

## Proposta de algoritmo de otimização de rotas

Robert Ramon de Carvalho Sousa (Universidade de Brasília) [robert.carvalho247@gmail.com](mailto:robert.carvalho247@gmail.com)

Abimael de Jesus Barros Costa (Universidade de Brasília) [acosta@unb.br](mailto:acosta@unb.br)

Elieze Bulhões de Carvalho (Universidade de Brasília) [elieze\\_carvalho@yahoo.com.br](mailto:elieze_carvalho@yahoo.com.br)

Adriano de Carvalho Paranaíba (Instituto Federal de Goiás) [adr.paranaiba@gmail.com](mailto:adr.paranaiba@gmail.com)

Daylyne Maerla Sandoval (Universidade de Brasília-PPGT) [daylynemaerla@gmail.com](mailto:daylynemaerla@gmail.com)

### Resumo

Este artigo faz uma aplicação da metodologia “Seis Sigma” para elaboração de um algoritmo de roteirização que seja capaz de obter resultados mais eficientes do que o algoritmo de Clarke e Wright (1964) em situações de aumento aleatório das demandas de entrega de produtos frente à incapacidade de aumento do nível de serviço. Em algumas situações o algoritmo proposto obteve resultados mais eficientes que o modelo de Clarke e Wright (1964). O fator chave foi a redução do número de erros (rotas de entrega única) e do nível de variação dos resultados.

**Palavras chave:** Roteirização, Algoritmo, Clarke e Wright.

## Proposed route optimization algorithm

### Abstract

This article does an application of the methodology "Six Sigma" to prepare a routing algorithm that is capable of more efficient results than the algorithm of Clarke and Wright (1964) in situations of random increased demands for product delivery to the front inability to increase the level of service. In some situations the proposed algorithm obtained more efficient results than the model of Clarke and Wright (1964). The key factor is to reduce the number of errors (single delivery routes), and degree of variation of results.

**Key-words:** Routing, Algorithm, Clarke and Wright.

### 1. Introdução

Segundo Laporte *et al.* (2000), o problema de roteirização de veículos é a escolha de rotas a serem percorridas pelos veículos de modo que estes atendam a cada ponto exatamente uma vez, e que a demanda em cada viagem não exceda a capacidade máxima do veículo ao menor custo total possível. Para Hall e Partyka (1997), as propostas de cálculos heurísticos carecem de robustez, ou seja, não conseguem obter os melhores resultados para problemas com características condicionantes ou restrições diferentes daquelas nas quais o modelo foi desenvolvido.

Entre os principais modelos propostos pela literatura, destaca-se o algoritmo de Clarke e Wright (1964) que resolve problemas de roteirização de veículos por meio de um algoritmo que define as rotas com base no maior ganho de distância. Esse modelo é capaz de fornecer resultados muito eficientes. Segundo Ballou (2006), suas soluções são em média dois por cento mais caras que o nível ótimo. Para Hensher e Button (2008), os modelos aplicados ao transporte, que surgiram entre os anos 50 e 60, tinham como objetivo solucionar problemas essencialmente práticos, onde o foco era apenas a melhoria do desempenho de sistemas. No entanto, atualmente o estudo de modelagem em transportes busca formular modelos e algoritmos que considerem a influência do comportamento dos fatores econômicos, entre eles os custos e a relação entre oferta e demanda.

Vários autores propuseram algoritmos com o intuito de melhorar o desempenho de sistemas de entrega de mercadorias, entre eles destacam-se Dhor e Levy (1986), que a partir de um problema de roteirização de veículos (VRP) apresentaram três heurísticas de melhoria capazes de examinar e operar todas as rotas simultaneamente por meio do conceito de troca de nós.

Já Larson (1988) propôs um método baseado na heurística de Clarke e Wright (1964), que considera rotas fixas para a coleta de resíduos das estações de tratamento de esgoto, onde as demandas seguem uma distribuição normal, porém tratadas como determinísticas, o resultado final é uma frequência de visitas muito maior do que a necessária para alguns clientes. Em paralelo, Benjamim (1989) apresentou uma heurística para a resolução de problemas não lineares partindo do problema de transporte e determinação do lote econômico de pedido, tal resolução apresentou-se viável apenas para instâncias de menor porte.

Uma das propostas heurísticas mais notórias é a dos autores Chien *et al.* (1989), que trata de um modelo de programação inteira mista que aloca a distribuição de estoques da fábrica para os clientes, agrupa os clientes em rotas e roteiriza. O problema de multi-período é decomposto em séries de subproblemas de um único período, usando função objetivo de um único período. Em paralelo, Speranza e Ukovick (1994) estudaram a distribuição de múltiplos produtos por meio de programação linear inteira ou mista.

Mais recentemente, Campbell e Savelsbergh (2004) detalharam o problema em duas etapas. A primeira consiste em determinar as quantidades a ser entregues aos clientes, os dias de atendimento e a designação dos resultados obtidos por meio de programação inteira mista. A segunda determina a programação efetiva das rotas a partir dos resultados obtidos na primeira fase. Ao final gera-se uma roteirização diária que posteriormente subsidiará uma roteirização semanal.

A literatura mostra vários estudos que buscam encontrar soluções para o problema de roteirização levando em conta fatores econômicos que impactam no desempenho dos sistemas de distribuição. Portanto, o objetivo deste artigo é aplicar a lógica do programa de gestão da qualidade “Seis Sigma” para observar os erros do algoritmo de Clarke e Wright (1964) e, assim, propor um algoritmo capaz de obter melhores resultados dentro de uma simulação que visa refletir uma situação de aumento da demanda de maneira aleatória frente à capacidade de entrega estática. As características das simulações foram especificadas com o intuito de melhor compreender a influência da relação existente entre a capacidade e a demanda nos resultados de Clarke e Wright (1964).

