



# Metaheurística Aplicada ao Problema de Roteamento Verde com Velocidades Variáveis no Tempo

Darci José Mendes Júnior

JUIZ DE FORA

JULHO, 2017

# Metaheurística Aplicada ao Problema de Roteamento Verde com Velocidades Variáveis no Tempo

DARCI JOSÉ MENDES JÚNIOR

Universidade Federal de Juiz de Fora  
Instituto de Ciências Exatas  
Departamento de Ciências da Computação  
Bacharelado em Ciência da Computação

Orientador: Prof<sup>a</sup> Luciana Brugiolo Gonçalves  
Co-orientador: Prof. Stênio Sã Rosário Furtado Soares

JUIZ DE FORA  
JULHO, 2017

# METAHEURÍSTICA APLICADA AO PROBLEMA DE ROTEAMENTO VERDE COM VELOCIDADES VARIÁVEIS NO TEMPO

Darci José Mendes Júnior

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, COMO PARTE INTEGRANTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO.

Aprovada por:

Prof<sup>a</sup> Luciana Brugiolo Gonçalves  
D.Sc. em Ciência da Computação

Prof. Victor Ströele de Andrade Menezes  
D.Sc. em Engenharia de Sistemas e Computação

Prof. Eduardo Barrére  
D.Sc. em Engenharia de Sistemas e Computação

JUIZ DE FORA  
4 DE JULHO, 2017

*Aos meus amigos e irmãos.*

*Aos pais, pelo apoio e sustento.*

## Resumo

A Logística tem como principal objetivo descrever o transporte, manuseio e armazenamento de produtos a fim de maximizar a rentabilidade e minimizar custos. Mas a preocupação com o impacto ambiental dessas atividades tem crescido nos últimos anos e tem preocupado tanto governos quanto empresas no mundo todo. Esta preocupação não está apenas relacionada à exploração do planeta e utilização dos recursos naturais, mas também à suas consequências para o meio ambiente e, principalmente, a saúde humana. Como consequência, a Logística Verde tem sido cada vez mais estudada e aplicada pelas empresas, como forma de atender as exigências e necessidade por um desenvolvimento mais sustentável. Além disso, muitos conceitos empregados em Logística tradicional estão sendo adaptados para a Logística Verde. Este trabalho avalia o impacto que a mudança do foco, de distância para emissão de gases poluentes, pode exercer sobre o Roteamento Verde de Veículos. Para tal, é apresentada uma abordagem baseada nas metaheurísticas Greedy Randomized Adaptative Search Procedure, Iterated Local Search e Random Variable Neighborhood Descent.

**Palavras-chave** Logística, Logística Verde, Roteamento de Veículos, Roteamento Verde de Veículos, Randomized Adaptative Search Procedure, Iterated Local Search, Random Variable Neighborhood Descent

## Abstract

The Logistic has as main objective describe the product transport, handing and storage to maximize the profitability and minimize cost. But the concern with environment impact from this ativities have grow in recent years and have concerned government and companies around the world. This concern is not only related with planet exploration and natural resources using but with its consequences to environment and, mainly, human health too. As result, the Green Logistic has been increasingly studied and applied by companies, as a form to comply with requirements and necessities for sustainable development. Moreover, many concepts in tradicional Logistic are being adapted to Green Logistic. This work evaluate the behavior that the change of focus, distance for polluting gases emissions, can excise on the Green Vehicle Routing. For this purpose, is presented a approach based on Greedy Randomized Adaptative Search Procedure, Iterated Local Search and Random Variable Neighborhood Descent metaheuristics.

**Keywords:** Logistics, Green Logistics, Vehicle Routing, Green Vehicle Routing, Randomized Adaptative Search Procedure, Iterated Local Search, Random Variable Neighborhood Descent

## **Agradecimentos**

Aos professores do Departamento de Ciência da Computação pelos seus ensinamentos, aos professores Luciana e Stênio pela orientação, aos funcionários do curso, que durante esses anos, contribuíram de algum modo para o nosso enriquecimento pessoal e profissional e à minha família pelo apoio e paciência.

*“Be water, my friend”.*

*Bruce Lee*



# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>7</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>8</b>
<b>Lista de Abreviações</b>	<b>9</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>10</b>
1.1 Justificativa . . . . .	11
1.2 Objetivos . . . . .	11
<b>2 PRVV-VVT</b>	<b>13</b>
2.1 Logística Verde . . . . .	13
2.2 Variações do Problema de Roteamento de Veículos Verde . . . . .	14
2.3 Problema de Roteamento Verde de Veículo com Velocidades Variáveis no Tempo . . . . .	16
2.4 Métodos exatos e aproximados . . . . .	18
<b>3 Abordagem Proposta</b>	<b>20</b>
3.1 Algoritmo construtivo . . . . .	20
3.2 Busca Local . . . . .	24
3.3 RVND . . . . .	26
3.4 GRASP . . . . .	27
3.5 ILS . . . . .	29
3.6 GRASP_ILS . . . . .	31
<b>4 Análise dos resultados</b>	<b>33</b>
4.1 Geração das Instâncias . . . . .	33
4.2 Comparação das abordagens . . . . .	34
4.3 Testes finais . . . . .	38
<b>5 Conclusão</b>	<b>42</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>43</b>
<b>A Média das valores numéricos - ILS</b>	<b>45</b>
<b>B Melhor solução - ILS</b>	<b>51</b>

## Lista de Figuras

2.1	Função de emissão . . . . .	17
3.1	Deslocamento do horário de partida ou chegada no depósito . . . . .	22
3.2	Alteração dos horários de visitas para inserção no meio . . . . .	22
3.3	Exemplos dos movimentos das Busca Locais . . . . .	25
4.1	Padrões de velocidade. Fonte: Xiao e Konak (2015) . . . . .	34
4.2	Comparação da distância entre as estratégias ILS e GRASP_Dist . . . . .	37
4.3	Comparação da emissão entre as estratégias ILS e GRASP_Dist . . . . .	38
4.4	Gráfico da relação entre emissão e tempo de processamento . . . . .	39
4.5	Gráfico da emissão e distância encontradas pela abordagem ILS . . . . .	40
4.6	Média das velocidades médias e ponderadas encontradas pela abordagem ILS . . . . .	41

## Lista de Tabelas

2.1	Constantes dos gases - adaptado de Boulter et al. (2009). . . . .	17
3.1	Valores dos critérios e suas combinações . . . . .	21
4.1	Características das instâncias do conjunto Amostra . . . . .	35
4.2	Características das abordagens . . . . .	35
4.3	Combinações que encontraram as melhores soluções . . . . .	37
4.4	Características das abordagens . . . . .	38
4.5	Média da emissão de poluição, distância e tempo de execução . . . . .	38
4.6	Diferença percentual entre a média e a melhor solução . . . . .	40
A.1	Conjunto C - 100 nós e 10 períodos de tempo . . . . .	45
A.2	Conjunto R - 100 nós e 10 períodos de tempo . . . . .	46
A.3	Conjunto RC - 100 nós e 10 períodos de tempo . . . . .	46
A.4	Conjunto UK_10 - 10 nós e 5 períodos de tempo . . . . .	47
A.5	Conjunto UK_15 - 15 nós e 5 períodos de tempo . . . . .	47
A.6	Conjunto UK_20 - 20 nós e 5 períodos de tempo . . . . .	48
A.7	Conjunto UK_25 - 25 nós e 5 períodos de tempo . . . . .	48
A.8	Conjunto UK_50 - 50 nós e 5 períodos de tempo . . . . .	49
A.9	Conjunto UK_75 - 75 nós e 5 períodos de tempo . . . . .	49
A.10	Conjunto UK_100 - 100 nós e 5 períodos de tempo . . . . .	50
B.1	Conjunto C - 100 nós e 10 períodos de tempo . . . . .	51
B.2	Conjunto R - 100 nós e 10 períodos de tempo . . . . .	52
B.3	Conjunto RC - 100 nós e 10 períodos de tempo . . . . .	52
B.4	Conjunto UK_10 - 10 nós e 5 períodos de tempo . . . . .	53
B.5	Conjunto UK_15 - 15 nós e 5 períodos de tempo . . . . .	53
B.6	Conjunto UK_20 - 20 nós e 5 períodos de tempo . . . . .	54
B.7	Conjunto UK_25 - 25 nós e 5 períodos de tempo . . . . .	54
B.8	Conjunto UK_50 - 50 nós e 5 períodos de tempo . . . . .	55
B.9	Conjunto UK_75 - 75 nós e 5 períodos de tempo . . . . .	55
B.10	Conjunto UK_100 - 100 nós e 5 períodos de tempo . . . . .	56

## Lista de Abreviações

DCC	Departamento de Ciência da Computação
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
PRV	Problema de Roteamento de Veículos
PRVV	Problema de Roteamento Verde de Veículos
PRVV-VVT	Problema de Roteamento Verde de Veículos com Velocidades Variáveis no Tempo
ER	Estações de Reabastecimento
GRASP	Randomized Adaptative Search Procedure
ILS	Iterated Local Search
RVND	Random Variable Neighborhood Descent
VND	Variable Neighborhood Descent

# 1 Introdução

Logística é o termo utilizado para descrever o transporte, armazenagem e manuseio de produtos (Picelli e Georges, 2011). O transporte para as atividades industriais é de vital importância já que seus produtos precisam ser levados ao consumidor final.

Os Problemas de Roteamento de Veículos tradicionais tem como objetivo, entre outros, minimizar os custos envolvidos no transporte, custos ligados ao consumo de combustível, custos de manutenção do veículo ou distância percorrida e, dependendo da variação e complexidade, o problema pode ter que lidar com mais de um objetivo ao mesmo tempo (Jabir et al., 2015). Mas nos últimos anos, os governos e a população em geral têm pressionado cada vez mais as empresas para que suas atividades sejam mais sustentáveis e tenham menor impacto ambiental (McKinnon et al., 2010).

Neste novo cenário, a Logística tradicional já não surtia o efeito esperado, o que levou à popularização da Logística Verde onde a principal preocupação está na redução dos impactos ambientais negativos. Adotar a Logística Verde não é importante apenas no ponto vista legal já que muitos governos, como os do Japão, Canadá, Estados Unidos e países europeus (Juras, 2011), têm discutido e modificado leis para obrigar que as atividades sejam mais sustentáveis mas também do ponto de vista comercial “já que os consumidores preferem produtos ecológicos e embalagens amigáveis ao meio ambiente e estão dispostos a pagar preços mais altos por estes produtos” (Santos et al., 2015). Nos Problemas de Roteamento Verde o foco é justamente reduzir o dano ambiental do transporte, tornando-o mais sustentável e próximo daquilo que os governos e a sociedade consideram como ideal.

Neste trabalho será abordado um Problema de Roteamento Verde, mais especificamente o Problema de Roteamento Verde com Velocidades Variáveis no Tempo. Nesse problema, o objetivo é definir o trajeto que cada veículo da frota deverá percorrer para que todos os clientes sejam atendidos durante suas respectivas janelas de tempo, de modo a minimizar a emissão de gases poluentes sendo que as emissões dependem da velocidade do veículo que, por sua vez, varia com o tempo.

## 1.1 Justificativa

Uma das principais formas de poluição atmosférica está na queima de combustíveis fósseis. Além do  $CO_2$ , outros gases provenientes da combustão incompleta também são despejados na atmosfera como o  $CO$  e  $NO_x$ . Os efeitos que a poluição pode causar variam de acordo com composição, concentração e tempo de exposição e alguns dos principais malefícios provocados à saúde vão de náuseas, dificuldade de respirar, irritação da pele, atraso de desenvolvimento em crianças, atividade reduzida do sistema imunológico e até câncer (Kampa e Castanas, 2008). O tempo de vida de uma molécula de  $CO_2$  é longo o suficiente para que toneladas de gases possam se espalhar por toda a Terra, o que torna o problema de emissão de gases poluentes um problema global (Ramanathan et al., 2009).

Considerar velocidades variáveis no tempo permite simular situações com congestionamento. Mesmo que determinadas ruas possuam o mesmo limite de velocidade, na prática, alguns caminhos terão tráfego maior em determinados horários e veículos funcionando em velocidades baixas tendem a poluir mais (Boulter et al., 2009).

Outro ponto que torna relevante o estudo sobre o problema é o fato de Problemas de Roteamento serem classificados como NP-difícil (Lin et al., 2014). Neste tipo de problema, obter uma solução exata pode levar muito tempo, pode exigir muito esforço computacional, ou mesmo ser impossível dependendo da quantidade de clientes que se deseja visitar. Sendo assim, métodos aproximados como as heurísticas e metaheurísticas são aconselháveis, já que encontram boas soluções num tempo aceitável, se comparadas aos métodos exatos.

## 1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é propor uma abordagem que combine heurísticas e metaheurísticas para o Problema de Roteamento Verde de Veículos com Velocidades Variáveis no Tempo (PRVV-VVT) que encontre uma boa solução em tempo viável.

Para atender ao objetivo, será feito um estudo sobre Logística Verde, problemas de roteamento semelhantes onde há emissão de gases poluentes. Além disso, será feita uma análise do impacto que abordagens que minimizam a distância têm sobre o problema,

---

comparadas à abordagens que buscam minimizar a emissão de gases poluentes.

O texto está dividido em cinco capítulos onde no Capítulo 2 é feita a revisão bibliográfica sobre o conceito de Logística Verde e outros Problemas de Roteamento, além da descrição do problema estudado. No Capítulo 3 são apresentadas os algoritmos propostos. No Capítulo 4 são descritos como as instâncias foram geradas, os testes para avaliação das abordagens e os resultados das execuções para todas instâncias. No Capítulo 5 são feitas as conclusões, considerações finais e sugestões de trabalhos futuros.

## 2 PRVV-VVT

Na primeira seção deste capítulo serão apresentados um pouco da história, origem e conceito da Logística Verde. Na segunda seção, serão descritos algumas variações dos Problemas de Roteamento Verde de Veículo (PRVV) estudados nos últimos anos. Na terceira, será descrito a versão do PRVV estudada neste trabalho. E por último, será mostrado a principal diferença entre métodos exatos e aproximados.

### 2.1 Logística Verde

Logística Verde é, segundo Picelli e Georges (2011), “Toda e qualquer ação, isolada ou não, realizada no âmbito da Logística nas organizações que visem a redução do impacto no ambiente[...]”. O conceito de Logística Verde se relaciona com outros conceitos como o de Cadeias de Suprimento Reversa, por exemplo, que também é discutido em Picelli e Georges (2011) e está relacionado à reciclagem e reaproveitamento de materiais.

A preocupação com o efeito nocivo do transporte de mercadorias surgiu por volta de 1950 e meados de 1960. O maior motivador sobre o impacto da logística foi o crescimento do tráfego de caminhões, onde a maior parte dos estudos foram feitos nos anos de 1970 no Reino Unido (McKinnon et al., 2010). Nos últimos anos, a Logística Verde tem ganhado mais atenção pois a logística tradicional não se mostra sustentável a longo prazo. Os autores de Santos et al. (2015) fazem um estudo para quantificar e avaliar artigos relacionados à Logística Verde. No estudo, os autores destacam que a maior parte dos trabalhos analisados tratam da minimização dos danos ambientais causados pelo transporte. Outro ponto de destaque na pesquisa é o fato das empresas, governos e financiadores de projeto estarem cada vez mais preocupados com o impacto de suas ações no meio ambiente.



