborda os parâmetros estabelecidos neste novo acordo e aplica um modelo matemático para estabelecer os possíveis pares de origem e destino para o transporte de órgãos para transplante, levando-se em consideração a restrição de tempo associada à sobrevida dos mesmos fora do corpo humano.

O estudo contempla as cinco empresas aéreas presentes no acordo de cooperação e dados de tempo de voo entre os trinta e dois principais aeroportos brasileiros para traçar uma matriz de compatibilidade entre pares de aeroportos. Essa matriz pode ser utilizada na tomada de decisão por parte de coordenadores de transplantes brasileiros, a fim de reduzir tempo na busca por voos entre origens e destinos considerados incompatíveis.

Atualmente, a busca por voos é feita pela CNT por meio de *websites* das companhias. Alguns *websites* não permitem que se compre uma passagem com tempo mínimo de antecedência do voo, pois o passageiro poderia se atrasar e gerar outro tipo de problema para a companhia. Como a CNT não precisa comprar passagem e o melhor seria embarcar no voo mais próximo do seu horário de partida, devido ao tempo de isquemia fria - CIT do órgão, a busca pelo *website* da companhia não seria adequada, pois além de ser demorada, pode não apresentar todos os voos que estariam disponíveis para o transporte de órgãos.

Além disso, existem os voos cargueiros, que não são mostrados em *websites* de companhias aéreas, mas por vezes são utilizados, principalmente na madrugada, quando há um número reduzido de voos de passageiros disponíveis. A matriz de compatibilidade é um auxílio para os gestores do transporte de órgãos identificarem a possibilidade de se transportar o órgão em um tempo razoável. A consulta à matriz proposta neste artigo é basicamente para identificar, em segundos, se é possível voar de uma origem para um destino sem ultrapassar o CIT máximo do órgão. Para se ter a certeza da possibilidade de voar de um ponto a outro haveria a necessidade de um modelo que considerasse os horários dos voos, mas por meio deste trabalho, é possível reduzir o espaço de busca e excluir os pares que se tem a certeza que não são possíveis de utilização.

Por meio de uma pesquisa de campo realizada junto à CNT, em Brasília, dados sobre o transporte de órgãos foram obtidos. No total, foram estudados 25 casos relacionados ao transporte de órgãos sólidos, sendo eles: coração, pulmão, fígado, pâncreas, rim e intestino.

A partir desta introdução, este artigo está estruturado como segue. Na Seção 2 é apresentada uma revisão bibliográfica relacionada a generalidades sobre o transplante e o transporte de órgãos. A Seção 3 apresenta a descrição do modelo matemático utilizado no estudo e a Seção 4 descreve a metodologia empregada. Os parâmetros utilizados no modelo e os resultados de sua aplicação são apresentados na Seção 5, enquanto a Seção 6 traz as conclusões do trabalho.

2. O TRANSPORTE DE ÓRGÃOS NO BRASIL

O transplante é definido como a transferência de células, tecidos, órgãos vivos e outras partes do corpo humano de uma pessoa para outra com a finalidade de restabelecer uma função perdida (Ministério da Saúde, 2012).

Um órgão vivo representa uma parte diferenciada e vital do corpo humano que é formada por diferentes tecidos e que mantém sua capacidade de desenvolver funções fisiológicas com um importante nível de autonomia (Espanha, 2006). Os órgãos vivos que podem ser transplantados são: rins, fígado, pâncreas, pulmões, coração e intestino.

O processo de transplante envolve no mínimo dois personagens (Beliën *et al.*, 2013). O primeiro é a família ou a pessoa que doa seu órgão com a intenção de transplante, chamado de doador (WHO, 2007). O segundo personagem é a pessoa a quem o órgão é destinado, denominado receptor, o qual receberá o enxerto de um órgão ou tecido transplantado (HRSA, 2012).

O doador pode ser uma pessoa viva ou falecida. Entretanto, além de ser mais comum a doação de pessoas falecidas, somente alguns órgãos ou parte de órgãos podem ser doados em vida (ABTO, 2012). A doação por morte encefálica é a mais frequente, não só no Brasil, mas também em todo o mundo. Após sua ocorrência, a pessoa não é capaz de respirar sem o auxílio de aparelhos, o que é possível apenas por mais algumas horas, uma vez que a parada cardíaca é inevitável. Os órgãos devem ser doados antes da parada cardíaca, enquanto ainda há circulação sanguínea, pois nessa situação aproveitam-se maior quantidade de órgãos do doador (Ministério da Saúde, 2012).

A partir do momento em que se inicia o processo de doação de um órgão, o tempo passa a ser a principal restrição, uma vez que haverá um intervalo determinado desde a definição do receptor adequado até a execução da cirurgia em seu corpo (Fuzzati, 2005). Apenas neste espaço de tempo, o órgão doado pode ser utilizado com a finalidade de transplante (Moreno *et al.*, 2001). Destaca-se que um tempo elevado de permanência de um órgão fora do corpo, conhecido como tempo de isquemia fria (*cold ischaemia time* – CIT), representa um impacto negativo nos resultados do transplante. Dependendo do órgão, o CIT elevado pode causar funcionamento retardado do enxerto, lesão ao órgão, redução no tempo de vida do órgão e também do paciente (Uehlinger *et al.*, 2010).