## 2. Algoritmo de roteirização de Clarke e Wright (1964)

Segundo Ballou (2006), o método Clarke-Wright há anos é considerado um modelo capaz de resolver problemas de decisões de rotas em diversas situações restritivas com soluções rápidas e práticas, a sua lógica é aplicada em diversos estudos na área de transportes e logística empresarial. Autores como: Jhonson e Mcgech (1995); Battarra, Golden e Vigo (2008) trabalharam na análise da lógica de cálculo e aplicação do modelo em soluções de distribuição. Além disso, Cunha, Bonasser e Abrahão (2002) analisaram aspectos específicos da implementação computacional de heurísticas de melhorias que influenciam a qualidade dos resultados obtidos nos tempos de processamento.

O modelo algoritmo por Clarke e Wright (1964) inicia a análise considerando que a adoção da pior solução possível é aquela na qual cada ponto é atendido de forma individual dentro de uma rota. O percurso total ( $L$ ) é dado por:

$$L = 2 \sum_i^n D_{d,i} \quad (1)$$

no qual:  $D_{d,i}$  é a distância entre o depósito e o cliente  $i$ .

Porém, há a possibilidade de realizar entregas em dois ou mais pontos em uma mesma rota. Com isso, há uma redução na quilometragem percorrida e isso gera ganhos de eficiência. O cálculo é dado por:

$$S_{i,j} = L_a - L_b = 2 \cdot d_{D,i} + 2 \cdot d_{D,j} - [d_{D,i} + d_{I,j} + d_{D,j}] = d_{D,i} + d_{D,j} - d_{i,j} \quad (2)$$

Clarke e Wright (1964) realizam o cálculo de ganhos de distância e montam uma sequência de combinações possíveis, estas devem ser agrupadas em fila a começar pelos pares de maior redução de distância  $S_{i,j}$ . A distância e o tempo de percurso são calculados para cada opção de rota e comparados com as restrições. As rotas vão sendo escolhidas a medida que atendem as restrições. Para Ballou (2006), deve ser levado em conta o maior valor de economia identificada para a inclusão de um novo roteiro, caso a restrição de tempo e capacidade do veículo não forem satisfeitas, então a combinação com o próximo valor de economia passa a ser considerada.

### 3. Bases teóricas do algoritmo proposto

A proposta de algoritmo que será elaborada por o uso da metodologia de gestão da qualidade “Seis Sigma”.

A lógica do “Seis Sigma” consiste em analisar os resultados de um processo, identificar aspectos que necessitam de ajustes, propor ajustes parciais ou totais e por fim, medir e comparar os resultados de ambos os processos com o uso de técnicas estatísticas. Por adotar métodos ou processos de melhorias para obter o melhor desempenho de qualquer sistema, na prática as principais medidas visam reduzir tanto o número de erros no processo quanto à variabilidade dos resultados.

Para Montgomery (2004), o objetivo do “Seis Sigma” em termos estatísticos é reduzir a variabilidade dos resultados e do nível de erros. O efeito positivo de tais mudanças tem respaldo teórico. Segundo diversos autores (Antony; Bañuelas, 2002; Folaron, 2000; Hahn *et al.*, 2000; Liderman *et al.*, 2003; Pfeifer *et al.*, 2004; Wessel; Burgher, 2004), a metodologia “Seis Sigma” consegue proporcionar o aumento da competitividade das empresas e a redução dos custos de produção por meio da redução do número de itens defeituosos, diminuição dos tempos de processos e melhoria daqueles já existentes.

Para Wheeler (2002), as métricas utilizadas no “Seis Sigma” observam os defeitos mais eficientemente do que as usadas nos clássicos programas de qualidade, tais métricas, segundo Wheeler (2002) e Lucas (2002), são apresentadas a seguir:

a) Defeitos por unidade (dpu): é uma medida que reflete o número médio de defeitos de todos os tipos sobre o número total de unidades produzidas. O dpu pode ser calculado conforme equação (3).

$$dpu = (n \text{ defeitos}) / (n \text{ unidades}) \quad (3)$$

b) Defeitos por oportunidade (dpo): no dpo é expressa a proporção de defeitos levando em consideração o número total de oportunidades, durante o processo, para a ocorrência de defeitos, sendo este calculado pela equação (4).

$$Dpo = (n \text{ defeitos}) / (n \text{ de unidades} * n \text{ de oportunidades}) = (dpu) / (n \text{ de oportunidades}) \quad (4)$$

c) Defeitos por milhão de oportunidades (dpmo): o dpmo indica o número provável de defeitos que podem ocorrer em um milhão de oportunidades possíveis para a ocorrência de defeitos (Equação 5).

$$Dpmo = dpo * 10^6 \quad (5)$$

As variáveis do problema são :

N unidades = número total de rotas obtidas.

N de oportunidades = número total de rotas obtidas.

Defeitos = número total de rotas de entrega única.

Marash (2000) explica que o nível “Seis Sigma” é o melhor desempenho a ser obtido, onde o número de defeitos por milhão de oportunidades é igual 3,4. Isso corresponde a um percentual livre de erros equivalente a 99,999966 %. Quanto maior o nível de sigma, melhor será a qualidade do sistema. A tabela G mostra os níveis de sigma e suas respectivas quantidades de defeitos por milhão.

| Nível Sigma | Defeitos por milhão de oportunidades (Dpmo) |
|-------------|---|
| 1           | 691.462                                     |
| 2           | 308.537                                     |
| 3           | 66.807                                      |
| 4           | 6.210                                       |
| 5           | 233   |
| 6           | 3,4   |

Tabela 1- Tabela de níveis sigma em função do número de defeitos por milhão (dpmo)

Fonte- Lucier e Sechadri (2001)

De modo complementar à análise dos resultados, Breyfogle III (1999) propõe o cálculo *First Throughput Yield* (FTY), que mede o rendimento pontual do processo indicando a probabilidade de se obter zero defeito em cada etapa específica, pela equação (6).

$$FTY = P(X = 0) = e^{-DPU} \quad (6)$$

Em complemento a este cálculo, Werkema (2002) e Pande *et al.* (2002) propõem o Rolled Throughput Yield (RTY), que representa a probabilidade de um único produto passar por vários processos e sair com zero defeitos.

$$RTY = 1 - [(unidades refugadas + unidades trabalhadas)/(unidades de entrada)] \quad (7)$$

Segundo Werkema (2002), o RTY também pode ser obtido pela multiplicação do FTY de cada etapa do processo.

$$RTY = FTY_1 \times FTY_2 \times \dots \times FTY_n \quad (8)$$

Lobos (1991) afirma que a disposição “zero erro” não se trata de uma utopia e sim de uma forma de raciocínio capaz de proporcionar ganhos de produtividade. Em todo processo há a combinação de componentes defeituosos e não defeituosos esse fato ao longo de vários processos pode levar a um número significativo de resultados capazes de comprometer os resultados finais.