## 2.2 Variações do Problema de Roteamento de Veículos Verde

Motivado pelo alto consumo de combustíveis fósseis nos setores de transporte nos Estados Unidos, Erdogan e Miller-Hooks (2012) propõem o Problema de Roteamento Verde de Veículos (PRVV). Neste problema, o objetivo é minimizar a distância percorrida pela frota onde é considerado que os veículos são movidos à combustível fóssil, há um limite de tempo para cada frota e existem Estações de Reabastecimento (ER) para que os veículos as utilizem caso necessário. A frota é homogênea, ou seja, todos os veículos possuem a mesma velocidade e taxa de consumo de combustível. Como o combustível é consumido a medida que os veículos se deslocam, minimizar a distância percorrida também minimiza o consumo de combustível. Os clientes possuem um tempo de atendimento e as ER também possuem um tempo de serviço que, na descrição apresentada, independe da quantidade de combustível atual do veículo.

No Problema de Roteamento de Baixo Carbono, proposto por Zhang et al. (2015), o objetivo é reduzir os custos associados ao consumo de combustível, emissão e uso dos veículos. Neste problema há um único depósito central de onde devem partir e retornar os veículos. Cada cliente possui uma demanda e um tempo de serviço que influencia no custo de operação do veículo. O custo de emissão e consumo é influenciado pela distância, velocidade e carga do veículo. O custo de uso dos veículos está associado ao tempo de uso.

O Problema de Roteamento e Escalonamento Verde de Veículos com Atraso Ponderado foi proposto em Xiao e Konak (2015) onde um dos objetivos é reduzir a emissão de gás carbônico. Nesse problema há períodos de tempo que influenciam na velocidade dos veículos e, conseqüentemente, no tempo de viagem. A emissão de gás carbônico é calculada em função da distância percorrida. Além de ter que visitar todos os clientes, há uma janela de tempo que indica o horário para visitá-los. Visitas antecipadas são incentivadas como segundo objetivo para melhorar a satisfação do cliente. O terceiro objetivo é minimizar o tempo total na estrada. Há uma penalidade de atraso que varia para cada cliente.

Diferentemente dos problemas anteriores onde há apenas um depósito central, Jabir et al. (2015) trabalham com o Problema de Roteamento de Veículo com Multi-depósito. Neste problema há dois objetivos: minimizar os gastos associados a abertura de depósitos e custos de roteamento e o segundo objetivo é minimizar os gastos associados à emissão de gás carbônico. Cada cliente possui uma demanda que deverá ser atendida em uma única visita. A emissão de gás carbônico é calculada em função da distância. Uma rota deverá terminar no mesmo depósito que iniciou e a frota é homogênea, ou seja, os veículos possuem mesma velocidade, capacidade de carga, emissão de poluição e custo de operação por unidade de distância. O peso da mercadoria e combustível também influenciam no custo final.

Os autores de (Qian e Eglese, 2016) abordam o Problema de Roteamento de Veículos com Velocidades Variáveis no Tempo. Neste problema, onde há apenas um único depósito central, o objetivo é minimizar as emissões totais da quantidade dos gases provenientes do consumo de combustível da frota. Para cada nó, há mais de um caminho onde a velocidade varia de acordo com os intervalos de tempo. Cada cliente possui uma demanda, um tempo de serviço e uma janela de tempo que indica o horário que deverá ser visitado. Não há limite no número de veículos, os veículos possuem uma capacidade de carga máxima e a frota é homogênea.

A emissão dos gases depende da velocidade do veículo de forma não linear, ou seja, apesar de velocidades baixas poluírem mais, velocidades muito altas não são as que menos poluem. Outro ponto relevante está na variação da velocidade máxima com o tempo, já que para diferentes pares de nós e intervalos de tempo a velocidade muda e pode fazer com que um caminho cronologicamente viável torne-se inviável devido a engarrafamentos ou alguma outra dificuldade no trânsito.

Devido à preocupação com o meio ambiente e a crescente relevância que problemas onde se aplicam os conceitos de Logística Verde tem ganhado no últimos anos, o Problema de Roteamento de Veículo com Velocidades Variáveis no Tempo, estudado por Qian e Eglese (2016), será a versão do PRVV abordada neste trabalho.

## 2.3 Problema de Roteamento Verde de Veículo com Velocidades Variáveis no Tempo

O objetivo do Problema de Roteamento de Veículo com Velocidades Variáveis no Tempo (PRV-VVT) é visitar todos os clientes minimizando a emissão de gases poluentes provenientes da queima de combustível.

Para descrever o problema, considere um grafo direcionado  $G = (V, A)$  onde  $V = C \cup \{d_{central}\}$ , sendo  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$  o conjunto de clientes e  $d_{central}$  o depósito central de onde partem os veículos e para onde eles devem retornar ao final da rota. Como este problema considera a variação da velocidade máxima durante o horizonte de tempo, para cada intervalo de tempo  $t_k$ , com  $k$  variando de 1 até  $m$ , há uma velocidade máxima diferente permitida para cada arco. Logo,  $A$  contém o conjunto de arcos, onde cada par de nós é ligado por no máximo  $m$  arcos, um para cada intervalo de tempo. Existe uma velocidade mínima  $Vel_{min}$  que é a mesma para todos os arcos.

Cada cliente  $i$  possui uma demanda  $d_i$  e uma janela de tempo que inicia em  $JI_i$  e termina no tempo  $JF_i$ . A frota é homogênea, ou seja, todos os veículos possuem a mesma capacidade de carga  $C_{max}$  e emitem a mesma poluição e o número de veículos é ilimitado. Há também um tempo máximo de espera  $TE_{max}$  para os casos em que o veículo chegue antes do início da janela de tempo.

Neste trabalho será considerada a emissão de 5 diferentes gases que são  $CO$ ,  $HC$ ,  $NO_x$ ,  $PM$  e  $CO_2$ , sendo a cada um associado um índice  $s$  que varia de 1 a 5, de acordo com a ordem em que foram apresentados (exemplo:  $s=1$  relacionado ao  $CO$ ).

A emissão de cada um dos gases para o deslocamento do nó  $i$  até o nó  $j$  com velocidade  $v_{i,j}$  é calculada a partir da Equação 2.1 onde  $P_s$  é a emissão em gramas por quilômetro do gás  $s$ :

$$P_s = \frac{a_s + b_s v_{i,j} + c_s v_{i,j}^2 + d_s v_{i,j}^3 + e_s v_{i,j}^4 + f_s v_{i,j}^5 + g_s v_{i,j}^6}{v_{i,j}} \quad (2.1)$$

As constantes, segundo Boulter et al. (2009), utilizadas para calcular a emissão individual de cada gás são apresentadas na Tabela 2.1. Essas constantes estão relacionadas ao trabalho de Boulter et al. (2009) para o veículo de código R166 que possui padrão de

emissão EURO V, limite de peso maior que 32 toneladas e diesel como tipo de combustível. Foi escolhido esse veículo pois é o mesmo utilizado em (Qian e Eglesse, 2016), a principal referência para a definição do problema considerada neste trabalho.

Tabela 2.1: Constantes dos gases - adaptado de Boulter et al. (2009).

Gás	$a_s$	$b_s$	$c_s$	$d_s$	$e_s$	$f_s$	$g_s$
CO	$2.0404E + 0$	$4.0540E - 1$	$-1.7566E - 2$	$4.1924E - 4$	$-5.7141E - 6$	$4.4735E - 8$	$-1.4931E - 10$
HC	$3.594E - 1$	$9.3573E - 2$	$-5.3987E - 3$	$1.4956E - 4$	$-2.2094E - 6$	$1.7133E - 8$	$-5.4005E - 11$
NO <sub>x</sub>	$5.0793E + 1$	$-1.1020E + 0$	$3.3824E - 1$	$-1.2620E - 2$	$2.0982E - 4$	$-1.5928E - 6$	$4.5487E - 9$
PM	$7.5519E - 1$	$8.6426E - 2$	$-4.3024E - 3$	$1.1100E - 4$	$-1.6094E - 6$	$1.3039E - 8$	$-4.4033E - 11$
CO <sub>2</sub>	$1.2690E + 4$	$1.6564E + 1$	$8.6867E + 1$	$-3.5533E + 0$	$6.1462E - 2$	$-4.7730E - 4$	$1.3853E - 6$

A emissão total  $P_{total}$  desses 5 gases produzidos pelo veículo quando transita do nó  $i$  para o nó  $j$  com velocidade  $v_{i,j}$ , é definida pelo somatório de  $P_s$  para  $s$  variando de 1 à 5.

$$P_{total} = \sum_{s=1}^5 P_s \tag{2.2}$$

A Figura 2.1 mostra uma aproximação da função para o somatório das emissões. A maior emissão ocorre para a velocidade de 6 km/h, com 2,54 kg/km e a menor fica em torno da velocidade 57 km/h com 0,92 kg/km.

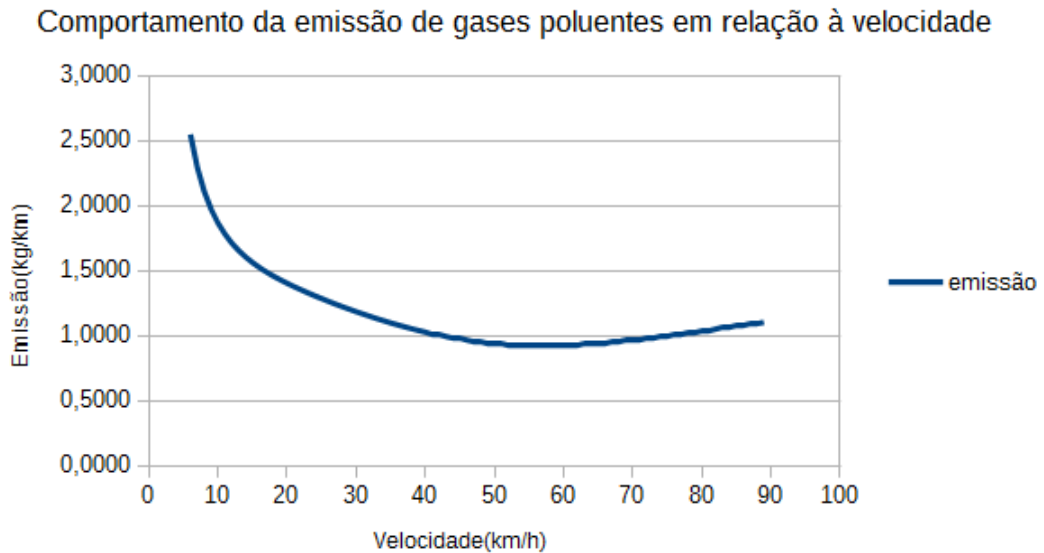


Figura 2.1: Função de emissão

## 2.4 Métodos exatos e aproximados

Segundo Talbi (2009), a complexidade de um problema é equivalente a complexidade do melhor algoritmo que resolve o problema. Problemas de Roteamento são, em sua maioria, classificados como NP-Difícil (Lin et al., 2014), ou seja, não são conhecidos algoritmos que os resolvam em tempo polinomial – a não ser que “ $P = NP$ ” - e por isso são chamados de problemas intratáveis. Algoritmos que buscam a melhor solução possível para este tipo de problema são inviáveis na prática para instâncias grandes devido aos recursos necessário para se chegar tal solução.

Métodos exatos são métodos onde a principal característica é que estes encontram a melhor solução, solução ótima, para o problema. Mas, para problemas intratáveis, a aplicação desses métodos se mostra inviável, na prática, devido aos recursos necessários para encontrar a melhor solução.

Em (Xiao e Konak, 2016) foram encontradas soluções ótimas para instâncias com 10 clientes gastando em média 12 minutos de tempo de CPU e os autores destacam que mesmo com 24 horas de tempo de CPU não foram capazes de resolver instâncias maiores. Em (Taha et al., 2014) também foram apresentados experimentos para outro problema de roteamento onde se resolve de forma exata apenas instâncias pequenas.

As heurísticas e metaheurísticas estão entre os métodos aproximados que, ao contrário dos métodos exatos, encontram soluções boas com tempo de processamento aceitável. Ou seja, por um tempo de processamento menor abre-se mão da garantia de encontrar a solução ótima. As heurísticas e metaheurísticas são indicadas para resolver instâncias grandes de problemas complexos e para problemas onde não se conhece com precisão as características da solução.

Em (Qian e Eglese, 2016) é apresentado uma abordagem baseado na Busca Tabu para o Problema de Roteamento Verde com Velocidades Variáveis no Tempo, uma metaheurística que utiliza uma lista com informações de soluções passadas como memória para impedir que se retorne a um ótimo local já explorado. Já em (Erdogan e Miller-Hooks, 2012) os autores utilizaram duas heurísticas para resolver um Problema de Roteamento Verde onde se deseja minimizar o consumo de combustível.

Para resolver o PRV-VVT optou-se por utilizar métodos aproximados devido a

---

natureza complexa que problemas de roteamento apresentam. Neste trabalho foi implementado uma combinação das metaheurísticas GRASP, ILS, RVND e um algoritmo construtivo.

## 3 Abordagem Proposta

Neste trabalho serão usadas como metaheurística o GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure), ILS (Iterated Local Search) e RVND (Random Variable Neighborhood Descent). O GRASP é uma metaheurística que tem como principal característica a aleatoriedade na fase de construção da solução inicial. Essa característica é utilizada para variar a solução inicial e conseguir chegar a diferentes ótimos locais com o refinamento. Já ILS procura sair de ótimos locais modificando a solução corrente ao invés de reconstruir uma nova solução. Tanto o GRASP quanto o ILS necessitam de uma solução inicial e de um algoritmo de refinamento. Para a solução inicial foi desenvolvido um algoritmo construtivo com 12 variações, onde são usadas três variáveis para determinar seu comportamento. O RVND é utilizado para o refinamento. A ideia do RVND é explorar diferentes vizinhanças com o intuito de encontrar uma solução melhor que a corrente.

### 3.1 Algoritmo construtivo

Em um algoritmo construtivo uma solução é construída, a partir de uma solução inicial vazia, atribuindo valores às variáveis de decisão, uma por vez. O processo continua até que a solução completa seja gerada. Em problemas de otimização, um elemento é selecionado do conjunto de todos os elementos candidatos a integrarem a solução utilizando uma heurística. Uma vez que um elemento é selecionado para fazer parte da solução, este nunca será substituído por outro elemento. Uma solução pode ser identificada como um subconjunto dos elementos candidatos a fazerem parte da solução.

O algoritmo proposto utiliza três variáveis que determinam seu comportamento. A ideia dessas variáveis denominadas aqui de critérios é variar a forma como o algoritmo se comporta e permitir que se identifique facilmente qual combinação de critérios é melhor para cada instância. Os critérios são independentes e seus valores são mostrados na Tabela 3.1, juntamente com as 12 combinações possíveis.

O critério que determina qual cliente será selecionado para ser incluído na solução

Tabela 3.1: Valores dos critérios e suas combinações

Combinação	Critério Inserção	Critério Custo	Critério Ordenação
1	FIM	POLUIÇÃO	INÍCIO
2	FIM	POLUIÇÃO	DIFERENÇA
3	FIM	DISTÂNCIA	INÍCIO
4	FIM	DISTÂNCIA	DIFERENÇA
5	FIM.INÍCIO	POLUIÇÃO	INÍCIO
6	FIM.INÍCIO	POLUIÇÃO	DIFERENÇA
7	FIM.INÍCIO	DISTÂNCIA	INÍCIO
8	FIM.INÍCIO	DISTÂNCIA	DIFERENÇA
9	INÍCIO_MEIO_FIM	POLUIÇÃO	INÍCIO
10	INÍCIO_MEIO_FIM	POLUIÇÃO	DIFERENÇA
11	INÍCIO_MEIO_FIM	DISTÂNCIA	INÍCIO
12	INÍCIO_MEIO_FIM	DISTÂNCIA	DIFERENÇA

é o Critério de Ordenação  $cOrd$ . Nesse critério existem dois valores possíveis sendo que um prioriza os clientes pelo início da janela de tempo e o outro, denominado diferença, define que os clientes serão ordenados pela diferença entre o fim e o início das janelas, ambas de forma crescente. Ordenar pelo início privilegia os clientes que permitem a visita mais cedo enquanto que ordenar pela diferença privilegia os clientes com menor intervalo de tempo para visita.

