



CAROLINA CORREA DE CARVALHO

**OTIMIZAÇÃO DINÂMICA DA LOGÍSTICA DE
DISTRIBUIÇÃO DE PRODUTOS ALIMENTÍCIOS
REFRIGERADOS E CONGELADOS**

CAMPINAS

2013



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

CAROLINA CORREA DE CARVALHO

**OTIMIZAÇÃO DINÂMICA DA LOGÍSTICA DE
DISTRIBUIÇÃO DE PRODUTOS ALIMENTÍCIOS
REFRIGERADOS E CONGELADOS**

Orientador: Prof. Dr. Orlando Fontes Lima Junior

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós- Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título Doutora em Engenharia Civil na área de concentração de Transportes.

**ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA
PELA ALUNA CAROLINA CORREA DE CARVALHO E ORIENTADA PELO
PROF. DR. ORLANDO FONTES LIMA JUNIOR.**

ASSINATURA DO ORIENTADOR

CAMPINAS

2013

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Elizangela Aparecida dos Santos Souza - CRB 8/8098

C253o Carvalho, Carolina Corrêa de, 1982-
Otimização Dinâmica da Logística de Distribuição de Produtos Alimentícios Refrigerados e Congelados / Carolina Corrêa de Carvalho. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Orlando Fontes Lima Júnior.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Caixeiros viajantes. 2. Distribuição. 3. Cadeia do frio. 4. Temperatura. I. Lima Júnior, Orlando Fontes, 1958-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Dynamic optimization of distribution logistic of chilled and frozen products

Palavras-chave em inglês:

Travelling salesman

Distribution

Cold chain

Temperature

Área de concentração: Transportes

Titulação: Doutora em Engenharia Civil

Banca examinadora:

Orlando Fontes Lima Júnior [Orientador]

Antônio Galvão Naclério Novaes

Edson Tadeu Bez

Diogenes Cortijo Costa

Antonio Batocchio

Data de defesa: 17-12-2013

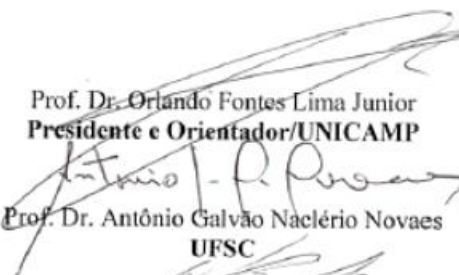
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA
E URBANISMO**

**OTIMIZAÇÃO DINÂMICA DA LOGÍSTICA DE
DISTRIBUIÇÃO DE PRODUTOS ALIMENTÍCIOS
REFRIGERADOS E CONGELADOS**

Carolina Correa de Carvalho

Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:


Prof. Dr. Orlando Fontes Lima Junior
Presidente e Orientador/UNICAMP

Prof. Dr. Antônio Galvão Naclério Novaes
UFSC


Prof. Dr. Edson Tadeu Bez
UNIVALI


Prof. Dr. Djoenes Cortijo Costa
UNICAMP


Prof. Dr. Antonio Batocchio
UNICAMP

Campinas, 17 de dezembro de 2013

RESUMO

O problema do transporte de produtos refrigerados e congelados é de grande importância e vem sendo cada vez mais estudado. Na cadeia do frio, o controle da temperatura é o fator determinante da qualidade e da validade de produtos alimentícios. Qualquer variação da temperatura fora da faixa padrão especificada ao produto pode levar a danos e perdas. Muitos trabalhos buscam entender o que acontece durante o processo de transporte com a temperatura da carga e do veículo, na qual é possível observar grandes variações deste parâmetro em função dos procedimentos pertencentes ao processo. Alguns elaboram modelos matemáticos que buscam exprimir o comportamento térmico do veículo e da qualidade do alimento em função do tempo decorrido no processo de transporte. Porém, quando se aborda o tema de roteirização de veículo dedicada exclusivamente ao tipo de carga que requer a manutenção adequada da temperatura, nota-se que ainda é uma área em desenvolvimento. Poucos trabalhos fazem uma abordagem de roteirização visando à preservação da qualidade da carga e, conseqüentemente, a manutenção da temperatura. No geral, modelos de roteirização buscam minimizar as variáveis relacionadas com custos operacionais, quase sempre expressas indiretamente através de medidas de tempo e de distância percorrida pelo veículo. Na sua grande maioria dos estudos, a otimização de problemas de roteirização é obtida com a aplicação de uma heurística do tipo PCV (Problema do Caixeiro Viajante). Entretanto, no processo de roteirização de um veículo envolvendo a distribuição de alimentos refrigerados e congelados, a variável temperatura deve ser incluída neste tipo de modelo, porém com certo cuidado, pois ela não apresenta um comportamento linear durante o percurso. Este cenário exige uma modelagem matemática específica, e obviamente mais complexa que respeite os limites de temperatura específicos ao alimento transportado e, ao mesmo tempo, assemelhe-se a situações reais. Deste modo, o objetivo do trabalho é desenvolver uma metodologia para roteirização dinâmica de veículo que combine o problema da variação da temperatura no transporte de alimento refrigerado e congelado a aspectos logísticos, melhorando assim o cenário atual de perdas e danos deste tipo de mercadoria. Esta metodologia foi aplicada a um cenário hipotético de distribuição utilizando a sequência do PCV. Foi possível constatar que este tipo de sequência, que busca menores distâncias, não consegue garantir as temperaturas ideais da carga transportada. Por outro lado, quando o algoritmo é aplicado novamente buscando soluções de sequências que garantam os índices térmicos e minimizam a distância, soluções ponderadas são obtidas. Além da contribuição acadêmica para a área de roteirização e modelagem dinâmica o presente trabalho visa auxiliar empresas que realizam o transporte e distribuição deste tipo de mercadoria.

Palavras chave: Roteirização dinâmica, problema do caixeiro viajante (PCV), carga refrigerada, temperatura, *simulated annealing*.

ABSTRACT

The transportation problem of refrigerated and frozen products is of great importance and is being increasingly studied. In the cold chain, temperature control is determinant of quality and shelf life of food products. Any variation of the temperature product out of range can lead to damage and loss. Many studies seek to understand what happens during the transportation process to load and vehicle temperature, in which is possible observe large variations of that parameter. Some of them, elaborate mathematical models that express the vehicle thermal behavior and the quality of the food according to elapsed time in the transport process. However, when addressing the issue of routing vehicle dedicated to this type of cargo, we note that it is still a developing area. Few studies make a routing approach in order to preserve the quality of the load and, consequently, the maintenance of temperature. Overall, routing models seek to minimize the variables related to operating costs, often expressed indirectly through measures of time and distance traveled by the vehicle. Mostly, the optimization of routing problems is obtained by applying a heuristic type PCV (TSP). However, in the routing vehicle process involving the distribution of chilled and frozen foods, the temperature variable should be included, but with some attention, since it does not present a linear behavior during the journey. This scenario requires a specific mathematical modeling, and obviously more complex than meets the specific temperature limits to food transported and at the same time, resemble to real situations. Thus, the aim of this work is to develop a methodology for dynamic vehicle routing that combines the problem of temperature variation in the transport of chilled and frozen food with logistics aspects, thus improving the current scenario of loss and damage of this type of products. This methodology was applied to a hypothetical distribution scenario using the sequence of the PCV. It was possible to show that this type of sequence, seeking shorter distances, can not guarantee the cargo optimal temperatures. On the other hand, when the algorithm is applied again looking for solutions that that can ensure thermal indices and minimize the distance, weighted solutions are obtained. Besides contributing to the academic research, the resulting developments will also contribute to the logistic practice, providing the transportation companies with elements to improve the distribution planning and to maintain the temperature limits inside the acceptable levels.

Keyword: dynamic routing, travelling salesman problem (TSP), refrigerated and frozen products, temperature, *simulated annealing*.

SUMARIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Importância e Relevância do Tema.....	1
1.2. O Problema de Pesquisa	2
1.3. Objetivo e Abrangência do Trabalho	6
1.3.1. Objetivo Geral.....	6
1.3.2. Objetivos Específicos	6
1.4. Estrutura do Trabalho.....	7
2. METODOLOGIA DE PESQUISA.....	9
Figura 1: Metodologia de Pesquisa.....	11
2.1. Metodologia para Roteirização de Veículo combinando otimização térmica e logística	12
2.1.1. Definição do Cenário de Estudo	12
2.1.2. Simulação do comportamento térmico do veículo.....	13
2.1.3. Funções Matemáticas de Comportamento Térmico do Veículo	14
2.1.4. Roteirização de Veículo Combinando Otimização Térmica e Logística	15
2.2. Avaliação da Metodologia Aplicada a Casos Reais.....	19
3. REVISÃO DA LITERATURA	21
3.1. ABORDAGEM ESPECIFICA DA CADEIA DO FRIO	21
3.1.1. Cadeia do Frio e Evolução.....	21
3.1.2. Modelos de Avaliação da Qualidade de Alimentos	30
3.1.3. Qualidade e a Importância da Temperatura.....	35
3.2. ABORDAGEM LOGÍSTICA AO PROCESSO DE TRANSPORTE.....	39
3.2.2. Desempenho Térmico de Veículos Refrigerado	41
3.2.2.1. Características do processo de transporte	41
3.2.2.2. Características do Veículo Refrigerado	47
3.2.3. Modelos de Desempenho Térmico de Veículo Refrigerado.....	58
3.2.3.1 Modelos Teóricos	59

3.2.3.2. Testes Laboratoriais.....	63
3.2.3.3. Levantamentos de Campo.....	65
3.2.3.4.. Utilização de TTI Associado à Simulação.....	71
3.2.4. Conceitos e Modelos de Roteirização de Veículo (VRP).....	72
4. PANORAMA GERAL DO PROBLEMA DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NO PROCESSO DE TRANSPORTE.....	83
5. ANÁLISE EXPLORATÓRIA E DESENVOLVIMENTO DO MODELO	89
5.1. Definição do Cenário de Estudo	89
5.2. Simulação do comportamento térmico do veículo.....	93
5.3. Funções Matemáticas de Comportamento Térmico do Veículo.....	98
5.4. Roteirização de Veículo Combinando Otimização Térmica e Logística	107
5.5. Avaliação da Metodologia Aplicada a Casos Reais.....	124
6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	129
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	135
APÊNDICES	145
<i>Apêndice 1: Coordenadas x e y dos pontos de clientes 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 e o depósito.</i>	<i>145</i>
<i>Apêndice 2: S.A. pseudo-código para o problema da distribuição de produto refrigerado</i>	<i>147</i>
<i>Apêndice 3: Procedimento de Monte Carlo para rotas genéricas de veículos.....</i>	<i>149</i>
<i>Apêndice 4: Quadros de coeficientes de variação CV simulações relativas a valores de CV variando de zero (configuração determinística básica) até 0,60.....</i>	<i>151</i>
<i>Apêndice 5: Programa Pascal para Roteirização de veículo combinando eficiência térmica e minimização da distância.....</i>	<i>157</i>
<i>Apêndice 6: Resultados Simulação CoolVan</i>	<i>167</i>
<i>Apêndice 7: Artigo aceito e apresentado no congresso nacional da Anpet 2012</i>	<i>171</i>
<i>Apêndice 8: Artigo aceito e apresentado no congresso internacional WCTR 2013</i>	<i>185</i>
<i>Apêndice 9: Artigo aceito e apresentado no congresso internacional ICPR22.....</i>	<i>207</i>
<i>Apêndice 10: Artigo aceito e apresentado no congresso nacional Anpet 2013.....</i>	<i>215</i>

DEDICATÓRIA

A minha irmã Júlia com muito amor
que me ensinou que a tamanha força interior
só pode ser achada em nós mesmos.

AGRADECIMENTOS

A instituição da UNICAMP pela oportunidade de desenvolvimento profissional e toda a estrutura de apoio oferecida. Ao Departamento de Geotecnia e Transportes pela atenção e auxílio. A secretaria de pós-graduação da FEC por toda assistência, organização e competência.

Ao apoio financeiro da Capes e da DFG – German Research Foundation que oferecem suporte ao projeto BRAGECRIM (Brasil/Alemanha) nº 2009-2, no qual este trabalho está inserido, e ao CNPq e PROAP pelo apoio financeiro ao pesquisador.

Aos colegas e amigos do LALT que contribuíram para o meu crescimento profissional e pessoal ao longo desta jornada.

Ao professor Lincoln de Camargo Neves Filho, do laboratório de Refrigeração da Faculdade de Engenharia de Alimentos (FEA – UNICAMP), por compartilhar seus conhecimentos acadêmicos, suas experiências práticas e seus materiais da área de refrigeração de alimentos.

Ao professor Orlando Fontes Lima Júnior mais uma vez pela oportunidade, paciência, questionamento, compreensão e contribuição. Com certeza levarei tudo com respeito e carinho nesta minha caminhada. Obrigada por ser educador acima de tudo.

Ao professor Antonio Galvão Naclério Novaes a quem tenho grande admiração, respeito e carinho. Obrigada por tornar o impossível possível e me fazer enxergar a beleza de amar o que faz e, ainda mais, fazer com amor. Obrigada por tudo.

Aos meus amigos da vida e irmão de caminhada que deixaram um pouquinho de si em mim. Dizem que somos o somatório de todos os que conhecemos e de tudo o que vivemos ou deixamos de viver. Por isso, eis me aqui com uma felicidade e valores incríveis. Muito Obrigada.

A minha grande família, que cada dia aumenta um bucado, por simplesmente existirem. "Só isso" já me bastava.

“Nenhum caminho é fácil o suficiente de ser atravessado sem tropeços, e nenhum é difícil o suficiente que não possa se atravessar. Em ambos os casos, independente dos obstáculos, é necessário exclusivamente uma coisa: coragem”.

Aghata Paredes

FIGURAS

Figura 1: Metodologia de Pesquisa.....	11
Figura 2: Evolução Capacidade frigorificada brasileira	25
Figura 3: Unidade de refrigeração por região brasileira.	26
Figura 4: Dez maiores Operadores logísticos frigorificados brasileiros.....	26
Figura 5: Produtos refrigerados e congelados transportados por via aérea para Europa	28
Figura 6: Produtos refrigerados e congelados exportados para Europa.....	29
Figura 7: Redução da qualidade pelos diferentes tipos de funções	32
Figura 8: Curva teórica de crescimento de microrganismos	34
Figura 9: Perda de açúcar em Aspargo em função do tempo e temperaturas	36
Figura 10: Perda da vida de prateleira por dia em função do tempo de vegetais e frutos típicos ..	37
Figura 11: Número bactérias (CFU/ g) em folhas alface não tratadas (■) e tratado (▲) com ions negativos e ozono em função do tempo.	38
Figura 12: Fração mássica de gelo em função da temperatura de um alimento congelado	38
Figura 13: Perda de qualidade do produto na distribuição.....	40
Figura 14: Variabilidade da Temperatura ao longo da cadeia do frio	41
Figura 15: Efeito da Temperatura Ambiente no Transporte (Veículo parado x movimento).....	44
Figura 16: Comportamento da temperatura entre os elos da cadeia do frio	45
Figura 17: Histórico de variação de temperatura	46
Figura 18: Classificação dos Veículos de transporte conforme operacionalidade	51
Figura 19: Exemplo de veículo semireboque com baú frigorífico e unidade de refrigeração	51
Figura 20: Métodos de circulação em veículos refrigerados.....	52
Figura 21: Sistema de distribuição de ar em veículo semireboque	53
Figura 22: Veículo multi-reboque de diferentes temperaturas	54
Figura 23: Sistema de distribuição de ar de veículo multi compartimentado	55
Figura 24: Desempenho térmico de veículo refrigerado com variação de sistemas: A Convencional e B duas aberturas de insuflação	57

Figura 25: Programa CoolVan.....	60
Figura 26: Histórico de variação de temperatura no sexto dia de monitoração	69
Figura 27: Mudança do tipo <i>2-opt</i>	77
Figura 28: Sequência geral computacional do Simulated Annealing	81
Figura 29: Distrito e clientes a serem atendido	90
Figura 30: Matriz de Distância entre o cliente i, j e o depósito.....	90
Figura 31: Roteiro de Entrega com base no PCV tipo <i>3-opt</i>	91
Figura 32: Plotagem dos dados de saídas da simulação no CoolVan	95
Figura 33: (A) Histograma dos TTIs ; (B)Frequência dos TTIs	97
Figura 34: Síntese das funções matemáticas de comportamento térmico de veículo	107
Figura 35: Histograma de TTIs do roteiro do <i>simulated annealing</i>	112
Figura 36: Mapa dos roteiros estáticos otimizados comparando-os com o PCV	113
Figura 37: Comportamento Cpk com atraso de 10 mim no cliente 8 - Roteiro Dinâmico	115
Figura 38: Comportamento Cpk Nova sequência com o atraso cliente 8 - Roteiro Dinâmico	116
Figura 39: Comportamento Cpk sequencia dinâmica do S.A.	120
Figura 40: Mapa dos roteiros estáticos otimizados comparando-os com o PCV	122

QUADROS

Quadro 1: Evolução de segmentos alimentícios brasileiros.....	29
Quadro 2: Tipos de resfriamento	31
Quadro 3: Potencias microbiológicos em função do tempo e temperatura de exposição.....	39
Quadro 4: Temperatura de carga congelada em diferentes estações	43
Quadro 5: Grupos de veículos isotérmicos e suas respectivas características	50
Quadro 6: Modelos clássicos de problemas de roteirização de veículos	74
Quadro 7: Panorama Geral do Problema da variação da temperatura no processo de transporte	88
Quadro 8 – Dados de Saída para a fase de linha de curso I	100
Quadro 9- Dados da fase de entrega de mercadoria para realização da regressão	103
Quadro 10- Dado de análise de significância e de <i>t student</i> dos parâmetros $\ln(\alpha_1)$, α_2 e β_{unl}	104
Quadro 11 - Dados d da fase de deslocamento entre clientes	105
Quadro 12- Dado de análise de significância e de <i>t student</i> dos parâmetros $\ln(\alpha_1)$, α_2 e α_3 para a etapa de deslocamento entre clientes	106
Quadro 13 Sequências de roteiros com base na restrição da distância à do desempenho térmico	111
Quadro 14: Probabilidade de ocorrência de $Cpk < 1.33$ para os 12 estágios em função do coeficiente de variação	124

TABELAS

Tabela 1: Dados da Programação de entrega pelo roteiro PCV	92
Tabela 2– Entradas Simulação no CoolVan.....	94
Tabela 3: Análise detalhada PCI da entrega no roteiro PCV	109

LISTA DE SIGLAS

ABIAF – Associação Brasileira da Indústria de Armazenagem Frigorificada
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAVA - Associação Nacional dos Fabricantes de Implementos Rodoviários
ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária.
ATP – *Agreements on the International Carriage of Perishable Food-stuffs*
CV – Coeficiente de Variação
IBF - Instituto Brasileiro do Frio
NBR - Norma Brasileira Regulamentadora
PCI – *Process Index capability*
PCV – Problema do Caixeiro Viajante
RFID - *Radio Frequency Identification*
SA – *Simulated Annealing*
TSM – *Travelling Salesman Problem*
TTI – *Time Temperature Integrator*
VRP – *Vehicle routing problem*

1. INTRODUÇÃO

1.1. Importância e Relevância do Tema

Mudanças do estilo de vida nas últimas décadas levaram ao aumento do consumo de alimentos refrigerados e congelados. Isto ocorre em função das vantagens que estes tipos de mercadorias podem oferecer como: facilidade e agilidade no preparo, preservação das propriedades sensoriais, físicas e organolépticas, aumento da validade, entre outros. Além desta crescente demanda, nota-se uma maior exigência dos consumidores que buscam produtos de qualidade. Estes dois fatores provocam alterações no setor, ocasionando o aumento da regulamentação e da fiscalização para este tipo de cadeia de suprimento que envolve o controle da temperatura (BOGOTAJ, 2005 e COULOMB, 2008). Este tipo de cadeia de suprimentos é conhecido como cadeia do frio e é definido por Heap (2006), IIR (2004) e Likar e Jevsnik (2006) como uma cadeia no qual é exigido um ambiente de temperatura controlada para garantir a integridade do produto manipulado, desde a produção até o consumidor final.

A manutenção da temperatura adequada à mercadoria comercializada é considerada como o fator crítico e determinante da qualidade e sanidade do produto comercializado (ESTRADA-FLORES e EDDY, 2006; JAMES et. al. 2006; PEREIRA *et. al.*, 2010). É fato que além dela outros fatores também podem afetar qualidade, tais como: (a) a qualidade inicial do produto, (b) a umidade relativa do ambiente, (c) o uso de atmosferas controladas ou modificadas durante a armazenagem ou trânsito, (d) o emprego de produtos químicos para o controle de perturbações fisiológicas; (e) o tratamento térmico para o controle da deterioração, (f) o uso de sistema de embalagem e de

manipulação, entre outros (HARVEY, 1978). Porém, a temperatura em grande parte determina a taxa de atividade microbiana, que é a principal causa da deterioração deste tipo de alimento, e que, portanto é considerada como parâmetro fundamental de estudo e análise deste trabalho.

A falta de controle das reações microbiológicas pode levar a perdas de qualidade do produto, sendo estas cumulativas e irreversíveis (HEAP, KIERSTAN e FORD, 1998). Este fato ressalta a necessidade de conhecer e respeitar as temperaturas limites, mínimas e máximas, específicas à carga, pois tanto as altas temperaturas quanto as baixas podem ocasionar danos e avarias. Portanto, assegurar este parâmetro ao longo da cadeia do frio, é essencial (PEREIRA et. al. 2010; IIR, 2004).

Cerca de 300 milhões de toneladas ao ano de produtos da cadeia do frio são perdidos em função de um processo de refrigeração deficiente ao longo da cadeia de suprimentos (IRR/UNEP, 2002). Para Hoffman (2006) e While (2007) estas perdas são ocasionadas devido as oscilação da temperatura ao longo da cadeia do frio, porém esses mesmos autores reconhecem que a maioria delas ocorre no processo de transporte. O estudo de While (2007) mostra que o transporte é um ponto crítico onde a temperatura varia ao longo do processo, ultrapassando as temperaturas limites superiores e inferiores requeridas pela carga, apontando a necessidade de maior atenção a este processo na cadeia do frio.

Juntamente às questões relacionadas com as falhas do processo de transporte e de cargas com elevada sensibilidade de variação de temperatura, faz-se necessário à realização de um monitoramento contínuo da temperatura ao longo do processo de transporte. Este monitoramento pode auxiliar na identificação dos tipos e dos níveis das perturbações que ocasionam estas variações (GIANNAKOURIU et. al. 2005). Desta forma, algumas proposições logísticas podem ser sugeridas para melhorar o cenário de perdas e danos deste tipo de mercadoria.

1.2. O Problema de Pesquisa

É reconhecido amplamente pelas autoridades sanitárias, indústrias e empresas varejistas de renome que os vários estágios do processo de transporte para produtos da cadeia do frio constituem segmentos críticos para a manutenção da temperatura e, conseqüentemente, requerem

monitoramento constante e adequado. Observa-se que as principais dificuldades são encontradas nos elos mais fracos ou interfaces da cadeia como, por exemplo, as operações de carregamento e de entregas de mercadorias, onde os produtos são geralmente manipulados em ambientes de temperatura menos controlada.

Questões operacionais são observadas e contribuem para a perda de qualidade dos produtos. Em muitos casos ocorrem problemas como: esperas excessivas nas plataformas de embarque, armazenagem em um ambiente inadequado, o processo lento de carregamento e entrega de mercadorias com a porta do veículo aberta durante período considerável etc., levando à elevação da temperatura além do permitido. De uma maneira geral, produtos alimentícios refrigerados que não sejam embalados, transportados e armazenados apropriadamente, também tendem a se deteriorar em tempo relativamente mais curto (GIANNAKOURETOS et al. 2005).

A distância entre a produção e o consumo é outro fator relevante. Um exemplo deste caso é a manutenção da temperatura ótima durante toda a cadeia do pós-colheita, é uma das tarefas mais difíceis, e que está longe do ideal. Mesmo quando o transporte rodoviário pode proporcionar temperaturas satisfatórias dentro dos limites aceitáveis, o tempo de deslocamento pode ser muito longo para prazos de validade curtos de produtos a serem transportados. Por outro lado, na entrega em curta e média distância, o produto refrigerado ou congelado pode estar sujeito a muitas aberturas de porta, na qual acontece a troca de calor com o ar externo, além do calor adquirido pela movimentação dos operadores responsáveis pela remoção e entrega dos produtos (JAMES et al. 2006; PEREIRA et al. 2010).

As aberturas frequentes de porta também podem levar a um aumento da cobertura do evaporador, o que resulta em uma redução de rendimento do equipamento e um aumento na necessidade de degelo (ESTRADA-FLORES e EDDY, 2006). A capacidade do sistema de refrigeração quando instalada no veículo deve suprir a necessidade de extensão das rotas, do volume de carga transportado, além de oferecer a potência adequada de resposta exigida para o resfriamento do veículo após a abertura de portas. O que muitas vezes não é observado na prática.

Outro ponto crítico no transporte deste tipo de mercadoria ocorre no carregamento do veículo. A carga deve ser embarcada com a temperatura situada dentro da faixa prescrita, pois a unidade de refrigeração do veículo não é projetada para resfriá-la, mas sim preservá-la dentro dos padrões adequados. O veículo deve ser pré-resfriado antes de seu carregamento (ESTRADA-FLORES e EDDY, 2006; PEREIRA et al. 2010).

Pereira et al. (2010) apresentam um caso real de distribuição de alimentos refrigerados e congelados realizado por uma empresa brasileira distribuidora de produtos refrigerados e congelados. Os autores abordam este problema e mostram a variação e o efeito térmico ocorrido em função de parâmetros inerentes ao processo, tais como: a abertura de portas, o ganho de gradiente térmico do ambiente externo, a não uniformidade da temperatura no interior do veículo, número de paradas, entre outros. Outros trabalhos que abordam o problema do processo de transporte na cadeia do frio são de Hoffman (2006) e While (2007). Os autores apontam para necessidade de melhorias de processo de controle e a manutenção da temperatura e, sobretudo, apontam o processo de transporte como fator crítico e de risco para a carga.