O CIT é a variável mais importante para o transporte, pois é durante o seu decorrer que o órgão será trasladado entre o doador e o receptor. O CIT está compreendido entre o horário de clampeamento (parada circulatória por interrupção da artéria aorta) e o horário de reperfusão do enxerto no receptor (Totsuka *et al.*, 2002; Stahl *et al.*, 2005).

Na Tabela 1 apresentam-se os tipos de órgãos com os tempos máximos de preservação. O coração e os pulmões são os órgãos com o menor tempo disponível (ABTO, 2009). O rim, por sua vez, tem um CIT variável, conforme o tipo de solução de preservação utilizado, sendo de até 24 horas para a solução *Euro Collins* (Collins *et al.*, 1969) e até 36 horas para a solução *Wiscosin University* – UW (Belzer *et al.*, 1967).

Tabela 1. Tempo máximo de preservação dos órgãos fora do corpo.

Fonte: ABTO (2009)

Órgão	CIT máximo (horas)
Coração	4
Pulmões	4 a 6
Intestino	6 a 8
Fígado	12
Pâncreas	Até 20
Rins	Até 24 (solução <i>Euro Collins</i>) e 36 (solução <i>UW</i>)

Tabela 2. Regiões para fins de transplantes

Fonte: Ministério da Saúde (2001)

Região	Estados
I	PR, RS, SC
II	ES, MG, RJ
III	AC, AM, AP, DF, GO, MS, MT, PA, RO, RR, SP, TO
IV	AL, BA, CE, MA, PB, PE, PI, RN, SE

O Sistema Nacional de Transplantes brasileiro (SNT) adota um modelo hierárquico dividido, a princípio, em três níveis: estadual, regional e nacional. São parte do SNT, o Ministério da Saúde e as Secretarias de Saúde dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios, além dos estabelecimentos hospitalares autorizados e a rede de serviços auxiliares aos transplantes (Brasil, 1997a). A Lei 9.434 dispõe sobre o transplante de órgãos em território brasileiro e o Decreto 2.268 regulamenta essa atividade nacionalmente (Brasil, 1997a e 1997b).

O Ministério da Saúde (Ministério da Saúde, 2001) distribui o território nacional em quatro regiões para fins de transplante, de acordo com a Tabela 2.

A alocação de órgãos no nível estadual é feita por meio das Centrais de Notificação, Captação e Distribuição de Órgãos (CNCDOs) e obedece a critérios de urgência e geográficos, sendo que cada estado é dividido em regiões e alguns deles são divididos em sub-regiões (Ministério da Saúde, 2001). O órgão é primeiramente ofertado ao subnível mais baixo até chegar ao nível estadual, de acordo com a urgência e a data de inscrição do paciente na lista, podendo não ser observada a ordem em razão da distância e das condições de transporte entre doador e receptor (Brasil, 1997a; Ministério da Saúde, 2001).

Não encontrando receptor para o órgão ofertado dentro do próprio estado, o órgão é oferecido pela CNCDO Estadual para a Central Nacional de Notificação e Captação de Órgãos – CNNCDO (referenciada neste trabalho por Central Nacional de Transplantes ou CNT), responsável pela distribuição dos órgãos entre estados da federação (Ministério da Saúde, 2001), a qual ofertará o órgão primeiramente à outra CNCDO da mesma região que o doador, seguindo a lista de espera única nacional, e, caso ainda não encontre receptor, oferecerá aos outros estados do país (Ministério da Saúde, 2001).

No cenário brasileiro, o compartilhamento de órgãos entre diferentes centros é realizado com o objetivo de se obter o melhor proveito de um programa nacional de transplantes. O compartilhamento de órgãos entre distintas localidades é uma necessidade e está previsto na Portaria nº 91/GM do Ministério da Saúde. As dimensões geográficas de países como o Brasil podem afetar as distâncias a serem percorridas para o órgão atingir o seu receptor (Stahl *et al.*, 2005), elevando o *CIT* e, conseqüentemente, reduzindo a

sobrevivência do enxerto em longo prazo (Gooi *et al.*, 2007; Schnitzler *et al.*, 2007).

O transporte do órgão deve ser feito da maneira mais ágil possível, com o objetivo de aumentar a probabilidade de chegar ao seu receptor dentro do *CIT* aplicável e aumentar a eficácia na execução desse transporte (Moreno *et al.*, 2001; Salahudeen e May, 2008). Um deslocamento de longa distância pode afetar negativamente o *CIT* de um órgão (Uehlinger *et al.*, 2010; Totsuka *et al.*, 2002), como destacado anteriormente.

Alguns dos fatores impactantes nesse transporte são: o modo de transporte, o equipamento utilizado (automóvel, aeronave a hélice, aeronave a jato etc.), tempos de espera em aeroportos, escolha de rotas, atrasos de tráfego e condições meteorológicas adversas (Totsuka *et al.*, 2002; Simpkins *et al.*, 2007; Martín *et al.*, 2008).

Ao se tomar como base o conceito de curta distância estabelecido por Martín *et al.* (2008) como sendo trajetos de até 300 km, conclui-se que apenas seis pares de capitais brasileiras poderiam ser classificados como de curta distância, de um total de 351 possibilidades, sendo elas: Recife / João Pessoa (120 km); Recife / Maceió (285 km); Recife / Natal (297 km); João Pessoa / Natal (185 km); Aracajú / Maceió (294 km); Brasília / Goiânia (209 km) (DNIT, 2014).