Já o Critério Custo define qual função será considerada no momento de determinar a melhor forma de incluir o cliente na solução, denominado  $cCusto$ . Além da Equação 2.2 que calcula a quantidade de gases poluentes emitidos, objetivo do problema, foi considerado como segundo critério a distância percorrida.

Para o Critério de Inserção  $cInsercao$  foram implementadas três opções onde cada opção definirá quais posições serão consideradas como candidatas para se inserir um novo cliente na rota. Vale destacar que todas as rotas são consideradas como candidatas a receber o novo cliente selecionado para integrar a solução. Na primeira opção é considerada apenas a opção de incluir o cliente no fim da cada rota. Na segunda opção são consideradas tanto a inclusão no fim quanto o início, ou seja, verifica-se o dobro de posições candidatas da primeira. Na terceira, além do início e do fim, é considerado como posição inserir entre dois clientes consecutivos.

Quando a inserção acontece no início, o que muda é o horário de saída do depósito. Quando a inserção acontece no fim, muda o horário de chegada. Ou seja, tanto no início



quanto no fim, nenhum cliente tem seu horário de visita alterado. A Figura 3.1 mostra o que aconteceria se um nó fosse inserido no início ou no fim da rota. Dependendo do tempo gasto para se chegar do antigo primeiro nó ao novo, pode ser que o Horário de Saída Novo se desloque para a direita (saída mais tarde). O equivalente pode acontecer com antigo último nó e o novo último nó, deslocando o Horário de Chegada Novo para a esquerda (chegada mais cedo).

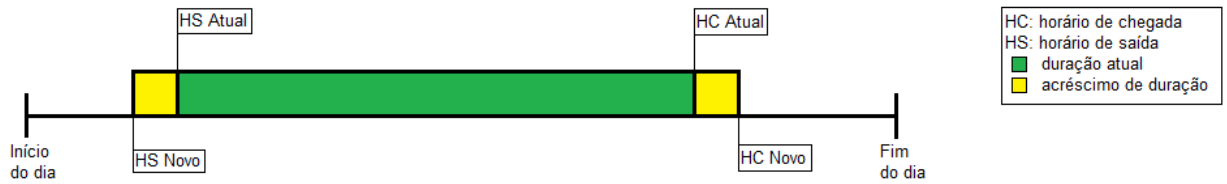


Figura 3.1: Deslocamento do horário de partida ou chegada no depósito

Mas quando a inserção é entre dois clientes consecutivos, ou seja, no meio da rota, todos os clientes que forem atendidos depois do novo cliente terão seus horários de visitas alterados. Como a solução sempre se mantém viável durante a construção, se alguma mudança de horário inviabilizar a rota, então a inserção do novo cliente na posição causadora da inviabilidade é descartada como candidata a receber o cliente. A Figura 3.2 mostra o efeito da modificação dos horários provocada pela inserção de um nó no meio da rota. A área em azul representa os horários alterados que, assim como acontece com a inserção no fim, podem tanto atrasar quanto adiantar o Horário de Chegada Novo.

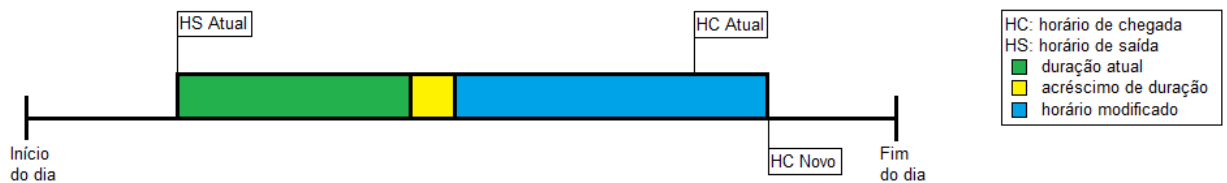


Figura 3.2: Alteração dos horários de visitas para inserção no meio

O Algoritmo 1 apresenta o pseudocódigo para o algoritmo Construtivo. Os parâmetros  $cOrd$ ,  $cCusto$  e  $cInsercao$  são os critérios descritos anteriormente, o Grafo  $G$  representa todos os dados do problema como as demandas e janelas de tempo dos clientes, capacidade máxima do veículo, as matrizes de velocidade para cada período de tempo e a matriz de distância. O parâmetro  $\alpha$  define o grau inicial de aleatoriedade do algoritmo.

**Algoritmo 1:** Construtivo

---

**Entrada:**  $G$ : Grafo,  $cOrd$ : int,  $cCusto$ : int,  $cInsercao$ : int,  $\alpha$ : double  
**Saída:**  $S$ : Solução

```

1 inicio
2    $numRotas \leftarrow CalculaMinRotas(G)$ ;
3    $lista \leftarrow OrdenaNos(G, cOrd)$ ;
4   repita
5      $custo_{melhor} \leftarrow \infty$ ;
6      $no \leftarrow primeiroNoLista(lista, \alpha)$ ;
7      $rota \leftarrow 1$ ;
8     repita
9        $custo_{cand} \leftarrow$ 
10         $custoInserirNo(no, rota, cCusto, cInsercao, pos_{cand})$ ;
11       se  $custo_{cand} < custo_{melhor}$  então
12          $custo_{melhor} \leftarrow custo_{cand}$ ;
13          $rota_{melhor} \leftarrow rota$ ;
14          $pos_{melhor} \leftarrow pos_{cand}$ ;
15       fim se
16        $rota ++$ ;
17     até  $rota > numRotas$ ;
18     se  $custo_{melhor} \neq \infty$  então
19        $S \leftarrow inserirNo(no, rota_{melhor}, pos_{melhor})$ ;
20     fim se
21     senão
22        $numRotas ++$ ;
23        $rota_{melhor} \leftarrow numRotas$ ;
24        $S \leftarrow inserirNo(no, rota_{melhor})$ ;
25     fim se
26      $removeNoLista(lista, no)$ ;
27 até  $lista = \emptyset$ ;
28 fin

```

---

Na linha 2 são calculados o número mínimo de rotas necessárias para que todos os clientes sejam atendidos. Para isso, o somatório da demanda de todos os clientes é dividido pela carga máxima que os veículos suportam. Na linha 3 é criada a lista ordenada de clientes, de acordo com o critério informado. No laço entre as linhas 4 e 26 é onde ocorre a avaliação e inserção dos clientes nas rotas. Na linha 6 é selecionado um dos  $M$  melhores nós da lista, onde  $M$  é igual a  $\alpha$  vezes o número de nós ainda não inseridos na solução.

No laço entre as linhas 8 e 16 ocorre a avaliação da inclusão do nó em cada rota. Na linha 9, além de calcular o custo de se inserir o nó na rota, também é calculado a velocidade, o tempo de espera e consequentemente o horário de partida para o nó seguinte - caso a inserção ocorra no meio da rota, são calculados os valores de todos os

nós envolvidos. Esses dados foram omitidos para facilitar a visualização do algoritmo. Se for encontrada uma posição viável, a inserção ocorre na linha 18. Caso não se encontre nenhuma rota para receber o nó, uma nova rota vazia é criada para receber o nó. Até que a quantidade mínima de rotas, calculada na linha 2, sejam preenchidas, uma rota vazia sempre será considerada como opção de inserção.

A velocidade calculada é sempre a maior possível, mesmo se ela não for a que polui menos. A ideia de utilizar a maior velocidade possível é ganhar tempo para visitar mais nós e evitar utilizar mais veículos, pois espera-se que com menos veículos em viagem a emissão também seja menor. O cálculo leva em consideração os nós envolvidos, o tempo de espera, a janela de tempo do nó destino e a velocidade máxima permitida. Mesmo quando o nó destino for depósito é utilizada a velocidade máxima. Quando o nó destino já estiver inserido, como acontece com uma inserção no início, é avaliado todos os períodos de tempo entre os nós origem (contando o tempo de atendimento) e o destino (considerando que seu horário de atendimento já está definido), sempre respeitando os limites de horário de um dia de trabalho.

O Algoritmo 1 é responsável por gerar uma solução inicial viável. Essa solução será posteriormente refinada pelo RVND, que considera as estratégias baseadas nas Buscas Locais descritas na próxima Seção.

## 3.2 Busca Local

Para entender o que é Busca Local é preciso definir primeiro o conceito de solução vizinha. Uma solução  $S'$  é vizinha de uma solução  $S$  se  $S'$  é gerada a partir de uma operação de movimento em  $S$  que provoque uma pequena alteração em  $S$  (Talbi, 2009). O objetivo da Busca Local é encontrar uma solução vizinha  $S'$  que seja melhor que  $S$ . Para isso, são executadas várias iterações onde, em cada iteração, se aplica o movimento e  $S'$  é selecionada durante essas iterações. As iterações continuam até que não se consiga mais obter nenhuma melhora.

Há três formas de escolher a solução: primeiro aprimorante, melhor aprimorante e seleção aleatória. No primeiro aprimorante é selecionada a primeira solução  $S'$  encontrada que seja melhor que  $S$ . No melhor aprimorante é selecionada a melhor solução após se

verificar todas as soluções vizinhas. Já na seleção aleatória, um vizinho de  $S$  é selecionado aleatoriamente entre os vizinhos melhores que a solução corrente. Todas as Buscas Locais implementadas neste trabalho consideram o primeiro aprimorante por evitar a enumeração de toda a vizinhança.

A Figura 3.3 ilustra os movimentos considerados por cada uma das cinco buscas locais utilizadas neste trabalho.

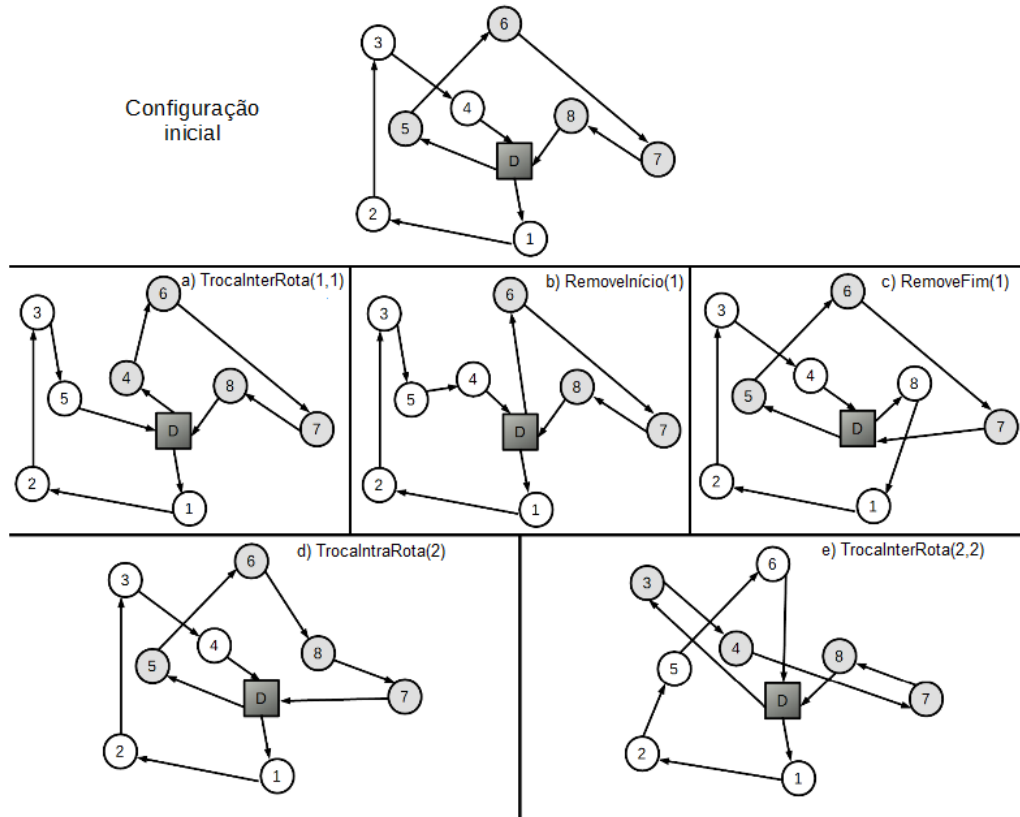


Figura 3.3: Exemplos dos movimentos das Busca Locais

Na *TrocaInterRota(1,1)*, é selecionado um nó  $no_1$  de uma rota  $r_1$  e um segundo nó  $no_2$  de outra rota  $r_2$ . O nó  $no_1$  está na posição  $p_1$  e o nó  $no_2$  está na posição  $p_2$ . O  $no_1$  é removido de  $r_1$  e inserido em  $r_2$  na posição  $p_2$  e o nó  $no_2$  é removido de  $r_2$  e inserido em  $r_1$  na posição  $p_1$ .

Na *RemoveInício(1)*, um nó do início da rota é removido para ser reinserido em outra rota. Essa reinserção pode ocorrer em qualquer posição, no início, meio ou fim da rota. Na Figura 3.3, o nó 5 é removido e reinserido entre os nós 3 e 4. A *RemoveFim(1)* segue a mesma ideia, mas o nó removido é o do fim da rota. A Figura 3.3 mostra a remoção do nó 8 e sua reinserção no início da outra rota, entre os nós D e 1.

Na *TrocaIntraRota(2)*, são trocadas a ordem de visita de dois nós consecutivos. A Figura 3.3 exemplifica uma troca. A ordem inicial é  $D - 5 - 6 - 7 - 8 - D$  que passa a ser, depois da troca entre os nós 7 e 8,  $D - 5 - 6 - 8 - 7 - D$ . Nenhum outro nó, a não ser depósito, sofre alteração de horário de visita. Ou seja, os nós 5 e 6 não tem seus horários modificados mas como o nó após 7 é o depósito, o horário que o veículo chega em  $D$  pode ou não ser alterado.

A *TrocaInterRota(2,2)* é semelhante a *TrocaInterRota(1,1)*, porém são removidos dois nós consecutivos por rota. Na Figura 3.3 são trocados os nós 3 e 4 com os nós 5 e 6. Todos os quatro nós tem seus horários de visita alterados mas a ordem se mantém, ou seja, o nó 4 continua a ser visitado depois do 3 e o 6 depois do 5.

Para explorar estas cinco estruturas de vizinhança, neste trabalho optou-se por usar um RVND estratégia que será descrita na próxima seção.

### 3.3 RVND

Sabe-se que um algoritmo de busca local termina sua execução indicando o ótimo local obtido a partir da solução informada. Como diferentes movimentos de buscas locais podem levar a diferentes regiões exploradas e, conseqüentemente, a diferentes ótimos locais, a ideia geral do *Variable Neighborhood Descent* - VND é buscar pelo melhor ótimo local considerando um conjunto de estruturas de vizinhança.

As cinco Busca Locais apresentadas neste trabalho foram combinadas em um VND. Nesta metaheurística, uma vizinhança  $V_i$  é selecionada de um conjunto de vizinhanças. A Busca Local é realizada considerando a vizinhança escolhida até que se encontre uma solução melhor ou a busca termine. Se for encontrada uma solução  $S'$  melhor, a busca é reiniciada a partir da solução  $S'$  considerando a vizinhança  $V_1$ . Mas, se não for encontrada, então uma nova vizinhança  $V_{(i+1)}$  é escolhida do conjunto para que outras soluções vizinhas sejam analisadas. O procedimento se repete para  $V_{(i+1)}$ , mas agora a busca retorna para  $V_1$  se uma solução melhor for encontrada ou continua para a vizinhança  $V_{(i+2)}$ , caso contrário. A ideia de mudar a vizinhança é justamente sair de um ponto de ótimo local considerando outro movimentos, ou seja, explorando outras soluções vizinhas.