Com isso, é possível perceber que existe um aumento significativo de trabalhos científicos que estudam a necessidade do monitoramento e controle da temperatura no processo de distribuição de alimentos refrigerados e congelados. Muitos desses trabalhos expõem o cenário atual da variação da temperatura no processo de distribuição deste tipo de carga e, outros buscam entender o comportamento térmico no interior do veículo, elaborando modelos matemáticos (BANDURINA et al, 2011; ESTRADA-FLORES e EDDY, 2006; KOURTI, 2006; LUI et al. 2010; PEREIRA et al. 2010; TIJSKENS e POLDERDIJK, 1996; WANTEMAN, 2012; ZHANG et al. 1994). Esses trabalhos sugerem algumas práticas para melhorar a variação da temperatura ao longo do processo de distribuição, como o uso de cortinas térmicas na abertura de portas, o uso de embalagens reforçadas, o tratamento químico das mercadorias, e outras melhorias. No entanto, esses mesmos trabalhos não buscam uma abordagem do problema de variação da temperatura com base em melhorias dos roteiros de entregas, que é o foco deste trabalho.

Com base nessa discussão, o presente trabalho realizou uma ampla revisão da literatura nesta área de investigação, onde foi constatada uma lacuna de pesquisa para o problema de variação da

temperatura no processo de transporte de mercadoria refrigerada e congelada. Esta lacuna aponta a carência de trabalhos que propõem uma abordagem do problema a partir roteiros diferenciados que preservem a qualidade da carga durante o processo de transporte. No geral, modelos de roteirização buscam minimizar os custos operacionais, quase sempre expressos indiretamente através do tempo e da distância percorrida pelo veículo. Na sua grande maioria, a otimização de roteiro é obtida com a aplicação de uma heurística do tipo PCV (Problema do Caixeiro Viajante). No entanto, e como se verá adiante, este processo de roteirização de veículo, envolvendo a distribuição de produtos refrigerados e congelados, não respeita as temperaturas limites específicas a carga. Além disso, observa-se ampla variação da temperatura durante o processo, e que a mesma não varia de uma forma linear. Contudo, este cenário requer o desenvolvimento de uma modelagem matemática específica ao problema de roteirização deste tipo de carga, e obviamente mais complexa, que considere estes limites de temperatura no sentido de garantir a qualidade do produto transportado, e ao mesmo tempo otimize os atributos logísticos.

A proposta deste trabalho é estudar a variação da temperatura no interior do veículo durante os roteiros de transportes de alimentos refrigerados e congelados resultantes das aberturas de portas, distâncias entre os pontos de entregas, número de paradas, etc. que levam à perda significativa da qualidade da mercadoria. A questão de pesquisa deste trabalho é: Como melhorar o desempenho térmico do transporte de mercadorias refrigeradas e congeladas no sentido de preservar a qualidade do produto?

Este trabalho está inserido no projeto LogGlobal do programa BRAGECRIM – *Brazilian German Collaborative Research Initiative on Manufacturing Technology* coordenado pelo Prof. Dr. Antônio Galvão Novaes da UFSC e pelo Prof. Bernd Scholz-Reiter do BIBA – *Bremer Institut für Produktion und Logistik* - da Universidade de Bremen, com a participação do Laboratório de Aprendizagem em Logística e Transportes – LALT da UNICAMP no subproject S1-Risk Management in Global Supply Networks sob a coordenação do Prof. Dr. Eng. Orlando Fontes Lima Júnior colaborando com o subprojeto "A1 - *Development of a quasi-real-time scheduling approach for integrated production and logistics systems*". O programa é financiado pela CAPES e DFG – *Deutsche Forschungsgemeinschaft*.

1.3. Objetivo e Abrangência do Trabalho

1.3.1. Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é propor uma metodologia para roteirização de veículo que combine o problema da variação da temperatura no transporte de carga refrigerada e congelada com a eficiência logística (minimização de distância e tempo no roteiro).

1.3.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- ✓ Caracterizar o cenário atual do transporte de carga refrigerada e congelada e elaborar um panorama do problema;
- ✓ Avaliar o comportamento da temperatura no interior do veículo durante o transporte de mercadoria refrigerada e congelada para um roteiro de entrega utilizando o modelo convencional de roteirização, PCV (problema do caixeiro viajante).
- ✓ Propor funções matemáticas que expressem o comportamento térmico do veículo em função do tempo e da operação logística realizada.
- ✓ Elaborar um algoritmo para roteirização que conjugue a otimização de atributos que representem a capacidade térmica do percurso com atributos logísticos provenientes da modelagem clássica de roteirização.
- ✓ Avaliar a aplicação desta metodologia de roteirização para casos reais de transporte de mercadoria refrigerada e congelada, com o objetivo de entender seus limites e ganhos.

Além da contribuição acadêmica para a área de roteirização e modelagem dinâmica, o presente trabalho visa contribuir para a prática logística dando elementos para que empresas transportadoras aprimorem o planejamento de roteiros de distribuição incorporando as restrições de manutenção da temperatura dentro de limites aceitáveis.

1.4. Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturado em seis capítulos. O capítulo um é introdutório e apresenta o problema de pesquisa, objetivo e abrangência do trabalho. O capítulo dois mostra a metodologia de pesquisa e suas etapas de desenvolvimento. O capítulo três elabora a revisão da literatura com base em duas grandes abordagens, uma específica a cadeia do frio e outra com o foco logístico do processo de transporte. Estas duas abordagens permitiram a construção do panorama geral do problema da variação da temperatura no processo de transporte de mercadorias refrigeradas e congeladas, apresentado no capítulo quatro. O capítulo cinco mostra a aplicação da metodologia proposta para roteirização de veículo combinando o problema da variação da temperatura com a eficiência logística, além de trazer análises e discussões. Por último, o capítulo seis apresenta as conclusões e considerações finais do trabalho.

2. METODOLOGIA DE PESQUISA

A metodologia de pesquisa para o desenvolvimento do trabalho foi estruturada em cinco etapas: definição do problema de pesquisa; revisão da literatura; elaboração do panorama geral do problema de transporte de alimentos refrigerados e congelados, desenvolvimento da metodologia de roteirização de veículo; resultados e conclusões, Figura 1.

✓ A definição do problema é a etapa inicial do trabalho. Esta foi construída com base em estudos preliminares do tema, realizados a partir da identificação de trabalhos importantes relacionados à cadeia do frio.

✓ A revisão da literatura foi elaborada com base em duas diferentes abordagens: abordagem específica à cadeia do frio e abordagem logística do processo de transporte. A abordagem específica contempla o conceito da cadeia do frio e sua evolução, apresenta modelos de avaliação da qualidade dos alimentos refrigerados e congelados e a importância do controle da temperatura para este tipo de produto. Já a abordagem logística mostra como é o desempenho térmico dos veículos refrigerados, exibe modelos matemáticos que descrevem o comportamento deste desempenho térmico e apresenta conceitos e modelos matemáticos de roteirização de veículos.

✓ A terceira etapa trás o primeiro ganho deste trabalho: a construção de um panorama geral do problema da variação da temperatura no processo de transporte de alimentos refrigerados e congelados. Este foi construído com base na revisão da literatura a partir da síntese da abordagem específica da cadeia do frio e da abordagem logística do processo de transporte.

✓ Na etapa quatro é desenvolvida a metodologia para roteirização de veículo combinando o problema da variação da temperatura com a eficiência logística. Esta etapa é elaborada em quatro passos. No primeiro passo é definido o cenário de distribuição e o roteiro a ser estudado. No segundo passo este cenário é simulado para a obtenção do comportamento térmico do veículo ao longo do roteiro. No terceiro passo são elaboradas as funções matemáticas que exprimam o comportamento térmico do veículo em função do tempo. Estas deverão ser calibradas pelos dados obtidos pela simulação do cenário. No passo quatro é elaborado o algoritmo de roteirização, composto pelas funções matemáticas calibradas. Este tem como objetivo estimar os níveis de temperatura, passo a passo, considerando diferentes sequencias de entregas e otimizar os atributos térmicos e logísticos. Estes quatro passos que compõem a metodologia para roteirização são detalhados a seguir.

✓ Na etapa cinco são discutidos os resultados do trabalho avaliando a aplicação da metodologia de roteirização para casos reais e apresentando as conclusões e considerações finais.

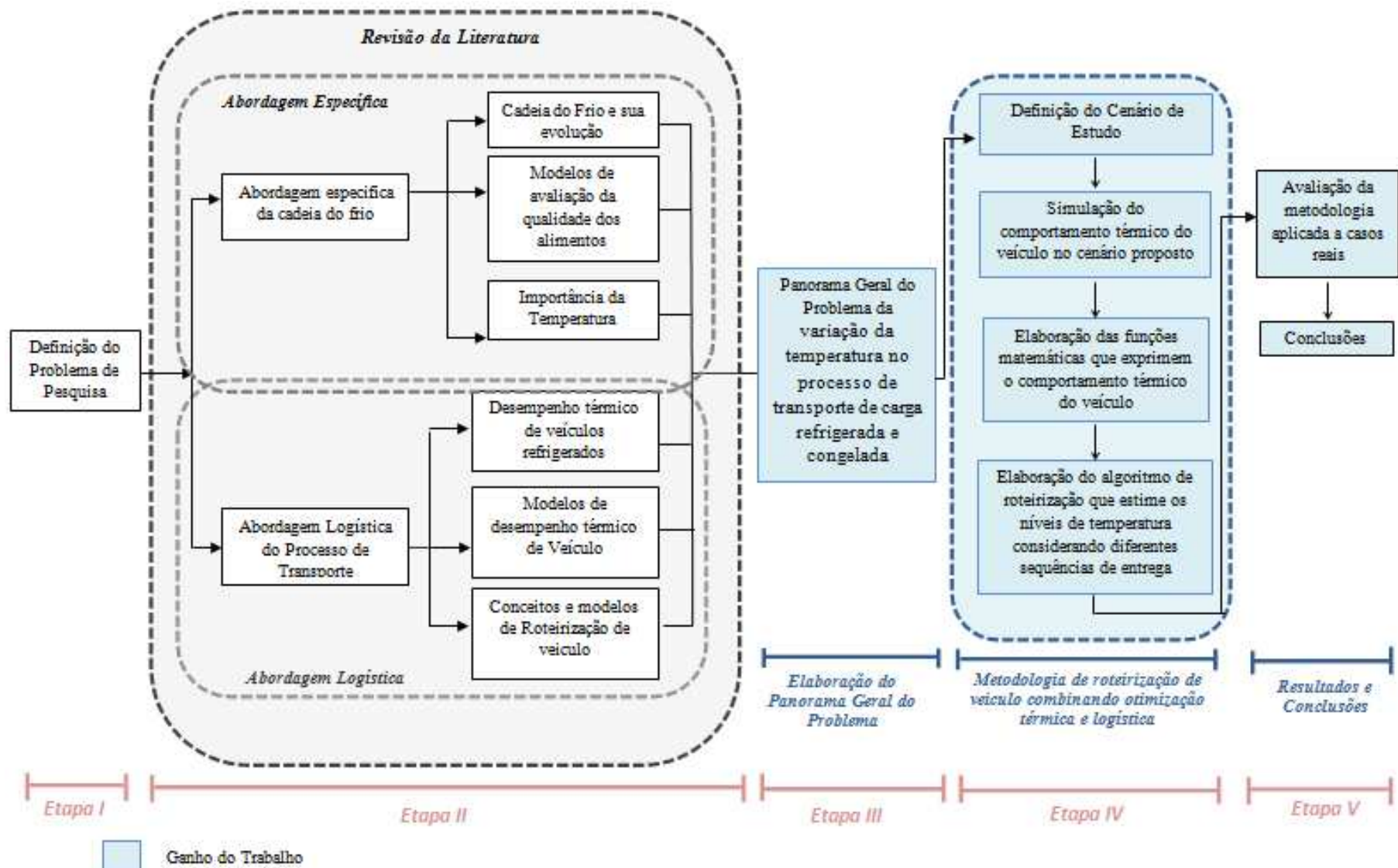


Figura 1: Metodologia de Pesquisa

2.1. Metodologia para Roteirização de Veículo combinando otimização térmica e logística

A metodologia para roteirização de veículo combinando otimização térmica e logística é elaborada em quatro passos: definição do cenário de distribuição e roteiro de estudo; simulação do comportamento térmico do veículo frente o cenário proposto; elaboração e calibração das funções matemáticas que expressem o comportamento térmico do veículo em função do tempo; e elaboração do algoritmo de roteirização que estime os níveis de temperatura, passo a passo, considerando diferentes sequências de entregas.

2.1.1. Definição do Cenário de Estudo

O cenário de estudo deve ser definido com base em cinco atributos importantes: região e clima; distrito, clientes e roteiro de entrega; veículo de transporte; equipamento de refrigeração; e carga transportada.

Região e o Clima

A região e o clima consistem em determinar onde será realizada a distribuição da mercadoria, ou seja, se esta acontecerá no cenário brasileiro onde o clima é tropical com temperaturas elevadas, ou em um cenário internacional como, por exemplo, a Inglaterra onde o clima no geral é frio e seco. Este passo é importante, pois definirá os níveis de temperatura ambiente nas quais a mercadoria transportada será exposta quando houver a abertura de porta, em uma entrega. Este ambiente poderá ter temperaturas elevadas ou temperaturas muito baixas.

Distrito, Clientes e Roteiro de Entrega

Deverá ser definido o distrito onde ocorrerá a distribuição de mercadoria, o número de clientes a serem visitados, as distâncias entre os clientes e o depósito, as quantidades de mercadorias a serem entregues a cada cliente e, por fim, a definição do roteiro de entrega. O roteiro poderá ser definido adotando algum modelo utilizado para problema de roteirização veículo.

Estes atributos são importantes, pois delimitam a zona de atuação das entregas, a extensão entre os clientes, o tamanho das entregas e a programação, ponto a ponto, do roteiro. Estes influenciam diretamente no comportamento térmico do veículo.

Veículo de Transporte

A escolha do veículo é importante, pois fornecerá as dimensões da câmara refrigerada e, conseqüentemente, determinará a capacidade máxima de volume de mercadoria embarcada. Também fornecerá dados técnicos importantes que afetam diretamente, de uma forma positiva ou não, a variação da temperatura do veículo no processo de transporte, como: espessura das paredes, material de isolamento, existência de prateleiras ou não e potência do motor.

Equipamento de Refrigeração

O equipamento de refrigeração é a peça chave do veículo refrigerado, pois é ele que dimensiona a capacidade térmica frigorífica que o veículo poderá fornecer a mercadoria durante todo o trajeto. Por isso, o equipamento de refrigeração deve ser escolhido baseado na dimensão da câmara frigorífica selecionada (fornecendo a potência necessária para tal volume a ser carregado) e nas temperaturas praticadas pelo tipo de carga transportada (climatizada, refrigerada e/ou congelada). Este equipamento, geralmente, é pesado e deve ser bem dimensionado para que o veículo não leve carga extra, evitando seu desgaste e consumo elevado de combustível.

Carga Transportada

O tipo de carga selecionado para o cenário de distribuição é qualquer tipo de carga que necessite de controle e manutenção da temperatura. Esta definirá os limites máximos e mínimos de temperatura que a carga pode ser exposta para não haver perda de qualidade. Ela também é importante, pois interage trocando calor com o ambiente por isso tem sua capacidade térmica e sua condutância própria, que interagem diretamente no sistema. Também será definida a quantidade de carga inicial embarcada ao início do percurso, ou seja, a massa total da mercadoria carregada no veículo.

2.1.2. Simulação do comportamento térmico do veículo

O objetivo de realizar a simulação do cenário é obter o comportamento térmico do veículo durante o percurso, ou seja, obter os dados da temperatura e do tempo em função da operação realizada. A simulação do trajeto possibilita entender o que acontece na prática de um roteiro que é composto por múltiplas entregas e que vise minimizar distância.

O simulador utilizado para análise foi o CoolVan, um software desenvolvido pela *Food Refrigeration and Process Engineering Research Center* da Universidade de Bristol, Reino Unido. Ele tem como objetivo prever temperaturas durante roteiro de multi entregas de alimentos refrigerados e congelados e ajudar o projeto e operação de veículos de entrega para pequenos e médios roteiros (GIGIEL et al. 1998; JAMES e SCHOFIELD, 1998; JAMES et al. 2006; MANUAL COOLVAN, 2000).

Este programa foi desenvolvido com base em equações matemáticas integradas capazes de modelar os diferentes parâmetros envolvidos no processo de transporte de produtos refrigerados e congelados, como: a temperatura do ambiente externo, o comportamento técnico do veículo, capacidade de carga térmica, parâmetros de roteiro como número de entregas, abertura de portas, incremento da temperatura, tempo de percurso, entre outros. A partir dessas equações no qual o programa é baseado, ele consegue revelar o comportamento da temperatura interna do veículo e da temperatura da carga durante todo o percurso (MANUAL COOLVAN, 2000). Os resultados do programa são o gráfico do comportamento térmico durante o trajeto e os dados, em planilha Excel, do tempo e da temperatura praticada a cada passo do percurso. O Gráfico permite analisar a evolução da temperatura em diferentes pontos (na porta, no interior do veículo, da carga e do ambiente externo) em função do tempo.

Apesar de o simulador CoolVan fornecer o comportamento da temperatura frente ao percurso de entrega, ele não oferece soluções, ações ou mudanças no roteiro que ajuste e corrija a temperatura do veículo. Portanto, a simulação é complementar para o desenvolvimento da metodologia proposta, pois ela fornece dados do roteiro prévio para a elaboração das funções matemáticas, de comportamento da temperatura, que irão compor o programa computacional.

2.1.3. Funções Matemáticas de Comportamento Térmico do Veículo

O objetivo desta etapa é elaborar funções matemáticas que expressem o comportamento da temperatura no interior do veículo em função do tempo decorrido no percurso. Estas serão elaboradas com base em funções matemáticas desenvolvidas no trabalho de Hoang *et al.* (2012). A função de comportamento desenvolvida por estes autores expressem o comportamento da temperatura de um container refrigerado em função do tempo decorrido, temperatura inicial da

carga, massa da mercadoria, capacidade térmica e condutância do produto, entre outros. Este é apresentada na equação 1 a seguir.

$$\theta_i(\tau) = \theta_0 + \left(\theta_i^{(load)} - \theta_0 \right) \exp\left(-\frac{H_i \tau}{m_i C_i}\right) \quad (1)$$

Onde $\theta_i(\tau)$ é a temperatura do produto i no tempo τ , θ_0 é a temperatura inicial do container, m_i é a massa total de produto i (kg), $\theta_i^{(load)}$ é a temperatura do container depois do carregamento do produto i , H_i é a condutância do produto i ($W K^{-1}$) e C_i é a capacidade térmica do produto i ($J kg^{-1} K^{-1}$). Assumindo $\theta_i^{(load)} > \theta_0$.

A função de Hoang *et al.* (2012) deve ser adaptada a cada parte do processo de transporte e será calibrada com base nos dados resultantes da simulação realizada no programa CoolVan, passo 2.

2.1.4. Roteirização de Veículo Combinando Otimização Térmica e Logística

O último passo da metodologia visa desenvolver um algoritmo que estime os níveis de temperatura, passo a passo, considerando diferentes sequências de entrega e formando conjuntos de TTI (Integradores de tempo e temperatura). O desempenho térmico de cada sequência de entregas será avaliada através do cálculo do índice de capacidade de processo, PCI, levando à solução ótima que minimize a distância percorrida e, ao mesmo tempo, mantenha os níveis de temperatura dentro de limites aceitáveis, específicos à carga.

TTI é uma medida específica utilizada para entender o comportamento térmico do ambiente na qual a carga é submetida. Eles fornecem o histórico do tempo e da temperatura, passo a passo, ao longo do processo de transporte (ESTRADA - FLORES e EDDY, 2006; SAHIN et al, 2007). Este tipo de análise vem sendo cada vez mais utilizada em trabalhos que avaliam os processos na cadeia do frio como, por exemplo, Estrada-Flores e Eddy (2006), Giannakourou et al (2005), Giannakourou e Taoukis (2003), Giegel et al (1998), Jacxsens et al (2002) e James e Scholfield (1998). Os dados de TTI, no geral, são caros e requerem tempo. Estes são obtidos através de teste de campo e medições em laboratórios, porém uma alternativa é calcular os TTIs através da simulação, como é sugerido neste trabalho.

Os coeficientes PCI, índices de capacidade do processo, são frequentemente utilizados como parte integrante do controle estatístico de qualidade de processo e produtividade em empresas de engenharia. A relação entre o desempenho do processo real e os limites de especificação ou tolerância pode ser quantificada utilizando variáveis apropriadas. Seguiremos rigorosamente Chang e Bai (2001), Chang et al (2002) e Estrada-Flores e Eddy (2006), aplicando a análise PCI para a distribuição de produtos alimentícios refrigerados.

Normalmente, os PCIs são utilizados para relacionar os parâmetros de processo de acordo com as especificações de engenharia, podendo incluir tolerâncias unilateral ou bilateral com ou sem um valor alvo (valor nominal). Na aplicação deste trabalho, a variável controlada é a temperatura θ no interior do veículo ao longo de um percurso de distribuição típica de produtos alimentares refrigerados, com média μ e desvio padrão σ . No caso da distribuição de alimentos refrigerados existe o limite de temperatura superior (USL) e o limite de temperatura inferior (LSL). Quatro índices de capacidade são comumente usados para variáveis com distribuição normal: C_p ; C_{pk} ; C_{pm} e C_{pmk} (GONÇALEZ e WERNER, 2009). Porém este trabalho só se atentará aos índices C_p e C_{pk} em virtude de serem índices específicos a cálculos de conjuntos de dados normalmente distribuídos e não normalmente distribuídos, que é o caso deste trabalho.

Para dados amostrais normalmente distribuídos será realizado o cálculo do C_p , definido como:

$$C_p = \frac{USL-LSL}{6\sigma} \quad (2)$$

O objetivo do controle do processo é que o C_p seja o maior possível e é definido como a relação entre a propagação da tolerância admissível e a propagação efetiva dos dados. Para o caso estudado o valor de $C_p \geq 1$ indica que a variação de temperatura se encaixa dentro dos limites especificados e se $C_p \leq 1$ indicará que o processo não atende as especificações definidas das temperaturas. Para $1 \leq C_p < 1,33$ o processo provavelmente atenderá aos requisitos e para $C_p \geq 1,33$ o processo é considerado inteiramente capaz.

Para dados de amostrais normalmente distribuídos será utilizado o procedimento descrito pelo trabalho de Gonzalez e Werner (2009). Este trabalho estudou uma relação de diferentes métodos

que aproximam este tipo de análise para uma situação com dados amostrais não normalmente distribuídos e indica como método mais apropriado o método de Chang e Bai (2001). O trabalho de Chang e Bai (2001) foi sugerido, pois consegue refletir com exatidão o número de itens não conformes na amostra avaliada, sendo superior a outros métodos analisados. Este método ajusta os valores PCIs de acordo com o grau de assimetria da população subjacente, utilizando fatores específicos, no cálculo dos desvios acima e abaixo do valor médio da variável. O método baseia-se na idéia de que o desvio padrão σ pode ser dividido em desvio superior e inferior, σ_U e σ_L , representando as dispersões do lado superior e inferior em torno da média μ , respectivamente. Uma função densidade de probabilidade (fdp) assimétrica $f(x)$ pode ser aproximada a partir de duas fdps normais:

$$f_U(x) = \frac{1}{2\sigma_U} \phi \left[\frac{\theta - \mu}{2\sigma_U} \right] \quad \text{e} \quad f_L(x) = \frac{1}{2\sigma_L} \phi \left[\frac{\theta - \mu}{2\sigma_L} \right], \quad (3)$$

com a mesma média μ , mas diferentes desvios padrão $2\sigma_U$ e $2\sigma_L$, onde ϕ representa uma fdp normal padrão. O lado superior e inferior da $f(\theta)$ é aproximado com o lado superior $f_U(x)$ e o lado inferior $f_L(x)$, respectivamente. Os valores de σ_U e σ_L são calculados como (CHANG et al. 2002).

$$\sigma_U = P_\theta \sigma \quad \text{e} \quad \sigma_L = (1 - P_\theta) \sigma \quad \text{com} \quad P_\theta = Pr \{ \theta \leq \mu \} \quad (4)$$

Deste modo o valor de C_p é calculado com base no método de Chang e Bai (2002), com algumas adaptações para a distribuição não normal, ou seja, será calculado de acordo com o limite superior e inferior. Segue estes cálculos:

$$C_p = \min \left\{ \frac{USL - LSL}{6 \times 2\sigma_U}, \frac{USL - LSL}{6 \times 2\sigma_L} \right\} = \min \left\{ \frac{USL - LSL}{6 \times 2P_\theta \sigma}, \frac{USL - LSL}{6 \times 2(1 - P_\theta) \sigma} \right\} = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \min \left\{ \frac{1}{2P_\theta}, \frac{1}{2(1 - P_\theta)} \right\} \quad (5)$$

Assumindo que $D_\theta = 1 + |1 - 2P_\theta|$, o que simplifica a expressão (5) para:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \frac{1}{D_\theta}, \quad (6)$$

Seja $1/D_\theta$ o coeficiente de correção para a equação (12). Por outro lado, de acordo com o método de Chang e Bai (2002), o valor de C_{pk} corrigido para esta assimetria pode ser estimada como segue. Primeiramente os índices de capacidade superior e inferior são definidos como (7) e (8), respectivamente:

$$C_{pk}^{(U)} = \frac{USL - \mu}{3 \cdot 2\sigma_U} = \frac{USL - \mu}{6 P_\theta \sigma}, \quad (7)$$

$$C_{pk}^{(L)} = \frac{\mu - LSL}{3 \cdot 2\sigma_L} = \frac{\mu - LSL}{6 (1 - P_\theta) \sigma}. \quad (8)$$

O PCI das temperaturas θ para os dois lados será:

$$C_{pk} = \min\{C_{pk}^{(U)}, C_{pk}^{(L)}\} = \min\left\{\frac{USL - \mu}{6 P_\theta \sigma}, \frac{\mu - LSL}{6 (1 - P_\theta) \sigma}\right\} \quad (9)$$

Nas equações (7) e (8), os desvios $2\sigma_U$ e $2\sigma_L$ são usadas no lugar de σ para refletir o grau de assimetria na distribuição de probabilidade de θ . Quando a distribuição subjacente de θ é simétrica $P_\theta = 0,5$. No entanto, quando os valores das temperaturas θ apresentarem uma leve inclinação, os valores de C_{pk} serão calculados pela equação (9). Deste modo os valores de C_{pk} e C_p são calculados para as amostras de dados contendo n valores de temperaturas θ ($\theta_1, \theta_2, \theta_n$). Cada média $\hat{\theta}$ e desvio padrão $\hat{\sigma}$ referentes a amostra estudada são calculados. A probabilidade P_θ pode ser estimada por meio do número de observações inferior ou igual a $\hat{\theta}$.

$$\hat{P}_\theta \cong \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g(\hat{\theta} - \theta_i), \quad (10)$$

Onde $g(x) = 1$ para $x \geq 0$ e $g(x) = 0$ para $x < 0$. Assim o valor de C_{pk} pode ser estimado substituindo os valores respectivos, referente à amostra analisada, de $\hat{\mu}$, $\hat{\sigma}$, e \hat{P}_θ para μ , σ e P_θ respectivamente na equação (9).