Breyfogle III (1999) expõe a equação (9) para calcular o rendimento final dos processos.

$$Y_{final} = 1 - DPU \quad (9)$$

Harry (1998) afirma que um alto valor de desvio padrão corresponde a uma baixa probabilidade de obter defeitos no processo, por isso será calculado o desvio padrão dos resultados do tempo total de percurso, da quilometragem percorrida e do número de rotas distintas, por meio da equação abaixo. :

$$S = \sqrt{\sum ((X_i - (\sum X / n))^2) / (n-1)} \quad (10)$$

A exposição e a comparação dos resultados serão feitas com o auxílio do Diagrama de Pareto e gráficos de Distribuição Normal.

#### 4. Metodologia

O trabalho consiste em um estudo de caso com dados fictícios onde serão realizadas 11 simulações com o algoritmo Clarke e Wright (1964) e com o algoritmo proposto para comparar os resultados. Será aplicada a metodologia e as principais ferramentas estatísticas do “Seis Sigma”. As etapas serão : a) analisar os resultados das simulações com o algoritmo de Clarke e Wright (1964); b) identificar aspectos que necessitem de ajustes na lógica do cálculo; c) propor um algoritmo e realizar as simulações mediante os mesmos dados e parâmetros restritivos; e d) comparar os resultados de ambos os processos com o uso das principais técnicas estatísticas do “Seis Sigma”.

#### 5. Estudo de caso e simulações com o algoritmo de Clarke e Wright (1964)

Será realizado um estudo de caso referente à empresa transportadora de cargas fictícia “Mega Transportes”, situada na cidade de Brasília-DF. A empresa está no início das operações atualmente e conta apenas com um caminhão com capacidade de transportar até 4 toneladas. A situação financeira da empresa encontra-se fragilizada, devido ao investimento inicial em estrutura, publicidade e capital de giro necessário para arcar com as obrigações de curto prazo.

O investimento em publicidade vem gerando bons resultados e a demanda por parte dos atuais clientes vem aumentando constantemente. Em média há o aumento de 0,5 toneladas de cargas a cada nova demanda de entrega. O gerente da empresa pretende adotar um sistema de roteirização e está buscando alguma lógica de cálculo capaz de alcançar os melhores resultados possíveis para a atual situação em que a empresa se encontra.

Visando elaborar uma lógica de cálculo que atenda às necessidades atuais da empresa Mega Transportes, serão realizadas 11 simulações por meio da lógica do modelo de roteirização de Clarke e Wright (1964), onde cada simulação terá um acréscimo de 0,5 toneladas.

Os dados que compõem o problema de decisão de rotas utilizados nas simulações tomam por base: a) as demandas de entrega; b) o tempo de descarga; e c) os pontos de entrega fictícios referentes à cidade de Brasília-DF (Tabela 2).

| Pontos de Entrega         | Localização                                       | Toneladas /semana | Tempo de Descarga |
|---------------------------|---|-------------------|-------------------|
| 1                         | CLN 112   | 3,5               | 40                |
| 2                         | CLN 315   | 1,5               | 60                |
| 3                         | CLN 413   | 0,2               | 90                |
| 4                         | W3 NORTE 707                                      | 0,7               | 20                |
| 5                         | W3 NORTE 713                                      | 2,5               | 50                |
| 6                         | CLS 102   | 2,8               | 50                |
| 7                         | CLS 302   | 1,8               | 30                |
| 8                         | CLS 405   | 2                 | 90                |
| 9                         | CLS 203   | 1,3               | 60                |
| 10                        | CLS 209   | 1,2               | 60                |
| DEMANDA TOTAL             |   | 17,5              | 550               |
| CAPACIDADE                |   | 4 toneladas       |                   |
| TEMPO PARA ENTREGA NO DIA |   | 12 horas          |                   |
| VELOCIDADE MÉDIA          |   | 40 km/h           |                   |
| Ponto de partida          | Depósito - SETOR INDÚSTRIA - FEIRA DOS IMPORTADOS |                   |                   |

Tabela 2 - Dados do problema

Foram levantados os valores reais das distâncias entre os pontos de entrega com o auxílio do software *Google Maps*, conforme a Figura 1 e a Tabela 3.



Figura 1- Mapa dos pontos de entrega em relação ao depósito. Fonte: Google Maps

|    | 1     | 2   | 0   | 4     | 5    | 6    | 7   | 8    | 9   | 10   |
|----|-------|-----|-----|-------|------|------|-----|------|-----|------|
| 0  | 26,67 | 40  | 60  | 13,33 | 33,3 | 33,3 | 20  | 60   | 40  | 40   |
| 1  | X     | 1,9 | 2,1 | 6,5   | 6,5  | 6,3  | 6,9 | 8,8  | 7,4 | 9,5  |
| 2  |       | X   | 1,8 | 6,8   | 6,8  | 7,6  | 7,2 | 10,2 | 8,7 | 11,4 |
| 3  |       |     | X   | 8,2   | 8,2  | 8,1  | 8,6 | 8,7  | 8,6 | 10,9 |
| 4  |       |     |     | X     | 0,3  | 4,2  | 3,9 | 7    | 5,3 | 7,5  |
| 5  |       |     |     |       | X    | 6,2  | 5,9 | 9,1  | 7,3 | 9,5  |
| 6  |       |     |     |       |      | X    | 0,9 | 2,3  | 1,5 | 3,4  |
| 7  |       |     |     |       |      |      | X   | 2,6  | 1,8 | 3,8  |
| 8  |       |     |     |       |      |      |     | X    | 1,7 | 2,5  |
| 9  |       |     |     |       |      |      |     |      | X   | 2,8  |
| 10 |       |     |     |       |      |      |     |      |     | X    |