O Algoritmo 2 mostra o pseudo-código para o VND implementado onde  $ordem[5]$  é o vetor que contém a ordem de execução das Buscas Locais e o parâmetro  $cCusto$  determina se as Buscas Locais irão minimizar a emissão de poluição ou a distância.

---

**Algoritmo 2:** VND
 

---

**Entrada:**  $S$ : Solução,  $ordem[5]$ : int,  $cCusto$ : int  
**Saída:**  $S$ : Solução

```

1 inicio
2    $i \leftarrow 1$ ;
3   repita
4      $custoAntes \leftarrow custo(S, cCusto)$ ;
5      $S \leftarrow buscaLocal(S, vet[i], cCusto)$ ;
6      $custoDepois \leftarrow custo(S, cCusto)$ ;
7     se  $custoAntes > custoDepois$  então
8        $i \leftarrow 1$ ;
9     fim se
10    senão
11       $i ++$ ;
12    fim se
13  até  $i > 5$ ;
14 fin
15 retorna  $S$ 

```

---

Como a ordem de seleção interfere nas soluções encontradas, uma sequência pode ser boa para um grupo de instâncias mas também pode não ser a melhor para outro grupo, então também foi considerada a versão RVND (*Random Variable Neighborhood Descent*) onde a ordem de execução das buscas locais é definida aleatoriamente.

### 3.4 GRASP

A metaheurística GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) é uma metaheurística que intercala duas fases: construção de uma solução e refinamento. A cada iteração, inicialmente uma nova solução independente das anteriores é construída. Para conseguir este resultado um algoritmo de construção com alguma característica de aleatoriedade é utilizado. Isso é necessário para que diferentes regiões do espaço de busca sejam exploradas (Talbi, 2009). Na sequência, a solução obtida é aprimorada em uma etapa de refinamento.

O Algoritmo 3 descreve o GRASP proposto. O primeiro parâmetro é o Grafo

$G$ , que contém os dados da instância, e o segundo parâmetro é o  $\alpha$  que é o fator de aleatoriedade do algoritmo de construção. O parâmetro  $it$  indica o número de iterações, critério de parada do algoritmo.

Outro fator de aleatoriedade está no sorteio de uma das  $n$  combinações de critérios. Para uma combinação  $i$ ;  $cOrd[i]$ ,  $cCusto[i]$  e  $cInsercao[i]$  indicam os valores para cada um dos três critérios que devem ser considerados para  $i$ -ésima combinação. Assim, diferentes combinações de critérios, que determinam diferentes comportamentos para o Algoritmo 1 (Construtivo), podem ser utilizados numa mesma execução. Portanto, o parâmetro  $n$  é o número de combinações de critérios e os vetores  $cOrd[n]$ ,  $cCusto[n]$  e  $cInsercao[n]$  contém os valores dos critérios de cada uma das  $n$  combinações. O parâmetro  $cCustoObj$  define se o GRASP minimiza a distância ou a emissão.

O algoritmo GRASP desenvolvido neste trabalho possui uma fase inicial de avaliação dos critérios. Nesta fase é realizada uma execução do algoritmo construtivo para cada uma das  $n$  combinações de critérios, seguida do VND (apesar da ordem das Buscas Locais ser definida aleatoriamente, neste passo a ordem será a mesma para todas as  $n$  combinações). Depois disso, as  $n$  soluções são ordenadas de acordo com suas qualidades. A cada combinação, um número de fichas é atribuído de modo que a combinação responsável para melhor solução receba mais fichas. Essa fase de avaliação dos critérios pode ser observada nas linhas 3 e 4 do Algoritmo 3.

No Algoritmo 3, o laço principal está entre as linhas 6 e 17 e é executados  $it$  vezes. Na linha 7 é sorteada uma combinação que será usada na linha 8 para construir a solução inicial, sorteio este realizado considerando-se a distribuição das fichas. Na linha 9 é realizado o refinamento com o RVND. Nas linhas 10 e 11 são realizadas a atualização da lista da combinação e recálculo das fichas. O vetor  $vetMelhor$  guarda a emissão encontrada para cada uma das  $n$  combinações, logo se a emissão de  $S^*$  for melhor que  $vetMelhor[c]$ ,  $vetMelhor[c]$  receberá a emissão de  $S^*$  aumentando as chances da combinação  $c$  ser sorteada novamente. O  $\alpha$  é incrementado em  $\alpha_{In}$  na linha 15, o que torna o construtivo mais aleatório a cada iteração.

**Algoritmo 3: GRASP**


---

**Entrada:**  $G$ : Grafo,  $\alpha$ : double,  $it$ : int,  $cOrd[n]$ : int,  $cCusto[n]$ : int,  $cInsercao[n]$ : int,  $n$ : int,  $cCustoObj$ : int

**Saída:**  $S_{melhor}$ : Solução

```

1 inicio
2    $\alpha_{In} \leftarrow 0.2/it$  ;
3    $vetMelhor[n] \leftarrow$ 
    $IniVetMelhor(G, cOrd, cCusto, cInsercao, n, cCustoObj, S_{melhor})$ ;
4    $vetFichas \leftarrow CalcProbabilidade(vetMelhor)$ ;
5    $i \leftarrow 1$ ;
6   repita
7      $c \leftarrow SorteiaConbinacao(vetFichas)$ ;
8      $S \leftarrow Construtivo(G, cOrd[c], cCusto[c], cInsercao[c], \alpha)$ ;
9      $S^* \leftarrow RVND(S, cCustoObj)$ ;
10     $AtualizaVetMelhor(S^*, cCustoObj, c, vetMelhor)$ ;
11     $vetFichas \leftarrow CalcProbabilidade(vetMelhor)$ ;
12    se  $custo(S^*, cCustoObj) \leq custo(S_{melhor}, cCustoObj)$  então
13       $S_{melhor} \leftarrow S^*$ ;
14    fim se
15     $\alpha \leftarrow \alpha + \alpha_{In}$ ;
16     $i ++$ ;
17  até  $i > it$ ;
18 fin
19 retorna  $S_{melhor}$ 

```

---

### 3.5 ILS

Como estratégia alternativa de solução, uma heurística baseada na metaheurística *Iterated Local Search* - ILS também foi proposta neste trabalho.

A solução encontrada pela Busca Local depende da solução inicial e uma das formas de se encontrar novas soluções iniciais seria construir uma nova solução que seria considerada como um ponto de partida diferente, como é a proposta do GRASP. Já o ILS tem como proposta reiniciar a busca a partir de soluções baseadas na solução corrente com algumas modificações.

A ideia do ILS é sair de um ótimo local encontrado pela Busca Local através de uma perturbação. A perturbação é uma modificação da solução atual com o intuito de preservar algumas de suas características e alterar outras

O Algoritmo 4 apresenta o algoritmo ILS proposto neste trabalho. As fases principais do ILS são perturbação, refinamento e uma última que é a aceitação da nova solução. Os parâmetros  $G$ ,  $porRem$ ,  $cOrd[n]$ ,  $cCusto[n]$ ,  $cInsercao[n]$ ,  $vetFichas[n]$  e  $n$



são utilizados na fase de perturbação. O *itILS* é o número de iterações, critério de parada do algoritmo.

---

**Algoritmo 4: ILS**


---

**Entrada:**  $G$ : Grafo,  $S$ : Solução,  $porRem$ : double,  $cOrd[n]$ : int,  $cCusto[n]$ : int,  $cInsercao[n]$ : int,  $n$ : int,  $cCustoObj$ : int,  $vetFichas[n]$ : double,  $\alpha_{In}$ : double,  $itILS$ : int

**Saída:**  $S_{melhor}$

```

1 inicio
2    $\alpha_{ILS} \leftarrow 0.1$ ;
3    $j \leftarrow 1$ ;
4    $S_{melhor} \leftarrow copiaSolucao(S)$ ;
5   repita
6      $S_{ILS} \leftarrow copiaSolucao(S_{melhor})$ ;
7      $S_{ILS} \leftarrow remove(porRem)$ ;
8      $c \leftarrow SorteiaCombinacao(vetFichas, n)$ ;
9      $S_{ILS} \leftarrow Construtivo(G, cOrd[c], cCusto[c], cInsercao[c], \alpha_{ILS})$ ;
10     $S_{ILS}^* \leftarrow RVND(S_{ILS}, cCustoObj)$ ;
11    se  $custo(S_{ILS}^*, cCustoObj) < custo(S_{melhor}, cCustoObj)$  então
12      |  $S_{melhor} \leftarrow S_{ILS}^*$ ;
13    fim se
14     $j++$ ;
15     $\alpha_{ILS} \leftarrow \alpha_{ILS} + \alpha_{In}$ ;
16  até  $j > itILS$ ;
17 fin
18 retorna  $S_{melhor}$ 

```

---

A variável  $\alpha_{ILS}$ , inicializada com 0.1 na linha 2, é utilizada para o fator de aleatoriedade na linha 9. No laço entre as linhas 5 e 16 ocorre o processo de perturbação e aprimoramento da solução corrente.

A perturbação consiste em remover alguns nós do início e/ou fim das rotas, linha 6, e reinseri-los considerando o Algoritmo 1, linha 9. A quantidade de nós removidos depende de *porRem* multiplicado pelo número de nós. Para remover os nós é feito uma lista com os nós iniciais e finais de cada rota e é calculado o impacto da remoção destes nós relacionado ao aspecto emissão. Então, aos nós são atribuídas fichas, seguindo o mesmo raciocínio da fase de avaliação dos critérios no Algoritmo 3, cuja quantidade depende dessa emissão. Um nó é sorteado para ser removido e, após a sua remoção, o novo nó inicial ou final da respectiva rota assume o lugar do nó removido e passa a fazer parte da lista. Se o nó removido for inicial, então o novo nó inicial entra na lista. O mesmo raciocínio se aplica quando o nó final é removido.

Assim como acontece na geração da solução inicial no Algoritmo 3 (GRASP), uma combinação de critérios é sorteada na linha 8 de acordo com  $vetFichas[n]$  para ser usada na reinserção dos nós removidos na linha 9.

O refinamento ocorre na linha 10 com o RVND. Na linha 11 é realizada a comparação da solução atual com a melhor solução encontrada até a iteração atual. Se  $S_{ILS}^*$  for melhor que  $S_{melhor}$ , então  $S_{ILS}^*$  assume o lugar de  $S_{melhor}$  como melhor solução encontrada até o momento.

## 3.6 GRASP\_ILS

Buscando combinar os algoritmos VND, GRASP e ILS desenvolvidos neste trabalho, uma outra estratégia foi avaliada: o GRASP\_ILS. A ideia do GRASP\_ILS é utilizar as duas formas de escapar de ótimos locais: gerar uma nova solução considerando um ponto de partida diferente e perturbá-la. Ou seja, cada solução gerada pelo GRASP sofrerá processo de perturbação e refinamento do ILS  $it_{ILS}$  vezes.

O GRASP\_ILS apresentado no Algoritmo 5 é simplesmente a união do Algoritmo 3 (GRASP) com o Algoritmo 4 (ILS). Os parâmetros de entrada são os mesmos presentes nos dois algoritmos. Nas linhas 3 e 4 ocorre a avaliação das combinações de critérios, assim como acontece no Algoritmo 3. O  $\alpha_{ILS_{In}}$  que será usado como parâmetro do Algoritmo 4 é calculado na linha 5. A parte relacionada ao Algoritmo 3 ocorre entre as linhas 8 e 15, onde uma combinação de critérios é sorteada na linha 8, a solução nova é construída na linha 9 e refinada na linha 10. A execução do Algoritmo 4 acontece na linha 17. Na linha 18 é feita a comparação entre a solução atual  $S_{ILS_{melhor}}$  e  $S_{melhor}$ , a melhor solução encontrada até o momento. Se  $S_{ILS_{melhor}}$  for melhor que  $S_{melhor}$  então  $S_{ILS_{melhor}}$  passa a ser a nova  $S_{melhor}$ . Assim como no Algoritmo 3, o  $\alpha$  é incrementado na linha 21.

---

**Algoritmo 5:** GRASP\_ILS

---

**Entrada:**  $G$ : Grafo,  $\alpha$ : double,  $it$ : int,  $cOrd[n]$ : int,  $cCusto[n]$ : int,  $cInsercao[n]$ : int,  $n$ : int,  $cCustoObj$ : int,  $it_{ILS}$ : int,  $porRem$ : double

**Saída:**  $S_{melhor}$ : Solução

```

1 inicio
2    $\alpha_{In} \leftarrow 0.2/it$  ;
3    $vetMelhor[n] \leftarrow$ 
    $IniVetMelhor(G, cOrd, cCusto, cInsercao, n, cCustoObj, S_{melhor})$ ;
4    $vetFichas \leftarrow CalcProbabilidade(vetMelhor)$ ;
5    $\alpha_{ILS_{In}} \leftarrow \alpha/it_{ILS}$  ;
6    $i \leftarrow 1$ ;
7   repita
8      $c \leftarrow SorteiaConbinacao(vetFichas)$ ;
9      $S \leftarrow Construtivo(G, cOrd[c], cCusto[c], cInsercao[c], \alpha)$ ;
10     $S^* \leftarrow RVND(S, cCustoObj)$ ;
11     $AtualizaVetMelhor(S^*, cCustoObj, c, vetMelhor)$ ;
12     $vetFichas \leftarrow CalcProbabilidade(vetMelhor)$ ;
13    se  $custo(S^*, cCustoObj) < custo(S_{melhor}, cCustoObj)$  então
14      |  $S_{melhor} \leftarrow S^*$ ;
15    fim se
16     $S_{ILS_{melhor}} \leftarrow S^*$ ;
17     $ILS(G, S_{ILS_{melhor}}, porRem, cOrd, cCusto, cInsercao, n, cCustoObj,$ 
    $vetFichas, \alpha_{ILS_{In}}, it_{ILS})$ ;
18    se  $custo(S_{ILS_{melhor}}, cCustoObj) < custo(S_{melhor}, cCustoObj)$ 
   então
19      |  $S_{melhor} \leftarrow S_{ILS_{melhor}}$ ;
20    fim se
21     $\alpha \leftarrow \alpha + \alpha_{In}$ ;
22     $i ++$ ;
23  até  $i > it$ ;
24 fin
25 retorna  $S_{melhor}$ 

```

---

## 4 Análise dos resultados

Nesse capítulo serão apresentados os resultados dos testes realizados com os algoritmos propostos. Na Seção 4.1 é descrito como foram adaptadas as instâncias, na Seção 4.2 é feita comparação entre nove abordagens construídas a partir dos algoritmos implementados e na Seção 4.3 os testes finais.

Os algoritmos propostos foram implementados em C++, em um computador com sistema operacional Ubuntu 16.10 de 64 bits, 4 GB de RAM, processador Intel Core i5 de 2.60GHz e compilador GNU GCC.

### 4.1 Geração das Instâncias

As instâncias avaliadas em Qian e Eglese (2016) - que estuda o mesmo problema - são baseadas em uma localidade real, um conjunto de lojas e um depósito de um supermercado no sudeste de Londres, mas não foi possível obter acesso a todas às informações relacionadas a essas instâncias para que elas fossem geradas. Para se chegar a instâncias semelhantes, foram feitas adaptações nas instâncias de Cordeau (2009) e Xiao e Konak (2016).