Normalmente, os PCIs são utilizados para relacionar os parâmetros de processo de acordo com as especificações de engenharia. Nesta área de atividade o nível desejado da exatidão é elevado, principalmente quando a matéria prima tem alto valor agregado. Por isso, no caso deste tipo de

produto os níveis desejados para Cpk são maiores que 1,33. No caso da distribuição de mercadorias refrigerada e congelada o valor de $Cpk = 1,33$ é suficiente. Se este for superior à distância total do roteiro tenderá a aumentar, e o que o presente trabalho busca é uma otimização híbrida do atributo térmico e do atributo logístico, neste caso expresso em distância.

Este passo da metodologia combina a aplicação da análise das estimativas de TTI com a análise PCI, o que ajuda a revelar condições térmicas indesejáveis que podem prejudicar o cumprimento dos requisitos de qualidade do produto ao longo da cadeia de abastecimento.

2.2. Avaliação da Metodologia Aplicada a Casos Reais

Será realizada uma discussão da aplicação da metodologia para casos reais, ressaltando a realidade da regulamentação na área; a necessidade da tecnologia, telemática e comunicação; e treinamento de trabalhadores que operam o sistema.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. ABORDAGEM ESPECIFICA DA CADEIA DO FRIO

3.1.1. Cadeia do Frio e Evolução

Cadeia do frio é um termo relativamente novo que surgiu na década de 80 e vem se desenvolvendo a partir dos princípios gerais da cadeia de suprimentos integrados a conservação da temperatura adequada ao ambiente (SILVA, 2010). Este ambiente pode ser climatizado, refrigerado e/ou congelado. Ao longo dos anos tanto a prática da cadeia do frio quanto o conceito sofreram modificações, como mostrado pelos diferentes autores a seguir:

- Kefford (1979) classifica a cadeia do frio como sendo o conjunto de operações compreendidas entre o processo de congelamento ou resfriamento até a comercialização do produto;
- Zhang (1994) descreve a cadeia de frio como uma série de processos interdependentes e equipamentos utilizados para garantir a preservação da temperatura de produtos perecíveis e outros tipos de produtos que necessitem de controle de temperatura;
- Salin e Nayga (2002) definem cadeia do frio como uma cadeia de suprimentos na qual é necessário o controle da temperatura adequado ao ambiente (refrigerado e/ou congelado). Para isso, deve-se fazer o uso de equipamentos específicos e processos que propiciem este controle;
- Segundo Billiard (2003) a cadeia do frio é a continuidade do campo de estudo da refrigeração. Ela é utilizada para garantir a preservação de alimentos perecíveis desde a fase de produção até o consumidor final;

- O Instituto Internacional de Refrigeração (IIR, 2004) descreve a cadeia de frio como todo o processo de armazenamento, conservação, transporte, distribuição e manipulação de tais produtos, incluindo o controle da temperatura baixa;
- De acordo com Likar e Jevsnik (2006) a cadeia do frio pode ser descrita como uma série de operações interdependentes que visam preservar as condições de qualidade de produtos sensíveis à temperatura durante os processos de produção, distribuição, armazenagem e comercialização;
- Heap (2006) define a cadeia do frio como sendo uma cadeia de transporte e armazenagem entre a sua produção inicial e o consumo final referente a produtos perecíveis que necessitem de controle de temperatura;
- Lopes (2007) define a cadeia do frio como um sistema de resfriamento que controla a temperatura à qual o produto deve ser exposto, desde a sua coleta ou logo após o abate do animal, até o consumo final. Ela pode ser entendida como uma rede de cooperação entre o produtor, atacadista e consumidor, na qual o ambiente adequado deve ser mantido a mercadoria comercializada;
- Joshi, Thakur e Singh (2008) definem cadeia do frio como toda a cadeia de suprimentos de produtos perecíveis.
- Pereira et al. (2010) definem cadeia do frio como uma cadeia que compreende todo processo de armazenamento, conservação, distribuição, transporte e manipulação dos produtos, porém que nestes processos ocorram o controle e a manutenção da temperatura adequada para garantir e assegurar a qualidade da carga.

Frente às definições apresentadas este trabalho entende cadeia do frio como uma cadeia de suprimentos na qual são manipuladas mercadorias sensíveis termicamente. A temperatura é específica para cada mercadoria e deve ser assegurada durante todos os processos e atividades realizadas entre os estágios que compõem a cadeia de suprimento. A temperatura é fator determinante da qualidade da mercadoria, por isto deve ser mantida através de equipamentos específicos e procedimentos técnicos da engenharia de refrigeração.

O desafio da cadeia do frio é assegurar à mercadoria transportada um ambiente adequado e contínuo ao longo do seu percurso garantindo sua qualidade durante todos os processos envolvidos como armazenamento, distribuição, transporte e manipulação dos produtos, até o

consumidor final (ZHANG, SUN, e LI 1994; RUIZ-GARCIA et al. 2007; IIR, 2004). Nestes processos as condições ambientais devem satisfazer as especificações da carga que têm como variável chave a temperatura. Dependendo do tipo de carga transportada, outros parâmetros de controle devem ser monitorados, tais como umidade, atmosfera modificada, pressão etc., a fim de preservar as características intrínsecas do produto manipulado.

Qualquer rompimento do frio pode ocasionar danos à qualidade do produto, por isso assegurar este parâmetro se torna de grande importância, com isso a cadeia do frio caracteriza-se como uma cadeia de suprimentos complexa, pois agrega competências como refrigeração, segurança alimentar, tecnologia de controle de temperatura, entre outros (PEREIRA et al. 2010; IIR, 2004).

Segundo Silva (2010) as mercadorias que utilizam a cadeia do frio são produtos alimentícios, produtos farmacêuticos, cosméticos, películas fotográficas e de filmes, além de obras de arte e produtos relacionados ao patrimônio cultural e flores. A gestão da cadeia do frio está relacionada à especificidade da mercadoria manipulada, que requer um ambiente adequado. Neste trabalho a mercadoria abordada serão os produtos alimentícios.

Segundo Bogotaj (2005) a crescente demanda por alimentos frescos, refrigerados e congelados tem impulsionado mudanças no mercado global de produtos que utilizam a cadeia do frio. Fatores que alavancaram este desenvolvimento são as mudanças nos hábitos alimentares ocorrido nos últimos anos, e consumidores se tornando mais exigentes (COULONB, 2008). Estas mudanças afetaram por sua vez a forma de produzir, comercializar e distribuir produtos, principalmente gêneros alimentícios (GELHLAR e COYLE, 2001). Em contrapartida tiveram como principal consequência o aumento nas importações e exportações de cargas refrigeradas, avanços tecnológicos para acompanhar este crescimento, além de gerar inúmeros empregos indiretos devido a crescente terceirização de serviços voltados para logística: armazenagem, distribuição, transporte etc. (MARINO, 2008; SILVA, 2010).

Segundo ABIAF (2011) a demanda por produtos refrigerados e conseqüentemente a capacidade frigorífica aumenta à medida que cresce o poder aquisitivo e na medida em que a sociedade evolui culturalmente. A sociedade moderna dedica um menor tempo a tarefas domésticas,

procuram alimentação rápida e prática. Desta forma, cada vez mais eleva o número de consumo de alimentos prontos e semi prontos, o que impulsiona à indústria de fornecimento de refeições e a necessidade da adequação desta indústria as exigências do mercado, agilidade e também sua qualidade. Esta Associação foi criada em 1979 e, atualmente, é considerada a maior associação do setor de refrigerados no Brasil, registra um crescimento médio do setor de mais de 10% ao ano. Atualmente, cerca de 2% do PIB - Produto Interno Bruto circulante no Brasil corresponde a mercadorias refrigeradas. O Brasil apresenta pouco mais de dois milhões de metros cúbicos de câmaras frigoríficas, entretanto poderia aumentar esta capacidade uma vez que países como Estados Unidos e Japão contam com 48 milhões e 25 milhões de metros cúbicos, respectivamente. Revelando um potencial de crescimento grande no setor.

Frente o crescimento da procura e do consumo de produtos refrigerados e congelados faz-se necessário maior controle dos processos envolvidos na cadeia do frio. Um dos fatores determinantes de sucesso ou não na cadeia do frio é o transporte. Ele é um processo estratégico e que passou por constantes transformações no Brasil nos últimos dez anos. Sendo uma delas, o surgimento do operador logístico. Ele é uma empresa especializada em gerenciar e executar atividades logísticas, em todo ou parte da cadeia de abastecimento, em particular, para a cadeia do frio especializa-se na manutenção e controle da temperatura (MEDEIROS, et al., 2008). Segundo Sousa Filho *et al*, (2010) a procura por operadores logísticos para serviços na cadeia frio esta aumentando em função de suas técnicas e especialidade no processo de transporte.

Todos os avanços acima mencionados foram acompanhados por inovações tecnológicas, além das gradativas mudanças dos conceitos na prestação de serviços, que levaram a mudanças operacionais significativas no setor com a evolução de sistemas de qualidade, melhorias e surgimento de operadores logísticos especializados no setor e com alto nível de serviço (Silva, 2010). Também houve avanço no processo de transporte melhorando a oferta de produtos perecíveis, o desenvolvimento de embalagens que possibilitaram o aumento da vida útil do produto, estimulando novos canais de marketing que possibilitaram o alcance de mercados em regiões distantes (COYLE, HALL e BALLENGER, 2001).

O crescimento da cadeia do frio brasileira pode ser visualizado através da Figura 2, que retrata o aumento do investimento em armazéns frigoríficos no país, mostrando a evolução ao longo dos anos e comparando o tipo de investimento, sendo estes de capital privado ou público.

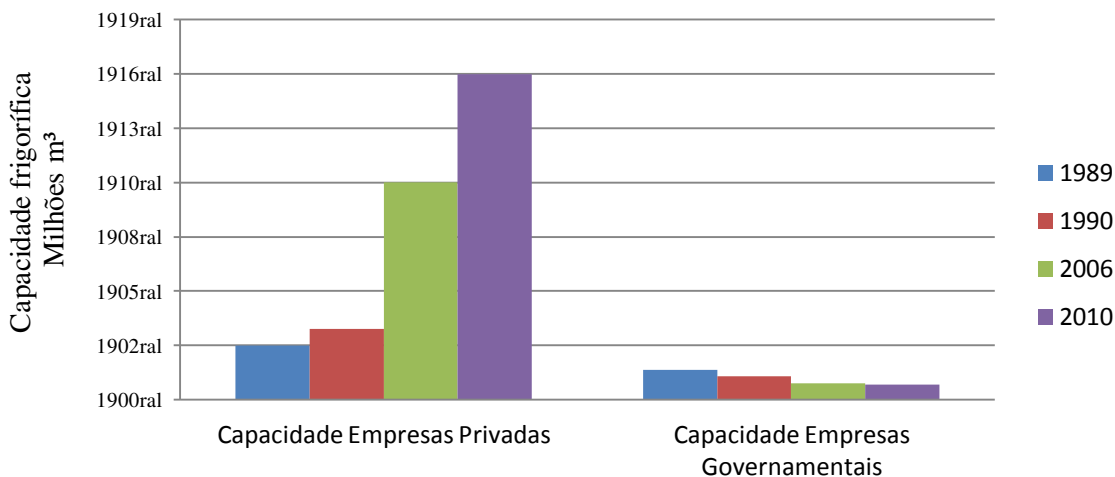


Figura 2: Evolução Capacidade frigorificada brasileira

Fonte: Adaptado ABIAF, 2011

Nota-se que no período inicial de análise (1989), a relação era de 29,5% de área de armazenagem pública e 70,5% de área de armazenagem privada. Já no período final (2010), essa relação passou para 5% para as companhias públicas e 95% para as companhias privadas, ou seja, o setor público foi perdendo mercado e espaço para as privadas. No geral, é possível afirmar que houve um crescimento elevado deste tipo de infraestrutura no Brasil nos últimos 20 anos, apontando para um aumento do mercado e da comercialização de mercadorias que utilizam a cadeia do frio no país.

Além de apresentar esta evolução a ABIAF (2011) identificou por regiões brasileiras a existência deste tipo de infraestrutura frigorificada, Figura 3. Esta mostra que a região Sudeste apresenta o maior volume de empresas frigorificadas instaladas, contando com 47% de empresas em relação ao total, e em seguida esta a região Sul com 37% de empresas. Estas duas regiões totalizam, atualmente, 84% dos armazéns refrigerados existentes no Brasil.

Unidade de Refrigeração Por Região

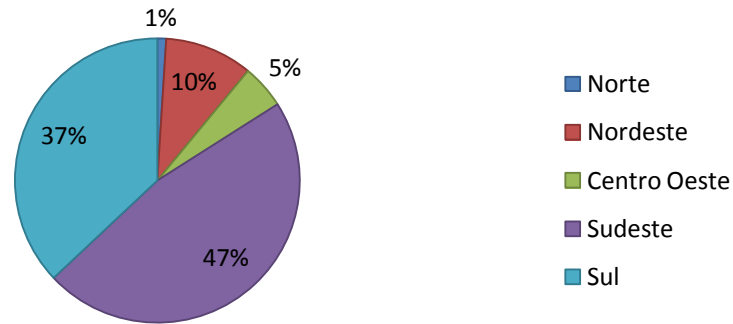


Figura 3: Unidade de refrigeração por região brasileira.

Fonte: ABIAF, 2011

A Figura 4 apresenta o cenário do *market share* brasileiro de operadores logísticos frigorificados. A figura além de apresentam alguns operadores logísticos importantes no Brasil, indica três empresas que totalizaram em 2011, aproximadamente, 45% da fatia de mercado brasileiro realizando atividades logísticas no setor, estas são: Standard (Esteio-RS) com 18,45%, Schio/Serbomcom 13,45% e Friozem (Jandira – SP) com 12,98.

Dez Maiores Operadores Logísticos Brasileiros

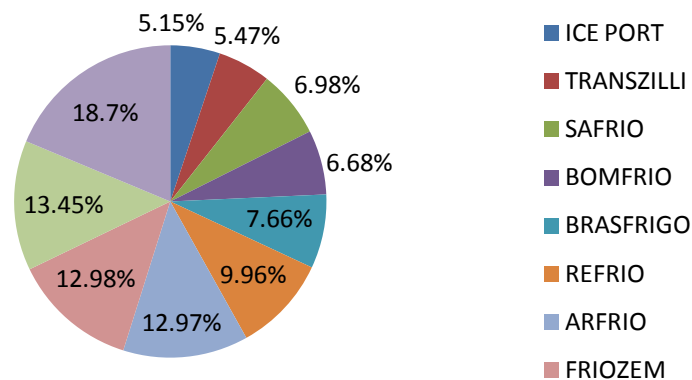


Figura 4: Dez maiores Operadores logísticos frigorificados brasileiros

Fonte: ABIAF, 2011

No Brasil o mercado pertencente à cadeia do frio que mais cresce é o grupo de alimentos de maior perecibilidade, produtos congelados, minimamente processados ou processados, carnes,

pescados, frutas e hortaliças. Este índice chega a 30% de crescimento ao ano, movimentando uma cifra de US\$ 30 bilhões de dólares anuais. Mudanças no setor, como o surgimento de operadores logísticos especializados na cadeia do frio, foi um fator determinante nas mudanças de hábitos e costumes da população brasileira (FAVERO, 2005).

O aumento do consumo de alimentos frescos, refrigerados e congelados influenciaram diversos setores da economia proporcionando desenvolvimentos e avanços nas operações relacionadas a este tipo de mercadoria. Um exemplo disso foi o crescimento significativo das redes e estabelecimentos de varejo. Outro setor que se destaca no Brasil é o setor de *food service*, sendo parte do varejo alimentício que mais cresce, tendo um crescimento de 225% no período de 1995 a 2005 (SILVA, 2010).

Cada tipo de mercadoria requer um ambiente específico para a preservação de sua qualidade. Como existem diferentes produtos e processos da cadeia de frio, é importante analisá-los caso a caso, a fim de considerar os requisitos e as restrições impostas por cada situação. Para isto, alguns autores classificam as mercadorias da cadeia do frio por grupo que são apresentados a seguir:

- Alimentos: carne, peixe, frutas, legumes e produtos lácteos, e outros (RUIZ-GARCIA e LOREDAI, 2009; SILVA, 2010);
- Farmacêutica: Medicina, sangue, vacinas, órgãos do corpo, plasma e tecidos do corpo (RUIZ-GARCIA E LOREDAI, 2009; SILVA, 2010);
- Componentes químicos: oxigênio líquido, o gás natural liquefeito (metano líquido refrigerado), dióxido de carbono líquido, argônio líquido, e outro (WHITE MARTINS, 2010);
- Flores: Rosas, orquídeas, helicônias, alpinias, bromélias, e outros (ROSA E LUNKES, 2010; SILVA, 2010);
- Componentes eletrônicos: microchips (RUIZ-GARCIA E LOREDAI, 2009);
- Produtos de beleza: Cosméticos (PANOZZO E CORTELLA, 2008; SILVA, 2010);
- Obras de arte e artefatos (PANOZZO E CORTELLA, 2008; SILVA, 2010);
- Materiais e filmes fotográficos (ADHIKARI, 2012; SILVA, 2010).

Um estudo desenvolvido por Seabury (2007) mostra a evolução entre os anos de 2000 a 2002 dos países que mais exportaram produtos refrigerados e congelados para a Europa por via aérea (Figura 5). Observa-se que o Brasil não se destaca como grande exportador, por via aérea, deste tipo de produto, apesar disso tem aumentado o seu mercado externo a cada ano.

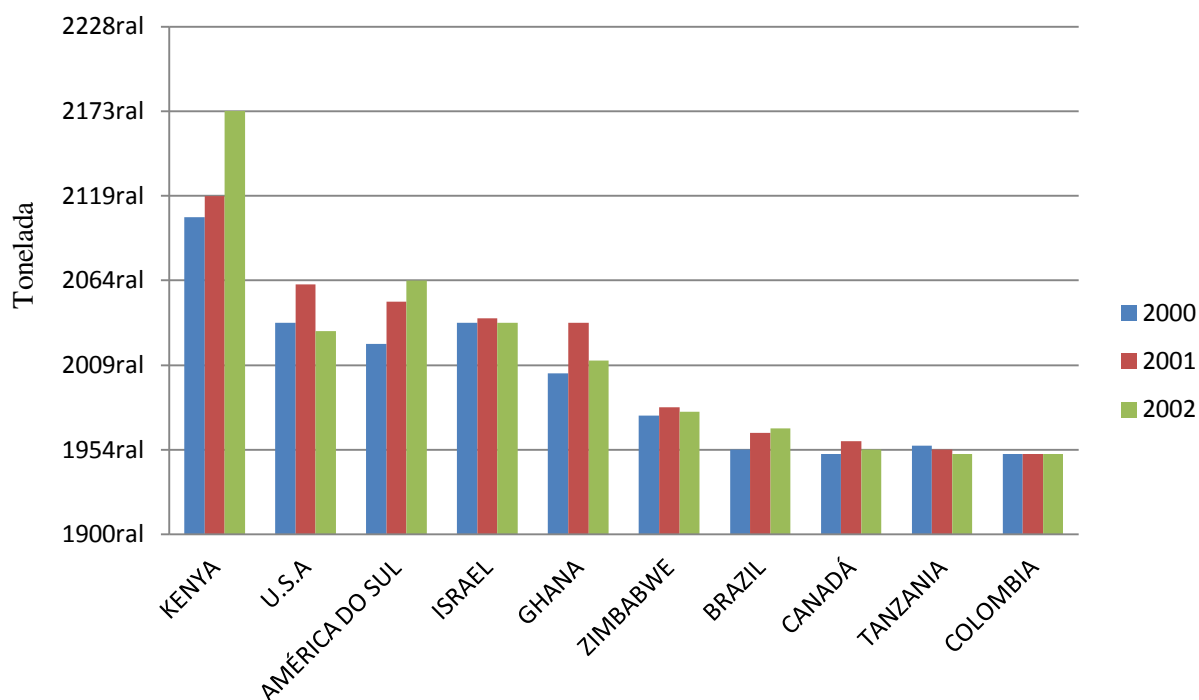


Figura 5: Produtos refrigerados e congelados transportados por via aérea para Europa

Fonte: Seabury Data base, 2007.

Os países como Kenya, Gana e o Brasil foram os únicos, dentre os países analisados que apresentaram uma crescente participação na exportação para a Europa deste tipo de produto. Os EUA, África do Sul e Canadá mostraram flutuações no período, enquanto Israel, Zimbábue e Colômbia permaneceram constantes. O mesmo trabalho mostra também o comportamento da importação de alguns produtos refrigerados e congelados para a Europa dos países da América Latina (Figura 6). Observa-se que no Brasil o produto dentre os analisados com maior destaque no mercado europeu é o mamão papaia, com aproximadamente 19000 ton/ano transportados no modal aéreo em 2002. Também merecem destaque produtos como a carne bovina, pescado e manga. No geral, os dados mostram que o Brasil é um dos países com maior volume de

exportação de alimentos refrigerados para a Europa no período analisado, quando comparado com países da América Latina.

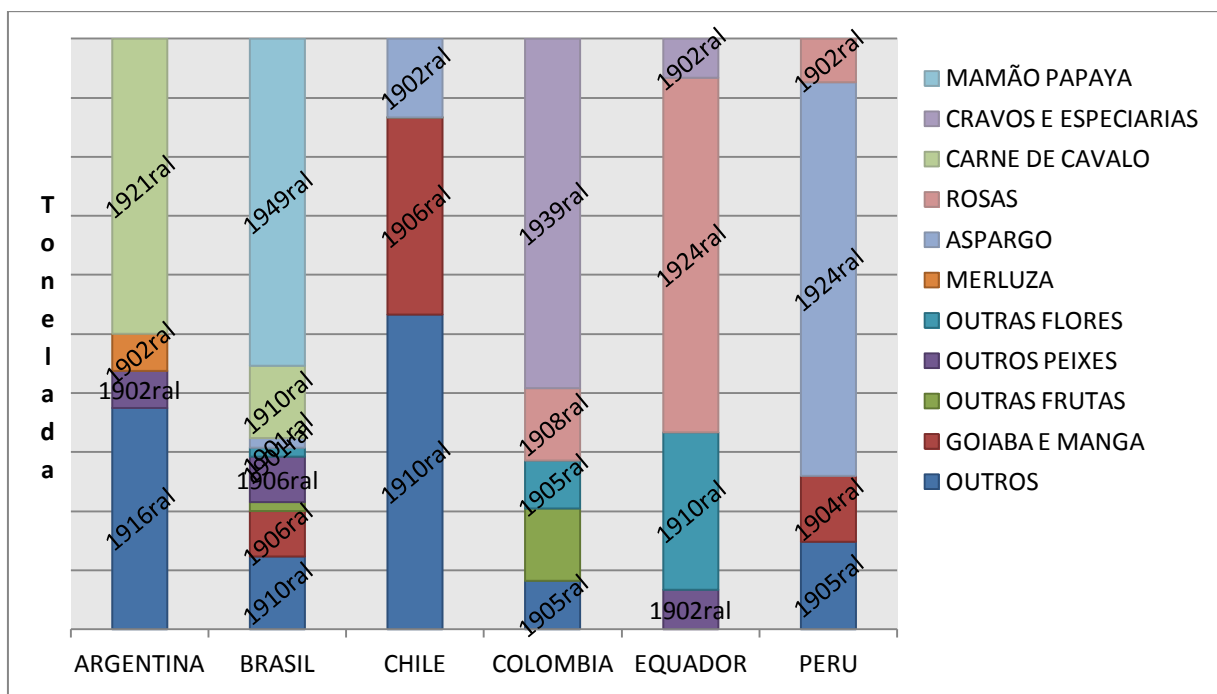


Figura 6: Produtos refrigerados e congelados exportados para Europa

Fonte: Adaptado Seabury Data base, 2007

Mudanças na economia, avanços tecnológicos e melhorias no setor de transporte alavancam a produção brasileira de alimentos, trazendo crescimento e diversidade para o setor. Isto é comprovado no Quadro 1. O período analisado é do ano de 1984 a 2010, mostrando forte crescimento destes segmentos. É possível visualizar que o segmento de carne suína e frango tiveram grande aumento de produção chegando a porcentagens de crescimento de 320% e 825%, respectivamente. Estes valores, no geral, demonstram a importância que vem tomando o setor de alimentos refrigerados no mercado brasileiro.

Produto [1.000ton]				
	Carne Suína	Frango	Carne bovina	Suco
1984	996	1483	2350	910
1995	1250	4060	5400	1031
2001	1589	6755	6900	1124
2005	2708	8242	8750	1412
2010	3190	12230	9500	1380

Quadro 1: Evolução de segmentos alimentícios brasileiros

Fonte: Neves Filho, 2010

3.1.2. Modelos de Avaliação da Qualidade de Alimentos

Segundo Heap, Kierstan e Ford (1998) a perda de qualidade do produto alimentício é cumulativa e irreversível, o que ressalta a necessidade de conhecer e respeitar os limites mínimos e máximos de temperaturas necessários para manter os atributos essenciais de qualidade. Os limites de qualidade e, conseqüentemente, segurança alimentar são inerentes e específicos a cada tipo de alimento. Contudo, é necessário analisar a classe do produto alimentício e suas características organolépticas, microbiológicas, químicas, a fim de entender quais os limites térmicos.

Muitos parâmetros podem ser influenciadores da qualidade do alimento, tais como umidade, atmosfera modificada, pressão, temperatura, luminosidade, etc. Porém na cadeia do frio o parâmetro de maior importância na preservação das características e sanidade da carga é a temperatura. A manutenção de um ambiente adequado à mercadoria é fator primordial para assegurar sua integridade, física, química, microbiologia e sensorial do alimento.