De 6.474 transportes realizados entre 1º de outubro de 2012 e 30 de setembro de 2013 que foram coordenados pela CNT, aproximadamente 0,7% foi feito por via terrestre, enquanto 99,3% dos casos utilizaram aeronaves (Heinzen, 2013). Por esse panorama, verifica-se a importância que o transporte aéreo representa para o transplante de órgãos dentro de um vasto território e, principalmente, em países com problemas de infraestrutura associados a rodovias e ferrovias (Aydin *et al.*, 2008).

3. MODELO MATEMÁTICO PARA O TRANSPORTE DE ÓRGÃOS EM VOOS REGULARES DOMÉSTICOS

O modelo matemático apresentado é baseado no problema do caminho mínimo (Dijkstra, 1959). Seja $G = (N, A)$ um grafo tal que N representa um conjunto de nós (aerportos) e A um conjunto de arcos (i, j) , sendo $i, j \in N: i \neq j$. Um arco representa um voo entre os aeroportos i e j . Considera-se ainda um tempo de viagem c_{ij} associado ao voo

$(i, j) \in A$ Assim, o problema do transporte de órgãos em voos regulares domésticos consiste em encontrar o caminho mínimo entre um aeroporto de origem s e um aeroporto de destino t , tal que $s \neq t$ e que um tempo máximo de deslocamento $T_{máx}$ seja respeitado. Um caminho consiste em um conjunto de voos que, interconectados, ligam o nó s ao nó t . O custo de um caminho consiste na soma dos tempos associados aos voos que o compõem.

O problema pode ser modelado como um problema de programação linear inteira mista. Assim, seja $x_{ij} \in \{0,1\}$ uma variável binária de decisão associada a cada arco $(i, j) \in A$. Então, se $x_{ij} = 1$, o arco (i, j) deve ser utilizado, fazendo parte do caminho mínimo entre os nós s e t , caso contrário, $x_{ij} = 0$. Cada aeroporto possui uma variável $T_i \geq 0$ que representa o momento no qual o órgão chega no aeroporto $i \in N$.

Assim, a formulação geral do problema do transporte de órgãos em voos regulares domésticos pode ser expressa da seguinte maneira:

$$\text{Min } z = T_t \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in N} x_{sj} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N} x_{it} = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ij} - \sum_{k \in N} x_{jk} = 0 \quad \forall j \in N / \{s, t\} \quad (4)$$

$$x_{ij} (T_i + c_{ij} - T_j) \leq 0 \quad \forall (i, j) \in A : i \neq t, j \neq s \quad (5)$$

$$T_s = 0 \quad (6)$$

$$T_t \leq T_{máx} \quad (7)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall (i, j) \in A \quad (8)$$

$$T_i \geq 0 \quad \forall i \in N \quad (9)$$

A Função Objetivo (1) busca minimizar o tempo de chegada ao aeroporto de destino. Na formulação matemática apresentada considera-se que uma unidade de fluxo é inserida no nó (s) que deve percorrer os nós do grafo até encontrar o nó t . Desta maneira, a Restrição (2) garante que uma unidade de fluxo deve deixar o nó inicial (s) e seguir para algum outro nó. A Restrição (3) garante que uma unidade de fluxo deve chegar ao nó t proveniente de algum outro nó. As Restrições (4) são conhecidas como restrições de conservação de fluxo e garantem que se a unidade de fluxo chegar a um nó intermediário, ela deve deixá-lo. As Restrições (5) garantem a contabilização da variável tempo (garantem o cálculo correto). A Restrição (6) garante que o órgão deve iniciar sua viagem no instante zero e a Restrição (7) garante que ele não deve extrapolar o tempo máximo

permitido. Por último, as Restrições (8) e (9) estão associadas ao domínio das variáveis.

O modelo (1)-(9) tem o objetivo de analisar a compatibilidade entre um órgão e o seu transporte entre um dado par de origem e destino de uma rede definida de aeroportos, sendo que sua função principal é economizar o tempo necessário na busca por voos entre os aeroportos de origem e de destino.

4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para a aplicação do modelo desenvolvido foi necessário o desenvolvimento prévio de etapas de pesquisa as quais estão descritas nesta seção. A primeira etapa foi a definição dos aeroportos a serem considerados no estudo e suas respectivas localizações para a estruturação da rede de transporte aéreo a ser analisada.

Na etapa seguinte foram computados os menores tempos de voo entre cada par de nós, levando-se em consideração todos os voos operados por todas as empresas aéreas participantes do Acordo de Cooperação descrito por Ministério da Saúde (2013). Os voos considerados para a definição dos tempos de deslocamento dos arcos foram baseados no arquivo de horários de transporte de 09 de setembro de 2013, disponibilizado por ANAC (2013a).

A obtenção dos dados de transplantes relaciona-se a terceira etapa, que consistiu na realização de entrevista com representantes da CNT em março de 2014. Os dados obtidos indicam o tipo de órgão, a data no qual aconteceu o transporte, o horário de chegada ao aeroporto de destino e uma lista de destinos prioritários.