As instâncias de Xiao e Konak (2016) são divididas em sete grupos de acordo com o número de clientes: 10, 15, 20, 25, 50, 75 e 100. Cada grupo possui 20 instâncias. Já as instâncias de Cordeau (2009) possuem 100 clientes e são 48 no total. Todas as instâncias possuem demanda, janela de tempo para os clientes e um depósito central.

O período do dia das instâncias de Xiao e Konak (2016) é dividido em 5 intervalos de tempo com uma hora cada. Não existe arco ligando todos os nós para as instâncias com mais de 20 clientes, portanto, o grafo não é completo para as instância com 25, 50, 75 e 100 clientes. Foi escolhido o modelo de veículo da frota com maior capacidade para ser usado aqui, já que este problema, ao contrário do estudado em (Xiao e Konak, 2016) que considera frota heterogênea, utiliza frota homogênea.

As velocidades foram limitadas no intervalo de 6 km/h a 90 km/h já que as

constantes da Tabela 2.1 são para o veículo cujas velocidades foram definidas para esse intervalo (Boulter et al., 2009).

As instâncias de Cordeau (2009) foram as que sofreram mais adaptações pois elas não contém um número de períodos do dia e velocidades variáveis. Suas adaptações foram feitas pensando nas instâncias de Qian e Eglese (2016). O dia foi dividido em 10 períodos com uma hora cada. Para definir as velocidades, foram utilizados os padrões de velocidades vistos na Figura 4.1, convertidos para 10 períodos e velocidades variando entre 6 km/h e 90 km/h. Com exceção do padrão *Constant*, todos os outros cinco foram utilizados. Foi atribuído aleatoriamente um padrão de velocidade para cada par de nós. Todas os arcos que saem do depósito, independente do horário e padrão de velocidade, possuem velocidade máxima de 90 km/h.

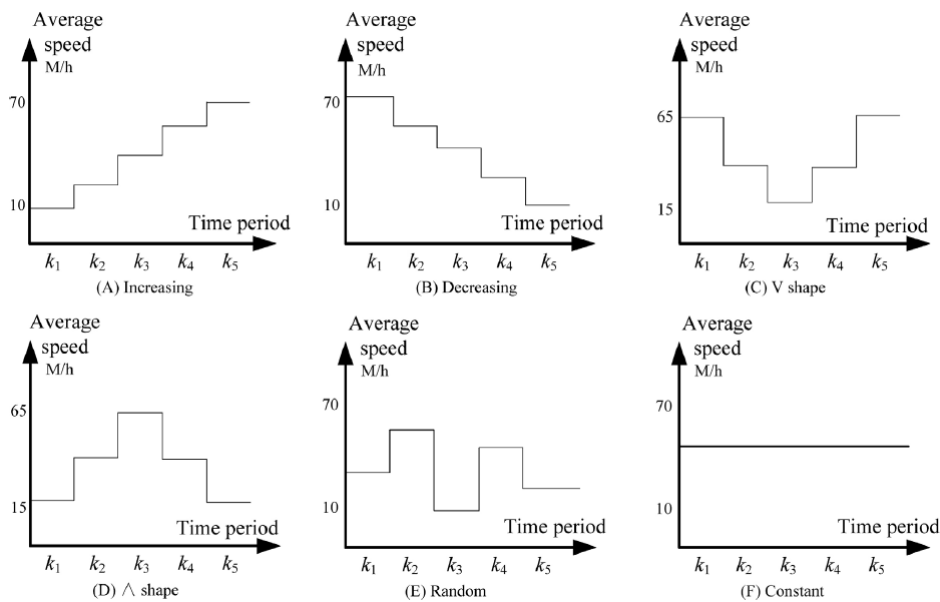


Figura 4.1: Padrões de velocidade. Fonte: Xiao e Konak (2015)

As distâncias dos conjuntos de Cordeau (2009) e Xiao e Konak (2016) também foram adaptadas para as distâncias das instâncias de Qian e Eglese (2016). Para isso, todas as distâncias foram convertidas para valores entre 92,2m e 2848,7m.

## 4.2 Comparação das abordagens

A partir dos algoritmos propostos, foram implementadas nove abordagens e para avaliá-las foi criado o conjunto de instâncias denominado Amostra. Esse conjunto é composto

por 26 instâncias sendo que 12 instâncias são adaptações do conjunto Cordeau (2009) e as outras 14 são adaptações do conjunto de Xiao e Konak (2016). A Tabela 4.1 apresenta as instâncias escolhidas, a quantidade de clientes e número de períodos de tempo de cada instância.

Tabela 4.1: Características das instâncias do conjunto Amostra

Instância	nClientes	nP.T.	Instância	nClientes	nP.T.
c101	100	10	10x5_2	10	5
c102	100	10	15x5_3	15	5
c203	100	10	15x5_4	15	5
c204	100	10	20x5_5	20	5
r111	100	10	20x5_6	20	5
r112	100	10	25x5_7	25	5
r209	100	10	25x5_8	25	5
r210	100	10	50x5_9	50	5
rc105	100	10	50x5_10	50	5
rc106	100	10	75x5_11	75	5
rc207	100	10	75x5_12	75	5
rc208	100	10	100x5_13	100	5
10x5_1	10	5	100x5_14	100	5

A Tabela 4.2 mostra as diferenças entre as nove abordagens. As diferenças estão relacionadas ao número de iterações para o GRASP e ILS, o critério de custo utilizado no Algoritmo 1 (Construtivo) e no Algoritmo 2 (RVND). Cada uma das nove abordagens foram executadas 30 vezes para cada instância do grupo Amostra. O parâmetro  $\alpha$  do Algoritmo 3 (GRASP) e Algoritmo 5 (GRASP\_ILS) foi definido empiricamente como 0,1 para todas as abordagens. Como o  $\alpha_{in}$  do Algoritmo 4 (ILS) depende de  $\alpha$  no GRASP\_ILS, a abordagem ILS considera o  $\alpha_{in}$  como 0,1/300 para manter a mesma variação.

Tabela 4.2: Características das abordagens

Abordagem	Iterações GRASP	Iterações ILS	Custo Const.	Custo RVND
GRASP_Dist	300	0	distância	distância
GRASP_Pol	300	0	poluição	poluição
GRASP_12Comb	300	0	pol./dist	poluição
GRASP_6_Mel	300	0	pol./dist	poluição
G.I.-17_18_12Comb	17	18	pol./dist	poluição
G.I.-17_18_6Mel	17	18	pol./dist	poluição
G.I.-10_30_12Comb	10	30	pol./dist	poluição
G.I.-10_30_6Mel	10	30	pol./dist	poluição
ILS	0	300	pol./dist	poluição

O GRASP\_Dist considera minimizar distância tanto no construtivo quanto no

RVND enquanto que o GRASP\_Pol considera minimizar a emissão. A ideia de comparar estas duas abordagens é avaliar o impacto que considerar apenas a distância quando verificada a emissão de poluentes. Para as outras abordagens não foi selecionadas as combinações considerando o *cCusto* permitindo que tanto as combinações que minimizem distância (combinações 3, 4, 7, 8, 11 e 12) quanto as que minimizam a emissão (1, 2, 5, 6, 9 e 10) sejam sorteadas (As características de todas as combinações estão detalhadas na Tabela 3.1).

A Tabela 4.3 mostra a quantidade de vezes que cada combinação encontrou a melhor solução para a abordagem GRASP\_12Comb. A última linha apresenta as médias para cada combinação sendo que as seis melhores estão destacadas em negrito. O *cInsercao* que considera inserir no início, meio e fim da rota foi o que obteve os melhores resultados, aparecendo em 18,49 das vezes (combinações 9, 10, 11 e 12). Como estas combinações consideram mais opções de inserção, esse resultado já era esperado. Mas o *cInsercao* que considera inserir no início e no fim (combinações 5, 6, 7 e 8) aparece, em média, 4,23 vezes, menos vezes que o *cInsercao* que considera inserir apenas no fim da rota (combinações 1, 2, 3 e 4) mas aparece em média 7,27 vezes.

Esse mesmo comportamento se repete para as abordagens G.I.-17\_18\_12Comb e G.I.-10\_30\_12Comb porém com menor diferença. Para as duas abordagens foi contabilizada a combinação que encontrou a melhor solução após a execução de todas as iterações do ILS. A abordagem G.I.-17\_18\_6Mel utiliza as combinações 7, 8, 9, 10, 11 e 12 enquanto que G.I.-10\_30\_6Mel utiliza as combinações 3, 4, 9, 10, 11 e 12.

O trabalho de Xiao e Konak (2016) - apesar de possuir diferenças com relação ao problema abordado aqui - mostra que minimizar a distância não garante a minimização da emissão. E realmente pode se observar esses mesmos resultados nas Figuras 4.2 e 4.3 onde se pode comparar a distância e a emissão das abordagens GRASP\_Dist e ILS para o conjunto Amostra. As soluções encontradas por GRASP\_Dist possuem, em média, as menores distâncias (37,30km) mas poluem mais (54,70kg) enquanto que a abordagem ILS, por exemplo, percorre 41,28 km para emitir 43,68 kg. Ou seja, a abordagem ILS anda 10,75% a mais que o GRASP\_Dist para emitir 20,15% a menos.

Outro resultado não esperado está no fato de o *cCusto* distância aparecer mais

Tabela 4.3: Combinações que encontraram as melhores soluções

Instância	Combinações											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
c101	0	0	9	0	0	0	7	0	0	0	14	0
c102	2	1	2	8	0	1	6	0	2	0	6	2
c203	0	1	0	5	0	1	0	2	0	0	0	21
c204	0	2	0	8	0	1	0	7	0	1	0	11
r111	2	2	11	8	0	0	3	0	0	2	2	0
r112	3	3	1	8	4	1	1	3	3	2	1	0
r209	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	5	13
r210	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	15
rc105	0	4	1	16	0	6	0	0	0	3	0	0
rc106	0	9	0	13	0	1	0	6	0	0	0	1
rc207	0	0	0	2	0	0	0	0	0	4	11	13
rc208	0	0	0	0	0	0	0	0	1	9	6	14
10x5_1	1	5	0	0	1	2	1	2	0	18	0	0
10x5_2	0	0	0	0	0	0	0	0	6	24	0	0
15x5_3	1	0	9	3	0	2	10	0	0	2	3	0
15x5_4	1	0	4	3	4	5	4	3	1	2	3	0
20x5_5	0	0	0	1	0	0	1	0	0	21	0	7
20x5_6	3	3	3	2	1	2	4	1	5	0	6	0
25x5_7	0	0	1	0	1	0	1	0	12	4	10	1
25x5_8	1	8	1	1	3	1	2	0	5	3	5	0
50x5_9	1	0	4	0	0	0	2	1	7	2	7	6
50x5_10	2	1	0	1	1	2	1	0	1	2	12	7
75x5_11	0	0	3	0	0	0	1	1	18	1	5	1
75x5_12	0	0	0	1	0	0	0	0	7	0	11	11
100x5_13	0	0	0	1	0	0	0	0	7	5	10	7
100x5_14	1	1	1	0	0	0	0	0	1	4	10	12
Média	0,6	1,5	<b>1,9</b>	<b>3,1</b>	0,5	0,9	1,6	1,0	<b>2,9</b>	<b>5,2</b>	<b>4,8</b>	<b>5,4</b>

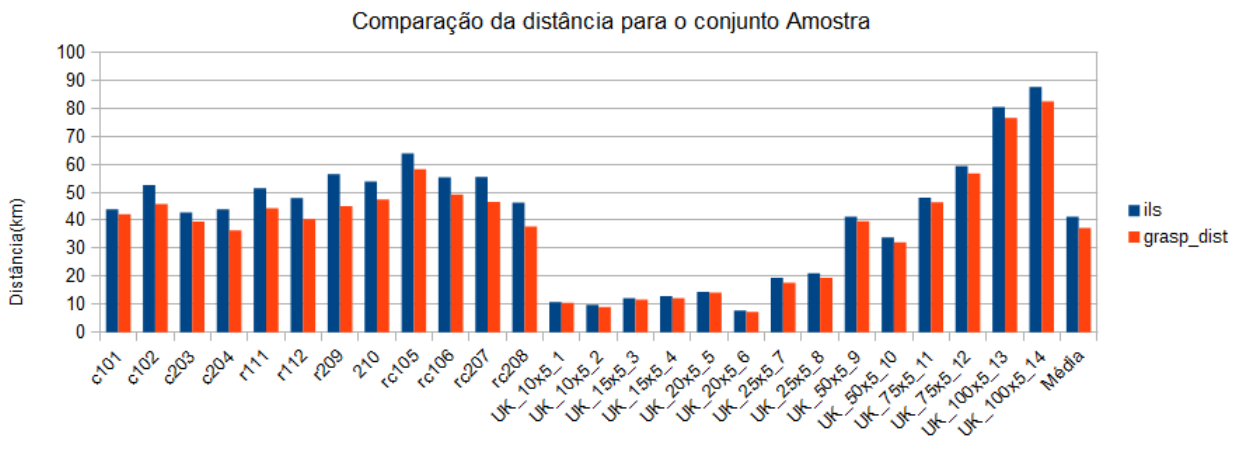


Figura 4.2: Comparação da distância entre as estratégias ILS e GRASP\_Dist

vezes que o *cCusto* emissão de poluição já que o problema consiste em minimizar a emissão. As soluções encontradas pelas abordagens que permitem a combinação de cons-



Tabela 4.4: Características das abordagens

Abordagem	INÍCIO_MEIO_FIM	FIM_INÍCIO	FIM
GRASP_12Comb	18,49	4,23	7,27
G..I.-17_18_12Comb	16,15	6,65	7,19
G..I.-10_30_12Comb	16,54	6,27	7,19

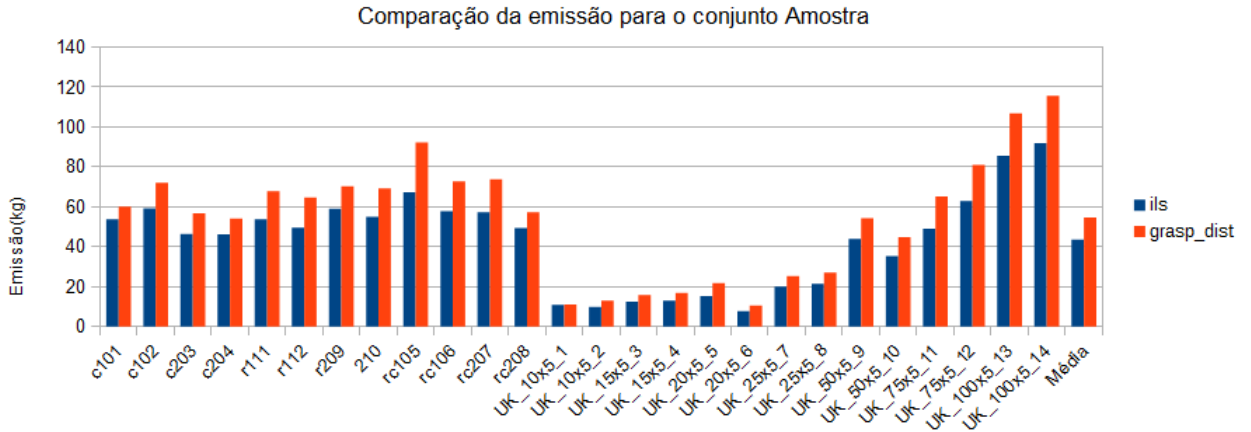


Figura 4.3: Comparação da emissão entre as estratégias ILS e GRASP\_Dist

trutivos que minimizam a distância com RVND que minimiza a emissão apresentam as menores emissões, menores até que o GRASP\_Pol. Combinar estratégias que minimizam a distância, na fase de construção da solução inicial, com estratégias que minimizam a emissão, na fase de refinamento, mostram-se promissoras.