Para Pinto e Neves (2010), a partir do método de conservação pelo frio é possível diminuir as atividades químicas e enzimáticas dos alimentos bem como não permitir a sua deterioração, através da exposição a temperaturas não apropriadas. Temperaturas próximas e abaixo dos 0°C, permitem controlar a proliferação microbiana, de forma a retardar o desenvolvimento microbiano ou até mesmo impedindo, assim como atenuar as reações químicas e enzimáticas.

Segundo Neves Filho (1997) quanto menor a temperatura aplicada ao ambiente, menor será a velocidade das reações bioquímicas, as atividades enzimáticas, reações químicas e atividades microbianas, responsáveis pela deterioração dos tecidos de origem animal e vegetal. Porém ela deve ser específica e adequada à carga comercializada, pois temperaturas mais altas podem ocasionar danos à mercadoria; no entanto, a baixa temperatura pode também provocar avarias e comprometer o produto final.

Os alimentos em geral são de alta sensibilidade e dependendo do ambiente nos quais são submetidos apresentam grau elevado de deterioração química, fisiológica e biológica. Cada um, em particular, apresenta seu tempo de validade, de acordo com sua propriedade, por exemplo, a composição de água.

Segundo a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (2009) o Brasil está entre os países que mais desperdiçam alimentos no mundo. Cerca de 40% da produção agrícola que não conseguem chegar ao seu destino final. As causas dessas perdas são de origem física (produzidas por agentes como a luz, o calor, a umidade e ações mecânicas); origens químicas (oxigênio, gás carbônico e contaminante anômalo); e origem biológica (ação de enzimas, microrganismo, insetos e outros parasitas) (NEVES FILHO, 1997). Parâmetros importantes que devem ser controlados ao longo da cadeia.

De acordo com a temperatura específica requerida por cada alimento para manter sua qualidade, os mesmos podem ser classificados como produtos resfriados e congelados. O Quadro 2 apresenta as possíveis classificações, bem como suas especificações térmicas. O beneficiamento térmico além de preservar a qualidade física e sensorial garante a segurança alimentar do produto.

Tipo do Produto	Característica
Congelados	-25°C para sorvetes e -18°C para outros.
Resfriamento Pleno	Entre 0°C e 1°C para carne bovina fresca e carne de frango, insumos cárneos, vegetais e algumas frutas.
Resfriamento Mediano	5°C para produtos pastosos e para a maioria dos derivados do leite.
Resfriamento Exótico/Climatização	Entre 10°C e 15°C para batata, ovos, frutas exóticas e banana.

Quadro 2: Tipos de resfriamento

Fonte: Silva, 2010

Atualmente, é crescente o número de trabalhos que discutem as dificuldades operacionais e de controle de qualidade de alimento ao longo da cadeia do frio. Alguns trabalhos buscam desenvolver modelos matemáticos que expressem o comportamento da qualidade do alimento em função do tempo e da temperatura ambiente no qual é submetido (BANDURINA et al. 2011; ESTRADA FLORES E EDDY, 2006; KOURTI, 2006; LUI et al. 2010; PEREIRA et al. 2010; TIJSKENS e POLDERDIJK, 1996; WANTEDMAN, 2012; ZHANG et al, 1994).

Um importante trabalho e bastante discutido na comunidade acadêmica é o modelo proposto pelos autores Tijsskens e Polderdijk (1996). O trabalho elabora o conceito de *keeping quality* e

formula um modelo genérico da qualidade em função do tempo e do ambiente durante o transporte. O chamado *keeping quality* se baseia no comportamento do produto (composto por fatores químicos, bioquímicos, físicos etc.) e parte dos requisitos do consumidor (composto por fatores sensoriais, de aceitação, culturais etc.), convergindo na determinação do tempo limite em que o produto se torna inaceitável. Esse tempo é representado como sendo inversamente proporcional à soma das taxas (curvas) de perda de qualidade (danos), e é baseado na cinética das reações químicas, incluindo os efeitos da temperatura, danos pelo frio, diferentes níveis de qualidade inicial e limites de aceitação da qualidade do produto.

O autor afirma que o conceito básico do *keeping quality* é estabelecer o tempo restante de vida útil que o produto alimentício tem antes de ser considerado inaceitável. A Figura 7 mostra exemplos de representação de curvas de *keeping quality* em função do tempo, na qual são representadas quatro funções de comportamento da qualidade em função do tempo, estas estão relacionadas com o tipo de alimento. Dependendo da composição e sensibilidade o mesmo seguirá uma função de comportamento específica a sua propriedade. As funções aqui apresentadas são: função logística, linear, exponencial e Michaelis Menten. É possível visualizar que com o passar do tempo a qualidade do produto alimentício decai dependendo da temperatura que é submetido.

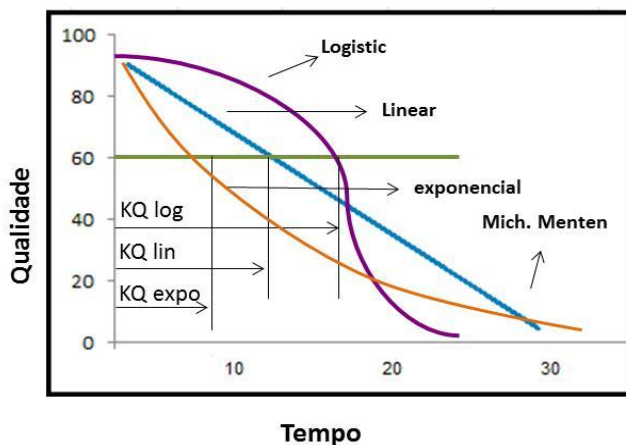


Figura 7: Redução da qualidade pelos diferentes tipos de funções

Fonte: Tijssens e Polderdijk (1996)

A equação (12) indica a formulação genérica do *keeping quality* (KQ) e compreende duas expressões: a função da qualidade $f(Q)$, que depende do tipo de cinética envolvida englobando

os níveis de qualidade inicial (Q_0) e limite (Q_i); e a curva de reação da qualidade (k) que varia em função do temperatura e pode ser construída de acordo com a lei de Arrhenius (CHANG, 1981).

$$kQ = \frac{f(Q)}{\kappa} \quad (11)$$

Jacxsens *et al.* (2001) em seu trabalho aborda este enfoque de qualidade. O trabalho apresenta um método para definir a validade de pacotes de vegetais minimamente processados utilizando embalagem composta de atmosfera modificada. O trabalho analisou diferentes situações de temperatura e comparou a embalagem com atmosfera modificada ou não. Foi possível observar que a embalagem com atmosfera modificada retarda a perda de qualidade dos produtos embalados. Também foi possível observar que alguns produtos são mais sensíveis à variação de temperatura, resultando em perda de qualidade mais rápida estes são: pepino fatiado, alface minimamente processada e pimentões.

Outro trabalho com a uma abordagem similar é de Robazza et al (2010). Os autores elaboram uma curva de qualidade, porém a curva de qualidade proposta no trabalho é com base no crescimento microbiano. O trabalho mostra o comportamento do crescimento microbiano em alimentos a partir da variação de diferentes regimes de temperatura. A temperatura foi incluída no modelo e expressa a dependência da taxa de crescimento dos microrganismos. São avaliados regimes de temperatura isotérmicos e regimes dinâmicos, nos quais a temperatura variava com o tempo. O regime dinâmico foi estudado a partir de simulações com grande flutuação da temperatura, com o objetivo de simular ambientes mais reais como os ocorridos em transporte e armazenagem.

O modelo proposto no trabalho de Robazza et al (2010) é a integração de dois sistemas de equações diferenciais ordinárias de primeira ordem. A primeira descrevendo o aumento do número de células em função do tempo onde $N(t)$ é a população no instante t e $\mu(N)$ é a taxa de crescimento específico da variação da população por unidade de tempo por indivíduo. A segunda expressa a taxa com que isso ocorre em função da população microbiana, sendo que nesta segunda equação estão incluídos termos relacionados com características fisiológicas e ambientais as quais os microrganismos estão sujeitos, onde m é, um parâmetro relacionado à

espécie do microrganismo e α é um parâmetro positivo que engloba as condições ambientais sob as quais o microrganismo será sujeito.

As duas equações estão respectivamente apresentadas a seguir:

$$\frac{dN(t)}{dt} = \mu(N) N(t) \quad (12)$$

$$\frac{d\mu N}{N(t)} = -\alpha \cdot N(t)^m \quad (13)$$

A equação (12) mostra que a velocidade de crescimento da população é proporcional a taxa de crescimento específico do microrganismo. Na equação (13) a variável α com sinal negativo assegura que a função seja decrescente e a variável m mostra que a taxa de crescimento específico é em função do aumento do número de microrganismos na amostra. Deste modo, o comportamento da curva de microrganismos em função do tempo, fornecendo o estado do alimento analisado em função do tempo e da temperatura, pode ser visualizado na Figura 8.

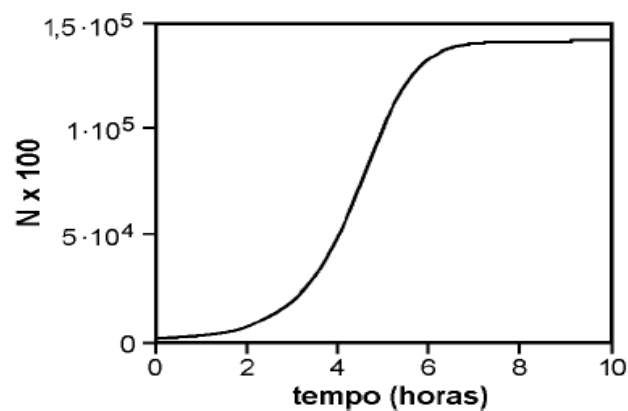


Figura 8: Curva teórica de crescimento de microrganismos

Fonte: Robazza, et al 2010.

O modelo matemático desenvolvido pelo trabalho de Robazza, et al (2010) possibilita entender o que aconteceria com um determinado produto alimentício submetido a um cenário prévio, com a finalidade de prevenir danos indesejáveis a carga.

3.1.3. Qualidade e a Importância da Temperatura

Perdas e danos de mercadorias perecíveis durante o armazenamento e transporte são questões substancialmente globais e que, pela sua importância, exigem soluções logísticas que possam oferecer operações adequadas de transporte, estocagem e transferência que garantam a qualidade dos produtos.

Segundo Ruiz-Garcia e Loredai (2009), a qualidade do produto se altera quando não é proporcionado o ambiente adequado. Dependendo do tipo de carga transportado e de sua embalagem (embalagem primária, secundária, terciária ou mesmo sem embalagem) a exigência de controle e monitoramento do ambiente pode ser requerida através de variáveis como: temperatura, umidade relativa, luminosidade, atmosfera modificada, entre outras.

Apesar de existência destes vários fatores extrínsecos que afetam o crescimento microbiano (como a umidade relativa, luminosidade, composição atmosférica do meio, etc.) a temperatura é a mais importante. A aplicação de temperaturas, durante o transporte tem como objetivo além de manter a integridade microbiológica manter a integridade física, química e organoléptica do produto (BAPTISTA, 2006).

Uma temperatura inadequada é considerada como o segundo maior fator de doenças transmitidas por alimentos, superado apenas pela microflora inicial presente nos alimentos (SÁNCHEZ LÓPEZ E DAEYOUNG, 2008). Segundo Ruiz-Garcia e Loredai (2009), para os produtos alimentares perecíveis, os processos internos químicos e biológicos dos produtos continuam após a colheita. O risco de uma falha na cadeia de frio pode causar um amadurecimento excessivo, a perda de peso, o amolecimento, mudanças de cor e textura, a degradação física, e apodrecimento e bolor. Esses fatores afetam a comercialização de tais produtos, por isso, um controle rigoroso da temperatura em toda a cadeia do frio pode minimizar os riscos de doenças transmitidas por alimentos. A submissão do produto a temperaturas adequadas reduziu drasticamente a taxa de crescimento da maioria dos patógenos humanos.

Ashby (1995) apresenta em seu trabalho o comportamento da qualidade do aspargo quando submetido a ambientes de temperaturas elevadas. O que se observa é a perda da vitamina C e

açúcar, medida de qualidade para o produto analisado. Na Figura 9 observa-se que quanto menor a temperatura ambiente menor é a taxa de perda de açúcar do alimento. Conseqüentemente, é notado um aumentando do tempo de vida do produto analisado. Outro fator importante apresentando pelo autor, porém, não demonstrados na figura é a exposição à baixa temperatura. Este ambiente pode causar avarias em frutas e vegetais pelo frio excessivo, o que implica em um período inadequado de amadurecimento do produto, mudança do sabor, descoloração, sinais de corrosão, entre outros fatores.

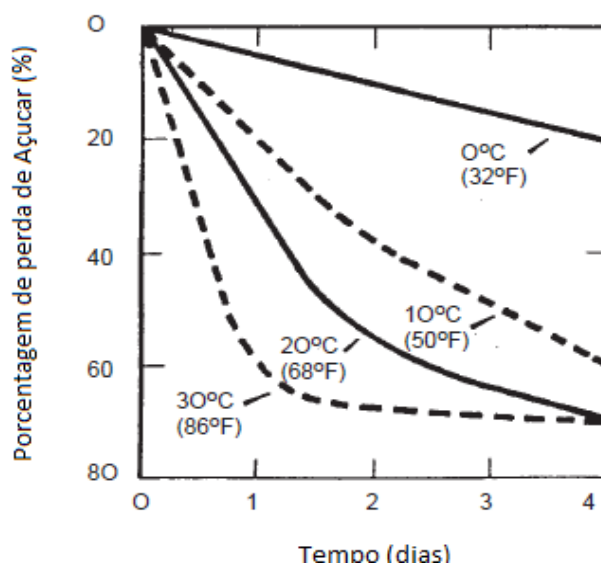


Figura 9: Perda de açúcar em Aspargo em função do tempo e temperaturas
Ashby (1995)

Outro trabalho com a mesma abordagem é o de Lang, *et al.* (2012). Os autores estudam a perda de qualidade de produtos alimentícios como frutos e vegetais típicos em função do ambiente de transporte (temperatura). A Figura 10 trás o comportamento da perda de vida de prateleira em função do período em que os produtos são submetidos à temperatura inadequada. No geral ela mostra que na medida em que a temperatura do ambiente aumenta a vida útil do alimento diminui consideravelmente. Além disso, mostra que o tomate verde é um produto muito sensível chegado a perder 2 dias de vida útil com um aumento de 2 graus no ambiente que é submetido.

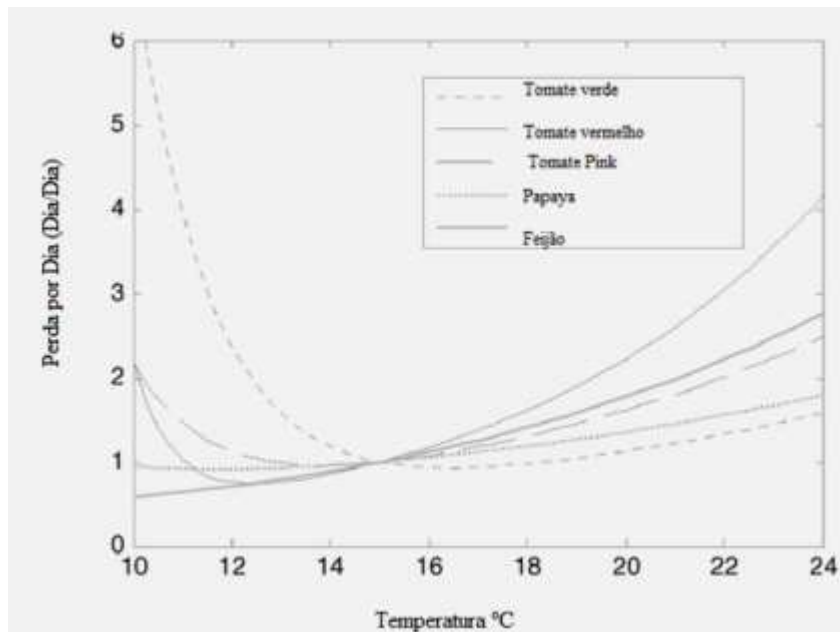


Figura 10: Perda da vida de prateleira por dia em função do tempo de vegetais e frutos típicos
Lang, *et al.* (2012)

O trabalho de Panazzo e Cortella (2008) questiona a regulamentação para o processo de transporte de alimentos perecíveis. O estudo apresenta os limites de alguns casos de produtos que necessitam de controle de temperatura. A análise realizada observa o crescimento bacteriano em função da temperatura e tempo de exposição. O produto analisado foi folhas de alfaces e o parâmetro de qualidade avaliado foi bacteriano, *colony forming unit (CFU)*. Os resultados do experimento possibilitam entender que a exposição das folhas de alface a temperaturas inadequadas aceleram o crescimento de bactérias. Mesmo utilizando um tratamento para redução do crescimento bacteriano há um aumento significativo de bactérias em função do tempo, mostrando perdas da qualidade do produto quando não respeitado os limites térmicos que asseguram a qualidade do produto. A Figura 11 apresenta o comportamento bacteriano em função do tempo para folhas de alface tratadas e não tratadas (AMENDOLA et al. 2005).

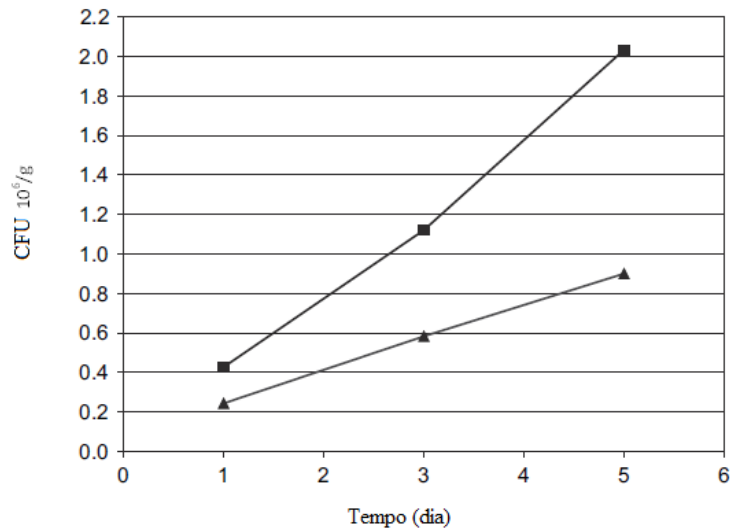


Figura 11: Número bactérias (CFU/ g) em folhas alface não tratadas (■) e tratado (▲) com ions negativos e ozono em função do tempo.

Fonte: Amendola et al. 2005

Para a cadeia do frio os produtos mais sensíveis às variações de temperaturas são os que requerem temperaturas mais baixas, ou seja, produtos congelados. O autor Chapleau, et al. (2005) apresenta uma curva da fração mássica de gelo em função da temperatura, para um alimento congelado onde sua temperatura inicial de congelamento é -2°C (Figura 12). Esta curva permite notar que a fração mássica diminui à medida que a temperatura do ambiente aumenta. Isto pode sugerir um potencial crescimento microbiano, ou perdas e danos físicos, sensoriais.

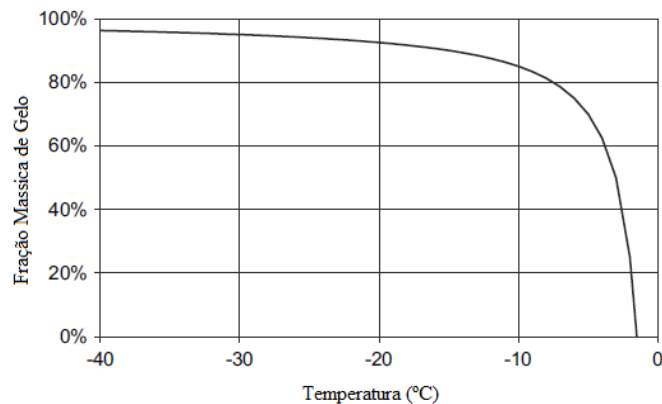


Figura 12: Fração mássica de gelo em função da temperatura de um alimento congelado

Baptista (2006) em sua pesquisa, de uma forma geral, elabora um quadro que expõem o tempo máximo que um alimento pode ser exposto a uma determinada temperatura para não criar condições indesejáveis de crescimento de microorganismos (Quadro 3). Nota-se que o fator tempo durante o transporte é de grande importância frente sua forte influência de crescimento microbiano, sendo responsável pela determinação da segurança e inocuidade do produto alimentício.

Condições Potenciais de Risco	Temperatura do Produto (°C)	Tempo Máximo Acumulado
Crescimento e formação de toxinas de <i>Bacillus cereus</i>	4-6	5 dias
	11-21	6 horas
	Acima de 21	3 horas
Crescimento de <i>Campylobacter jejuni</i>	30-34	48 horas
	Acima de 34	12 horas
Germinação, crescimento e formação de toxinas pelo <i>Clostridium botulinum</i>	Acima de 21	2 horas
Crescimento de esporos patogênicos de <i>Escherichia coli</i>	7-10	14 dias
	11-21	6 horas
	Acima de 21	3 horas
Crescimento de <i>Listeria monocytogenes</i>	-0,4-5	7 dias
	6-10	2 dias
Crescimento de espécies de <i>Salmonella</i>	5,2-10	14 dias
	11-21	6 horas
	Acima de 21	3 horas
Crescimento e formação de toxinas por <i>Staphylococcus aureus</i>	7-10	14 dias
	11-21	12 horas
	Acima de 21	3 horas

Quadro 3: Potencias microbiológicos em função do tempo e temperatura de exposição

Fonte: Baptista (2006)

3.2. ABORDAGEM LOGÍSTICA AO PROCESSO DE TRANSPORTE

Todas as atividades logísticas envolvidas na cadeia do frio são responsáveis pela perda de qualidade de alimentos refrigerados e congelados. Porém, é reconhecido que o transporte é a atividade na qual se concentra a maior parte destas perdas em função da concentração de atividades e não controle do ambiente nesta etapa do processo.

Este fato pode ser observado no trabalho de Heap et al. (1998) que mostram que a perda da qualidade ao longo da cadeia do frio é cumulativa e irreversível. A Figura 13 enfatiza os pontos críticos entre os elos e também durante o processo de transporte, devido a não manutenção da temperatura adequada. É possível visualizar que as etapas de transporte são forte influenciadoras da perda da qualidade da mercadoria, representadas pela inclinação acentuada da temperatura na curva a seguir.

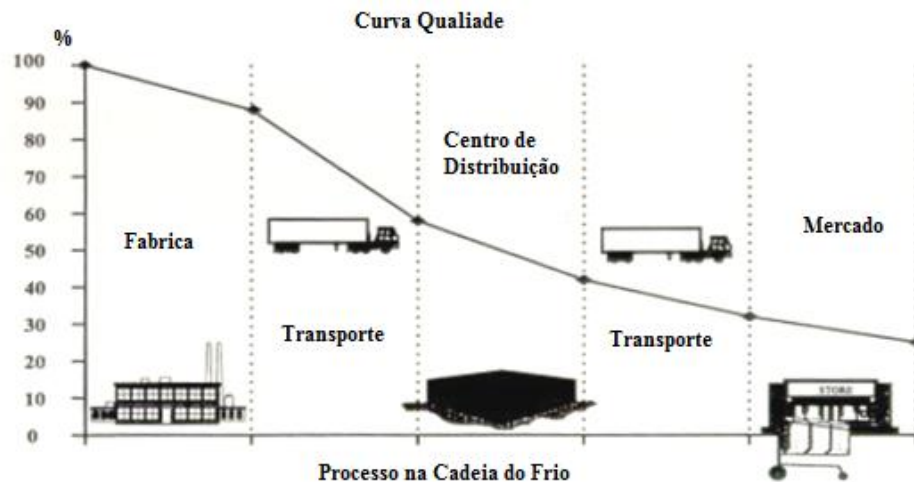


Figura 13: Perda de qualidade do produto na distribuição

Fonte: Heap, Kierstan e Ford, 1998.

A Figura 14 apresenta a variabilidade ao longo da cadeia mostrando que à medida que o produto comercializado se aproxima do elo final, o consumidor, a variabilidade da temperatura aumenta, havendo grande desvio da temperatura. Na curva referente ao produto é possível observar as inclinações com grandes ângulos. O que retrata uma alta variação da temperatura e, conseqüentemente, redução da qualidade. Esta figura também mostra a falta de eficiência do longo do processo. É possível observar que são poucos os períodos em que a carga transportada permanece na temperatura adequada.

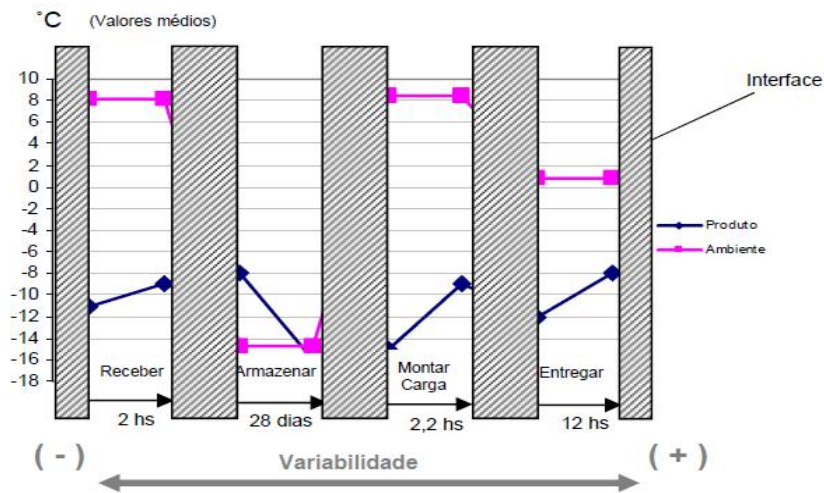


Figura 14: Variabilidade da Temperatura ao longo da cadeia do frio

Fonte: Silva, 2010

Sendo o transporte uma atividade de risco para a manutenção da qualidade na cadeia do frio, será estudada a seguir em maiores detalhes.