A partir do CIT máximo de cada órgão que consta na Tabela 1, procedeu-se a quarta etapa que consistiu na definição do tempo máximo disponível para o transporte ($T_{máx}$). Assim, com base em entrevistas com coordenadores de equipes de captação de cada tipo de órgão, foram levantados os valores de tempos que compõem o período de isquemia fria, sendo: tempo aplicável à cirurgia de retirada do órgão do corpo de seu doador até seu armazenamento em embalagem para transporte (D_{cg}); tempo de deslocamento entre o hospital e o aeroporto de origem do órgão (D_{ho}); tempo de transporte entre os aeroportos de origem e de destino (T_t); e tempo de deslocamento entre o aeroporto de destino e o hospital transplantador (D_{dh}).

Considerou-se um tempo padrão de 30 minutos de transporte entre o hospital onde se deu a doação e o aeroporto de origem mais próximo e mais 30 minutos de transporte entre o aeroporto de destino mais próximo do receptor e o hospital transplantador. O tempo de cirurgia de implante do órgão no receptor foi desconsiderado, pois se trata de um parâmetro muito variável e dependente de cada caso específico.

Foram considerados os CIT máximos possíveis para cada tipo de órgão transplantado em território nacional. Portanto, o tempo máximo disponível para o transporte ($T_{máx}$) é dado pela Equação 10.

$$T_{máx} = CIT_{máx} - D_{cg} - D_{ho} - D_{dh} \quad (10)$$

Na quinta etapa, o aplicativo *What's Best* versão 11.1 (LINDO Systems, 2013) foi utilizado para resolver o modelo matemático (1)-(9) em um computador portátil Compaq Presario C750BR com Processador Intel® Celeron M540 e 2GB de memória.

Tabela 3. Dados de órgãos disponibilizados durante a pesquisa

Cód. do Nó	Município	Cód. Aeroporto	Cod. do Nó	Município	Cód. Aeroporto
1	Maceió	SBMO	16	Macapá	SBMQ
2	Salvador	SBSV	17	Belém	SBBE
3	Fortaleza	SBFZ	18	Porto Velho	SBPV
4	São Luís	SBSL	19	Boa Vista	SBBV
5	João Pessoa	SBJP	20	Palmas	SBPJ
6	Recife	SBRF	21	Campinas	SBKP
7	Teresina	SBTE	22	Ribeirão Preto	SBRP
8	Natal	SBNT	23	Guarulhos	SBGR
9	Aracaju	SBAR	24	São Paulo	SBSP
10	Brasília	SBBR	25	Vitória	SBVT
11	Goiânia	SBGO	26	Belo Horizonte	SBBH
12	Campo Grande	SBCG	27	Rio de Janeiro	SBRJ
13	Cuiabá	SBCY	28	Curitiba	SBCT
14	Rio Branco	SBRB	29	Porto Alegre	SBPA
15	Manaus	SBEG	30	Florianópolis	SBFL

Tabela 4. Dados de órgãos disponibilizados durante a pesquisa

Caso	Órgãos	Data	Hora	s	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆	t ₇	t ₈	t ₉
C01	Rim	27/2	00:52	SBSV	SBRF	SBFZ	SBRJ	SBVT	SBBH				
C02	Rins	27/2	05:00	SBRJ	SBVT	SBBH	SBRF	SBCT	SBPA				
C03	Rins	01/3	07:44	SBFZ	SBRF	SBRJ	SBVT	SBBR					
C04	Rim	01/3	11:45	SBSV	SBRF	SBFZ	SBPA	SBBR	SBBH				
C05	Fígado	04/3	01:42	SBBH	SBVT	SBRJ	SBCT	SBRF	SBPA				
C06	Rins	04/3	01:42	SBBH	SBRJ	SBVT	SBPA						
C07	Fígado	04/3	17:35	SBCG	SBRF	SBBR	SBRJ	SBVT	SBBH	SBPA			
C08	Coração	04/3	17:35	SBCG	SBSP	SBBR							
C09	Rins	04/3	17:35	SBCG	SBSP	SBEG	SBBE	SBBR	SBGO	SBRF			
C10	Fígado	05/3	01:25	SBSV	SBRF	SBFZ	SBRJ	SBCT	SBVT	SBBR	SBBH		
C11	Rim	06/3	23:40	SBRB	SBRF	SBBR	SBBE	SBGO					
C12	Rim	06/3	23:40	SBRB	SBRF	SBGR	SBBR	SBBE	SBGO				
C13	Fígado	06/3	23:40	SBRB	SBBR	SBRJ	SBVT	SBRF	SBFZ				
C14	Fígado	07/3	03:35	SBNT	SBSV	SBRF	SBFZ	SBRJ	SBBR	SBCT	SBVT		
C15	Rim	07/3	14:30	SBFL	SBSP	SBPA	SBCT	SBRJ	SBRF	SBB	SBBE	SBV	
C16	Rim	07/3	14:30	SBFL	SBPA	SBCT	SBRJ	SBRF	SBBH	SBBE	SBVT		
C17	Rim	08/3	12:15	SBFL	SBRF	SBSP	SBPA						
C18	Fígado	11/3	10:38	SBNT	SBRF	SBFZ	SBRJ	SBBR	SBVT	SBCT			
C19	Fígado	12/3	23:43	SBNT	SBGR	SBRF	SBFZ	SBCT	SBRJ	SBBR	SBVT		
C20	Fígado	18/3	11:45	SBSV	SBFZ	SBRJ	SBBR						
C21	Rim	19/3	15:00	SBFZ	SBSV	SBMO	SBPA	SBRJ	SBBE	SBTE	SBJP	SBRF	SBSL
C22	Rins	20/3	00:00	SBFZ	SBSV	SBMO	SBJP	SBRF	SBNT	SBTE			
C23	Coração	20/3	03:36	SBGO	SBBR								
C24	Pulmão	20/3	03:36	SBGO	SBBR								
C25	Fígado	20/3	03:36	SBGO	SBBR	SBRJ	SBVT	SBPE	SBCE	SBPR			