Tabela 4.5: Média da emissão de poluição, distância e tempo de execução

Abordagem	Poluição(kg)	Distância(km)	Tempo Execução(s)
GRASP_Dist	54,70	<b>37,30</b>	6,12
GRASP_Pol	48,94	46,68	4,97
GRASP_12Comb	47,72	44,91	6,40
GRASP_6_Mel	47,27	44,48	4,47
G..I.-17_18_12Comb	44,73	42,24	2,82
G..I.-17_18.6Mel	44,72	41,99	2,96
G..I.-10_30_12Comb	44,44	41,91	2,90
G..I.-10_30.6Mel	44,04	41,48	3,25
ILS	<b>43,68</b>	41,28	<b>2,22</b>

### 4.3 Testes finais

A Figura 4.4 mostra a relação entre emissão e tempo de processamento para as nove abordagens. As abordagens baseadas no GRASP são as que possuem o pior emissão e

desempenho com a melhor delas sendo o GRASP\_6\_Mel com emissão de 47,27kg para 4,47 segundos de tempo de processamento. As abordagens que combinam o GRASP com o ILS possuem um desempenho mais próximo do ILS do que do GRASP, sendo a melhor delas o G.I.-10.30\_6Mel, com 44,04kg de emissão e 3,25 segundos de tempo de processamento. Como ILS apresenta os melhores resultados para emissão e tempo de processamento, foi escolhida como a abordagem para os testes finais com todas as instâncias (todas as instâncias foram executadas 30 vezes).

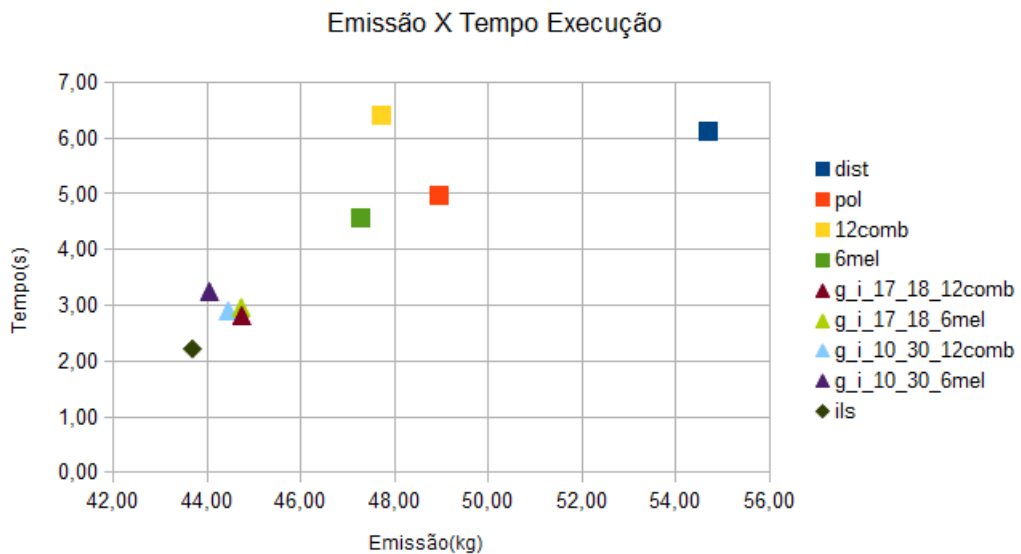


Figura 4.4: Gráfico da relação entre emissão e tempo de processamento

A Figura 4.5 mostra a média das emissões e distâncias para cada conjunto de instâncias. É possível notar que os comportamentos da emissão e distância estão relacionados e quando se compara a média das soluções com a melhor de cada uma das 30 execuções esse comportamento também fica evidente.

A Tabela 4.6 mostra essa comparação para a emissão, distância, número de rotas, velocidade média e velocidade média ponderada pelo tempo de viagem. Apesar de a velocidade média ponderada apresentar comportamento semelhante para os conjuntos *UKs*, o mesmo não ocorre para os conjuntos *C*, *R* e *RC*.

A Figura 4.6 mostra que as velocidades médias se mantêm próximas de 57 km/h, que é o valor com menor emissão, mas as velocidades médias ponderadas estão ainda mais abaixo do ideal, principalmente no conjunto *C*. De acordo com a Equação 2.1, velocidades entre 40 km/h e 60 km/h emitem quantidades próximas a 1 kg/km o que deixa relação

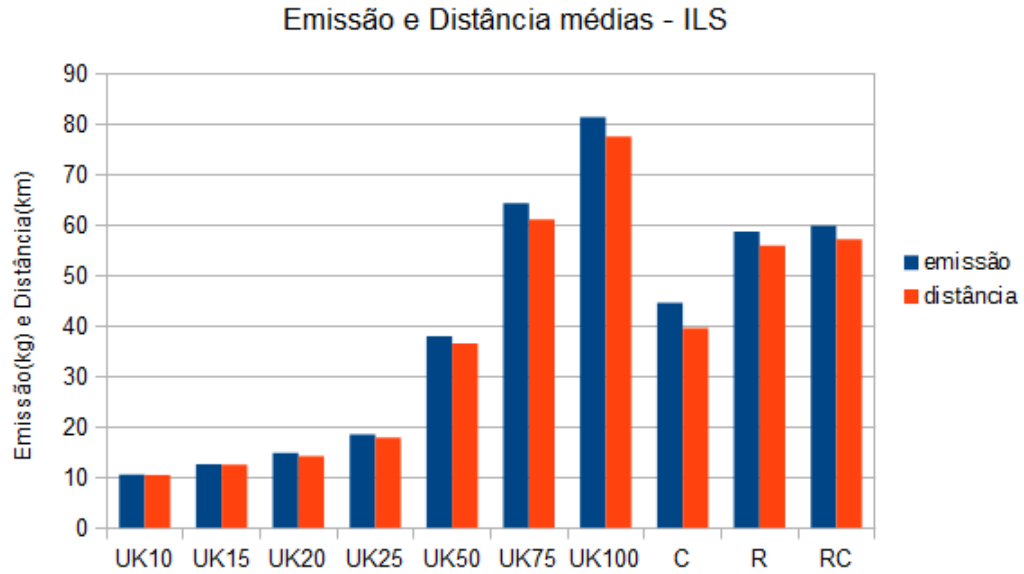


Figura 4.5: Gráfico da emissão e distância encontradas pela abordagem ILS

Tabela 4.6: Diferença percentual entre a média e a melhor solução

Conjunto	Poluição(kg)	Distância(km)	N. Rotas	V. Média	V. M. P. Tempo
UK10	0,46%	-0,09%	0,00%	-0,31%	-0,64%
UK15	3,14%	2,26%	0,00%	-1,33%	-1,68%
UK20	7,21%	5,08%	-4,47%	-4,71%	-7,32%
UK25	5,56%	3,56%	-2,33%	-5,92%	-7,47%
UK50	5,21%	3,73%	1,08%	-3,37%	-5,28%
UK75	4,84%	3,38%	-1,49%	-2,25%	-5,04%
UK100	4,22%	3,31%	-0,93%	-3,12%	-4,18%
C	10,25%	10,98%	4,75%	-0,19%	0,16%
R	7,64%	7,19%	-2,39%	-0,32%	-2,39%
RC	9,82%	8,97%	-3,18%	-2,05%	-4,03%

entre emissão e distância encontrada pela abordagem ILS bem próxima.

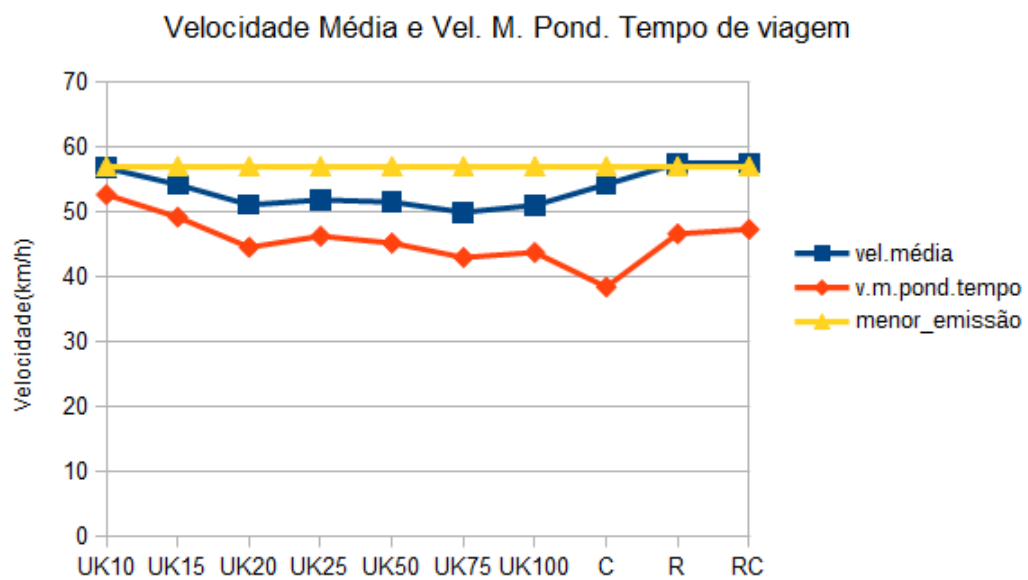


Figura 4.6: Média das velocidades médias e ponderadas encontradas pela abordagem ILS

## 5 Conclusão

A proposta desse trabalho é propor uma abordagem baseada em metaheurísticas para o Problema de Roteamento Verde de Veículos com Velocidades Variáveis no Tempo. Para se chegar ao objetivo proposto foi realizado um estudo sobre a Logística Verde, problemas semelhantes ao estudado e como a velocidade interfere na emissão de gases poluentes provenientes da queima de combustíveis fósseis.

Diferentemente da Logística tradicional, a Logística Verde se preocupa em reduzir o impacto ambiental e está ganhando cada vez mais atenção da sociedade, governos e do meio acadêmico. Muitos dos Problemas de Roteamento ligados à Logística Verde associam a emissão com a distância percorrida e o peso das mercadorias. Mas outra forma de calcular a emissão que têm ganhado bastante destaque está relacionado à velocidade, método utilizado nesse trabalho.

Testes realizados com duas versões do GRASP, uma que minimize a distância e outra que minimize a emissão, mostram que minimizar a distância não garante baixa emissão. Mas combinar as duas estratégias - minimizar distância na construção da solução inicial e minimizar a emissão na busca local - apresenta resultados ainda melhores do que minimizar a emissão em todas as etapas do algoritmo.

Na ausência de resultados da literatura para comparação, a média dos resultados do algoritmo foram comparados com a melhor solução encontrada nas 30 execuções. E os resultados levam a concluir que a distância tem um peso significativo na solução pois as diferenças percentuais possuem valores muito próximos. Ou seja, minimizar a distância não garante baixa emissão mas interfere significativamente.

Para trabalhos futuros pode-se considerar outras metaheurísticas como a Busca Tabu para evitar movimentos repetidos durante o ILS. Outro ponto a ser considerado é a interferência da distância, ou seja, agrupar os nós pela distância antes de ordená-los pela janela de tempo pode apresentar resultados melhores.

## Referências Bibliográficas

- Boulter, P. G.; Barlow, T. J. ; McCrae, I. S. **Emissions factors 2009: Report 3 - exhaust emission factors for road vehicles in the united kingdom**, 2009. Acessado em: 30 de Março 2017.
- Cordeau. **Capacitated vrp with time windows instances** , <http://neo.lcc.uma.es/vrp/vrp-instances/capacitated-vrp-with-time-windows-instances/>, 2013. Acessado em: 30 de Março 2017.
- Erdogan, S.; Miller-Hooks, E. A green vehicle routing problem. **Transportation Research Part E**, p. 100–114, 2012.
- E., J.; Panicker, V. V. ; Sridharan, R. **Multi-objective optimization model for a green vehicle routing problem**. In: XVIII Annual International Conference of the Society of Operations Management (SOM-14), 2015.
- da Ascensão Garrido Martins Juras, I. **Legislação sobre resíduos sólidos: Comparação da lei 12.305/2010 com a legislação de países desenvolvidos**, abril 2011. [http://www2.camara.leg.br/documentos-e-pesquisa/publicacoes/estnottec/areas-da-conle/tema14/2012\\_1658.pdf](http://www2.camara.leg.br/documentos-e-pesquisa/publicacoes/estnottec/areas-da-conle/tema14/2012_1658.pdf). Acessado em 19 outubro 2016.
- Kampa, M.; Castanas, E. Human health effects of air pollution. **Environmental Pollution**, p. 362–367, 2008.
- Lin, C.; Choy, K.; Ho, G.; Chung, S. ; Lam, H. Survey of green vehicle routing problem: Past and future trends. **Expert Systems with Applications**, p. 1118–1138, 2014.
- McKinnon, A.; Cullinane, S.; Browne, M. ; Whiteing, A. **Green Logistics: Improving the environmental sustainability of logistics**. Kogan Page Limited, 2010.
- Picelli, V. C.; Georges, M. R. R. **Cadeia de suprimentos reversa e logística verde: Teoria e prática**. In: Anais do XVI Encontro de Iniciação Científica da PUC-Campinas e I Encontro de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação da PUC-Campinas, 2011.
- Qian, J.; Eglese, R. Fuel emissions optimization in vehicle routing problems with time-varying speeds. **European Journal of Operational Research**, p. 840–848, 2016.
- Ramanathan, V.; Feng, Y. Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives. **Atmospheric Environment**, p. 37–50, 2009.
- da Silva Santos, J.; Bortolon, K. M.; de Genaro Chirolí, D. M. ; Oiko, O. T. Logística verde: conceituação e direcionamentos para aplicação. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v.19, n.2, p. 314–331, 2015.
- Taha, M.; Fors, M. N. ; Shoukry, A. A. **An exact solution for a class of green vehicle routing problem**. In: Proceedings of the 2014 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 2014.

- 
- Talbi, E.-G. **Metaheuristics: from design to implementation**. John Wiley Sons, Inc, 2009.
- Xiao, Y.; Konak, A. A simulating annealing algorithm to solve the green vehicle routing scheduling problem with hierarchical objectives and weighted tardiness. **Applied Soft Computing**, p. 372–388, 2015.
- Xiao, Y.; Konak, A. The heterogeneous green vehicle routing and scheduling problem with time-varying traffic congestion. **Transportation Research Part**, p. 146–166, 2016.
- Zhang, J.; Zhao, Y.; Xue, W. ; Li, J. Vehicle routing problem with fuel consumption and carbon emission. **Int. J. Production Economics**, p. 234–242, 2015.

## A Média das valores numéricos - ILS

As Tabelas de A.1 até A.10 mostram a média dos valores de emissão em kg, distância em km, tempo em segundos, número de rotas, velocidade média em km/h, e velocidade média ponderada pelo de viagem em km/h. Obtidos após 30 execuções da abordagem ILS para cada instância.