3.2.2. Desempenho Térmico de Veículos Refrigerado

O desempenho térmico do veículo é de extrema importância, pois é responsável pela qualidade ou pela perda de qualidade do produto em função da temperatura e das variações ocorridas ao longo do percurso de entregas. Existem dois fatores que podem influenciar o desempenho térmico de veículos refrigerados: as características do processo de transportes (como embarque e desembarque; tempo e número de abertura de portas, e características dos roteiros de entrega) e as características específicas ao veículo refrigerado (como o equipamento de refrigeração, a capacidade do condensador, o isolante térmico, etc.). Estes fatores são abordados a seguir.

3.2.2.1. Características do processo de transporte

Embarque e Desembarque

A atividade de embarque e desembarque dos produtos alimentícios no veículo é fator de atenção no processo de transporte, pois é o momento onde a porta do veículo fica aberta para as atividades de carregamento ou de entrega das mercadorias. Neste instante ocorre a troca de calor entre a massa de ar interna e externa, consequentemente, causando a variações de temperatura no ambiente interno do veículo. Outro fator importante é a temperatura inicial da carga ao ser

carregada no veículo. Esta deve encontrar-se com a temperatura especificada exigida por qualidade, para evitar que o veículo seja utilizado para resfriar a mercadoria. Outro fator importante é a temperatura inicial do veículo antes do carregamento, o mesmo deve ser resfriado até a temperatura ideal para a carga que será transportada. Estes fatores são relatados nos trabalhos de Estrada-Flores e Eddy (2006) e Pereira et al (2010), além de apresentarem problemas como esperas excessivas nas plataformas de embarque, processos lentos de carregamento e de entrega da mercadoria, permanecendo tempos longos de porta aberta. Estes fatores ocasionam elevações de temperatura além do permitido.

Heap (2006) propõe que durante o processo de transporte, os produtos a serem distribuídos devem, obrigatoriamente, ter suas temperaturas reduzidas antes de entrarem na câmara do veículo, pois o sistema de refrigeração instalado nessa câmara não é dimensionado para reduzir a temperatura dos produtos frigorificados. O SEST/SENAT (2009) sugere que o produto deve ser carregado no veículo à temperatura correta para que o sistema de refrigeração consiga desempenhar corretamente a sua função, que é manter a baixa temperatura dos produtos transportados.

Antes de iniciar o carregamento dos produtos, deve-se verificar se o sistema de refrigeração da carroceria está funcionando adequadamente e se não há a necessidade de se realizar um degelo da serpentina. A carroceria deverá ser pré-resfriada antes do início do carregamento por um período suficiente para que a temperatura interna esteja uniforme à temperatura de transporte (IIR, 1976).

Segundo a NBR 14701 (ABNT, 2001), o transporte de produtos alimentícios é realizado utilizando diferentes câmaras frigoríficas, contudo estas devem ser capazes de manter a temperatura do produto no valor desejado. Obrigatoriamente, deve-se reduzir e estabilizar a temperatura interna da carroceria por pelo menos 15 minutos antes da entrada do produto alimentício, além de se utilizar instrumentos para registro contínuo da temperatura do ar interno e indicação desta temperatura durante o transporte. O aumento da temperatura da superfície do produto alimentício congelado até $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ pode ser tolerado, desde que a temperatura do centro térmico continue a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, de modo que a redução da temperatura superficial deve ser feita

rapidamente. Segundo Baptista (2005), a norma NBR 14701 regula, mas não resolve todos os problemas encontrados no transporte frigorificado de alimentos.

Um trabalho realizado por Irving e Sharp (1976) avaliou a temperatura de produtos no processo de carga e descarga na cidade de Sidney, Austrália. O objetivo foi entender o comportamento da temperatura dos mesmos nas duas estações do ano consideradas críticas o verão e o inverno. As medições apontaram que as estações analisadas influenciam fortemente o comportamento das temperaturas dos produtos congelados transportados. A carga é abastecida a uma temperatura inicial de -11°C é possível observar que na estação do verão tanto o carregamento quanto descarregamento observa-se o aumento de temperatura. No entanto, no inverso ocorre o decréscimo de temperatura em função da baixa temperatura externa (Quadro 4). Quando se traz esta análise para o caso brasileiro, Kefford (1997) afirma que a situação se torna ainda mais crítica devido ao clima tropical onde as variações de temperatura podem ocorrer entre 15°C a 35°C na maioria das regiões.

Médias das temperaturas	Verão	Inverno
Carregamento	$-16,5^{\circ}\text{C}$	$-17,0^{\circ}\text{C}$
Descarregamento	$-12,0^{\circ}\text{C}$	$-13,5^{\circ}\text{C}$

Quadro 4: Temperatura de carga congelada em diferentes estações

Fonte: Irving e Sharp (1976)

Observa-se que além do ganho de gradiente térmico em função da variação térmica do ambiente externo no processo de abertura de porta, o sistema de refrigeração é desligado ao chegar ao ponto de entrega. Este fato pode ser observado no trabalho de Kefford (1979), que avaliando o efeito da temperatura comparou o cenário para um veículo parado e em movimento. O resultado obtido do experimento foi que o veículo parado apresentou menor capacidade frigorífica e conseqüentemente menos carga térmica. Este fato pode ser visualizado na Figura 15 elaborada por Peão (1998).

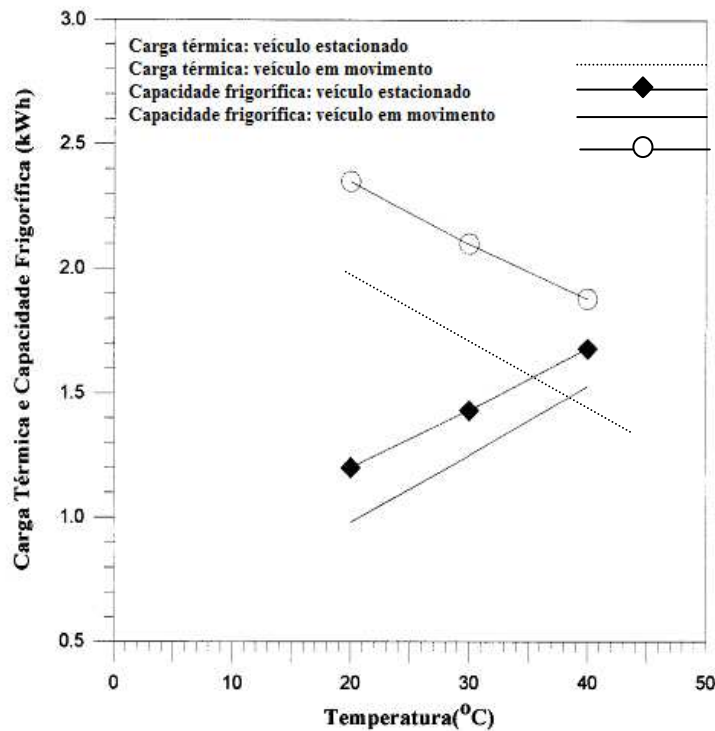


Figura 15: Efeito da Temperatura Ambiente no Transporte (Veículo parado x movimento)

Fonte: Adaptado de Peão, 1998

Abertura de Portas

Uma vez que a porta do compartimento refrigerado do veículo é aberta, ocorre troca de ar frio interno pelo ar quente e úmido do ambiente externo (IRR, 1986). A abertura desnecessária de portas ou mesmo um período longo de carregamento ou descarregamento pode ocasionar um aumento alevado da carga térmica. O ar frio, pela sua densidade maior, escapa pela parte inferior do veículo formando uma neblina branca e em seguida ocorre a entrada de ar quente pela parte superior do veículo. Isto pode provocar grandes variações de temperatura no interior do veículo. Por esse motivo, é importante que a entrada de ar do ambiente externo seja evitada ao máximo. Os procedimentos sugeridos são a redução do tempo de abertura de porta e a redução do número de entregas por veículo, a fim de respeitar a capacidade frigorífica do equipamento e consequentemente assegurar a temperatura limites da carga (NEVES FILHO, 2010).

A Figura 16 elaborada por Rodrigue e Craig (2010) mostra os pontos críticos de grande variação da temperatura no processo de transporte e de armazenamento destacando os elos de transição entre os processos e aponta os pontos críticos onde a temperatura limite não é respeitada.

Observa-se que na primeira transição a carga sofre um brusco aumento de temperatura, ultrapassando o limite superior da temperatura requerida pelo produto analisado. Isto ocorre devido à abertura de porta que possibilita a troca de calor entre o ambiente interno e externo e, conseqüentemente, causa o aumento da temperatura do veículo. Isto pode ser observado fortemente nos processo de carga e descarga. Já na segunda transição é possível observar que a temperatura durante o armazenamento diminuiu bruscamente, porém, quando a carga é transferida para o veículo e realiza as entregas durante o roteiro de transporte tem, novamente, a sua temperatura elevada.

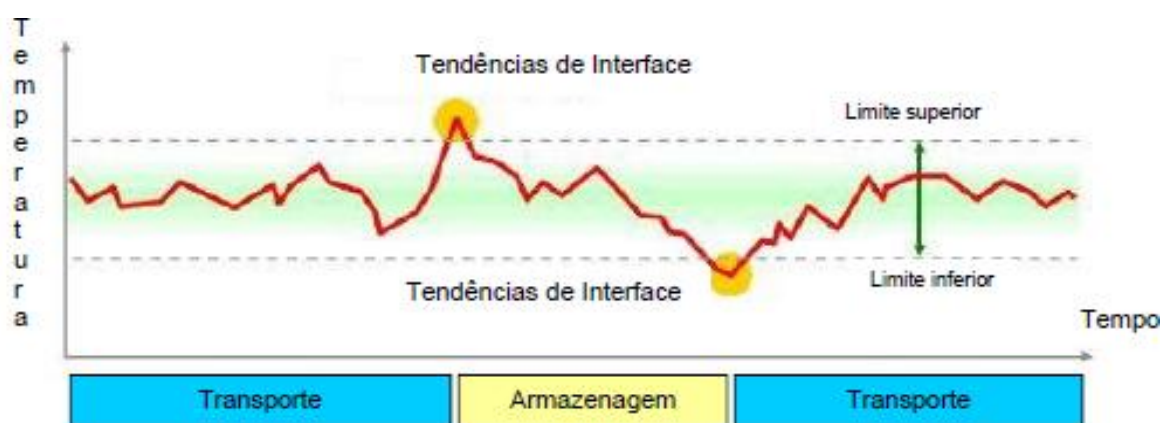


Figura 16: Comportamento da temperatura entre os elos da cadeia do frio

Fonte: Silva 2012, Adaptado de Rodrigue e Craig (2010)

Quando o produto alimentício é submetido a este tipo de ambiente, no qual a temperatura ambiente do veículo além de ultrapassar os limites térmicos superiores e inferiores oscila com a abertura de porta em função das entregas, ocorrem danos e perdas de qualidade como redução do peso, perda de água, modificação de cor, alteração de textura, etc. Este fato aponta a importância do monitoramento e da manutenção da temperatura nestes elos de transição considerados mais críticos.

A frequente abertura de portas do veículo pode acarretar na perda de eficiência do sistema de refrigeração do veículo. Ocorre uma formação de gelo no evaporador que reduz o desempenho do sistema de refrigeração e aumenta a necessidade da realização de degelos, especialmente em ambientes com umidade relativa alta (ESTRADA-FLORES e EDDY, 2006). Essa formação de

gelo pode dificultar a troca de calor entre a superfície da serpentina e o ar circulado dentro da câmara, podendo bloquear totalmente a passagem de ar pela serpentina (Neves Filho, 2010).

Um trabalho que retrata o ganho de temperatura durante a abertura de porta em entregas de mercadorias refrigeradas e congeladas é de Pereira, et. al (2010). Ele realiza um estudo para entender o comportamento da temperatura durante roteiros de entrega. O trabalho elabora gráficos do comportamento de paradas do veículo para descarga e os ganhos de temperatura (Figura 17). Nota-se que o ganho de temperatura é cumulativo durante as entregas. Os longos roteiros de entrega também são responsáveis pela dificuldade do sistema de refrigeração retomar a temperatura ideal. Observa-se também que o desligamento do veículo, durante o momento de espera para o descarregamento, contribuiu para a elevação da temperatura na câmara frigorífica.

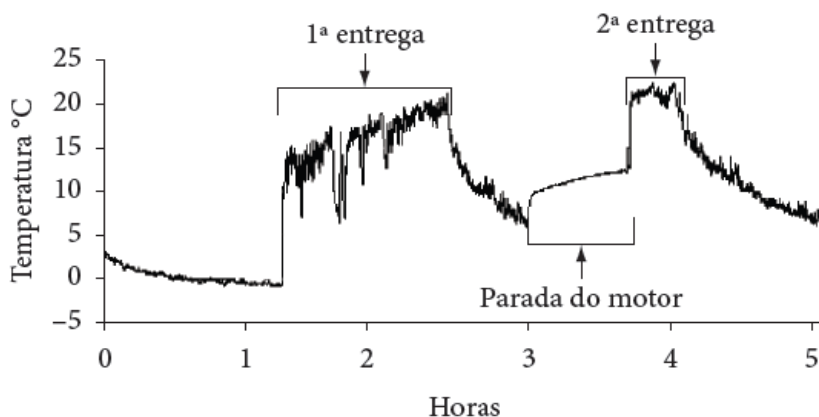


Figura 17: Histórico de variação de temperatura

Fonte: Pereira, et al. 2010

Veículos refrigerados modernos possuem uma cortina térmica na porta de acesso ao compartimento de carga, que reduz significativamente a absorção de calor do ambiente externo. Esta cortina térmica é uma cortina vertical de ar refrigerado lançado de cima para baixo na porta de acesso, e forma uma barreira à troca de calor com o meio ambiente (GE e TASSOU, 2001). Outra técnica mais econômica é a cortina de tiras de plástico, feitas de material específico. Estas são colocadas verticalmente na porta e cedendo passagem aos carregadores, voltando a sua posição inicial logo que são liberadas. No Brasil é muito comum encontrar estas tiras na lateral da porta, ou mesmo sobre a carroceria do veículo. Os carregadores afirmam que elas atrapalham o

trabalho da manipulação da carga e, conseqüentemente, provocam nefastas conseqüências à qualidade do produto.

Roteiro de entregas

O roteiro de entregas também é ponto crítico a manutenção da temperatura no transporte. Quanto maior o número de entregas em um roteiro, maior será o número de paradas e, conseqüentemente, maior o gradiente térmico ganho neste processo.

Segundo Heap (2006), existe uma opinião comum em se pensar que durante o transporte de produtos frigorificado, quanto mais longo for o trajeto de viagem, maior deverá ser o cuidado para evitar o rompimento da cadeia do frio. Infelizmente, há quem acredita que a recíproca dessa mesma idéia também seja verdade, ou seja, se os trajetos de viagem forem curtos durante as entregas desses produtos, não existe uma necessidade em se preocupar com o rompimento da cadeia do frio. Este tipo de raciocínio invertido faz com que os deslocamentos mais curtos sejam os mais críticos para a manutenção da cadeia do frio.

3.2.2.2. Características do Veículo Refrigerado

Os veículos utilizados para este tipo de transporte geralmente são mais pesados que os convencionais e também consomem mais combustível, isto acontece em função do peso extra do equipamento necessário para realização da refrigeração. No Brasil o acordo e a norma que apresentam significativas contribuições são o ATP – *Agreements on the International Carriage of Perishable Food-stuffs* e da Norma NBR 15457 (Norma Brasileira Regulamentadora) respectivamente. Eles fazem referência aos veículos refrigerados regulando parâmetros necessários para desempenho de carrocerias termicamente isoladas.

A norma NBR 15457 surgiu a partir de estudos realizados pelo IBF (Instituto Brasileiro do Frio), e também através do seu comitê técnico do setor produtivo como ABRAVA e ANFIR (Associação Nacional dos Fabricantes de Implementos Rodoviários). Com apoio da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) eles desenvolveram um estudo na área que se transformou na norma ABNT NBR 15457 conhecida como “Carrocerias Termicamente Isoladas – Desempenho Térmico”. Esta norma, por exemplo, fornece métodos para o cálculo da carga

térmica, necessário para a determinação do ganho de calor adquirido pelas aberturas de portas, respiração do produto, entre outros (NEVES FILHO e SILVEIRA JR, 2010).

Já o ATP é um acordo relacionado ao transporte internacional de produtos perecíveis e aos equipamentos específicos utilizados neste tipo de transporte. Ele foi assinado na década de 70 em Genebra e, atualmente, é fortemente recomendado na área. Tem por objetivo criar procedimentos para as caixas isotérmicas e equipamentos que garantam a qualidade do produto transportado, e fazem uma classificação deste tipo de equipamento com o objetivo de padronizar termos na área e definir limitação (ATP, 1970).

O ATP classifica os veículos utilizados neste tipo de transporte (refrigerado e congelado) em quatro grupos de acordo com o seu coeficiente global de transmissão térmica e também a capacidade de manter a temperatura do veículo: veículos isotérmicos, veículos refrigerados, veículos frigoríficos e veículos caloríficos. Os veículos isotérmicos são classificados como uma caixa isotérmica normal (IN) quando apresentam um coeficiente global de transmissão térmica K igual ou inferior $0,7 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Quando o K for igual ou inferior a $0,4 \text{ W/m}^2\text{°C}$ ele é classificado como caixa isotérmica reforçada, IR (ATP, 1970).

Os veículos refrigerados são aqueles que sem recurso mecânico ou de absorção conseguem manter a temperatura desejada em seu interior quando a temperatura exterior atinge 30°C . Este tipo de veículo utiliza uma fonte de frio como gelo hídrico, neve carbônica, e placas eutéticas. Estes sistemas conseguem manter a temperatura baixa no período de no mínimo 12 horas, sem serem reabastecidos. Dependendo da temperatura que este sistema consegue manter, ele pode ser classificado em quatro classes de veículo refrigerado:

- **Classe A:** temperatura interior máxima de $+7\text{°C}$
- **Classe B:** temperatura interior máxima de -10°C
- **Classe C:** temperatura interior máxima de -20°C
- **Classe D:** temperatura interior máxima de 0°C

Uma observação para estas classes é que para classe B e C, o coeficiente K deverá ser sempre menor ou igual a $0.40 \text{ W/m}^2\text{C}$ para conseguir manter este nível de temperatura mínima.

Os veículos frigoríficos possuem uma caixa isotérmica atrelada a um equipamento que gera frio mecânico e possibilita a redução da temperatura e a conservação do frio mesmo a uma temperatura exterior de 30°C . Este grupo também é dividido em 6 classes, apresentadas a seguir:

- **Classe A:** temperatura interior entre $+12^\circ\text{C}$ e 0°C .
- **Classe B:** temperatura interior entre $+12^\circ\text{C}$ e -10°C .
- **Classe C:** temperatura interior entre $+12^\circ\text{C}$ e -10°C .
- **Classe D:** temperatura interior inferior a 0°C .
- **Classe E:** temperatura interior inferior a -10°C .
- **Classe F:** temperatura interior inferior a -20°C .

Observa-se que para as classes B, C, E e F para atingirem a temperatura desejada é necessário que o seu coeficiente K seja menor ou igual a $0,40 \text{ W/m}^2\text{C}$.

Os veículos caloríficos possuem um auxílio de equipamento capaz de elevar a sua temperatura interior a um valor maior ou igual a 12°C e mantê-la durante 12 horas. Estes veículos são destinados a regiões muito frias que necessitam de aumento de temperatura e a manutenção da mesma para que não sofra injúrias e avarias pelo frio. Este grupo também é dividido em classes:

- **Classe A** temperatura média exterior de -10°C .
- **Classe B** temperatura média exterior de -20°C .

O Quadro 5 apresenta a síntese destes quatro grupos e compara seus coeficientes globais de transmissão térmica e suas temperaturas máximas e mínimas atingidas pela constituição de cada sistema.

Grupos	Isotérmica	Classe	Coefficiente K [W.m ² .°C]	Temperatura interior [°C]	Temperatura exterior [°C]
Isotérmico	Normal		≤ 0.7	-	-
	Reforçado		≤ 0.4	-	-
Refrigerado	Normal	A	0.7	+7	+30
	Reforçado	A	0.4	+7	+30
	Reforçado	B	0.4	-10	+30
	Reforçado	C	0.4	-20	+30
	Normal	D	0.7	0	+30
	Reforçado	D	0.4	0	+30
Frigorífico	Normal	A	0.7	+12/0	+30
	Reforçado	A	0.4	+12/-10	+30
	Reforçado	B	0.4	+12/-10	+30
	Reforçado	C	0.4	+12/-10	+30
	Normal	D	0.7	+2	+30
	Reforçado	D	0.4	+2	+30
	Reforçado	E	0.4	-10	+30
	Reforçado	F	0.4	-20	+30
Calorífico	Normal	A	0.7	+12	-10
	Reforçado	A	0.4	+12	-10
	Reforçado	B	0.4	+12	-20

Quadro 5: Grupos de veículos isotérmicos e suas respectivas características

Fonte: ATP (1970)

Outro trabalho que traz a classificação de veículos refrigerados, porém considerando parâmetros de operacionalidade é de Ashrae (1994). Ele classifica os veículos em três grupos: veículo de transporte de longa distância; veículo de transporte de curta ou média distância; e veículos de distribuição de produtos alimentícios. O autor também faz a classificação por funcionalidades da temperatura: veículos para produtos congelados (atingem a temperatura de -18 °C); produtos frescos (atingem temperaturas entre 0°C a -2 °C); produtos perecíveis (atingem temperaturas entre

0 a 5 °C); e ar-condicionado (atingem temperaturas entre 13 a 21 °C). A Figura 18 apresenta exemplos de veículos conforme a classificação de operacionalidade.



Veículo de Distribuição



Veículo de Longo Curso

Figura 18: Classificação dos Veículos de transporte conforme operacionalidade

Fonte: Ashrae (1994)

Os veículos de transporte e também de curta ou média distância geralmente são veículos semireboques, Figura 19.



Figura 19: Exemplo de veículo semireboque com baú frigorífico e unidade de refrigeração

Fonte: Silva (2010)

O sistema de distribuição de ar dentro de um semireboque frigorífico é de grande importância, pois é responsável pela distribuição de carga fria ao longo do veículo, garantindo temperaturas uniformes. De acordo com Ashby (1995) existem dois métodos principais de circulação de ar em veículos refrigerados. O superior (*top-air delivery*) e o inferior (*Ceiling ducts delivery*) que são detalhados na Figura 20 a e b, respectivamente. A circulação superior é a mais convencional e reforçada pela característica de construção do sistema onde acontece a circulação de ar no sentido

horário no interior do veículo. Já a inferior vem sendo bastante empregada, mas tem limitação de extensão de veículo devido ao alcance e uniformidade da temperatura. A circulação acontece no sentido anti-horário e é caracterizada pela corrente de ar com a forma de um retângulo, como pode ser visualizado na figura 20 b.

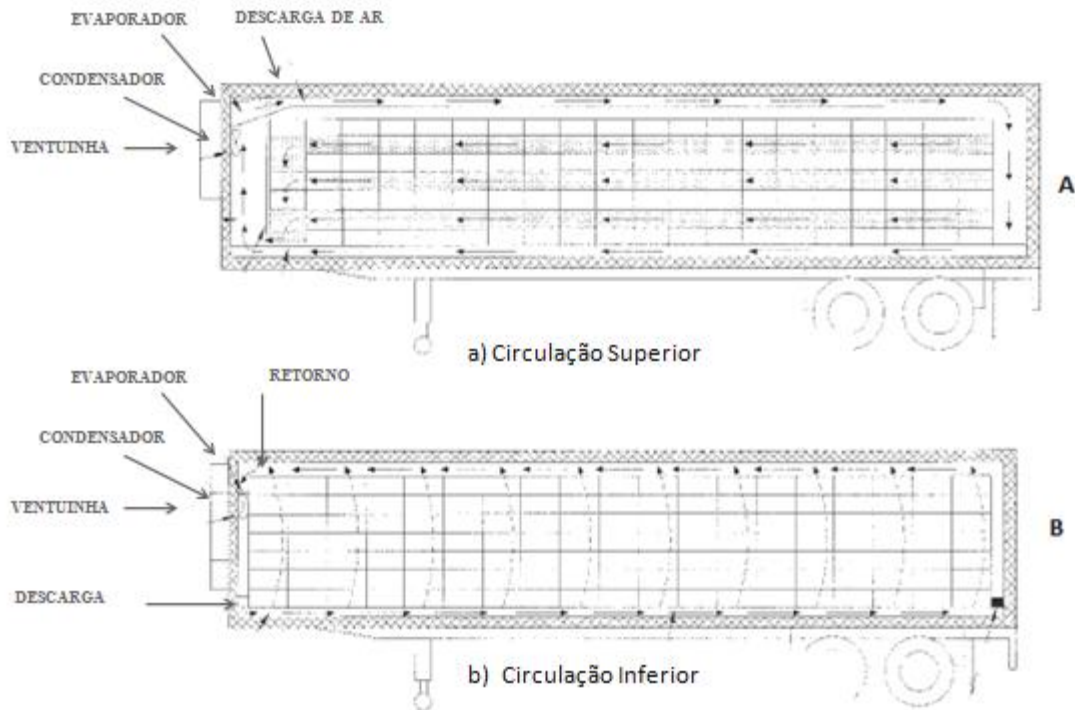


Figura 20: Métodos de circulação em veículos refrigerados

Fonte: Adaptado de Ashby (1995)

Para Tassou et al. (2009) o sistema de distribuição de ar em um veículo semireboque é estruturado a partir do ventilador que é localizado a frente do evaporador. Ele insufla o ar frio através de um duto localizado ao longo da parte superior interna da superfície do caminhão, possibilitando que o ar infiltre nas paredes laterais, ao longo do piso, e também entre os paletes e/ou caixas da carga organizadas ao longo do veículo, conduzindo o ar quente de volta para o evaporador, onde é novamente recomeçado o ciclo de distribuição de ar. Ainda os autores fazem uma ressalva a cargas resfriadas, como frutas e verduras, onde o fluxo de ar deve passar ainda pelas embalagens vazadas e conduzir o calor da respiração que representa uma importante parcela do calor da carga transportada. O sistema descrito por Tassou et al. (2009) pode ser visualizado

na Figura 21, apresentado detalhadamente do sistema de circulação de ar em um veículo semireboque.