Na aplicação do modelo matemático (1)-(9) foi considerado, ainda, um fator de parada de 30 minutos. Esse fator considera que deve haver um tempo de antecedência para que se faça a transferência de um veículo terrestre para uma aeronave, no aeroporto de origem, e também um tempo de espera (escala ou conexão, com ou sem troca de aeronave) em nós transitórios entre s e t . Assim, para cada partida de um nó i para um nó j , inclusive quando $i = s$, aplica-se esse fator de parada. Portanto, $c_{ij} \leftarrow c_{ij} + 0,5$ $(i, j) \in A$.

5. MATRIZ DE COMPATIBILIDADE: UMA APLICAÇÃO REAL

Conforme previsto na primeira etapa descrita na metodologia, foram considerados trinta e dois aeroportos brasileiros, sendo estes os principais de cada uma das capitais dos estados do país, além dos aeroportos de Guarulhos, Viracopos (Campinas) e Ribeirão Preto. O primeiro por ser o

aeroporto com mais movimentos de aeronaves no Brasil e os outros dois por serem bases principais de duas das empresas aéreas incluídas no estudo (ANAC, 2013b). Os aeroportos Santos Dumont e Galeão foram considerados como um único nó no Rio de Janeiro e os aeroportos de Confins e Pampulha como um único nó em Belo Horizonte. Com isso, a rede estudada contempla ao todo 30 nós. A Tabela 3 traz o código do nó utilizado para representar o aeroporto bem como o município em que ele está inserido e o seu código ICAO (International Civil Aviation Organization).

Na segunda etapa, definiu-se a matriz de tempos que é a base para os cálculos dos caminhos mínimos entre os pares de aeroportos da rede, e consequentemente, para a definição da matriz de compatibilidade.

Para a coleta de dados de transplante (etapa 3), em razão do elevado número de receptores, foram considerados até 20 receptores para cada um dos 25 casos disponibilizados pela CNT, o que representou até nove destinos diferentes.

Tabela 5. Valores considerados para o cálculo do $T_{m\acute{a}x}$.

Órgão	$CIT_{m\acute{a}x}$	D_{cg}	D_{ho}	D_{dh}	$T_{m\acute{a}x}$
Coração	04:00	00:30	00:30	00:30	02:30
Pulmão	06:00	00:30	00:30	00:30	04:30
Fígado	12:00	00:40	00:30	00:30	10:20
Pâncreas	20:00	01:00	00:30	00:30	18:00
Rim	36:00	01:20	00:30	00:30	33:40