Tabela A.1: Conjunto C - 100 nós e 10 períodos de tempo

Instância	Emissão	Distância	Tempo	N. Rotas	V. Média	V. M. Pond
c101	54,09	43,85	2,48	12,60	47,45	28,37
c102	59,73	53,17	2,99	13,57	54,42	37,87
c103	53,46	50,05	3,59	12,43	58,33	46,91
c104	46,35	45,01	4,62	10,90	59,84	53,68
c105	48,00	42,85	2,93	11,30	55,17	40,34
c106	45,35	41,31	3,07	12,07	57,74	45,41
c107	44,73	39,34	2,64	10,63	51,68	36,21
c108	43,71	39,82	3,13	10,63	56,78	42,51
c109	48,08	44,11	3,15	10,80	54,74	42,32
c201	33,14	27,14	2,26	3,00	48,16	28,27
c202	50,81	43,83	2,67	7,73	53,94	34,43
c203	46,92	43,37	3,46	7,80	59,32	45,93
c204	44,88	42,32	4,78	6,67	57,62	46,58
c205	34,53	28,10	2,47	3,80	50,48	26,89
c206	36,90	31,99	2,61	4,37	53,90	34,63
c207	35,92	29,45	2,83	3,60	50,93	28,29
c208	32,52	28,56	2,56	3,70	51,83	34,55
Média	44,65	39,66	3,07	8,56	54,25	38,42



Tabela A.2: Conjunto R - 100 nós e 10 períodos de tempo

Instância	Emissão	Distância	Tempo	N. Rotas	V. Média	V. M. Pond
r101	91,81	83,56	2,50	17,90	56,69	40,63
r102	80,37	74,96	2,70	14,33	58,85	44,68
r103	65,67	61,36	3,53	12,40	58,20	43,25
r104	52,14	49,62	4,11	9,63	58,37	47,23
r105	68,21	66,00	2,18	10,63	60,31	50,33
r106	62,71	60,91	2,59	9,57	56,02	46,53
r107	57,09	55,09	3,17	9,13	58,42	48,59
r108	48,39	46,89	4,10	8,60	58,03	49,26
r109	56,75	53,87	2,84	9,30	55,19	44,23
r110	51,86	50,50	3,53	9,30	56,30	47,86
r111	53,54	51,19	3,53	9,10	57,24	46,00
r112	48,93	47,43	4,56	8,73	59,09	50,92
r201	69,65	65,45	1,98	3,77	58,95	44,05
r202	65,27	61,73	3,21	6,40	55,29	44,49
r203	57,08	56,76	3,67	5,47	61,79	55,42
r204	48,12	47,04	5,37	5,50	59,58	52,07
r205	62,42	58,95	2,46	4,20	53,72	43,12
r206	55,09	52,67	3,51	4,60	56,39	45,56
r207	51,21	48,03	4,41	4,07	56,99	43,98
r208	46,03	42,07	5,49	3,43	53,10	41,20
r209	57,65	55,26	3,12	3,40	56,77	46,13
r210	55,41	54,02	3,50	6,17	57,92	49,57
r211	47,38	45,30	4,56	3,00	58,16	47,43
Média	58,82	56,03	3,50	7,77	57,45	46,63

Tabela A.3: Conjunto RC - 100 nós e 10 períodos de tempo

Instância	Emissão	Distância	Tempo	N. Rotas	V. Média	V. M. Pond
rc101	70,78	66,50	3,54	12,37	56,12	43,56
rc102	62,43	59,46	3,9,0461	11,03	57,71	46,99
rc103	57,09	55,43	4,50	10,50	58,58	49,42
rc104	51,25	50,29	5,46	10,03	58,32	50,95
rc105	68,16	64,45	4,09	12,33	56,11	45,15
rc106	58,40	55,67	3,89	9,93	57,61	46,21
rc107	55,45	52,96	4,73	10,13	57,74	47,32
rc108	51,49	50,17	5,95	10,17	59,35	51,23
rc201	77,39	73,23	3,12	5,20	58,53	46,80
rc202	67,12	64,56	4,06	6,47	60,82	50,66
rc203	57,99	55,36	4,93	5,83	59,20	48,81
rc204	44,73	42,64	6,17	4,97	57,56	48,37
rc205	68,44	64,73	3,86	7,80	61,36	49,93
rc206	60,27	57,46	3,92	3,90	55,93	44,63
rc207	58,42	56,39	4,36	4,03	54,26	45,59
rc208	49,49	46,53	5,58	3,10	51,73	41,57
Média	59,93	57,24	4,54	7,99	57,56	47,32

Tabela A.4: Conjunto UK\_10 - 10 nós e 5 períodos de tempo

Instância	Emissão	Distância	Tempo	N. Rotas	V. Média	V. M. Pond
UK_10_1	11,00	10,74	0,03	2,00	59,00	49,24
UK_10_2	9,80	9,76	0,02	1,00	50,65	49,20
UK_10_3	10,96	10,38	0,04	2,00	41,73	38,07
UK_10_4	9,67	9,72	0,03	1,00	56,95	60,49
UK_10_5	10,05	9,98	0,03	1,00	60,24	53,38
UK_10_6	12,89	12,60	0,03	1,00	58,73	51,12
UK_10_7	9,65	9,95	0,03	1,00	63,23	58,40
UK_10_8	11,84	12,02	0,04	2,00	51,92	49,45
UK_10_9	9,16	9,28	0,03	1,00	57,50	54,90
UK_10_10	9,90	10,05	0,03	1,00	61,05	56,52
UK_10_11	11,74	11,91	0,03	1,00	57,01	51,78
UK_10_12	8,50	8,50	0,03	1,00	56,80	55,61
UK_10_13	10,12	10,18	0,03	1,00	61,17	54,11
UK_10_14	12,57	11,78	0,03	1,00	60,73	55,10
UK_10_15	9,83	9,70	0,03	1,00	49,61	49,90
UK_10_16	14,10	14,02	0,04	2,00	57,10	52,74
UK_10_17	9,27	9,21	0,02	1,00	64,36	54,45
UK_10_18	10,78	10,76	0,02	1,00	63,00	64,49
UK_10_19	10,06	9,96	0,03	1,00	53,10	48,43
UK_10_20	9,89	9,79	0,05	2,00	51,89	46,13
Média	10,59	10,51	0,03	1,25	56,79	52,67

Tabela A.5: Conjunto UK\_15 - 15 nós e 5 períodos de tempo

Instância	Emissão	Distância	Tempo	N. Rotas	V. Média	V. M. Pond
UK_15_1	11,27	11,10	0,11	2,00	53,77	47,05
UK_15_2	10,00	10,42	0,11	2,00	57,41	54,40
UK_15_3	12,41	12,10	0,09	2,00	52,53	45,29
UK_15_4	13,04	12,82	0,11	2,00	52,35	46,90
UK_15_5	12,94	12,84	0,10	2,00	52,96	47,64
UK_15_6	14,39	14,30	0,12	2,00	52,62	47,59
UK_15_7	10,36	9,99	0,09	2,00	56,15	44,34
UK_15_8	13,34	13,44	0,11	2,00	64,29	59,23
UK_15_9	11,57	11,62	0,11	2,00	53,69	53,47
UK_15_10	13,36	13,28	0,11	2,00	52,16	47,44
UK_15_11	11,98	12,01	0,10	2,00	52,81	49,61
UK_15_12	13,10	13,41	0,11	2,00	58,89	56,23
UK_15_13	12,39	12,15	0,08	2,00	46,05	44,54
UK_15_14	14,65	14,44	0,09	2,00	54,51	49,50
UK_15_15	13,68	13,12	0,10	2,00	48,52	41,65
UK_15_16	14,66	14,32	0,10	2,00	56,09	49,35
UK_15_17	14,44	14,30	0,08	2,00	56,14	49,95
UK_15_18	13,25	12,92	0,10	2,00	54,53	48,80
UK_15_19	11,29	11,44	0,10	2,00	56,01	52,55
UK_15_20	10,35	10,30	0,10	2,00	52,93	48,57
Média	12,62	12,52	0,10	2,00	54,22	49,21

Tabela A.6: Conjunto UK\_20 - 20 nós e 5 períodos de tempo

Instância	Emissão	Distância	Tempo	N. Rotas	V. Média	V. M. Pond
UK_20_1	15,51	14,67	0,15	2,10	50,78	42,40
UK_20_2	18,02	16,75	0,17	2,00	48,44	41,99
UK_20_3	12,91	12,26	0,17	2,00	47,29	41,01
UK_20_4	13,47	13,22	0,15	2,97	57,50	49,13
UK_20_5	15,37	14,34	0,15	2,03	48,17	41,85
UK_20_6	7,85	7,83	0,22	3,00	51,38	46,52
UK_20_7	16,31	16,14	0,19	2,00	57,72	53,36
UK_20_8	12,81	12,14	0,14	3,00	50,94	42,21
UK_20_9	15,33	14,61	0,21	2,00	49,90	43,12
UK_20_10	13,67	12,83	0,12	2,17	46,61	40,15
UK_20_11	18,10	17,03	0,22	3,00	45,93	39,42
UK_20_12	13,78	13,42	0,19	2,00	55,25	48,83
UK_20_13	16,51	15,57	0,20	2,00	49,81	41,67
UK_20_14	16,96	16,71	0,16	3,00	54,62	48,96
UK_20_15	17,19	16,77	0,15	2,43	53,11	46,13
UK_20_16	16,16	15,54	0,19	3,00	50,04	44,64
UK_20_17	9,22	8,90	0,15	2,00	50,74	48,29
UK_20_18	15,13	14,26	0,18	3,00	49,25	41,95
UK_20_19	15,95	15,27	0,10	2,07	52,57	44,83
UK_20_20	17,61	16,87	0,19	2,00	51,90	44,54
Média	14,89	14,26	0,17	2,39	51,10	44,55

Tabela A.7: Conjunto UK\_25 - 25 nós e 5 períodos de tempo

Instância	Emissão	Distância	Tempo	N. Rotas	V. Média	V. M. Pond
UK_25_1	18,28	18,49	0,41	3,00	57,96	53,94
UK_25_2	16,16	16,23	0,33	3,00	55,56	51,10
UK_25_3	16,71	16,24	0,35	3,00	53,01	46,77
UK_25_4	16,47	15,74	0,34	2,23	48,94	42,60
UK_25_5	18,20	18,01	0,34	3,00	55,00	50,75
UK_25_6	14,29	14,18	0,38	3,00	51,50	47,21
UK_25_7	20,37	19,43	0,28	3,00	54,52	47,66
UK_25_8	21,49	20,94	0,39	3,00	51,97	47,71
UK_25_9	14,40	13,52	0,32	3,00	45,01	38,99
UK_25_10	24,41	23,56	0,34	3,00	49,36	45,19
UK_25_11	19,33	19,04	0,35	3,00	54,65	49,52
UK_25_12	19,89	18,95	0,34	3,00	47,38	41,48
UK_25_13	18,33	17,97	0,38	3,00	50,15	45,32
UK_25_14	16,75	16,44	0,36	3,00	54,93	50,19
UK_25_15	20,35	18,95	0,23	2,20	47,38	39,51
UK_25_16	17,66	17,43	0,36	3,00	51,14	47,33
UK_25_17	20,45	19,33	0,32	3,03	51,91	42,93
UK_25_18	20,47	18,88	0,23	3,00	44,77	37,78
UK_25_19	19,26	18,83	0,32	3,00	56,66	49,32
UK_25_20	16,64	16,37	0,28	3,13	55,33	49,91
Média	18,50	17,93	0,33	2,93	51,86	46,26

Tabela A.8: Conjunto UK\_50 - 50 nós e 5 períodos de tempo

Instância	Emissão	Distância	Tempo	N. Rotas	V. Média	V. M. Pond
UK_50_1	39,13	37,71	0,74	5,60	51,66	44,73
UK_50_2	39,97	37,94	0,72	5,17	50,20	42,63
UK_50_3	34,70	33,89	0,81	6,03	52,27	46,35
UK_50_4	46,81	44,76	0,80	6,00	50,43	44,15
UK_50_5	41,01	38,69	0,94	5,00	47,47	40,21
UK_50_6	40,42	38,21	0,84	6,00	48,73	41,54
UK_50_7	38,48	37,02	0,84	5,13	51,19	44,63
UK_50_8	38,97	37,76	0,73	5,10	50,24	45,32
UK_50_9	43,53	40,77	0,83	5,53	47,35	40,32
UK_50_10	35,67	34,46	0,69	5,57	52,85	46,94
UK_50_11	41,48	39,68	0,78	5,07	51,75	44,07
UK_50_12	34,44	33,65	0,77	5,00	53,41	47,33
UK_50_13	17,54	17,20	0,78	5,43	51,72	46,68
UK_50_14	39,24	38,36	0,84	5,50	53,44	47,63
UK_50_15	34,50	33,64	0,86	5,00	56,14	48,30
UK_50_16	35,87	34,45	0,79	5,00	52,00	45,50
UK_50_17	33,07	32,80	0,75	5,97	54,14	51,12
UK_50_18	45,21	43,44	0,74	6,00	51,80	44,84
UK_50_19	39,01	37,84	0,71	5,27	51,41	45,59
UK_50_20	40,61	38,98	0,72	5,80	52,39	46,19
Média	37,98	36,56	0,78	5,46	51,53	45,20

Tabela A.9: Conjunto UK\_75 - 75 nós e 5 períodos de tempo

Instância	Emissão	Distância	Tempo	N. Rotas	V. Média	V. M. Pond
UK_75_1	66,00	63,32	1,36	8,60	51,37	44,28
UK_75_2	57,37	55,69	1,28	8,50	52,29	46,78
UK_75_3	63,48	60,21	1,34	7,63	50,96	43,75
UK_75_4	56,54	53,90	1,21	8,23	51,55	43,99
UK_75_5	66,02	63,10	1,45	7,80	50,05	43,20
UK_75_6	66,88	63,37	1,26	8,17	49,14	42,03
UK_75_7	66,21	62,18	1,30	8,37	49,01	41,63
UK_75_8	61,84	58,12	1,20	8,07	48,07	41,10
UK_75_9	68,73	65,02	1,27	7,63	50,06	42,80
UK_75_10	69,30	65,91	1,34	8,03	49,58	42,89
UK_75_11	49,83	48,42	1,49	8,00	52,93	46,93
UK_75_12	62,97	58,94	1,36	7,17	49,10	40,22
UK_75_13	71,57	68,65	1,47	8,03	51,93	44,74
UK_75_14	66,90	64,22	1,58	8,03	51,86	44,92
UK_75_15	71,20	67,70	1,31	8,00	49,18	42,79
UK_75_16	67,21	62,97	1,45	8,03	47,58	40,68
UK_75_17	67,63	63,93	1,38	8,07	51,19	43,06
UK_75_18	60,32	57,84	1,46	8,07	50,78	44,45
UK_75_19	62,39	58,03	1,50	8,03	45,38	38,34
UK_75_20	66,47	62,90	1,29	8,10	46,90	40,94
Média	64,44	61,22	1,36	8,03	49,95	42,98

Tabela A.10: Conjunto UK\_100 - 100 nós e 5 períodos de tempo

Instância	Emissão	Distância	Tempo	N. Rotas	V. Média	V. M. Pond
UK_100_1	88,13	83,95	2,03	10,40	51,98	43,84
UK_100_2	85,26	81,28	2,25	9,97	51,29	44,03
UK_100_3	74,28	71,92	2,22	10,13	54,62	47,27
UK_100_4	75,31	71,49	2,13	11,07	49,53	42,56
UK_100_5	68,11	65,91	2,29	11,10	53,02	46,30
UK_100_6	88,09	83,88	2,04	11,03	52,13	44,13
UK_100_7	78,97	75,78	2,31	9,67	51,52	44,53
UK_100_8	79,00	76,20	2,20	9,53	52,60	45,68
UK_100_9	67,12	64,15	2,42	9,90	50,70	43,96
UK_100_10	81,68	77,53	2,20	9,27	51,75	43,34
UK_100_11	86,92	82,60	2,61	11,30	51,09	43,43
UK_100_12	75,90	72,34	2,04	9,40	51,10	44,26
UK_100_13	84,72	80,70	2,11	10,03	51,64	43,79
UK_100_14	91,65	86,70	2,30	10,67	50,53	42,55
UK_100_15	94,11	88,90	2,33	11,33	49,41	42,06
UK_100_16	76,14	72,09	2,27	9,40	48,58	42,04
UK_100_17	91,09	85,81	2,32	11,37	50,16	42,22
UK_100_18	80,33	75,87	2,36	9,77	48,11	41,50
UK_100_19	72,76	70,13	2,32	10,03	51,21	45,27
UK_100_20	89,95	84,91	2,43	10,70	49,46	42,47
Média	81,48	77,61	2,26	10,30	51,02	43,76

## B Melhor solução - ILS

As Tabelas de B.1 até B.10 mostram os valores de emissão em kg, distância em km, número de rotas, velocidade média em km/h, e velocidade média ponderada pelo de viagem em km/h para a melhor solução dentre as 30 execuções da abordagem ILS para cada instância.