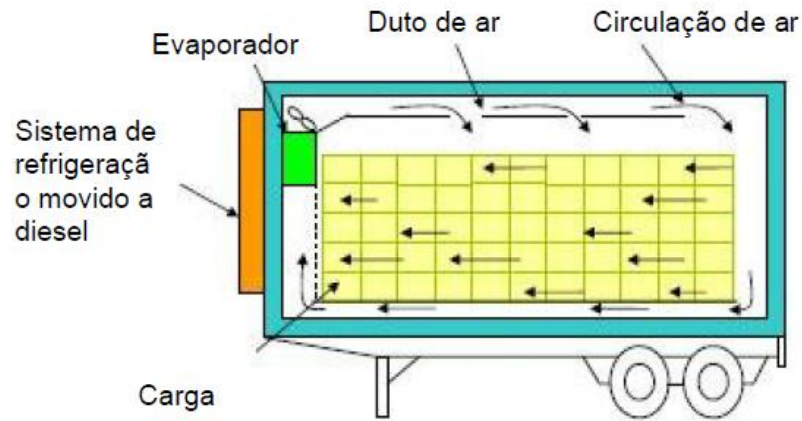


Figura 21: Sistema de distribuição de ar em veículo semireboque

Fonte: Silva (2010) adaptado de Tassou, De-Lille e Ge (2009)

Os veículos de longo curso podem ser adaptados com diferentes câmaras dependendo de sua funcionalidade, devam ser projetadas com paredes laterais de espessura específica adequada a necessidade da operação a ser realizada. A espessura pode influenciar na capacidade de carga, chegando ao incremento de 20% relacionado aos veículos convencionais. Todavia, paredes mais finas podem apresentar deficiente distribuição da temperatura e também maior susceptibilidade ao envelhecimento, fortemente condicionado pela umidade (BENNAHMIA, 1990 e PITARMA 1998).

Veículos repartidos, também conhecidos como multi reboque, podem realizar distribuição de mercadorias de diferentes especificidades de temperatura (como por exemplo, carga congelada e refrigerada, ou congelada e climatizada, entre outros). Estes podem ser utilizados para diferentes funcionalidades, no entanto devem respeitar as normas e regulamentações.

Nota-se um aumento no uso deste tipo de veículo, repartido. Segundo Ashby (1995) este fato é observado principalmente para operações de distribuição de alimentos, em especial para *fast food* e supermercados independentes. Isto também é observado por James et al. (2006) que afirmam

que o aumento da demanda por produtos resfriados e congelados em um único pedido requer flexibilidade no transporte refrigerado com a utilização de painéis móveis isolados termicamente. Ainda segundo Ashby (1995) os veículos de multi temperaturas podem chegar a ser projetados com até três diferentes compartimentos, separadamente controlado. A Figura 22 mostra um exemplo de um caminhão multi-reboque organizado em três compartimentos: compartimento congelado (com temperatura de -18°C); compartimento refrigerado (com temperatura de 2°C); e compartimento destinado a alimentos refrigerados (com temperatura em torno de 13°C).

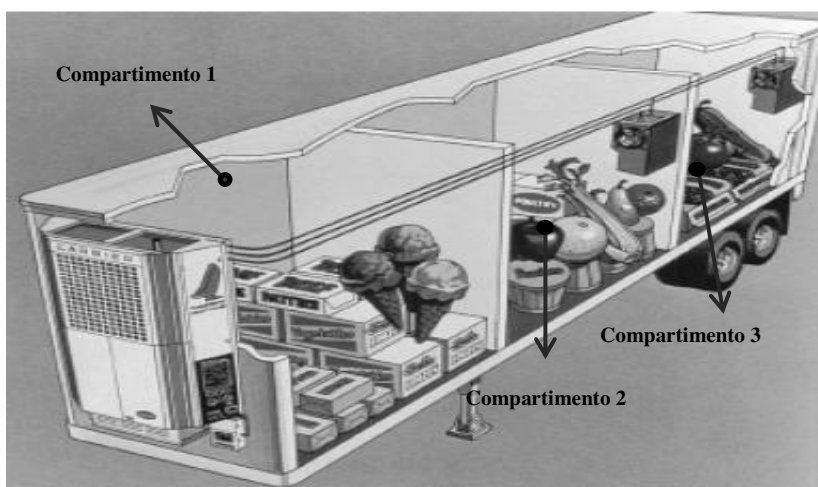


Figura 22: Veículo multi-reboque de diferentes temperaturas

Fonte: Ashby (1995)

O sistema de distribuição de ar no veículo multireboque pode ser organizado em divisórias móveis que possibilitam a separação de produtos de diferentes temperaturas durante o transporte. Segundo Silva (2010) e Zhang (2007) é um diferencial competitivo, por outro lado constitui um sistema complexo que exige melhor organização de alocação das cargas nas entregas, treinamento de mão de obra para a utilização do sistema, maior custo e manutenção do equipamento etc. Tassou et al. (2009) também fazem referência a complexidade deste tipo de sistema citando a necessidade de atenção a fatores que compõem o sistema como a taxa de transferência de calor entre os ambientes, eficiência do material de isolamento (divisórias), capacidade da unidade de refrigeração com múltiplos evaporadores, entre outros.

A Figura 23 exemplifica uma carroceria multi compartimentada. Cada compartimento é alocado com evaporador específico e alimentado por uma única unidade de condensação.

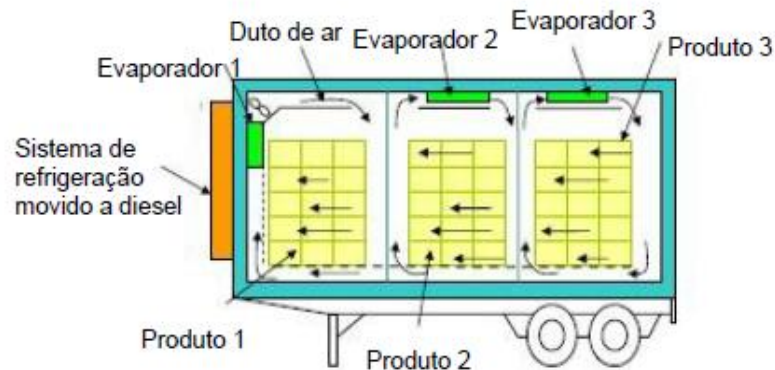


Figura 23: Sistema de distribuição de ar de veículo multi compartimentado

Fonte: Silva (2010) adaptado de Tassou, De-Lille e Ge (2009)

Este tipo de veículo deve ser bem isolado para diminuir o fluxo de calor entre as paredes. Geralmente o material utilizado para fazer este isolamento é a espuma de plástico por proporcionar um coeficiente de transferência de calor baixo. Elas são impermeáveis, não corrosivas, de material leve, não onerando ao veículo um peso extra (ASHBY, 1995). A qualidade deste isolamento pode ser melhorada adicionando outras práticas como o caso de utilização de aço ou de alumínio altamente polido no exterior do veículo, provocando a reflexão dos raios solares. Este material pode ser substituído pela pintura externa do veículo utilizando tinta reflexiva.

O sistema de refrigeração de maior utilização em veículos refrigerados é por compressão de vapor, segundo Silva (2010). No entanto, existem outras formas de obtenção do frio como: o movido a diesel, a motor elétrico, acoplada ao motor do caminhão, de criogenia, e placas eutéticas. Para Heap (2007) os sistemas movido a diesel e a motor elétrico funcionam independentes, sendo o primeiro sistema utilizado para veículos de médio e grande porte, ou seja, destinado a roteiros de longas distâncias. Já o segundo sistema funciona de forma estacionária. O terceiro sistema, unidade acoplada ao motor do caminhão, é dependente sendo utilizada para roteiro de curta distância. Este sistema é interrompido quando o veículo é desligado nas paradas para a carga e descarga de mercadorias, devendo se tomar maior atenção nesta parte do processo

para não se perder o frio. Estes três primeiros sistemas são obtidos a partir da compressão de vapor, utilizando um fluido refrigerante.

Para Silva (2010) tem sido cada vez mais frequente a combinações desses três sistemas de refrigeração e outros arranjos híbridos com o objetivo de melhorar o processo de transporte e consequentemente ter uma maior eficiência do sistema. Gás refrigerante do tipo HFC tem sido muito utilizado para a refrigeração de veículos rodoviários podendo operar independente do motor do veículo ou podendo operar acoplados ao motor do caminhão, durante a fase de deslocamento do veículo. Na fase estática do veículo, a unidade de refrigeração pode operar por meio de energia elétrica, enquanto aguarda para descarregar (IIR, 2003).

O sistema de criogenia utiliza normalmente o gás CO₂ na forma líquida é também chamado de sistema de perda total, devido à completa exaustão do gás. É utilizado para transporte de alto valor agregado, devido ao custo elevado (TASSOU et al, 2008). Por último o sistema eutético muito utilizado no transporte de produto congelado (como sorvetes e produtos que exigem temperaturas muito baixas).

Neves Filho (2006) afirma que para se obter um melhor desempenho no processo de transporte de mercadorias refrigeradas e congeladas é necessário dar atenção a alguns fatores como:

- Adequação dos equipamentos de refrigeração com as dimensões da carroceria do veículo;
- Verificação do tipo de sistema a necessidade da temperatura requerida pela carga;
- Refrigeração do veículo antes do carregamento da mercadoria;
- Alocação das mercadorias que não bloqueie o fluxo de ar, tanto das paredes quanto do piso;
- Utilização de um duto para conduzir o ar insuflado por ventiladores;
- Sistemas adequados de vedação das portas;
- Utilização de cortinas de ar para diminuir a gradiente de calor com a abertura de portas;
- O desligamento do aparelho de refrigeração enquanto as portas estiverem abertas;
- Utilização de divisórias para entregas com múltiplas temperaturas;
- A utilização de prateleiras para reduzir vibrações e choques quando a carga não for paletizada.

Um estudo realizado por Cruz (2009) objetivou acompanhar e analisar os processos necessários à certificação de veículos destinados ao transporte de produtos perecíveis. O estudo realizou dois ensaios simulados em laboratórios para classificar e certificar dois veículos. Foi ainda realizado um ensaio informático, para investigar a viabilidade destes ensaios. Dois casos apresentam o comportamento da distribuição do ar no veículo conforme a configuração de dois diferentes sistemas de refrigeração. Sistema A convencional e sistema B de conduta com duas aberturas de insuflação (Figura 24). O primeiro obteve um bom resultado, no entanto este sistema de circulação de ar está condicionado pelo forte efeito de desidratação que induz, fazendo-se necessário uma velocidade do ar mais baixa através de duas (ou mais) aberturas localizadas no teto, na parte posterior do compartimento. Já o sistema B apresentou-se mais eficaz garantindo níveis mais admissíveis da velocidade do ar na zona útil. Ele apresentou-se uniforme, sem conseguir melhorar a distribuição da grandeza na zona crítica descrita.

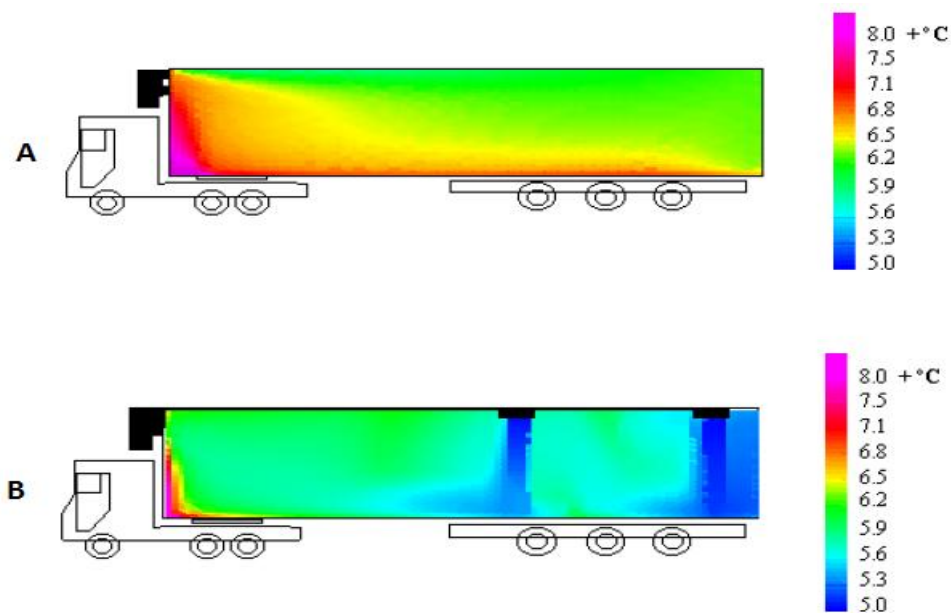


Figura 24: Desempenho térmico de veículo refrigerado com variação de sistemas: A Convencional e B duas aberturas de insuflação

Fonte: Cruz (2009)

Outro trabalho que mostra o desempenho térmico de veículo em função de suas especificidades é o de Tso *et al.* (2002). O trabalho trás um estudo experimental sobre o calor e as características de transferência de massa no corpo de um veículo refrigerado para três casos: sem uma cortina de ar; com cortina de ar da ventoinha; e com cortina de tiras de plástico. Verifica-se que o uso de uma

cortina de ar pode auxiliar a diminuição do gradiente de temperatura com a abertura de porta na ordem de 40 a 11%.

Outro trabalho que mostra o desempenho do veículo em função da característica proveniente de alguns parâmetros específicos do veículo é o trabalho desenvolvido por Neves Filho e Silveira (2010). Ele compara o desempenho térmico de uma carroceria sem isolamento com uma de isolamento. O trabalho mostra que a carroceria com isolamento apresenta um melhor desenvolvimento térmico, apesar de apresentar grande variação da temperatura em diferentes pontos analisados.

Em função das muitas variáveis envolvidas no desempenho térmico de veículo refrigerado e da importância e significância que estas têm no processo de transporte de mercadorias refrigeradas nota-se um aumento do número de trabalhos e grupos de pesquisa que estudam o processo de distribuição de carga refrigerada e congelada. Muitos trabalhos procuram entender os atributos influenciadores desta variação e também o comportamento do veículo em uma operação de transporte.

3.2.3. Modelos de Desempenho Térmico de Veículo Refrigerado

A abordagem logística também possibilitou a identificação de estudos atuais que buscam descrever o comportamento térmico do veículo refrigerado em roteiro de transporte. Nota-se um aumento significativo deste tipo de trabalho que procura entender os atributos influenciadores do desempenho térmico. Estes trabalhos podem ser organizados em quatro grupos: estudo e proposição de modelos teóricos, testes laboratoriais, levantamento de campo, e simulação utilizando TTI (*Time Temperature Integrator*). O primeiro grupo é caracterizado por trabalhos que fazem o uso de modelos matemáticos de CFD (Computational Fluid Dynamics) com base em aspectos físicos de transferência de calor (CUESTA et al, 1990; ZHANG et al, 1994; Campanone et al, 2002). No segundo grupo estão os trabalhos que descrevem testes laboratoriais controlados, como Moureh e Derens (2000), Tso et al (2002), Estrada-Flores e Eddy (2006) e Garcia (2008). No terceiro grupo estão os trabalhos que envolvem testes de campo, eventualmente completado com dados laboratoriais, tais como o experimento CoolVan (GIGIEL et al, 1998; SCHOLFIELD e JAMES, 1998, JAMES et al, 2006), bem como outros similares (GIANNAKOURETOS et al,

2005; PEREIRA et al, 2010; NGA, 2010). O quarto grupo compreende os trabalhos que abordam o TTI - Análise de indicadores de tempo e temperatura, geralmente empregando simulações utilizando o sistema computacional (MANUAL COOLVAN 2000, HOANG et al, 2012a, b). Independente do tipo de abordagem observa-se que boa parte desses trabalhos empregam métodos combinados. Estes trabalhos são apresentados com mais detalhes na sessão seguinte.

3.2.3.1 Modelos Teóricos

Alguns trabalhos, frente diferentes cenários, propõem modelos teóricos que visam reproduzir o comportamento da temperatura no interior do veículo de transporte a partir de equações matemáticas. Alguns atributos são levados em conta e também variados para entender a influência que exercem ou não no processo como, por exemplo, tipo de carroceria, cortinas de ar, temperatura externa ao veículo, entre outros.

Um exemplo de modelo teórico desenvolvido é o programa CoolVan. Na década de 90 o centro de pesquisa *Food Refrigeration and Process Engineering Research Center at University of Bristol* obteve apoio financeiro para desenvolver um programa capaz de apoiar a gestão de transporte de carga refrigerada durante roteiros de entregas. Este programa é conhecido como CoolVan (PARRY JONES e JAMES, 1994). A Figura 25 mostra a janela principal do programa bem como as entradas que compõem o modelo como: Ambiente externo, roteiro de entregas, característica da carga transportada, do veículo.

O programa foi desenvolvido com base em equações matemáticas integradas capazes de modelar os diferentes parâmetros envolvidos no processo. A partir dessas equações o programa mostra o comportamento da temperatura interna ao veículo e a temperatura da carga frente ao roteiro pré-definido. O modelo é resolvido através de um método de diferença finita implícito. Ela começa com as condições iniciais e prossegue até o fim da viagem com intervalos de tempo variáveis. O programa é capaz de modelar os detalhes da viagem com precisão e pode contribuir para a gestão de frotas de veículos refrigerados, corrigir falhas no sistema e ser utilizado no treinamento de funcionários que atuem nesta área.

O coração do programa CoolVan é a temperatura do ar no interior do veículo. Ele simula a troca calor proveniente do ar no ambiente interno com o ambiente externo, enquanto as portas estão abertas para a remoção da mercadoria. Muitas vezes, o veículo tem um grande número de clientes a serem atendidos em um único roteiro o que causa um grande aumento e variação da temperatura ao longo do percurso. A saída do programa é um gráfico contendo as curvas de comportamento das temperaturas do ambiente externo ao veículo, da superfície do produto, do centro do produto, o comportamento do ganho térmico com o processo de abertura de porta, entre outros.



Figura 25: Programa CoolVan

Fonte: Manual CoolVan 3.0 (2000)

Nos últimos anos, o grupo que elaborou o CoolVan vem publicando trabalhos utilizando o programa. Com o objetivo de simular diferentes cenários para entenderem o comportamento e as variáveis envolvidas no processo (JAMES e JAMES, 2002 e JAMES et al. 2006).

Outro trabalho com abordagem semelhante é o de Zhang *et al.* (1994), que elabora um novo método para a determinação rápida do coeficiente de transferência de calor K em veículos refrigerados e isolados. Através do cálculo da distribuição de temperatura no isolamento, utilizando o método de diferença finita. O novo modelo permite a realização de avaliações mais rápidas e adequadas para testes de controle de qualidade em veículos refrigerados, em ensaios de

produção. O método utiliza cálculo do coeficiente de transferência de calor K . As conclusões são resultados mais precisos do que os métodos atualmente utilizados para testar veículos, devido ao fato de compreender modificações e ajustes na base teórica dos métodos anteriores. A otimização também se deu em um menor tempo para realização do teste.

Outro trabalho que aborda modelo teórico é de Ge e Tassou (2001). Os autores desenvolvem um modelo abrangente baseado na técnica de diferencial finita que pode ser utilizado para prever e otimizar o desempenho de cortinas de ar, utilizadas para reduzir a troca de ar e, portanto, a transferência de calor e de umidade entre o meio condicionado e o ambiente circundante. A finalidade principal da cortina de ar é o de reduzir a troca de ar e, portanto, o calor e a transferência de umidade entre o meio condicionado e o ambiente circundante. O trabalho desenvolve o modelo para uma simulação em frizer horizontal para tentar entender o comportamento térmico do ambiente. Um modelo desenvolvido se baseia na transferência de calor simplificada. O resultado apresentado mostra que o desempenho de cortinas de ar pode ser simulado pela técnica de diferencial finita (equação matemática) com o objetivo de explorar em detalhe a influência de parâmetros de projeto e condições operacionais sobre a transferência de calor total com a utilização das mesmas. O modelo foi validado comparando os resultados com resultados de testes. Além dos resultados da investigação anteriormente resumidos, a literatura mostra um bom número de trabalhos que lidam com abordagens teóricas para os problemas relacionados com o desempenho térmico de veículos refrigerados.

Campanõne, et al. (2002) elaboraram um modelo matemático generalizado para simular a refrigeração de alimentos. Este levou em conta a evaporação da água da superfície, permitindo que as propriedades físicas do alimento sejam consideradas. A validade do método foi verificada por comparação com dados experimentais. O modelo proposto formou um sistema não linear com equações diferenciais parciais. Ele pode simular a refrigeração de uma vasta gama de alimentos sob diversos tipos de condições de funcionamento do meio de refrigeração, e podendo ser estendido a outras situações. O modelo e software desenvolvidos correspondente foram validados com experimentos de campo. As previsões do método numérico mostraram boa concordância em todos os casos.

Laguerre e Flick (2010) e Flick et al (2012) elaboraram um trabalho com finalidade de caracterização experimental e simulação de transferência de calor e fluxo de ar em refrigeradores domésticos. O objetivo foi estudar como duas variáveis aleatórias como a temperatura ambiente e a regulação do termostato influenciam na temperatura do ar e na temperatura da carga, em um frigorífico doméstico. Os autores desenvolveram um modelo, para freezer refrigerado doméstico, que combina uma abordagem determinística e estocástica para entender o comportamento da temperatura do ar e da carga estática em refrigeradores domésticos (sem ventilador). Para os efeitos do desenvolvimento do modelo simplificado, os autores assumiram o estado estacionário no refrigerador, ou seja, todas as temperaturas são consideradas constantes em função do tempo. O modelo de transferência de calor simplificado para uma unidade frigorífica carregada. Seja T_c a temperatura da parede fria, T_w a temperatura da parede quente, T_L e a temperatura da carga, todos estas expressa em Kelvin (K). Supondo que o estado de equilíbrio térmico foi alcançado, tem-se:

$$(T_c - T_L) = \alpha_L (T_w - T_L), \quad \text{com} \quad (14)$$

$$\alpha_L = \exp \left[-K_{value} \left(\frac{A_L}{f_m C_p} \right) \right], \quad (15)$$

onde K_{value} é o coeficiente de transferência de calor ($W m^{-2} K^{-1}$), A_L é a superfície de carga, f_m é a taxa de fluxo de massa do ar na unidade de refrigeração ($Kg s^{-1}$), e C_p representa a capacidade de aquecimento do ar ($J kg^{-1} K^{-1}$). Em um caminhão frigorífico, o processo de arrefecimento não é o mesmo, mas uma relação semelhante entre as variáveis ainda se mantém. No entanto, durante a maior parte de um processo de distribuição de alimentos frios, a transferência de calor segue uma sequência de estados transitórios, e as equações (14) e (15) não se aplicam.

O modelo foi desenvolvido baseado em um projeto de freezer vertical e deu sequência a outros dois estudos Flick et al (2012) parte I e Hong et al. (2012) parte II.

O trabalho de Flick et al (2012) parte I, teve como objetivo propor uma metodologia geral com a finalidade de prever a evolução de produtos alimentares e sua variabilidade ao longo de um frio. Através da observação de variáveis como: temperatura, teor de água, carga microbiana, variáveis logísticas etc. A metodologia foi estruturada com base em modelos determinísticos de equipamentos e em leis estocásticas para diferentes fontes de aleatoriedade. Um algoritmo de

Monte-Carlo foi proposto para resolver as equações do modelo. A metodologia proposta é híbrida combinando a dinâmica do parâmetro tempo orientada a eventos em ambientes incertos. Utilizando apenas um número limitado de hipóteses um algoritmo geral foi proposto pelos autores. A metodologia geral combinada, determinística e estocástica conseguiu descrever a evolução de produtos alimentícios ao longo da cadeia de frio, superando a impossibilidade de prever a evolução, em todo o tempo, a todos os produtos que partilham o equipamento com os produtos de interesse. De forma geral, algoritmo de Monte Carlo foi proposta com base em algumas hipóteses.

A parte II elaborada por Hong *et al.* (2012) teve como objetivo aplicar o modelo desenvolvido na parte I separadamente à três diferentes elos participantes da cadeia do frio: o freezer de exposição, o carrinho de compras e geladeira doméstica. Ao mesmo tempo foi realizado o teste de campo para comparar e observar o comportamento do modelo frente aos três casos sugeridos. Esta comparação entre os resultados numéricos e os dados da pesquisa de campo mostrou bons resultados em termos de valor médio, desvio padrão, e as distribuições estatísticas de temperatura do produto e tempo de residência. O trabalho mostrou que o freezer tem a maior influência sobre o crescimento microbiano na cadeia de suprimentos do frio, no cenário apresentado. Também mostrou que a variação da carga microbiana em cada ligação depende principalmente do tempo de residência e também da calibração do termostato. A expressão matemática utilizada para medir a evolução da temperatura de um produto colocado dentro de um recipiente refrigerado foi: a equação já citada neste trabalho equação (1).

3.2.3.2. Testes Laboratoriais

Alguns trabalhos abordam o problema do desenvolvimento térmico em veículos refrigerados realizando análises práticas em laboratórios para entender o comportamento de alguns fatores importantes de comportamento do ambiente frente a um ambiente e roteiro exposto. Estes testes servem como instrumento de benchmarking para comparar diferentes sistemas de transporte refrigerado e para garantir que estes sistemas proporcionam um nível mínimo de eficácia operacional.

Testes laboratoriais relevantes (MOURETH et al, 2002; ESTRADA-FLORES e EDDY, 2006; NGA, 2010), normalmente avaliam a eficácia do isolamento (fugas de calor) do corpo de isolamento, medida como K_{value} (coeficiente global de transferência de calor), por meio da criação um diferencial de temperatura de pelo menos 20° C entre o espaço de carga e o ambiente externo.

Estrada-Flores e Eddy (2006) incluiu a medição de pelo menos 12 temperaturas abrangendo os cantos, paredes laterais, teto e chão do veículo. Outro teste avalia a capacidade de desempenho do veículo para manter a temperatura do ponto de ajuste no interior do espaço de carga durante 8 horas de operação contínua. O veículo foi testado durante mais 4 horas, com uma carga de calor adicional. A terceira tentativa foi em serviço, ou teste de *pull-down*, que mede o tempo necessário para resfriar o caminhão vazio para a temperatura pré-estabelecida.