Tabela 6. Matriz de compatibilidade da rede

Origem \ Destino	Região A									Região B										Região C					Região D					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	-	T	T	Y	T	T	T	T	T	T	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	T	Y	T	Y	T	T	Y	Y	Y	
2	T	-	T	T	T	T	T	T	T	T	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	T	T	Y	T	T	T	T	T	T	Y	Y
3	T	T	-	T	T	T	T	T	T	Y	Y	Y	Y	T	T	T	Y	Y	Y	T	Y	T	Y	Y	Y	Y	T	Y	Y	Y
4	Y	T	T	-	T	T	T	Y	T	T	Y	Y	Y	Y	T	T	Y	Y	Y	Y	Y	T	Y	Y	T	T	Y	Y	Y	
5	T	T	T	T	-	T	T	T	T	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	T	Y	T	Y	Y	Y	Y	T	Y	Y	
6	T	T	T	T	-	T	T	T	T	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	T	Y	Y	
7	T	T	T	T	T	-	T	T	T	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	T	Y	T	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	
8	T	T	T	T	T	T	-	T	T	Y	Y	Y	Y	Y	Y	T	Y	Y	Y	T	Y	T	Y	T	T	T	Y	Y	Y	
9	T	T	T	Y	T	T	T	-	T	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Z	Y	T	Y	T	Y	T	T	T	Y	Y	Y	
10	T	T	T	T	T	T	T	T	-	T	T	T	T	T	Y	T	T	Y	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	
11	T	T	T	Y	Y	T	T	Y	Y	T	-	T	Y	Y	Y	T	Y	Y	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	
12	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	T	T	-	T	Y	Y	Y	T	Y	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	
13	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	T	T	T	-	T	Y	Y	T	Y	T	Y	T	T	T	T	T	T	T	T	T	Y	Y
14	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	T	Y	Y	T	-	T	Y	Y	T	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	
15	Y	Y	T	Y	Y	Y	Y	Y	T	Y	Y	Y	T	-	T	T	T	T	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	
16	Y	Y	T	T	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	T	-	T	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	
17	Y	Y	T	T	Y	T	T	Y	T	T	Y	Y	Y	T	T	-	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	T	Y	Y	Y	
18	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	T	Y	T	T	T	T	Y	Y	-	T	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	
19	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	T	Y	Y	T	-	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	
20	Y	T	Y	Y	Y	T	T	Y	T	T	T	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	-	T	T	T	T	T	T	T	T	Y	T	
21	T	T	T	Y	T	T	T	T	T	T	T	T	Y	Y	Y	Y	Y	Y	T	-	T	T	T	T	T	T	T	T	T	
22	Y	T	Y	Y	Y	Y	Y	Y	T	T	T	T	Y	Y	Y	Y	Y	Y	T	T	-	T	T	T	T	T	T	T	T	
23	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	Y	T	Y	T	Y	Y	T	T	T	-	T	T	T	T	T	T	T	
24	Y	T	Y	Y	Y	Y	Y	T	T	T	T	T	Y	Y	Y	Y	Y	Y	T	T	T	T	-	T	T	T	T	T	T	
25	T	T	T	Y	Y	T	Y	Y	T	T	T	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	T	T	T	T	T	-	T	T	T	T	
26	T	T	T	T	Y	T	Y	Y	T	T	T	T	Y	Y	Y	T	Y	Y	T	T	T	T	T	T	-	T	T	T	T	
27	T	T	T	T	T	Y	T	T	T	T	T	T	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	T	T	T	T	T	T	-	T	T	T	
28	Y	T	Y	Y	Y	Y	Y	Y	T	T	T	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	T	T	T	T	T	T	-	T	T	T	
29	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	T	T	T	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	T	T	T	T	T	T	T	T	-	T	
30	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	T	T	T	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	T	T	T	T	T	T	T	T	T	-	

Legenda: T = Compatível para todos os órgãos; Y = Compatível para todos os órgãos menos coração e pulmão; Z = Compatível para todos os órgãos menos coração, pulmão e intestino

A Tabela 4 resume os dados dos 25 casos sendo que as últimas nove colunas indicam a prioridade dos aeroportos de destino, de acordo com os critérios de alocação do Ministério da Saúde (2001).

Dentre os possíveis destinos para um órgão, destaca-se em negrito na Tabela 4, o aeroporto selecionado para o órgão no caso real. Para facilitar o entendimento dessa tabela, considere o primeiro Caso, denominado C01. Ele indica que um Rim foi disponibilizado para transplante no dia 27 de Fevereiro de 2013 as 00h:52min em Salvador (SBSV) e a CNT, após avaliar a lista de prioridades, verificou que este órgão poderia ir para um receptor em Recife (SBRF), Fortaleza (SBFZ), Rio de Janeiro (SBRJ), Vitória (SBVT) ou Belo Horizonte (SBBH), nesta ordem de prioridade. Após avaliar as rotas, a CNT optou por enviar este órgão para a quarta opção, ou seja, para o receptor localizado em Vitória.

Analisando a Tabela 4, verifica-se que alguns órgãos não foram alocados ao primeiro receptor das respectivas listas. Segundo informações obtidas, a CNT acredita que a não alocação ao primeiro receptor da lista possa se dar por motivos logísticos ocorridos no transporte do órgão como, por exemplo, a falta de um voo disponível entre a origem e o destino.

Para cumprimento da etapa 4 foi elaborada a Tabela 5 que apresenta os valores considerados para o cálculo do tempo máximo de deslocamento ($T_{m\acute{a}x}$), utilizando a Equação (10).

Após o levantamento de dados, o modelo matemático foi aplicado para cada órgão e cada possível par de origem e destino (etapa 5). Assim, dado um órgão e um par de aeroportos de origem e destino, seu transporte é considerado compatível se existir um caminho entre estes aeroportos tal

que o momento de chegada ao aeroporto de destino seja inferior ou igual ao tempo máximo de deslocamento permitido (Tabela 5).

A Tabela 6 traz a matriz de compatibilidade da rede de aeroportos. Os números representam os códigos dos nós da rede de acordo com a Tabela 3, sendo que a primeira coluna traz os nós de origem e a segunda linha os nós de destino. As regiões de transplante de A a D são aquelas definidas pelo Ministério da Saúde (Ministério da Saúde, 2001), conforme detalhado na Seção 2.

Ao analisar as Tabelas 4 e 6 conjuntamente, verifica-se que todos os destinos considerados pela CNT para cada caso estudado podem ser classificados como destinos compatíveis utilizando-se voos regulares, levando-se em consideração os caminhos mínimos entre cada par de origem e destino.

Entretanto, destaca-se que dos 25 casos apresentados, o órgão foi transportado para o primeiro receptor da lista de espera em apenas 13 situações. Acredita-se que a decisão de se enviar o órgão para receptores que não sejam os primeiros, seja motivada pela falta de ferramentas que auxiliem à tomada de decisão, como indicado pela própria CNT. Desta forma, a matriz de compatibilidade pode ser útil no processo de tomada de decisão, conforme destacado pela própria CNT.