Tabela B.1: Conjunto C - 100 nós e 10 períodos de tempo

Instância	Emissão	Distância	N. Rotas	V. Média	V. M. Pond
c101	49,90	38,56	12,00	45,10	24,30
c102	52,04	45,89	13,00	54,11	37,70
c103	46,36	43,22	12,00	58,96	47,64
c104	43,33	41,28	11,00	60,88	54,30
c105	43,13	37,82	11,00	55,82	39,39
c106	42,78	38,98	11,00	57,02	45,62
c107	41,05	34,87	10,00	49,37	32,60
c108	37,95	34,88	10,00	58,07	44,53
c109	43,07	38,55	10,00	55,25	38,59
c201	32,61	26,81	3,00	46,88	28,31
c202	41,48	35,16	7,00	55,43	32,49
c203	42,30	38,34	9,00	58,92	43,89
c204	40,66	38,23	7,00	55,91	44,67
c205	32,45	28,86	4,00	53,91	35,80
c206	33,22	29,28	3,00	52,21	36,59
c207	35,11	29,28	3,00	54,00	30,53
c208	31,07	27,57	3,00	52,21	35,19
Média	40,50	35,74	8,18	54,36	38,36

Tabela B.2: Conjunto R - 100 nós e 10 períodos de tempo

Instância	Emissão	Distância	N. Rotas	V. Média	V. M. Pond
r101	87,06	78,68	18,00	55,48	40,31
r102	75,73	70,55	14,00	56,55	44,52
r103	61,17	58,27	13,00	61,17	48,16
r104	47,88	46,49	11,00	61,77	53,20
r105	64,52	63,34	10,00	58,36	52,04
r106	54,84	53,37	10,00	56,89	47,87
r107	53,16	49,74	9,00	58,52	44,27
r108	44,12	43,26	9,00	57,99	51,05
r109	53,24	49,83	10,00	54,24	41,76
r110	48,50	46,78	10,00	56,00	46,15
r111	50,01	48,38	9,00	56,19	47,35
r112	45,31	44,25	9,00	60,83	55,05
r201	65,89	62,06	5,00	58,75	44,12
r202	60,86	57,68	5,00	53,98	44,85
r203	54,54	54,82	5,00	61,87	56,29
r204	43,20	42,07	5,00	57,44	49,02
r205	56,58	54,95	4,00	51,99	44,96
r206	51,60	48,88	5,00	53,53	41,37
r207	48,04	45,97	5,00	59,88	48,04
r208	42,85	40,63	4,00	55,71	47,16
r209	49,85	46,95	4,00	58,56	45,51
r210	52,37	52,03	6,00	59,21	53,87
r211	45,43	43,26	3,00	60,66	51,94
Média	54,64	52,27	7,96	57,63	47,78

Tabela B.3: Conjunto RC - 100 nós e 10 períodos de tempo

Instância	Emissão	Distância	N. Rotas	V. Média	V. M. Pond
rc101	63,07	58,16	12,00	56,11	41,57
rc102	56,75	54,22	11,00	59,56	49,54
rc103	52,78	52,24	11,00	59,32	53,22
rc104	48,24	47,63	9,00	58,98	50,72
rc105	63,85	61,70	14,00	60,43	52,97
rc106	52,67	51,65	10,00	60,86	53,07
rc107	51,97	50,02	10,00	58,15	47,81
rc108	47,47	46,76	10,00	59,96	53,97
rc201	69,85	65,28	8,00	60,77	45,85
rc202	60,47	57,45	7,00	58,00	47,84
rc203	51,89	49,53	5,00	62,31	51,54
rc204	42,90	41,05	6,00	57,42	49,21
rc205	64,43	61,93	7,00	63,08	52,28
rc206	53,66	53,26	4,00	57,82	51,32
rc207	51,39	49,52	5,00	54,26	45,51
rc208	41,81	40,09	3,00	53,17	42,60
Média	54,57	52,53	8,25	58,76	49,31

Tabela B.4: Conjunto UK\_10 - 10 nós e 5 períodos de tempo

Instância	Emissão	Distância	N. Rotas	V. Média	V. M. Pond
UK_10_1	11,00	10,74	2,00	59,00	49,24
UK_10_2	9,80	9,76	1,00	50,65	49,20
UK_10_3	10,88	10,42	2,00	42,00	38,70
UK_10_4	9,67	9,72	1,00	56,95	60,49
UK_10_5	9,87	9,84	1,00	62,48	55,13
UK_10_6	12,89	12,60	1,00	58,73	51,12
UK_10_7	9,65	9,95	1,00	63,23	58,40
UK_10_8	11,58	12,02	2,00	49,83	49,39
UK_10_9	9,13	9,28	1,00	57,91	55,71
UK_10_10	9,89	10,06	1,00	61,36	56,82
UK_10_11	11,61	11,87	1,00	58,27	53,21
UK_10_12	8,50	8,53	1,00	57,27	55,90
UK_10_13	10,02	10,10	1,00	61,07	54,32
UK_10_14	12,57	11,78	1,00	60,73	55,10
UK_10_15	9,83	9,70	1,00	49,61	49,90
UK_10_16	13,96	14,38	2,00	57,68	54,00
UK_10_17	9,27	9,21	1,00	64,36	54,45
UK_10_18	10,78	10,76	1,00	63,00	64,49
UK_10_19	10,06	9,96	1,00	53,10	48,43
UK_10_20	9,88	9,79	2,00	52,08	46,28
Média	10,54	10,52	1,25	56,97	53,01

Tabela B.5: Conjunto UK\_15 - 15 nós e 5 períodos de tempo

Instância	Emissão	Distância	N. Rotas	V. Média	V. M. Pond
UK_15_1	11,06	11,00	2,00	47,71	45,12
UK_15_2	9,96	10,38	2,00	56,92	53,69
UK_15_3	12,03	11,80	2,00	56,71	49,06
UK_15_4	12,60	12,59	2,00	55,71	51,99
UK_15_5	12,43	12,67	2,00	54,59	51,09
UK_15_6	13,29	13,49	2,00	55,08	49,69
UK_15_7	10,16	9,82	2,00	58,18	45,80
UK_15_8	13,12	13,13	2,00	63,33	56,67
UK_15_9	11,42	11,46	2,00	56,21	51,41
UK_15_10	13,04	12,94	2,00	52,24	46,22
UK_15_11	11,27	11,52	2,00	55,24	53,64
UK_15_12	12,96	13,21	2,00	60,08	55,71
UK_15_13	11,63	11,45	2,00	53,62	51,32
UK_15_14	13,79	14,02	2,00	51,65	47,48
UK_15_15	13,61	13,11	2,00	49,00	42,32
UK_15_16	14,10	14,22	2,00	56,12	52,66
UK_15_17	14,19	14,03	2,00	53,76	49,76
UK_15_18	13,21	12,88	2,00	54,06	48,42
UK_15_19	10,94	11,17	2,00	55,95	52,25
UK_15_20	9,97	9,89	2,00	52,87	46,57
Média	12,24	12,24	2,00	54,95	50,04



Tabela B.6: Conjunto UK\_20 - 20 nós e 5 períodos de tempo

Instância	Emissão	Distância	N. Rotas	V. Média	V. M. Pond
UK_20_1	14,25	13,31	3,00	46,25	37,66
UK_20_2	16,65	15,46	2,00	46,42	38,84
UK_20_3	11,13	11,34	2,00	60,34	56,91
UK_20_4	13,13	12,76	3,00	53,04	46,53
UK_20_5	14,97	14,12	2,00	52,53	44,98
UK_20_6	7,47	7,49	3,00	52,91	48,35
UK_20_7	14,97	15,19	2,00	57,04	56,16
UK_20_8	12,31	11,83	3,00	54,78	46,87
UK_20_9	14,10	13,72	2,00	53,55	48,01
UK_20_10	12,69	12,21	2,00	48,23	41,93
UK_20_11	16,80	16,46	3,00	52,48	47,51
UK_20_12	12,55	12,30	2,00	55,82	51,16
UK_20_13	15,48	15,04	2,00	53,68	46,02
UK_20_14	16,02	15,88	3,00	63,35	56,42
UK_20_15	16,84	16,77	3,00	49,39	46,01
UK_20_16	14,52	14,67	3,00	54,19	49,68
UK_20_17	8,46	8,40	2,00	56,00	56,12
UK_20_18	13,48	13,31	3,00	55,57	49,39
UK_20_19	15,50	15,31	3,00	54,41	49,33
UK_20_20	16,49	15,80	2,00	52,50	43,49
Média	13,89	13,57	2,50	53,62	48,07

Tabela B.7: Conjunto UK\_25 - 25 nós e 5 períodos de tempo

Instância	Emissão	Distância	N. Rotas	V. Média	V. M. Pond
UK_25_1	17,80	17,18	3,00	52,99	45,21
UK_25_2	15,31	15,73	3,00	60,93	58,72
UK_25_3	15,69	15,74	3,00	57,14	51,64
UK_25_4	15,40	14,74	2,00	56,26	45,38
UK_25_5	17,13	17,15	3,00	62,29	55,34
UK_25_6	13,85	14,04	3,00	56,50	53,59
UK_25_7	19,30	18,73	3,00	60,39	53,70
UK_25_8	20,90	20,63	3,00	52,82	49,83
UK_25_9	13,65	13,05	3,00	47,56	40,61
UK_25_10	23,27	23,14	3,00	56,99	55,96
UK_25_11	18,19	18,45	3,00	58,36	54,58
UK_25_12	18,84	18,34	3,00	52,61	46,23
UK_25_13	17,06	16,98	3,00	52,97	48,24
UK_25_14	16,45	16,30	3,00	56,93	52,58
UK_25_15	18,76	18,79	3,00	52,12	47,85
UK_25_16	16,51	16,29	3,00	51,32	49,26
UK_25_17	18,79	18,18	3,00	52,27	45,29
UK_25_18	18,95	18,17	3,00	44,99	40,00
UK_25_19	19,01	18,74	3,00	58,39	51,11
UK_25_20	15,56	15,86	4,00	58,59	54,76
Média	17,52	17,31	3,00	55,12	49,99

Tabela B.8: Conjunto UK\_50 - 50 nós e 5 períodos de tempo

Instância	Emissão	Distância	N. Rotas	V. Média	V. M. Pond
UK_50_1	37,44	36,20	6,00	48,24	42,05
UK_50_2	37,27	36,68	6,00	51,16	46,89
UK_50_3	32,29	31,83	6,00	55,24	50,03
UK_50_4	44,84	44,86	6,00	54,56	51,74
UK_50_5	38,90	38,42	5,00	53,07	48,17
UK_50_6	38,03	36,01	6,00	49,92	41,43
UK_50_7	36,16	35,17	5,00	53,43	46,49
UK_50_8	36,31	35,78	5,00	54,38	50,34
UK_50_9	42,01	39,68	5,00	49,11	41,85
UK_50_10	33,51	32,68	5,00	55,71	50,42
UK_50_11	39,81	38,45	5,00	54,22	45,66
UK_50_12	33,70	33,61	5,00	55,78	50,97
UK_50_13	16,55	16,41	5,00	54,41	49,42
UK_50_14	37,34	37,07	5,00	55,83	51,17
UK_50_15	33,47	32,87	5,00	55,80	48,49
UK_50_16	33,22	32,21	5,00	55,12	50,31
UK_50_17	32,21	31,93	6,00	55,46	53,64
UK_50_18	42,87	41,25	6,00	52,80	44,43
UK_50_19	36,84	34,91	5,00	46,96	40,55
UK_50_20	39,23	38,93	6,00	55,31	50,47
Média	36,10	35,25	5,40	53,33	47,72

Tabela B.9: Conjunto UK\_75 - 75 nós e 5 períodos de tempo

Instância	Emissão	Distância	N. Rotas	V. Média	V. M. Pond
UK_75_1	63,30	61,76	9,00	51,07	46,25
UK_75_2	55,74	53,12	8,00	49,83	44,46
UK_75_3	60,90	58,87	8,00	55,69	48,40
UK_75_4	53,35	50,78	8,00	50,39	42,11
UK_75_5	63,87	61,76	8,00	49,61	44,24
UK_75_6	62,92	62,84	9,00	55,81	50,15
UK_75_7	63,16	60,98	9,00	51,86	45,74
UK_75_8	58,19	56,44	8,00	50,67	44,62
UK_75_9	66,25	62,20	7,00	49,61	40,83
UK_75_10	65,31	62,12	8,00	49,02	43,65
UK_75_11	47,29	46,57	8,00	55,14	51,30
UK_75_12	61,10	57,95	8,00	48,77	41,57
UK_75_13	69,81	65,65	8,00	49,97	42,76
UK_75_14	63,19	63,87	8,00	58,24	55,43
UK_75_15	67,34	64,85	8,00	54,43	47,35
UK_75_16	64,35	61,39	8,00	50,03	44,16
UK_75_17	64,36	62,38	9,00	51,37	45,58
UK_75_18	56,19	53,39	8,00	46,65	42,68
UK_75_19	59,63	57,22	8,00	49,75	43,36
UK_75_20	63,07	60,18	8,00	44,01	40,49
Média	61,47	59,22	8,15	51,10	45,26

Tabela B.10: Conjunto UK\_100 - 100 nós e 5 períodos de tempo

Instância	Emissão	Distância	N. Rotas	V. Média	V. M. Pond
UK_100_1	83,54	79,55	10,00	51,00	43,21
UK_100_2	81,94	77,90	10,00	52,20	43,46
UK_100_3	72,90	70,12	10,00	51,38	45,22
UK_100_4	72,21	68,26	11,00	50,48	42,59
UK_100_5	65,42	63,16	11,00	53,03	47,54
UK_100_6	84,20	78,85	11,00	50,32	41,32
UK_100_7	75,70	71,56	10,00	48,96	42,09
UK_100_8	76,28	73,42	9,00	54,80	45,42
UK_100_9	64,77	62,58	10,00	56,52	49,32
UK_100_10	77,55	77,27	10,00	55,63	51,01
UK_100_11	84,35	81,05	12,00	55,31	48,08
UK_100_12	73,14	72,09	10,00	54,43	50,08
UK_100_13	81,73	79,50	10,00	55,95	47,65
UK_100_14	87,48	85,22	11,00	55,74	48,02
UK_100_15	90,87	86,92	12,00	50,30	44,01
UK_100_16	72,28	66,75	9,00	44,41	37,49
UK_100_17	86,33	83,74	11,00	56,31	48,67
UK_100_18	76,41	73,73	10,00	50,22	45,17
UK_100_19	69,93	68,86	10,00	56,25	50,25
UK_100_20	86,57	81,81	11,00	50,10	42,87
Média	78,18	75,12	10,40	52,67	45,67