Tso *et al* (2002) realizou um estudo experimental sobre o calor e as características de transferência de massa no corpo de um veículo refrigerado para casos de ambiente: sem uma cortina de ar (caso1), com uma cortina de ar da ventoinha (caso 2) e com uma cortina de tiras de plástico (caso 3). O objetivo do trabalho é entender como se comportam as variações da temperatura e umidade relativa no interior do caminhão estacionário, durante um período curto após a porta. A principal finalidade de cortinas de porta em veículos refrigerados é reduzir a troca de ar e, portanto, a transferência de calor e de umidade entre o ambiente condicionado e o ambiente circundante. Durante o percurso de distribuição, o produto refrigerado pode ser submetido a muitas aberturas de porta, onde existe a entrada de calor diretamente a partir do ar exterior e de pessoal que entra para selecionar e remover o produto. O trabalho variou a temperatura e umidade relativa do ar no interior do caminhão parado durante um curto período depois que a porta foi aberta. Comparações entre o experimento e os resultados numéricos demonstraram concordância razoável em termos de temperatura média no interior do corpo. Os resultados dos testes mostraram que, em geral, quando a porta é aberta, a temperatura média e umidade relativa do ar no interior do corpo aumentar rapidamente. Pode ser deduzido a partir dos testes que cortinas são úteis para impedir a infiltração de ar quente para dentro do corpo refrigerado quando a porta é aberta. Observou-se que a cortina de ar pode tornar menos eficaz quando a temperatura ambiente for muito elevada (maior que 40 °C). Para os casos sem qualquer

dispositivo de proteção em frente da porta, o aumento da temperatura é o mais elevado, como esperado. De comparações de temperatura, pode-se deduzir que a cortina tira de plástico é capaz de reduzir a infiltração de ar quente dentro do espaço refrigerado, mas não seria tão eficaz como a cortina de ar. Outros trabalhos também relatam testes de laboratório de desempenho térmico, como, por exemplo, Moureh e Derens (2000), Ge e Tassou (2001) e Garcia (2008), entre outros.

A pesquisa de Estrada-Flores e Tanner (2005) realizam teste em laboratório para medir o comportamento da temperatura no interior do veículo. Na Europa, existem regulamentações que fiscalizam veículos refrigerados com o intuito de melhorar os processos logísticos e preservar a carga transportada. Um modelo de van foi lançado, porém não teve muita aceitação e apoio pela indústria, desta forma o trabalho desenvolvido pelos autores tem como objetivo fornecer razões técnicas que podem ter contribuído para isto, além de oferecer um modelo de testes alternativos para veículos com isolamento que são equipados com unidades de refrigeração. Um dos testes realizados é quanto à eficiência do isolamento, o objetivo deste teste foi determinar a eficácia do corpo isolado quando a unidade de refrigeração é desligada e as portas do caminhão estão fechadas. Uma vez que um diferencial de temperatura de equilíbrio é atingido, as temperaturas são registradas durante um período adicional de oito horas.

O trabalho conclui que testes em laboratórios deixam de atender alguns fatores importantes que ocorrem nas situações reais de distribuição de mercadoria refrigeradas, como é o caso do incremento da temperatura frente ao tempo e a frequência de abertura de portas relacionadas ao número de entregas e volume. Propuseram melhorias na simulação para incluir alguns parâmetros importantes para o teste.

3.2.3.3. Levantamentos de Campo

Outros trabalhos buscam entender o comportamento da temperatura no interior de veículos de transportes durante entregas de mercadorias através de pesquisa de campo, ou seja, estudam casos reais de empresas que realizam este tipo de operação buscando entender quais variáveis influenciam diretamente o comportamento da temperatura. Estes testes também são realizados para confirmar a possível eficácia de TTI como ferramentas de monitoramento em distribuição

real de produtos refrigerados e detectar eventuais pontos problemáticos da sua aplicação, testes de campo são realizados com frequência.

Um trabalho que trás este tipo de abordagem é de Estrada-Flores et al. (2006). Os autores, como objetivo de questionar a regulamentação Australiana para transporte de alimentos perecíveis, responsável por fornecer recomendações de temperaturas máximas e mínimas necessárias durante o processo para transportadores e operadores logísticos, realizam o monitoramento da temperatura no interior do veículo de transporte durante dois casos reais de entregas de alimentos perecíveis. O primeiro caso monitorado e avaliado é um caso de roteiro de entrega de carga perecível em centro urbano realizado por um veículo de transporte refrigerado. Já o segundo caso monitorou e avaliou um roteiro de entrega de exportação de peixe congelado em um contêiner. Os dois estudos de roteiros de entregas de mercadorias refrigeradas e congeladas foram realizados com o objetivo de melhor entender as variáveis envolvidas no processo que provocam a variação e oscilação da temperatura no interior do meio de transporte utilizado e desta forma propor melhorias para a regulamentação Australiana.

O primeiro caso avaliado, modo geral, mostrou um aquecimento rápido do veículo com a abertura de portas no processo de entrega das mercadorias, havendo aquecimento rápido dos produtos que permaneceram no veículo durante o descarregamento, devido a baixa capacidade de refrigeração do veículo utilizado. Já o segundo caso mostrou que há falha na instalação de refrigeração do recipiente, o que provocou um aumento rápido da temperatura do produto transportado. Portanto, os dois casos mostraram que é necessário uma maior atenção no processo de transporte por diferentes tipos de modais e que a capacidade térmica não foi suficiente para manter a temperatura necessária de qualidade.

Fonseca e Njie (2006) relatam em sua pesquisa a variada gama de problemas que ocorrem durante o transporte para os mercados de exportação, como a quebra da cadeia de frio nos portos de mar, representam um elevado risco para a qualidade dos produtos que atingem os compradores internacionais. Através de um estudo de caso os autores expõem a importância de identificar o impacto cumulativo de falhas de manipulação de múltiplas operações de produtos de exportação.

O caso estudado foi o de exportação de abacaxi no mercado internacional, onde ensaios de simulação foram conduzidos internamente com a colaboração da empresa não divulgada.

Os resultados obtidos para o caso estudado foi que apesar de muitos países da América Latina e Caribe (ALC) apresentarem boa avaliação comparação com outros países que exportam para os EUA e a União Europeia, alguns países ainda tem um desempenho muito ruim, revelando uma grande disparidade na preparação para o comércio de exportação na região. O estado atual da tecnologia é ainda muito pouco desenvolvido na maioria dos países da ALC. A análise de rejeições por compradores privados, e o estudo de caso de um produto de exportação revelou a importância de seguir as boas práticas em toda a cadeia. Falhas de manipulação múltiplas ao longo da cadeia é provavelmente a causa das queixas mais frustrantes por compradores internacionais. A intervenção proposta para reduzir essas reclamações é o estabelecimento de um programa detalhado com base no conhecimento e ação rápida, o que inclui: 1) desenvolvimento de conhecimento para prever a variabilidade na qualidade na colheita, independentemente dos sistemas de tratamento utilizados; 2) desenvolvimento de conhecimento para entender a relação entre a qualidade final e várias combinações de falhas de manipulação; 3) uso da tecnologia de comunicação eficiente para rastrear as reclamações em tempo hábil.

Outro trabalho que trás um estudo de campo é o trabalho de Pereira et al. (2010). Os autores apresentaram uma fotografia do cenário de uma distribuição de alimentos perecíveis refrigerados e congelados de uma empresa distribuidora brasileira. Com o objetivo de verificar o efeito da entrada de carga térmica no ambiente refrigerado de câmaras frigoríficas durante o transporte de produtos resfriados/congelados o trabalho visou compreender o processo de distribuição destes produtos nos centros urbanos. Através de um caso de distribuição foi estruturado um sistema de monitoração para entender e avaliar a influência das aberturas das portas da câmara na alteração da temperatura interna do ambiente frigorificado.

O estudo de caso foi realizado com a colaboração de uma empresa brasileira de grande porte fabricante de alimentos congelados e resfriados. O período de monitoramento foi o mês de agosto e setembro do ano de 2007 e as rotas de entregas abrangeram a região do estado de São Paulo, mais especificamente: Águas de São Pedro, Americana, Araras, Iracemápolis, Piracicaba, Rio

Claro, Santa Bárbara e Sorocaba. O acompanhamento do transporte foi realizado desde o centro de distribuição da empresa até os clientes finais da cadeia. O veículo utilizado foi um caminhão da marca Volkswagen, modelo 8150 movido a diesel (143 cv) pertencente à empresa alimentícia. O equipamento de refrigeração do veículo foi uma câmara frigorífica Litocargo, de dimensões 5,0 m, 2,2m e 2,3m de comprimento, largura e altura, respectivamente. O equipamento de refrigeração instalado na câmara foi Transfrigor, modelo TF6.4-RB MAXi, e utilizou o refrigerante R404A. O funcionamento deste sistema de refrigeração foi possível por meio do uso de um compressor acoplado ao eixo do motor do caminhão. Assim, conforme a rotação do eixo do motor variava uma mudança na rotação do eixo do compressor acoplado também era observada. O caminhão era bipartido e foi equipado com 11 sensores de temperatura.

Os resultados obtidos durante os sete dias de monitoramento mostram que tanto a temperatura interna quanto a externa do sistema apontam que quanto maior número de entregas em um roteiro maior a entrada de ar quente e úmido proveniente do ambiente externo. Este fato ocasiona concentração de água no condensador e, conseqüentemente, prejudicam o sistema. Também nota-se que algumas paradas do motor ocorreram durante a espera pela autorização de entrega no local, isto ocorre devido à decisão dos motoristas em economizarem combustível.

O aumento da temperatura em função da abertura de porta é agravado também por outros fatores como:

- quanto maior o tempo de duração das entregas maior a carga térmica proveniente do ambiente externo, o que dificulta o trabalho do sistema de refrigeração durante as retomadas de temperatura;
- o tempo de parada do motor durante a espera para o descarregamento: este fato agrava ainda mais;
- realização das entregas com o motor do caminhão desligado segundo os autores é uma prática positiva, pois diminui a troca excessiva de ar entre os ambientes interno e externo durante as aberturas de porta da câmara. Isto pode ser observado em todas as entregas.

- tempo disponível para a retomada das temperaturas pelo sistema de refrigeração entre o final da última entrega do dia e a chegada ao centro de distribuição aconteceu mais rapidamente em função do funcionamento contínuo do sistema de refrigeração e da câmara estar vazia Figura 26.

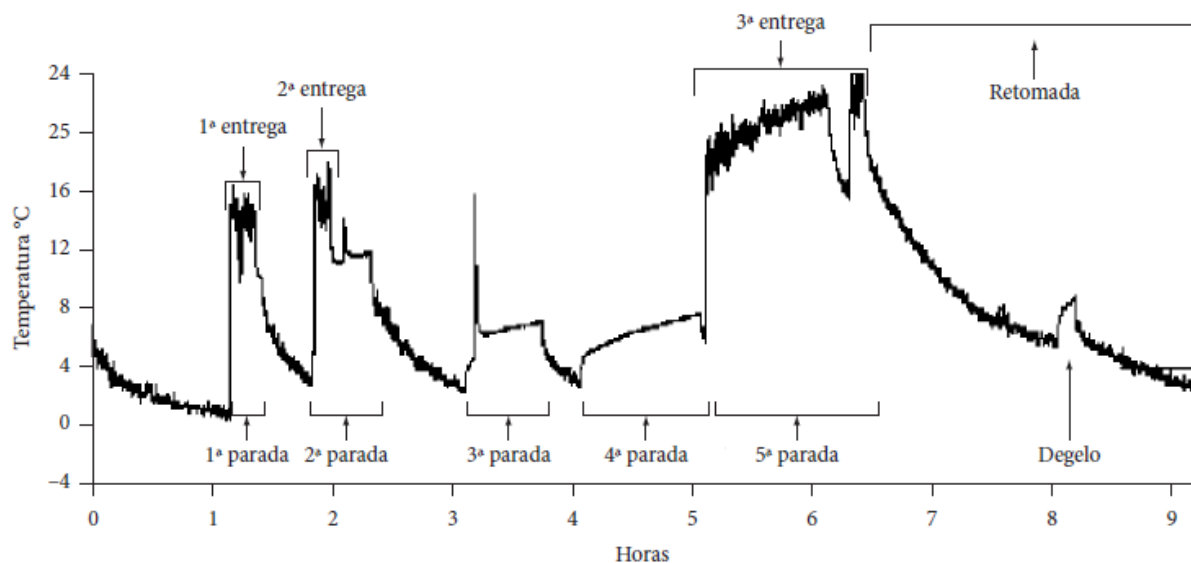


Figura 26: Histórico de variação de temperatura no sexto dia de monitoração

Fonte: Pereira et al. (2010)

No geral o trabalho elaborado por Pereira et al. (2010) avaliou as condições de funcionamento do processo urbano de distribuição, como também analisou o efeito térmico da abertura de portas. Foi observado que há forte incremento da temperatura quando há a abertura de porta durante as entregas e também a influência do número de paradas na variação da temperatura. Por outro lado, muitas vezes os veículos são obrigados a esperar antes da entrega da carga ao varejista, e nessas ocasiões é comum parar o motor, parando assim a refrigeração.

Este tipo de teste é importante para detectar inconvenientes na prática da cadeia de frio local. Eles indicam os aspectos técnicos e logísticos pontos que necessitam de melhorias operacionais. Por exemplo, a distribuição conjunta de produtos refrigerados e congelados na forma como tem sido realizada em vários casos no Brasil deve ser revista, uma vez que os resultados de desempenho são frequentemente pobres.

O trabalho de Lui *et al.* (2010) analisa e redesenha o processo de exportação de carga farmacêutica de alto valor agregado de uma empresa de medicamentos, com necessidade de controle de temperatura, no roteiro da Irlanda para os Estados Unidos. O trabalho utilizou a metodologia *e³-control*, modelo baseado em procedimentos de redesenho de metodologia de controle, que possibilitou mostrar a necessidade e viabilidade do fornecimento da temperatura da carga embarcada e dados relacionados á localização em tempo real. Estas informações disponibilizadas permitem um melhor controle do processo, cumprimento de exigências regulatórias e redesenho dos processos logísticos que favoreçam a qualidade da carga e atendam suas especificações.

Os procedimentos de uma empresa foram analisados e foi possível identificar algumas falhas ocorridas no processo. Foi proposto o procedimento de exportação com aplicação de uma nova segurança de contentores e tecnologia avançada de sensor e correspondentes serviços de TI, tornando possível o acesso em tempo real da temperatura e localização da carga em tempo real. Esta metodologia já foi aplicada em outros casos como na indústria cervejeira, papel, alimentos, entre outros.

Outro caso semelhante é o trabalho de Bandurina *et al.* (2011) que mostram o desvio de temperatura durante uma operação de transportes multimodal de produtos farmacêuticos a partir do depósito em Zagreb, Croácia, ao centro de distribuição para o mercado dos EUA em Forest, Virgínia. A ferramenta utilizada é a temperatura média cinética (MKT - *Mean Kinetic Temperature*), que simula a influência dos diferentes desvios de temperatura no qual o produto foi submetido durante o período de monitoramento (armazenamento e / ou distribuição). O estudo além de mostrar os desvios durante o processo de transporte, também aponta o risco de utilizar processos intermodais devido às operações de aeronaves serem menos estáveis. Os resultados mostraram que há a necessidade de maior atenção para não ocorrer grandes variações é o processo de embarque e desembarque das aeronaves. Este trabalho possibilitou ter uma visão completa da cadeia do frio utilizando o transporte multimodal.

3.2.3.4.. Utilização de TTI Associado à Simulação

Nota-se uma crescente utilização da análise de TTI na cadeia do frio (GIGIEL et al, 1998; JAMES e SCHOLFIELD, 1998; JACXSENS et al, 2002; GIANNAKOUROU e TAOUKIs, 2003; GIANNAKOUROU et al, 2005; ESTRADA-FLORES e EDDY, 2006) com o objetivo de obter um histórico da variável temperatura em função do tempo e processos ocorridos na cadeia do frio. Esta técnica tem ajudado a entender o comportamento do ambiente a qual a carga é submetida bem como seu histórico. O principal propósito de sua utilização é manter um bom controle da temperatura durante o transporte refrigerado e diminuir a taxa de crescimento microbiano e, portanto, mantendo a segurança e qualidade alimentar dos alimentos. De fato, existem muitos modelos microbianos que podem ser aplicados para representar o crescimento de microrganismos em alimentos, durante o transporte. Mas desde que a temperatura determina em grande parte a taxa de atividade microbiana, que é a principal causa da deterioração dos produtos alimentares mais frescos e congelados, o monitoramento contínuo da história da temperatura em tempo integral geralmente permite o controle adequado do processo ao longo de situações de distribuição de média distância.

Um trabalho que utiliza esta técnica é a artigo de Giannakourou et al. (2005) que avaliam a aplicabilidade do TTI como instrumentos eficazes de monitoramento da cadeia de frio. O objetivo do trabalho foi avaliar o potencial de aplicação de TTI, como monitores de vida de prateleira do peixe fresco, para conduzir a um sistema otimizado de distribuição de gestão. Os autores tomaram como base o aumento da população natural de *pseudomonas imax*, bactéria mais importante na deterioração deste tipo de carga refrigerada, para cálculos de vida de prateleira do pescado. As estimativas de *pseudomonas imax* foram expressas como uma função da temperatura utilizando a equação de Arrhenius. Os testes de campo realizados mostraram a aplicabilidade e utilidade de TTI na cadeia de frio de peixe, elucidando também as dificuldades práticas e limitações, que precisam ser abordadas para a expansão do uso TTI como uma ferramenta de gestão. Baseado em modelos de vida de prateleira e a cinética da resposta de TTI, o trabalho concluiu que o efeito da temperatura pode ser controlada e, quantitativamente convertido para qualidade alimentar, desde a produção até o ponto de consumo.

Para a utilização do TTI foram utilizados modelos cinéticos dos microrganismos deteriorantes específicos de dourado da cabeça-dourada desenvolvido e validado na faixa de temperatura de interesse. A cinética da resposta de TTI enzimática também foi estudada de modo a prever a vida útil restante do produto perecível, em qualquer ponto da cadeia. A eficácia da TTI em monitorar e controlar ferramentas para a real distribuição de peixes foi avaliada por dois testes controlados de campo, desde a colheita até o consumo. Os resultados mostraram uma boa concordância entre o efeito tempo-temperatura global integrada pelo TTI, e o real.

Em uma segunda etapa, este cenário foi conduzido em simulação o que permitiu reproduzir as condições reais de temperatura da cadeia de frio e monitoramento TTI do peixe distribuído. Os resultados indicaram que as leituras TTI podem ser adequadamente correlacionadas para a vida de prateleira restante do produto, em qualquer ponto da sua distribuição. O teste de campo de simulação mostrou também que o conhecimento do TTI pode proporcionar uma indicação fiável da deterioração do produto, permitindo assim uma previsão satisfatória da sua vida útil restante, em qualquer ponto ao longo da cadeia de distribuição.

Outro artigo que faz uma abordagem utilizando o TTI é o trabalho de Simpson *et al.* (2012). Os autores sintetizam a aplicação e validação do TTI para monitorar a vida de prateleira de salmão refrigerado ao longo da sua distribuição da cadeia de frio. A cinética da reação do processo de deterioração foi caracterizada determinando-se a cinética de crescimento da população microbiana e degradação química (quebra de nucleotídeos). O efeito combinado dessas reações em percebida deterioração da qualidade organoléptica (aparência, odor, textura alterações repentinas, e cor) foi medida por um painel treinado sensorial. Uma comparação destes resultados com os níveis de crescimento microbiano e *shelf life* concordaram bem tanto no painel de sensorial quanto nos previstos. Os resultados mostraram que os TTIs utilizados neste estudo, com E_a (Energia de Ativação) foram capazes de prever a vida de prateleira de salmão refrigerado dentro de erro de 10% nos casos de excesso no uso da temperatura moderada (0-7C).

3.2.4. Conceitos e Modelos de Roteirização de Veículo (VRP)

O problema da roteirização de veículos, conhecido como *vehicle routing problem (VRP)*, tem crescido consideravelmente durante os últimos anos. Segundo Laporte (1992), ele desempenha

papel fundamental na logística e distribuição física de produtos e mercadorias comercializadas, pois possibilita, a partir da utilização de modelos matemáticos adotados segundo a especificidade de cada problema, um melhor planejamento e execução de rotas de entregas. Os modelos clássicos de *VRP* visam à redução de custos operacionais no sistema de distribuição e, conseqüentemente, de tempos e distâncias percorridas no trajeto. Recentemente, outras variantes vêm sendo incluídas e adaptadas aos modelos matemáticos com a finalidade de aproxima-los do problema real, tal como: restrições de rotas e horários em determinados trechos devido a novas leis adotadas em centros urbanos, restrição de horário de chegada em clientes, entre outros.

Para Ghiani, et al (2007), os problemas de roteirização de veículo podem ser classificados em estáticos ou dinâmicos. A roteirização estática se dá quando se conhecem todas as variáveis do problema antes do início do processo de roteirização, e as mesmas não sofrem modificações ao longo do percurso. Nesse tipo de problema o algoritmo de solução é único durante a execução da rota (PSARAFTIS, 1998). Já os problemas de roteirização dinâmica podem ser definidos como problemas em que as entradas analisadas podem mudar durante a execução do algoritmo e da eventual execução da rota (PILLAC et al. 2013). Nesses problemas, a dimensão de tempo é essencial. Além disso, o cenário na roteirização dinâmica é considerado como um processo aberto, que continua por um período indefinido, devido a essas atualizações. Nos últimos anos, em função da rápida evolução tecnológica, da telecomunicação e dos tratamentos de informações, os problemas dinâmicos de roteirização de veículo (DVRP) têm recebido cada vez mais atenção. Esses sistemas e tecnologias permitem a obtenção de informações em tempo real e, conseqüentemente, oferecem a possibilidade de tomada de decisão baseada em cenários dinâmicos (NOVAES e BURIN, 2010).

Na literatura existem diferentes problemas de roteirização de veículo. No estudo de Silva (2007) o autor sintetiza em um quadro os diferentes tipos de problemas de roteirização estudados e suas características com relação a: tipo de modelo, número de roteiro no problema, como é a localização dos clientes, o número de depósitos existente no problema, o tipo de demanda, as restrições consideradas, número de entregas, tipo de frota e numero de veículo. Este quadro é apresentado no Quadro 6 .

Tipo Modelo	Número Roteiros	Localização do Cliente	Número de Depósitos	Restrições	Número entregas/clientes	Tipo de Frota	Número de Veículos
TSP	1	Nos	1	-	1	1 veiculo	Limitado
CPP	1	Arcos	1	-	1	1 veiculo	Limitado
MTSP	Múltiplos	Nos	1	-	1	Homogênea	limitado
VRP	Múltiplos	Nos	1	Capacidade do veiculo	1	Homogênea	Limitado
MDVRP	Múltiplos	Nos	Múltiplos	Capacidade do veiculo	1	Homogênea	Limitado
CARP	Múltiplos	Arcos	1	Capacidade do veiculo	1	Homogênea	Limitado
SVRP	Múltiplos	Nos	1	Capacidade do veiculo	1	Homogênea	Limitado
VRPSD	Múltiplos	Nos	1	Capacidade do veiculo	≥ 1	Homogênea	Limitado
FSVRP	Múltiplos	Nos	1	Capacidade do veiculo	1	Homogênea	Limitado
HFFVRP	Múltiplos	Nos	1	Capacidade do veiculo	1	Heterogênea	Limitado
FSMVRP	Múltiplos	Nos	1	Capacidade do veiculo	1	Heterogênea	limitado
PVRP	Múltiplos	Nos	1	Capacidade do veiculo	1	Homogênea	Limitado
TDVRP	Múltiplos	Nos	1	Capacidade do veiculo e tempo dependente	1	Homogênea	Limitado
VRPSTW	Múltiplos	Nos	1	Capacidade do veiculo e janela de tempo	1	Homogênea	Limitado
VRPSTW	Múltiplos	Nos	1	Capacidade do veiculo e janela de tempo flexível	1	Homogênea	Limitado
PDP	Múltiplos	Nos	1	Capacidade do veiculo e precedência entre tarefas	1	Homogênea	Limitado

Quadro 6: Modelos clássicos de problemas de roteirização de veículos

Fonte: Adaptado Silva. (2007) onde:

TSP – Problema do Caixeiro Viajante

MTSO – Problema do múltiplo caixeiro viajante

MDVRP – VRP com múltiplos depósitos

SVRP – VRP com demanda estocástica

FSVRP – VRP com dimensionamento de frotas homogenia

FSMVRO – VRP com dimensionamento de frota heterogenia

TDVRP – VRO com tempo dependente

PDP – Problema de coleta e entrega (VRP + precedência)

CPP – Problema do carteiro chinês

VRP - problema Clássico de roteirização de veiculo

CARP – VRP com demanda em arcos

VRPSD – VRP com entregas fracionadas

HFFVRP – VRP confronta heterogenia fixa

PVRP – VRP periódico

VRPSTW – VRP com janelas de tempo flexíveis

Frente os diferentes tipos de problemas de roteirização apresentados destaca-se o modelo *Traveling Salesman Problem (TSP)* conhecido também como problema do caixeiro viajante (PCV). Este modelo foi o primeiro problema de roteirização a ser estudado, tendo origem em 1859 em um jogo que ficou conhecido como ciclo hamiltoniano. O objetivo do jogo era traçar uma rota através dos vértices do dodecaedro que deveria começar e terminar no mesmo vértices sendo que todos os vértices deveriam ser visitados apenas uma vez (BODIN et al., 1983; CHRISTOFIDES, 1985; CUNHA, 2000; GOLDBARG e LUNA, 2000; SOLOMON e DESROSIERS, 1988). O PCV tem como objetivo oferecer o melhor roteiro de entregas, ou seja, apresentando a menor distância no trajeto total e ao mesmo tempo visitando todos os pontos necessários de entrega uma única vez (CUNHA, 2000). Este problema de roteirização é considerado básico e geralmente se caracteriza por ignorar um grande número de restrições e variáveis frequentemente encontradas em problemas reais. A otimização é conseguida através da aplicação de uma heurística apropriada, (SYSLO et al., 2006).

Atualmente, nota-se um aumento de pesquisas que utilizam o PCV adaptado a variáveis e restrições com o objetivo de melhorar a representação e aproximá-las do problema real. Exemplos de trabalhos com esta abordagem são: Bodin et al. (1983); Christofides (1985); Laporte e Nobert (1987); Laporte (1990); Desrochers, Lenstra e Savelsbergh (1990); entre outros. Eles incorporam variáveis como, por exemplo, janela de tempo, capacidade do veículo, diferentes tamanhos de veículos, distância máxima de rota, custo máximo, entre outros.