Tabela 3 - Matriz de distâncias

Após o levantamento das distâncias, foram calculados os ganhos de distância entre os pontos com base na literatura de Clarke e Wright (1964) (Equação 11)

$$S_{i,j} = S_{d,i} + S_{d,j} - S_{i,j} \quad (11)$$

A Tabela 4 mostra a sequência de combinações que geram os maiores de ganhos de distância.

|      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| S38  | 1°  | S13  | 11° | S25  | 21° | S110 | 31° | S410 | 41° |
| S89  | 2°  | S58  | 12° | S48  | 22° | S710 | 32° | S46  | 42° |
| S23  | 3°  | S18  | 13° | S59  | 23° | S16  | 33° | S17  | 43° |
| S810 | 4°  | S78  | 14° | S26  | 24° | S15  | 34° | S14  | 44° |
| S39  | 5°  | S910 | 15° | S34  | 25° | S27  | 35° | S47  | 45° |
| S68  | 6°  | S69  | 16° | S12  | 26° | S67  | 36° |      |     |
| S28  | 7°  | S37  | 17° | S510 | 27° | S49  | 37° |      |     |
| S310 | 8°  | S29  | 18° | S56  | 28° | S57  | 38° |      |     |
| S36  | 9°  | S610 | 19° | S19  | 29° | S24  | 39° |      |     |
| S35  | 10° | S210 | 20° | S79  | 30° | S45  | 40° |      |     |

Tabela 4 - Hierarquia de ganhos de distâncias

Os resultados de tempo total de percurso e distância total percorrida estão expostos na Tabela 5. Cada sistema corresponde ao atendimento de todos os pontos de demanda. Cada um foi calculado mediante ao aumento de 0,5 toneladas em algum ponto de entrega de forma aleatória, de modo que todos os pontos obtivessem pelo menos um aumento ao longo das 11 simulações. É possível verificar que cada sistema de entrega tem um padrão que o caracteriza: o Sistema 1 tem uma rota N3, três rotas N2 e uma rota N1, diferentemente do padrão observado no Sistema 2, que é composto por duas rotas N3, zero rotas N2 e quatro rotas N1.

| CLARK E WRIGHT        | N 3 | N 2 | N 1 | Tempo ( h ) | Distância ( Km) |
|-----------------------|-----|-----|-----|-------------|-----------------|
| SISTEMA 1 (18,0 ton)  | 1   | 3   | 1   | 18,11       | 357,83          |
| SISTEMA 2 (18,5 ton)  | 2   | 0   | 4   | 19,95       | 426,37          |
| SISTEMA 3 (19,0 ton)  | 1   | 2   | 3   | 19,17       | 399,97          |
| SISTEMA 4 (19,5 ton)  | 1   | 2   | 3   | 19,17       | 399,97          |
| SISTEMA 5 (20,0 ton)  | 1   | 2   | 3   | 20,62       | 458,13          |
| SISTEMA 6 (20,5 ton)  | 0   | 4   | 2   | 20,39       | 442,47          |
| SISTEMA 7 (21,0 ton)  | 0   | 4   | 2   | 20,39       | 442,47          |
| SISTEMA 8 (21,5 ton)  | 0   | 3   | 4   | 22,05       | 509,00          |
| SISTEMA 9 (22,0 ton)  | 0   | 3   | 4   | 22,05       | 509,00          |
| SISTEMA 10 (22,5 ton) | 0   | 3   | 4   | 22,05       | 509,00          |
| SISTEMA 11 (23,0 ton) | 0   | 3   | 4   | 22,38       | 528,50          |

Tabela 5- Resultado das simulações

em que: N3 = número de rotas com ligação entre 3 pontos.

N2 = número de rotas com ligação entre 2 pontos.

N1 = Número de rotas de entrega única.

Os resultados da simulação mostram que há uma relação direta entre a quantidade de rotas de entrega única e os resultados de tempo e distância. Pode-se ilustrar da seguinte maneira: o Sistema 1 obteve uma rota de entrega única e obteve melhores resultados do que o Sistema 6, que obteve 2 rotas de entrega única na composição do seu padrão. Quanto mais rotas de entrega única, menor será a redução de distância e de tempo. Portanto, pode-se afirmar que as rotas de entrega única são erros de decisão e impactam negativamente no desempenho de qualquer sistema de entregas de mercadorias.

### 6.1. Aspectos relevantes

Os resultados das simulações mostram que o algoritmo de Clarke e Wright (1964) é altamente sensível ao aumento da demanda, uma vez que a composição de suas rotas necessitou de maior frequência de ajustes. A primeira etapa de cálculo do algoritmo mostra que a hierarquia de ganhos é utilizada para decidir todas as combinações entre dois pontos possíveis, esta é calculada com base na redução de distância sem a influência das variáveis: capacidade de oferta de serviços, demanda de entrega dos produtos e tempo máximo aceitável. Na segunda etapa é preciso verificar se a primeira combinação proposta pela hierarquia de ganhos de distância obedece às restrições de capacidade e de tempo. Por último é necessário verificar se há a possibilidade de incluir um ou mais pontos de entrega na mesma rota sem exceder as restrições.

Há duas questões a serem ressaltadas ao realizar uma análise crítica das etapas de cálculo do algoritmo de Clarke e Wright (1964). A primeira refere-se à hierarquia de ganhos de distância. Se forem mantidos os mesmos pontos de entrega de mercadorias, provavelmente será obtida a mesma “hierarquia de ganhos de distância”, isso se dá porque a distância entre o depósito e cada ponto de entrega dificilmente muda.

A segunda questão refere-se às variáveis: capacidade de oferta de serviços e demanda por produtos. Estas estão em constante mudança devido a vários fatores mercadológicos, no entanto, são utilizadas apenas como caráter classificatório ou eliminatório para decidir a composição de cada rota.