Além disso, outro fator que pode ter levado à alocação dos órgãos para outros receptores não classificados em primeiro lugar na lista de espera, está associado à falta de voos regulares. Dependendo do horário e do dia da semana, o número de voos regulares se torna reduzido e, considerando a dificuldade de se obter as informações de voo, mesmo com o acordo firmado, a equipe da CNT pode ter tomado algumas decisões que priorizaram a integridade do órgão.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou a aplicação de um modelo matemático com base no problema do caminho mínimo para definir os pares de aeroportos entre os quais há compatibilidade para se transportar cada tipo de órgão para transplante sem que seja excedido o tempo máximo de isquemia fria do órgão.

Pela análise da matriz de compatibilidade desenvolvida no estudo (Tabela 6), tem-se uma visão geral dos pares de origem e destino que podem ser considerados compatíveis para o transporte de cada tipo de órgão e, em especial, quais os pares podem ser descartados para deslocamentos de órgãos em voos de empresas aéreas regulares.

Os resultados deste trabalho podem ser utilizados na tomada de decisão por parte das equipes de coordenação de transporte de órgãos antes da busca pelos voos que serão utilizados nos deslocamentos, principalmente para se evitar a perda de tempo com buscas por voos em trechos onde o deslocamento de determinado órgão não é compatível.

Porém, a matriz de compatibilidade por si só não considera todos os voos existentes entre todos os pares de aeroportos. Sendo assim, embora a matriz indique que, para um determinado órgão, existe a possibilidade de realizar o transporte respeitando seu *CIT* máximo, podem não existir

voos que sejam compatíveis com o momento no qual o órgão foi liberado para o transporte. Por exemplo, a compatibilidade pode ser levantada considerando voos diurnos, mas o órgão foi disponibilizado a noite, quando não existem voos entre a origem e o destino desejado. Mesmo sem a restrição de horários no modelo, destaca-se que a CNT está utilizando a matriz desenvolvida neste artigo para ajudar a realizar as buscas por voos para o transporte dos órgãos.

Sugere-se então, em trabalhos futuros, o estudo dos voos reais com suas datas e horários pré-definidos e a aplicação de modelagem matemática não somente para a definição dos pares de origem e destino compatíveis, mas também para a análise da possibilidade desses transportes tendo em vista os horários de disponibilidade dos órgãos e das partidas e chegadas dos voos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Processos 313408/2014-9 e 308729/2014-5) pelo apoio institucional e auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS

- ABTO – Associação Brasileira de Transplante de Órgãos (2009) *Diretrizes Básicas para captação e retirada de múltiplos órgãos e tecidos*. São Paulo, SP.
- ABTO – Associação Brasileira de Transplante de Órgãos (2012) *Entenda a doação de órgãos: decida-se pela vida*. Disponível em: <<http://www.abto.org.br/abtov03/Upload/file/entendadoacao.pdf>>. Acesso em 5 de março de 2012.
- ABTO – Associação Brasileira de Transplante de Órgãos (2013) *Registro Brasileiro de Transplantes – Ano XIX – nº 3 - Jan/Set 2013*. Disponível em: <<http://www.abto.org.br/abtov03/default.aspx?>>. Acesso em 2 de dezembro de 2013.
- ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil (2013a) *Voos Autorizados Vigentes (HOTRAN)*. Disponível em: www2.anac.gov.br/hotran/. Acesso em set 2013.
- ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil (2013b) *Anuário Estatístico do Transporte Aéreo. Dados Estatísticos e Econômicos de 2012*. Brasília, DF.
- Aydin, U., Yazici, P., Kazimi, C., Bozoklar, A., Sozbilen, M., Zeytinlu, M., Kilic, M. (2008) Simultaneous air transportation of the harvested heart and visceral organs for transplantation. *Transplantation Proceedings*, v. 40, n. 1. p. 44-46. DOI: 10.1016/j.transproceed.2007.12.002
- Beliën, J., De Boeck, L., Colpaert, J., Devesse, S., van den Bossche, F. (2013) Optimizing the facility location design of organ transplant centers. *Decision Support Systems*, v. 54, n.4, p. 1568-1579. DOI:10.1016/j.dss.2012.05.059
- Belzer, F. O., Ashby, B. S., Dunphy, J. E. (1967) 24-hour and 72-hour preservation of canine kidneys. *The Lancet*, v.