Níveis restritivos maiores levaram o algoritmo de Clarke Wright (1964) a adotar mais rotas de entrega única, esse fato reduz a sua capacidade de reduzir as distâncias percorridas. Logo, infere-se que a elasticidade da capacidade de oferta de serviços e da demanda é um fator que também influencia as composições das rotas.

### 7. Proposta de algoritmo e aplicação

Visando sanar as inconsistências observadas nos resultados das simulações com o algoritmo de Clarke e Wright (1964), propõe-se um novo algoritmo que cumpra dois objetivos. O

primeiro é obter um menor número de rotas de entrega única, visando a menor distância total percorrida e o menor tempo total de percurso.

O segundo objetivo é estabelecer a composição das possíveis ligações entre dois pontos com a influência das variáveis: demanda, capacidade de oferta de serviços, tempo e ganho de distância.

a) Para cumprir o primeiro objetivo será adotada uma forma de evitar possíveis rotas de entrega única. Para isso, deve-se buscar possíveis ligações para os pontos com maior demanda de entrega, da seguinte forma: Hierarquizar os pontos de entrega levando em conta os seus respectivos valores de demanda em toneladas (t).

A sequência deverá ser ordenada de modo decrescente - o resultado deve ser uma “hierarquia de pontos com maior demanda”: Ponto 1 – 3,5 t; Ponto 6 – 2,8 t; Ponto 5 – 2,5 t; Ponto 8 – 2,0 t; Ponto 7 – 1,8 t; Ponto 2 – 1,5 t; Ponto 9 – 1,3 t; Ponto 10 – 1,2 t; Ponto 4 – 0,7 t; Ponto 3 – 0,2 t. Serão elencadas ligações para cada ponto de entrega obedecendo à sequência estabelecida.

Já para atender ao segundo objetivo, deve-se:

b) Elencar todas as combinações possíveis para o primeiro ponto da “hierarquia de pontos com maior demanda” obedecendo às restrições de capacidade (Tabela 6).

| Localização 1 | Localização 2 | Possíveis Combinações | Demanda Total                             |
|---------------|---------------|-----------------------|---|
| 1º Ponto      | Ponto x       | 1º Ponto + Ponto x    | $\Sigma$ Demanda $\leq$ Capacidade máxima |
|               | Ponto y       | 1º Ponto + Ponto y    | $\Sigma$ Demanda $\leq$ Capacidade máxima |
|               | Ponto z       | 1º Ponto + Ponto z    | $\Sigma$ Demanda $\leq$ Capacidade máxima |

Tabela 6- Combinações possíveis

As possíveis combinações que extrapolarem a capacidade máxima serão desconsideradas, restando somente aquelas que obtiverem a soma das demandas menor ou igual à capacidade máxima.

c) Calcular a distância total a ser percorrida e o tempo total de percurso de cada combinação possível (Equação 12). As combinações que não atenderem às restrições de tempo serão desconsideradas:

$$T(i, j) = [(D_{oi} + D_{ij} + D_{jo}) / \text{Velocidade média}] + \text{Tempo de parada} \quad (12)$$

em que: o tempo de percurso  $T(i, j)$  deve ser menor ou igual ao tempo aceitável (TA), ou seja:  $T(i, j) \leq TA$ .

Caso haja duas ou mais combinações possíveis após a verificação do atendimento a todas as restrições, será escolhida a combinação que apresentar o maior ganho distância para compor a rota. Para realizar uma distribuição menos dispersa de pontos entre as rotas, excluir-se-à a possibilidade de inserir um ou mais pontos adicionais em uma mesma rota, ou seja, o máximo de pontos de entrega a serem atendidos em uma mesma rota será dois.

A aplicação do algoritmo é ilustrada abaixo (Tabela 7). Foram utilizados os mesmos dados e parâmetros restritivos do estudo de caso calculado pelo algoritmo de Clarke e Wright (1964), anteriormente apresentado.

Sendo assim, a primeira combinação pode ser explicada pela seguinte representação matricial: A13 pode combinar com A33; A14 pode combinar com A34; A15 pode combinar com A35, A36 e A37; A16 pode combinar com A38, A39 e A310; A17 pode combinar com A311. Desse modo, é realizada a composição de cada rota, onde as faixas horizontais de cor cinza simbolizam as combinações escolhidas pelo modelo.



| COMBINAÇÕES   |                  |               |                  |                        |            |  |                |
|---------------|------------------|---------------|------------------|------------------------|------------|--|----------------|
| Localização 1 | Demanda (ton.) 2 | Localização 2 | Demanda (ton.) 2 | Soma da Demanda (ton.) | Combinação | Posição na Hierarquia de Ganhos de Distância | Rota Escolhida |
| Ponto 1       | 3,5              | Ponto 3       | 0,2              | 3,7 < 4,0              | S13        | 13 <sup>º</sup>                              | X              |
| Ponto 6       | 2,8              | Ponto 4       | 0,7              | 3,5 < 4,0              | S46        | 42 <sup>º</sup>                              | X              |
| Ponto 5       | 2,5              | Ponto 2       | 1,5              | 4,0 = 4,0              | S25        | 21 <sup>º</sup>                              | X              |
|               |                  | Ponto 9       | 1,3              | 3,8 < 4,0              | S59        | 23 <sup>º</sup>                              |                |
|               |                  | Ponto 10      | 1,2              | 3,7 < 4,0              | S510       | 27 <sup>º</sup>                              |                |
| Ponto 8       | 2,0              | Ponto 7       | 1,8              | 3,8 < 4,0              | S78        | 14 <sup>º</sup>                              |                |
|               |                  | Ponto 9       | 1,3              | 3,3 < 4,0              | S89        | 2 <sup>º</sup>                               | X              |
|               |                  | Ponto 10      | 1,2              | 3,2 < 4,0              | S810       | 4 <sup>º</sup>                               |                |
| Ponto 7       | 1,8              | Ponto 10      | 1,2              | 3,0 < 4,0              | S710       | 32 <sup>º</sup>                              | X              |

Tabela 7- Combinações possíveis entre dois pontos de entrega

O resultado final desta simulação resultou no sistema composto pelas seguintes rotas de entrega: S13; S46; S25; S89 e S710.