- 290, n. 7515, p. 536-539.
DOI:10.1016/S0140-6736(67)90498-9
- Brasil (1997a) *Decreto nº 2.268, de 30 de junho de 1997*. Diário Oficial da União, Brasília, DF.
- Brasil (1997b) *Lei nº 9.434, de 4 de fevereiro de 1997*. Diário Oficial da União, Brasília, DF.
- Collins, G. M.; Bravo-Shugarman, M.; e Terasaki, P. I. (1969) Kidney preservation for transportation: initial perfusion and 30 hours' ice storage. *The Lancet*, v. 294, n. 7632, p. 1219-1222. DOI:10.1016/S0140-6736(69)90753-3.
- Consejo de Europa (2012) International figures on donation and transplantation. Newsletter Transplant, v. 17, n. 1. Disponível em: <<http://www.transplant-observatory.org/Documents/NEWSLETTER2012.pdf>>.
- Dijkstra, E. (1959) A note on two problems in connection with graphs. *Numerische Mathematic*, v. 1, p. 269-271. DOI: 10.1007/BF01386390
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2014) *Distância entre cidades*. Disponível em: www1.dnit.gov.br/rodovias/distancias/distancias.asp. Acesso em 27 fev. 2014.
- Espanha (2006) *Real Decreto 1301/2006, de 10 de novembro de 2006*. 19625. Ministerio de Sanidad y Consumo. In: BOE No 270, de 11/11/2006, p. 39475 a 39502.
- Fuzzati, R. (2005) Organ Transplantation Management. *EPFL Technical Report IC/2005/022*, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne – EPFL, Lausanne, Switzerland.
- Gooi, J. H., Sharples, L., Goldsmith, K., Jenkins, D., Dhital, K., Large, S., Tsui, S. (2007) The potential impact of reducing cold ischaemic time on cardiac transplant survival. *The Journal of Heart and Lung Transplantation*, v. 26, n.2, p. 63-S64. DOI: 10.1016/j.healun.2006.11.022
- Heinzen, E. (2013) Central Nacional de Transplantes e Desafios na Alocação de Órgãos e Tecidos - Apresentação. *I Fórum de Logística para Distribuição de Órgãos e Tecidos para Transplante no Brasil*, Ministério da Saúde, Pirenópolis, GO, 24 e 25 out. 2013.
- HRSA – Health Resources and Services Administration (2012) *Annual Data Report 2011*, U.S. Department of Health and Human Services, United States Organ Transplantation – OPTN & SRTR.
- LINDO (2013) *Whats Best! Version 12.0 User's Manual*. LINDO Systems Inc. Illinois, USA.
- Martín, S., Martínez, I., Uruñuela, D. (2008) El papel de la enfermería en la Oficina Central de la ONT. In: Matesanz, R. (ed.) *El modelo español de coordinación y trasplantes (2ª Ed.)*. Madrid, Espanha.
- Moreno, A., Valls, A., Ribes, A. (2001) Finding efficient organ transport routes using multi-agent systems. *Proceedings of the IEEE 3rd International Workshop on Enterprise Networking and Computing in Health Care Industry (Healthcom)*. L'Aquila, Itália.
- MS – Ministério da Saúde (2001) *Portaria nº 91/GM de 23 de janeiro de 2001*. Diário Oficial da União, Brasília, DF.
- MS – Ministério da Saúde (2009) *Acordo de Cooperação Técnica que entre si celebram a União, por intermédio do Ministério da Saúde, e as empresas aéreas representadas pelo Sindicato Nacional das Empresas Aeroviárias - SNEA*. Diário Oficial da União, Brasília, DF.
- Ministério da Saúde (2012) *Dúvidas mais frequentes sobre transplante*. Brasília: MS.
- MS – Ministério da Saúde (2013) *Extrato de Acordo de Cooperação Técnica nº 2/2013 de 9 de dezembro de 2013*. Diário Oficial da União, Brasília, DF.
- Nunes, E. E. F. (2010) *Análise dos processos logísticos no transplante de órgãos: acondicionamento, deslocamento de equipes e previsão de demanda - Relatório Final*. UNICAMP, Campinas.
- Salahudeen, A. K., May, W. (2008) Reduction in cold ischemia time of renal allografts in the United States over the last decade. *Transplantation Proceedings*, v. 40, n. 5, p. 1285-1289. DOI:10.1016/j.transproceed.2008.03.131
- Schnitzler, M. A., Buchanan, P. M., Burroughs, T. E., Lee, R., Hauptman, P. J. (2007) Impact of ischemia time on the outcomes of heart transplant. *The Journal of Heart and Lung Transplantation*, v. 26, n. 2, p.64. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.healun.2006.11.023>
- Simpkins, C. E., Montgomery, R. A., Hawxby, A. M., Locke, J. E., Gentry, S. E., Warren, D. S., Segev, D. L. (2007) Cold ischemia time and allograft outcomes in live donor renal transplantation: is live donor organ transport feasible?. *American Journal of Transplantation*, v. 7, n. 1, p. 99-107. DOI:10.1111/j.1600-6143.2006.01597.x
- Stahl, J. E., Kong, N., Shechter, S. M., Schaefer, A. J., Roberts, M. S. (2005) A methodological framework for optimally reorganizing liver transplant regions. *Medical Decision Making*, v. 25, n. 1, p. 35-46. DOI:10.1177/0272989X04273137
- Totsuka, E., Fung, J. J., Lee, M. C., Ishii, T., Umehara, M., Makino, Y., Chang, T. H., Toyoki, Y., Narumi, S., Hakamada, K., Sasaki, M. (2002) Influence of cold ischemia time and graft transport distance on postoperative outcome in human liver transplantation. *Surgery Today*, v. 32, n. 9, p. 792-799. DOI:10.1007/s005950200152
- Uehlinger, N., Beyeler, F., Marti, H. P., Immer, F. F. (2010) Organ transplantation in Switzerland: impact of the new transplant law on cold ischaemia time and organ transports. *Swiss Medical Weekly*, v. 140, n. 15, p. 222.

WHO - World Health Organization (2007) *Data Harmonization on Transplantation Activities and Outcomes: Editorial Group for a Global Glossary*. World Health Organization, Geneva, Switzerland.