## 8. Comparação entre os dois algoritmos

Para fins de comparação, foi realizada a mesma quantidade de simulações para os dois algoritmos (o proposto e o de Clarke-Wright), mediante os mesmos dados e restrições do problema. Os resultados estão detalhados na Tabela 8.

| CLARK E WRIGHT        | N 3 | N 2 | N 1 | Tempo ( h) | Distância ( Km) | Algoritmo Proposto    | N 3 | N 2 | N 1 | Tempo ( h) | Distância ( Km) |
|-----------------------|-----|-----|-----|------------|-----------------|-----------------------|-----|-----|-----|------------|-----------------|
| SISTEMA 1 (18,0 ton)  | 1   | 3   | 1   | 18,11      | 357,83          | SISTEMA 1 (18,0 ton)  | 0   | 5   | 0   | 18,77      | 385,26          |
| SISTEMA 2 (18,5 ton)  | 2   | 0   | 4   | 19,95      | 426,37          | SISTEMA 2 (18,5 ton)  | 0   | 5   | 0   | 18,77      | 385,26          |
| SISTEMA 3 (19,0 ton)  | 1   | 2   | 3   | 19,17      | 399,97          | SISTEMA 3 (19,0 ton)  | 0   | 5   | 0   | 18,77      | 385,26          |
| SISTEMA 4 (19,5 ton)  | 1   | 2   | 3   | 19,17      | 399,97          | SISTEMA 4 (19,5 ton)  | 0   | 5   | 0   | 18,77      | 385,26          |
| SISTEMA 5 (20,0 ton)  | 1   | 2   | 3   | 20,62      | 458,13          | SISTEMA 5 (20,0 ton)  | 0   | 4   | 2   | 19,81      | 427,06          |
| SISTEMA 6 (20,5 ton)  | 0   | 4   | 2   | 20,39      | 442,47          | SISTEMA 6 (20,5 ton)  | 0   | 4   | 2   | 19,81      | 427,06          |
| SISTEMA 7 (21,0 ton)  | 0   | 4   | 2   | 20,39      | 442,47          | SISTEMA 7 (21,0 ton)  | 0   | 4   | 2   | 19,81      | 427,06          |
| SISTEMA 8 (21,5 ton)  | 0   | 3   | 4   | 22,05      | 509,00          | SISTEMA 8 (21,5 ton)  | 0   | 4   | 2   | 20,43      | 451,76          |
| SISTEMA 9 (22,0 ton)  | 0   | 3   | 4   | 22,05      | 509,00          | SISTEMA 9 (22,0 ton)  | 0   | 3   | 4   | 22,09      | 518,09          |
| SISTEMA 10 (22,5 ton) | 0   | 3   | 4   | 22,05      | 509,00          | SISTEMA 10 (22,5 ton) | 0   | 3   | 4   | 22,68      | 541,46          |
| SISTEMA 11 (23,0 ton) | 0   | 3   | 4   | 22,38      | 528,50          | SISTEMA 11 (23,0 ton) | 0   | 3   | 4   | 19,16      | 447,36          |

Tabela 8- Comparação dos resultados

em que: N3 = número de rotas com ligação entre 3 pontos.

N2 = número de rotas com ligação entre 2 pontos.

N1 = número de rotas de entrega única.

Cinza escuro = Valor numérico maior.

Cinza claro = Valor numérico menor.

Os resultados mostram que o algoritmo proposto foi mais eficiente do que Clarke e Wright (1964) em termos de tempo e distância percorrida, em 8 das 11 simulações realizadas. Um fator relevante para a obtenção de tais resultados foi a redução do número de rotas de entrega única. Porém, o algoritmo foi menos eficiente nos sistemas 1, 9 e 10.

O resultado do Sistema 1 pode ser justificado pela eficiência na redução de distância obtida pelo algoritmo de Clarke e Wright (1964) ao criar uma rota de entrega de 3 pontos. Esta foi capaz de ser mais eficiente em termos de tempo e distância, apesar de ter apresentado uma rota de entrega única.

Já nos sistemas 9 e 10 houve o mesmo padrão ( 3 rotas N2 e 4 rotas N1) para ambos os algoritmos. O algoritmo de Clarke e Wright (1964) obteve o melhor desempenho, isso se deu porque o número de rotas N1 é igual para ambos e a lógica de Clarke e Wright (1964) que visa compor as combinações levando em conta os ganhos de distância apresentou mais eficiência. A Figura 2 ilustra a quantidade total de rotas de entrega única obtida nas simulações.

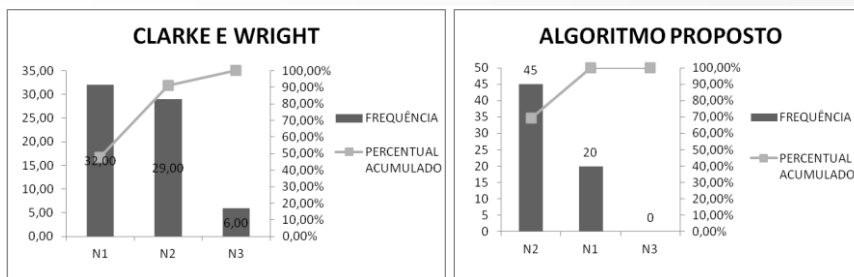


Figura 2- Comparação dos gráficos de Pareto

O algoritmo proposto apresentou 12 rotas de entregas únicas (N1) a menos do que o algoritmo de Clarke e Wright (1964), isso se deu porque a lógica do cálculo tem por objetivo evitar rotas de entrega única ao invés de maximizar cada rota. Na prática dois fatores contribuem para isso: (a) buscar um ponto de ligação para os pontos com maior demanda e (b) distribuir a quantidade de pontos por rota de maneira mais uniforme, para isso, o máximo de pontos por rota é dois.

A quantidade de erros impacta diretamente na variabilidade. Diversos autores ressaltam a importância de analisar esse aspecto. Dellareti Filho e Drumond (1994) ressaltam a utilização das curvas de distribuição normal para análise da variabilidade. Para os autores, essa ferramenta é adequada para descrever características de qualidade, cuja variação é o resultado da soma dos erros decorrentes do processo. É obtida por meio dos parâmetros: a) centro da curva (média); e b) dispersão da distribuição (desvio padrão). Lourenço Filho (1976) afirma que a distribuição normal indica que um processo está sob controle, não contendo nenhum ponto fora dos limites estabelecidos. Caso a variabilidade se torne anormal, há indícios de que o processo se modificou e ficou fora de controle.

Os resultados de tempo de percurso e distância percorrida podem ser observados nos gráficos de distribuição de tempo e distância (Figura 3).

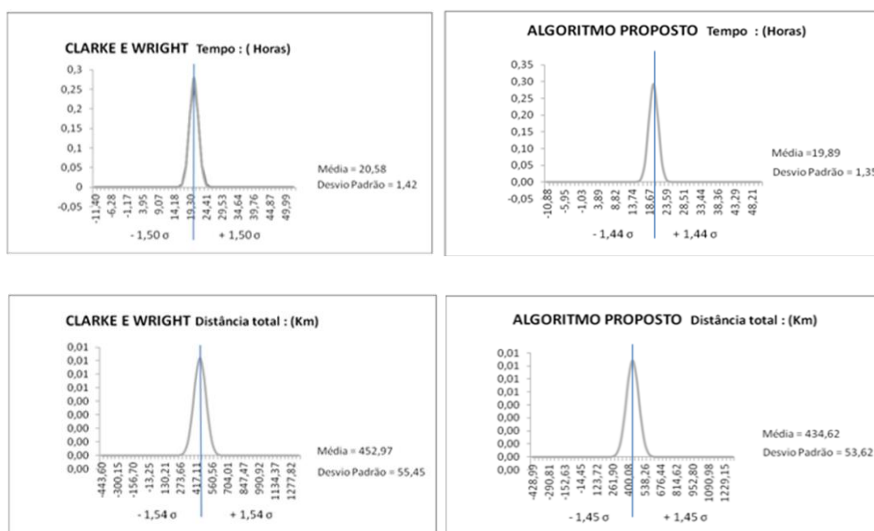


Figura 3- Comparação das distribuições dos resultados

Os resultados mostram que o algoritmo proposto apresentou dados menos dispersos, uma vez que conseguiu reduzir o desvio padrão dos valores de tempo e distância percorrida.

Segundo Davis, Aquilano e Chase (2001), o objetivo principal do controle estatístico de qualidade é manter um processo sob controle, com resultados que estejam dentro de limites toleráveis. Para verificar o nível sigma de ambos os processos foram calculados os índices: dpu (defeitos por unidade), dpo (defeitos por oportunidades), dpmo (defeitos por milhão de oportunidades), RTY (probabilidade de zero defeito em um processo de várias etapas, onde cada sistema consiste em uma etapa) e o rendimento do processo (Tabela 9).

| Clarke e Wright            |               | Algoritmo Proposto         |               |
|----------------------------|---------------|----------------------------|---------------|
| N unidades                 | 67,00         | N unidades                 | 65            |
| N defeitos                 | 32,00         | N defeitos                 | 20,00         |
| N oportunidades            | 67,00         | N oportunidades            | 65            |
| DPU                        | 0,48          | DPU                        | 0,31          |
| DPO                        | 0,00713       | DPO                        | 0,00473       |
| DPMO                       | 7.128,54      | DPMO                       | 4.733,73      |
| RTY                        | 0,68%         | RTY                        | 4,75%         |
| Rendimento do processo (%) | 52,24%        | Rendimento do processo (%) | 69,23%        |
| Valor Sigma                | 3,98 $\sigma$ | Valor Sigma                | 4,25 $\sigma$ |

Tabela 9- Mapeamento e comparação dos resultados

Os dados mostram que o algoritmo proposto apresenta tanto menores taxas de defeitos por unidades e de defeitos por oportunidades, quanto maior rendimento no processo (16,99 % superior). O índice RTY demonstra que a probabilidade desse algoritmo obter zero erro (rotas de entrega única) é de 4,75 %. Contudo o RTY do algoritmo de Clarke e Wright (1964) é de 0,68 %.

Para medir o nível sigma de cada processo foi utilizada a escala proposta por Lucier e Sechadri (2001), que realiza a classificação por meio do valor de dpmo (defeitos por milhão de oportunidades). O algoritmo proposto obteve o nível 4,25  $\sigma$  e o algoritmo de Clarke e Wright (1964) é classificado como nível 3,98  $\sigma$ . Isso significa que a proposta apresentada obteve resultados de maior nível de qualidade.

## 9. Considerações finais

Foi possível observar que a relação entre a capacidade de oferta de serviços e a demanda é um fator que exerce bastante influência nos resultados do algoritmo de Clarke e Wright (1964). Por meio das simulações, observou-se que cada rota de entrega única adicional reduziu a capacidade de otimização do sistema.

Diante disso, pode-se afirmar que em determinadas problemáticas, evitar as rotas de entrega única é tão importante quanto tomar as decisões que proporcionem os maiores ganhos de distância, isso se dá porque a ineficiência das rotas de entrega única pode anular a eficiência das decisões tomadas pela “hierarquia de ganhos de distância”.

As comparações mostram que o algoritmo proposto apresenta melhores resultados as simulações referentes às demandas totais de 18,5, 19,0, 19,5, 20,0, 20,5, 21,0, 21,5 e 23,0 toneladas, em que o nível de qualidade “Sigma” é mais elevado o obtido por meio do algoritmo de Clarke e Wright (1964). Isso demonstra que o algoritmo tem funcionalidade e pode ser utilizado para fins comparativos.

No entanto, não há evidências suficientes para refutar a aplicabilidade do algoritmo de Clarke e Wright (1964), uma vez que este encontrou a melhor decisão para os sistemas de entrega com demandas totais de 18,0, 22,0 e 22,5 toneladas.

Portanto, conclui-se que o algoritmo proposto tem um nível de confiabilidade maior do que o algoritmo de Clarke e Wright (1964) para este contexto simulado. No entanto, cabe ressaltar que o algoritmo proposto não se trata de uma lógica substituta e sim, uma solução alternativa.

## Referências

- BALLOU, RONALD H.** Gerenciamento da cadeia de suprimentos/logística empresarial/ Ronald H. Ballou; traduzido Raul Rubenich – 5. Ed. – Porto Alegre : Bookman, 2006.
- BAÑUELAS, R.; ANTONY, J.** Critical success factors for the successful implementation of six sigma projects in organizations. *The TQM Magazine*, v. 14, n. 2, p. 92-99, 2002.
- BATARRA, M.; GOLDEN, B.; VIGO, D.** Tuning a parametric Clarke-Wright heuristic via a genetic algorithm. *Journal of the Operational Research Society*, 2008.
- BENJAMIN, J.** An Analysis of Inventory and Transportation Costs in a Constrained Network. *Transportation Science*, v. 23, n. 3, pp. 177-183.
- Campbell, A. M.; Savelsbergh, M. W. P.** (2004). A Decomposition Approach for the Inventory-Routing Problem. *Transportation Science*, v. 38, n. 4, pp. 488-502, 1989.
- CHIEN, T.W.; BALAKRISHNAN, A.; WONG, R.T.** An Integrated Inventory Allocation and Vehicle Routing Problem. *Transportation Science*, v. 23, n. 2, pp. 67-76, 1989.
- CLARKE, G. e WRIGHT, J. W.** *Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points*, Operations Research, vol. 12, n. 4, p. 568-581, 1964.
- CUNHA, CLÁUDIO B.; BONASSER, ULISSES O.; ABRAHÃO, FERNANDO T. M.** Experimentos Computacionais com Heurísticas de Melhorias para o Problema do Caixeiro Viajante. Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes-ANPET, Rio Grande do Norte, 2002.
- DAVIS, M. M.; AQUILANO N. J.; CHASE R. B.** *Fundamentos da administração da produção*. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- DELLARETI FILHO, O. D.; DRUMOND, F. B.** *Itens de controle e avaliação de processos*. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1994.
- DROR, M.; LEVY, L. A.** Vehicle Routing Improvement Algorithm Comparison of a “Greedy” and a Matching Implementation for Inventory Routing. *Computers and Operations Research*, v. 13, n. 1, pp. 33-45, 1986.
- FOLARON, J.** The Evolution of Six Sigma. *Six Sigma Forum Magazine*, v. 2, n. 4, p. 35-45, 2000.
- HAHN, G. J.; DOGONAKSOV, N.; HOERLI, R.** The evolution of six sigma. *Quality Engineering*, v. 2, n. 3, p. 317-326, 2000.
- HALL, R.W.; J.G. PARTYKA.** *On the road to efficiency*. OR/MS Today, p. 38-47, jun/97, 1997.
- HARRY, M.J.** Six sigma: A breakthrough strategy for profitability. *Quality Progress*, Milwaukee: v. 31, n. 5, p. 60-64, May 1998.
- HENSHER, DAVID. A.; BUTTON, KENNETH J.** *Handbook of Transport Modelling* Second Edition. Copyright 2008 Emerald Group Publishing Limited. UK, 2008.
- JOHNSON, DAVID S.; MCGEOCH, LYLE A.** *The Traveling Salesman Problem : A Case Study in Local Optimization*. Local Search in Combinatorial Optimization, 1995.
- LAPORTE, G.; M. GENDREAU; J.Y. POTVIN e F. SEMET.** *Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem*, International Transactions in Operations in Operational Research, v. 7, n. 4/ 5, p. 285-300, 2000.
- LARSON, R.C.** Transporting Sludge to the 106-Mile Site: An Inventory/Routing Model for Fleet Sizing and Logistics System Design. *Transportation Science*, v. 22, n. 3, pp. 186-198, 1988.
- LINDERMAN, K. et al.** Six Sigma: a goal-theoretic perspective. *Journal of Operations Management*, v. 3, n. 21, p. 193-203, 2003.
- LOBOS, J.** *Qualidade através das pessoas*. 9. ed. São Paulo: Instituto da Qualidade, 1991.
- LOURENÇO FILHO, R. C. B.** *Controle estatístico de qualidade*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1976.
- LUCAS, J. M.** The Essential Six Sigma. *Quality Progress*, Milwaukee: v. 35, n. 1, p. 27-31, Jan 2002.
- LUCIER, G.T.; SESHADRI, S.** Ge Takes Six Sigma Beyond the Bottom Line. *Strategic Finance*, Montvale: v. 82, n. 11, p. 40-46, May 2001.
- MARASH, S. A.** Six Sigma: Business Results Through Innovation. *Quality Congress. ASQ's 54<sup>th</sup> Annual Quality Congress Proceedings*, Milwaukee: p. 627-630, 2000.
- MONTGOMERY, D. C.** *Introdução ao controle estatístico da qualidade*. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 513p, 2004.
- PANDE, PETER S.; NEUMAN, ROBERT P.; CAVANAGH, ROLAND R.** *Estratégia Seis Sigma: como a GE, a Motorola e outras Grandes empresas estão aguçando seu desempenho*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 472p, 2002.
- PFEIFER, T.; REISSIGER, W.; CANALES, C.** Integrating six sigma with quality management systems. *The TQM Magazine*, v. 16, n. 4, p. 241-249, 2004.
- SPERANZA, M.G.; UKOVICH, W.** Minimizing Transportation and Inventory Costs for Several Products on a Single Link. *Operations Research*, v. 42, n. 5, pp. 879-894, 1994.
- WESSEL, G.; BURGUER, P.** Six Sigma for small and medium-sized enterprises. *The TQM Magazine*, v. 16, n. 4, p. 264-272, 2004.