Além do modelo PCV outro modelo considerado clássico é o do Carteiro Chinês (*Chinese Postman Problem - CPP*). Este é uma variação do problema do caixeiro viajante. Ele acontece em um cenário onde é necessário percorrer todos os arcos de um grafo com o custo mínimo, ou seja, ao invés dos clientes serem considerados nós, neste problema eles estão localizados em arcos. Como no PCV o problema não apresenta restrição de capacidade, é considerado determinístico e apresenta apenas uma solução (rota).

Outra variação do PCV é o problema de Múltiplos Caixeiros Viajantes (PCVM), conhecido também como "*Multiple Traveling Saleman Problem*". Este problema é composto por m veículos que podem originar m rotas. Cada rota deve contemplar pelo menos um nó, cada nó deve ser

visitado apenas uma única vez e em apenas uma base, ou seja, o veículo deve sair e retornar no mesmo depósito. Este problema é considerado determinístico, apresenta múltiplas rotas e não trabalha com a restrição de capacidade dos veículos. A estratégia básica e comumente utilizada para resolver um problema de roteirização dinâmico de veículos é adaptar um algoritmo para a versão estática do problema (PSARAFTIS, 1998, LARSEN, 2001 e BERBEGLIA, 2010).

Os problemas de roteirização de veículos podem ser explorados a partir de métodos exatos, métodos heurísticos e/ou meta-heurísticas. Isso depende do nível de complexidade que os mesmos envolvem. Métodos exatos abrangem problemas menos complexos e de menor tamanho, tais como o método simplex, plano de corte ou *branch and bound*. Os métodos heurísticos, por sua vez, não atingem o ótimo absoluto, mas produzem resultados aproximados, mas satisfatórios. São indicados para problemas de roteirização de média e alta complexidade (PRESTES 2006; e HERRERA, 2007). Já os métodos heurísticos do tipo meta-heurística empregam soluções analógicas em relação a fenômenos físicos, biológicos, etc., buscando soluções também aproximadas (Blum e Roli, 2003). Entre as meta-heurísticas mais conhecidas encontram-se: Colônia de Formigas (ACO), Algoritmo Genético (AG), Busca Tabu (TS), Recozimento Simulado (*SA- Simulated Annealing*), entre outras (CHAVES, 2009).

Os métodos heurísticos e meta heurísticas são detalhados a seguir por serem a base da análise proposta na metodologia deste trabalho.

Método Heurístico

Este método se apoia basicamente em uma abordagem intuitiva, na qual a estrutura particular do problema possa ser considerada e explorada de forma inteligente para a obtenção de uma solução adequada (CUNHA, 1997). Na maioria dos casos as heurísticas propostas tendem a ser bastante específicas e particulares para um determinado problema, carecendo de robustez, isto é, não conseguem produzir boas soluções para problemas com características, condicionantes ou restrições pouco diferentes daquelas para as quais foram desenvolvidas (CUNHA, 2002).

Os algoritmos elaborados pelo método heurístico basicamente são apoiados em modelos cognitivos, fundamentando seu desenvolvimento em modelos ou experiências já existentes.

Caracteriza-se por ser um método que possibilita uma solução boa, garantido uma solução viável para o problema (GOLDBARG e LUNA, 2000; CORDENONSI, 2008). Para Sauer (2007) o método heurístico pode ser trabalhado de duas formas como heurística construtiva ou como heurística de melhoria de roteiro.

Para Novaes (2004) a heurística construtiva inicia a construção do roteiro escolhendo dois pontos e assim vai adicionando outros novos até chegar a uma solução inicial viável. Alguns algoritmos construtivos importantes são: Método das economias, do vizinho mais próximo e métodos de inserção.

Já a heurística de melhoria de roteiros atua nas rotas com o objetivo de melhora-las realizando trocas de posição entre as solicitações de uma mesma rota. Elas são conhecidas como: k -opt, podendo variar de 2 -opt e 3 -opt. O k -opt realiza a troca de arestas que podem ser usadas para melhoria de uma solução obtida por algum algoritmo de construção. Assim, k arcos são removidos do roteiro do PCV e substituídos por outro k arco. Quanto maior for o valor da variável k , maiores são as chances de se encontrar soluções melhores, porém acarretando no aumento do custo operacional, pois este está diretamente relacionado com o tamanho de k . Os mais utilizados são os 2 -opt e 3 -opt (NOVAES, 2004; LAPORTE, 1992). A mudança do tipo 2 -opt permite a remoção de 2 arcos (Figura 27) a serem substituídos por outros dois e assim buscar um melhor roteiro. Já o 3 -opt permite a substituição de três arcos o que aumenta a chance de melhoria do modelo execute as combinações possíveis.

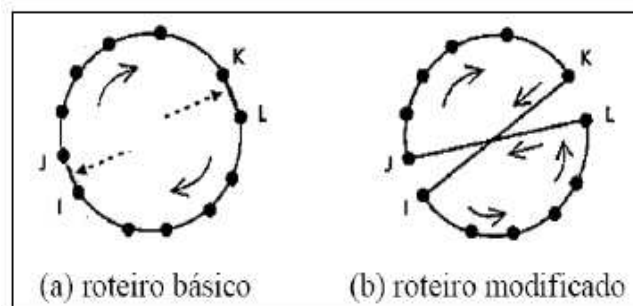


Figura 27: Mudança do tipo 2 -opt

Fonte: Novaes (2001) apud Cunha (2002)

Método Meta Heurística

O termo meta heurística foi introduzido por Glover (1986), e tem seu significado baseado na composição das duas palavras: heurística que significa a arte de encontrar; e meta que significa a ideia de nível superior. De forma geral, meta heurística é um processo de busca por solução próxima do ótimo (Blum e Roli, 2003). Segundo Osman e Laporte (1996) a meta heurística utiliza procedimentos de orientação de uma heurística interativa com o objetivo de encontrar soluções mais eficientes. As meta heurísticas mais conhecidas são: Colônia de Formigas (ACO), Algoritmo Genético (AG), Busca Tabu (TS), Recozimento Sumulado (SA – Simulated Annealing), entre outros (Chaves, 2009). Observa-se que atualmente apenas o uso de uma meta heurística se torna muito "limitado" a solução de problemas reais. Faz-se necessário à combinação de uma meta heurística com outras técnicas de otimização (Blum e Roli, 2008). Exemplos de combinação são: meta heurística com métodos exatos, com outra meta heurística, ou com mecanismo de busca específica.

O presente trabalho de tese utiliza o método da meta heurística, *simulated snnealing* (SA), na busca por melhores soluções para o problema estudadp. Deste modo nesta sessão a meta heurística *simulated annealing* será detalhada.

O *simulated annealing* é uma meta heurística aplicada para resolver problemas de otimização combinatória, geralmente no campo da física estatística e da otimização combinatória. Por um lado, ele pode ser encarado como um algoritmo que simula o processo de recozimento físico de um sólido para o seu estado energético mínimo. Por outro lado, ele pode ser considerado como uma generalização de algoritmos de busca local, as quais desempenham um papel importante na otimização combinatória (AARTS e KORST, 1989). Em 1953 foi utilizada a técnica de "annealing" na qual consiste um cuidadoso processo de resfriamento de cristais de metais. Este cuidadoso processo parte de uma temperatura elevado que lentamente abaixa sua temperatura levando a um estado mínimo de energia dos cristais e, conseqüentemente, preservando a perfeição estrutural do material. O método permite a aceitação de configurações intermediárias do problema em que cresce o valor da função objetivo, na qual se deseja minimizar (KIRKPATRICK, et al, 1983; ARAGON et al, 1984). O algoritmo começa com uma determinada solução inicial, muito frequentemente escolhido aleatoriamente, e tenta mover-se continuamente

a partir de uma corrente de solução de um dos seus vizinhos através da aplicação de um mecanismo de geração e um critério de aceitação. O resultado deste procedimento evita mínimos locais, a fim de se chegar a um mínimo global.

Em mecânica estatística, análise experimental das propriedades de agregação de átomos encontrada em amostras de matéria líquida ou sólida em equilíbrio térmico e a uma dada temperatura, é realizada considerando apenas o comportamento mais provável do sistema, uma vez que o número de átomos é da ordem de 10^{23} por centímetro cúbico. Neste contexto, cada configuração, definida pelo conjunto de posições atômicas $\{\pi_i\}$ do sistema, é ponderado pelo seu fator de probabilidade de Boltzmann (KIRKPATRICK et al. , 1983):

$$f_i = \exp \left[-\frac{E\{\pi_i\}}{k_B T} \right], \quad (16)$$

onde $E\{\pi_i\}$ é a energia do conjunto atômica, k_B é constante de Boltzmann e T é a temperatura. Uma questão fundamental em mecânica estatística é o que acontece com o sistema em baixa temperatura limitante. Por exemplo, uma pergunta é se os átomos de permanecer fluido ou solidificar e, se solidificar, se formar um sólido cristalino ou um vidro. Estados cristalinos são extremamente raros entre todas as configurações de um corpo macroscópico, contudo eles dominam as suas propriedades a baixas temperaturas, porque, como T é reduzido, a distribuição de Boltzmann colapsa para o estado mais baixo de energia, ou de estados (KIRKPATRICK et al. , 1983). Em contextos práticos, no entanto, a baixa temperatura não é uma condição suficiente para encontrar estados fundamentais da matéria. As experiências para determinar o estado de baixa temperatura de um material, por crescimento de um cristal único a partir de uma massa fundida, por exemplo, são feitas por tratamento térmico cuidadoso. Em primeiro lugar, a substância é fundida a uma condição térmica elevada, próxima da experiência lentamente a temperatura diminui. Além disso, o material passa de um longo período de tempo a temperaturas na vizinhança do ponto de congelamento. Se isso não for feito, e se a substância sai do equilíbrio, o cristal resultante mostrará muitos defeitos, ou a substância pode ser transformada num vidro, sem qualquer ordem cristalina (KIRKPATRICK et al. , 1983).

Procurando o estado de baixa temperatura de um sistema tal como anteriormente descrito é completamente análoga a muitos problemas operacionais encontradas na otimização combinatória. Metropolis et al. (1953) desenvolveram um algoritmo simples, que pode ser usado para fornecer uma simulação eficiente de um conjunto de átomos em equilíbrio a uma dada temperatura. Em cada passo do algoritmo um átomo é submetido a um pequeno deslocamento aleatório, e a alteração resultante na variação de energia (ΔE) a energia do sistema é computado. Se $\Delta E \leq 0$, o deslocamento é aceite, e a configuração com o átomo deslocada é utilizado como o ponto de partida do passo seguinte. Por outro lado, se $\Delta E > 0$, o comportamento do sistema é tratado probabilisticamente: a probabilidade de que a configuração aceita é $p(\Delta E) = \exp(-\Delta E/k_B T)$. Os números aleatórios distribuídos uniformemente no intervalo (0,1) são utilizados para programar a parte aleatória do algoritmo. Seja r um número aleatório. Se $r < p(\Delta E)$, a nova configuração é retida, caso contrário, a configuração original é utilizada para iniciar o próximo passo. Estes passos são repetidos diversas vezes, simulando o movimento térmico dos átomos em contato com um banho de aquecimento à temperatura T . Esta sequência de procedimentos, baseado em $p(\Delta E)$, tem como consequência que o sistema evolua para uma distribuição de probabilidade de Boltzmann (KIRKPATRICK et al , 1983):

$$p\{\pi_i\} = \frac{g_i \exp\left(\frac{-E_i}{k_B T}\right)}{Z(T)} \quad (17)$$

Onde g_i é o número de níveis tendo energia E_i e

$$Z(T) = \sum_i g_i \exp(-E_i/k_B T) \quad (18)$$

Usando uma função de custo no lugar de configurações de energia e definição de um conjunto de parâmetros $\{x_i\}$, Hastings (1970) generalizou o procedimento de Metropolis para tratar problemas de otimização iterativa de melhoria exterior física estatística, e resolvê-los de forma análoga. Agora, a temperatura é um parâmetro de controle simplesmente expresso nas mesmas unidades como a função de custo. O processo de SA, como implementado no procedimento de Metropolis / Hasting, difere da técnica de melhoria interativa em que o primeiro evita ficar preso em mínimos locais, uma vez que as transições para fora de um ótimo local são sempre possíveis

em temperaturas intermediárias. Em termos gerais, o método SA para resolver os problemas de otimização segue o algoritmo ilustrado na Figura 28.

- 1 The system under analysis has a representative state described by an n -dimensional vector \mathbf{x} , for which the function to be minimized is $f(\mathbf{x})$.
- 2 The function must return a scalar quantity.
- 3 The generalized temperature GT is a scalar quantity with the same dimension as $f(\mathbf{x})$.
- 4 Initial step: Select an initial configuration \mathbf{x}_B (B means *before*);
- 5 Let i be the step counter of the number of Monte Carlo iterations;
- 6 Set the initial generalized temperature to a high value GT_0 ;
- 7 Choose a transition $\Delta\mathbf{x}$ at random;
- 8 Calculate the function value before the transition: $f_B = f(\mathbf{x}_B)$;
- 9 Do the trial transition as $\mathbf{x}_A = \mathbf{x}_B + \Delta\mathbf{x}$;
- 10 Calculate the function value after the transition $f_A = f(\mathbf{x}_A)$;
- 11 Calculate $\Delta f = f_A - f_B$:
 - a. If $\Delta f \leq 0$, accept the new state \mathbf{x}_A making $\mathbf{x}_B = \mathbf{x}_A$;
 - b. If $\Delta f > 0$:
 - i) Generate a random number r such that $0 \leq r \leq 1$;
 - ii) Accept the state \mathbf{x}_A only if $r < \exp(-\frac{\Delta f}{GT})$;
- 12 If the state \mathbf{x}_A is accept $\mathbf{x}_B = \mathbf{x}_A$;
- 13 Reduce the temperature GT by some small value: $GT - \varepsilon_{GT} \leftarrow GT$
- 14 Increase the Monte Carlo step by one: $i \leftarrow i + 1$;
- 15 If $GT > GT_{min}$ go to 7 otherwise $\mathbf{x} = \mathbf{x}_B$ andEnd;

Figura 28: Sequência geral computacional do Simulated Annealing

Fonte: NOVAES, et al. (2014)

4. PANORAMA GERAL DO PROBLEMA DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NO PROCESSO DE TRANSPORTE

A revisão da literatura mostrou que a cadeia de suprimentos do frio é composta por diferentes atividades como: fabricação, colheita, abate (depende do tipo de produto alimentício); transporte, armazenagem e venda no varejista. Independente do tipo de atividade é possível notar que há variações de temperatura durante os procedimentos. Isto ocorre em função da falta de controle e monitoramento da temperatura, que deve ser contínua durante todos os processos que compõem este tipo de cadeia. Este fato se agrava, principalmente, nos elos entre as atividades na qual a mercadoria é exposta a um ambiente termicamente não controlado (ambiente externo). Além disso, este tipo de mercadoria é muito sensível a qualquer variação da temperatura, o que agrava mais ainda o cenário e mostra a necessidade de atenção e controle desta variável. Outro problema observado nesta cadeia é não haver a conscientização e treinamento dos funcionários, que trabalham com este tipo de mercadoria, que realizam procedimentos sem orientação fazendo com que as oscilações de temperatura se agravem. Todos estes fatos constatarem um cenário de danos e perdas de mercadorias refrigeradas e congeladas ao longo da cadeia do frio. Apesar de todas as atividades apresentarem pontos críticos de controle da temperatura, a atividade de transporte é a que mais registra prejuízo de mercadoria. No contexto brasileiro, na qual as temperaturas são elevadas em função do clima tropical, é observado à alta temperatura no interior do veículo principalmente nas atividades de embarque e desembarque das mercadorias.

Além deste contexto geral, a revisão da literatura com base nos dois tipos de abordagens, específica à cadeia do frio e na logística do processo de transporte, permitiram a elaboração do primeiro ganho deste trabalho, o panorama geral do problema da variação da temperatura no

processo de transporte de alimentos refrigerados e congelados. Uma análise destas duas abordagens possibilitou a identificação de fatores influenciadores da qualidade das mercadorias e de fatores influenciadores da variação da temperatura no processo de transporte. Também, foi possível identificar ações paleativas, praticadas atualmente, que melhoram o cenário da perda de qualidade deste tipo de carga. A síntese destes dados esta consolidada no Quadro 7.

Abordagem Especifica

A abordagem específica, no geral, mostrou à importância de alguns fatores que influenciam a qualidade do alimento no processo de transporte. Estes fatores podem ser de origem física, química e biológica:

- ✓ Origem Física: luminosidade, temperatura, umidade relativa, ação mecânica, pressão, etc.;
- ✓ Origem Química: composição da atmosfera do ambiente como oxigênio, gás carbônico, contaminantes químicos, etc.;
- ✓ Origem Biológica: ação enzimática, microbiológica, insetos e parasitas.

Estes fatores influenciadores quando não gerenciados podem ocasionar ao produto perda de qualidade como: mudança de cor, mudança de textura e estado físico, maturação precoce, entre outros. Um fator muito importante que deve ser levado em consideração é o estado de qualidade inicial do alimento ao se iniciar o processo de transporte. Muitas vezes o alimento se encontra em estado avançado de maturação, ou mesmo em baixa qualidade, e pode não suportar o trajeto e apresentar um baixo nível de qualidade ao chegar ao consumidor final.

Esta análise também permitiu entender que na maioria dos alimentos o fator de maior influência em sua qualidade é a temperatura. Ela é responsável pelas mudanças físicas deste tipo de mercadoria, pela velocidade das reações enzimáticas, químicas e biológicas que aceleram a maturação do alimento. Por isto é o parâmetro fundamental de estudo neste trabalho.

Nesta abordagem foram identificadas algumas sugestões de ações ou mesmo mecanismos que minimizem a atuação destes fatores influenciadores. Estes são:

- ✓ Uso de embalagens adequadas e paletes que permitam a respiração e transpiração adequada dos alimentos;
- ✓ Controle atmosférico dos gases no ambiente interno da câmara refrigerada e utilização de embalagem utilizando atmosfera modificada;
- ✓ Controle da temperatura dentro dos limites inferiores e superiores específicos a carga transportada;
- ✓ Realizar tratamento químico que retardem as reações enzimáticas e microbiológicas da mercadoria;
- ✓ Realizar o controle do estágio inicial de maturação e de qualidade da mercadoria antes do carregamento do veículo.

Abordagem Logística

A abordagem logística, no geral, identificou alguns fatores influenciadores da variação da temperatura do veículo no transporte de mercadoria refrigerada e congelada. Os fatores aqui identificados puderam ser classificados em dois grupos: técnicos, inerentes ao veículo refrigerado; e inerentes ao processo logístico de transporte. Estes são:

- ✓ Técnico Inerente ao Veículo de Transporte: dimensões do veículo, tipo de isolamento térmico, tipo de equipamento de refrigeração, tipo de condensador, equipado ou não equipado com cortina de proteção térmica, diferentes tipos de cortinas que fornecem diferentes eficiências de proteção; equipamento com o motor acoplado ao motor do caminhão ou com energia própria, etc.
- ✓ Inerente ao Processo Logístico de Transporte: número de entregas em um único roteiro, tempo de duração de abertura de porta tanto para carregamento quanto para a entrega de mercadorias, distância/tempo entre os pontos de entregas, etc.

Estes fatores identificados quando não controlados podem levar a grandes variações da temperatura no interior do veículo que chegam a ultrapassar os limites inferiores e superiores específicos a carga.

Nesta abordagem do problema foram identificadas algumas sugestões de ações ou mecanismos que minimizem a variação da temperatura no processo de transporte como:

- ✓ Resfriamento do veículo antes da mercadoria ser carregada;
- ✓ Carga com a temperatura inicial ideal ao entrar no veículo;
- ✓ A utilização de cortina de ar para minimizar o gradiente térmico adquirido com a abertura de portas;
- ✓ Utilização de veículos menores para menores roteiros de entregas;
- ✓ Melhores isolamentos térmicos e das câmaras do veículo refrigerado.

Na abordagem logística além destes fatores influenciadores, foi observado um conjunto de artigos que buscam descrever o comportamento térmico de veículos refrigerados em roteiro de transporte. Estes puderam ser organizados em quatro grupos de acordo com a sua forma de abordagem ao problema: (a) modelos teóricos, (b) testes laboratoriais, (c) levantamento de campo, e (d) TTI associado a simulação. O primeiro grupo faz uso de modelos matemáticos de CFD (Computational Fluid Dynamics) com base em aspectos físicos de transferência de calor (CUESTA et al, 1990; ZHANG et al, 1994, CAMPANONE et al, 2002). O segundo grupo descreve testes laboratoriais controlados, como Moureh e Derens (2000), Tso et al (2002), Estrada-Flores e Eddy (2006) e Garcia (2008). O terceiro grupo realiza teste de campo, com a informação, eventualmente completado com dados laboratoriais, tais como o experimento CoolVan (GIGIEL et al, 1998; SCHOLFIELD e JAMES, 1998, JAMES et al, 2006), bem como outros esforços similares (Giannakourou et al, 2005; Pereira et al, 2010; Nga, 2010). O quarto grupo abordam análises de TTI associado à simulação computacional (MANUAL COOLVAN, 2000; HOANG et al, 2012a, b). Claro, uma boa parte desses trabalhos empregam métodos combinados.

Apesar dos diferentes enfoques destes trabalhos, os mesmos identificam e descrevem o problema da variação da temperatura no interior do veículo e apontam algumas soluções paliativas como, por exemplo, a inclusão de cortina de ar para minimizar a troca de calor ocorrida com a abertura de porta entre as entregas. Entretanto, os enfoques não abordam a necessidade da otimização dos roteiros de entrega que integre o parâmetro da temperatura como variável de restrição ao

processo. Todavia, a proposição deste trabalho é realizar uma abordagem ao problema direcionado a otimização logística de roteiros de entregas no transporte de alimentos refrigerados e congelados.

Além disso, esta revisão sob diferentes enfoques permitiu a identificar de grupos de pesquisa que vem desenvolvendo trabalhos e estudando esta área na cadeia do frio, estes são:

✓ *Cold Chain Management of the Rheinische Friedrich-Wilhelms-* Um grupo de pesquisa italiano da Universidade de Bonn, do Instituto de ciência Animal, do departamento de gestão preventiva da saúde. Este grupo de pesquisa vem desenvolvendo pesquisa na área da cadeia de suprimentos do frio elaborando trabalhos que trazem as dificuldades encontradas neste setor, bem como novas tecnologias de controle, o panorama do mercado internacional de empresas que trabalham na área de refrigerados e congelados e novas pesquisas explorando este tema.

✓ O Laboratório o de Refrigeração - LAREFRI- e Laboratório de Automação e de Controle de Processo em Alimentos - LACPA - da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP -, Brasil. Este grupo se destaca com pesquisas nas seguintes áreas: avaliação da energia utilizando difetentes tipos de resfriamento (adsorção e compressão), automação de processos com arrefecimento e lógica pid difusa, armazenamento e refrigeração de produtos perecíveis, produtos congelados estudando, a influência do processo de refrigeração e a perda de peso do produto, a cadeia de frio no geral e estudo de caso de transporte de alimentos perecíveis.

Revisão da Literatura da Cadeia do Frio e do Transporte Refrigerado						
Abordagem Específica			Abordagem Logística			
Fatores Influenciadores de Qualidade dos Alimentos			Fatores Influenciadores da Variação da Temperatura			
Físico	Químico	Biológico	Técnico ao Veículo	Inerente ao Processo de Transporte		
Luminosidade, temperatura, umidade relativa, ação mecânica, pressão, etc.	Composição dos gases no ambiente como: oxigênio, gás carbônico, contaminantes, etc.;	Ação enzimática, microbiológica, insetos e parasitas.	Dimensões do veículo, tipo de isolamento térmico, tipo de equipamento de refrigeração, tipo de condensador, cortina de proteção térmica, motor acoplado ao veículo.	Número de entregas em um roteiro, tempo de duração na abertura de porta tanto para o carregamento quanto para a entrega, distância/tempo entre pontos de entregas, etc.		
			Atuais Abordagens ao Problema			
Fator de maior influência da perda de qualidade do alimento			Modelo Teórico	Teste de Laboratório	Pesquisa de Campo	TTI associada à Simulação
Temperatura			Identificam o problema da variação da temperatura, propõem modelos de comportamento, porém não sugerem otimizações logísticas.			
Ações que minimizam a perda de qualidade			Ações que minimizam a variação da temperatura no transporte			
Uso de embalagens adequadas ou paletes; realização de controle atmosférico de gases; controle e monitoramento das temperaturas limites inferiores e superiores específicos a carga; tratamento químico; controle do estagio inicial de maturação e qualidade do alimento.			Resfriamento do veículo antes do carregamento da mercadoria, carga com temperatura inicial ideal ao entrar no veículo, utilização de cortina de ar; utilização de veículos menores, melhorias no isolamento térmico e na câmara do veículo, etc.			

Quadro 7: Panorama Geral do Problema da variação da temperatura no processo de transporte

5. ANÁLISE EXPLORATÓRIA E DESENVOLVIMENTO DO MODELO

5.1. Definição do Cenário de Estudo

O cenário de estudo foi definido a partir de um cenário hipotético de distribuição de mercadorias, elaborado pelo autor. Este foi caracterizado com base em alguns atributos extraídos de pesquisas que estudam este tipo de transporte no Brasil e de dados técnicos de equipamentos fornecidos por empresas brasileiras. O cenário é descrito com base nos cinco atributos previamente mencionados: região e clima; roteiro de entrega; veículo de transporte; equipamento de refrigeração; e carga transportada.

Região e o Clima

A ideia do trabalho foi compor um cenário tipicamente brasileiro para simular o problema encontrado a partir do clima da região. Por isso, a região adotada para caracterizar o cenário foi à região sudeste do Brasil, onde o clima é tropical. A estação do ano adotada foi a primavera, no mês de setembro aonde as temperaturas chegam a variar, em média, de 18°C a 28°C. Este clima foi assim determinado devido às limitações de temperatura do ambiente externo que o programa de simulação utilizado no trabalho consegue simular.

Distrito, Clientes e Roteiro de Entrega

Para definir o roteiro de entrega, primeiramente foi adotado um distrito na qual foram situados os pontos de clientes a serem entregues as respectivas mercadorias. O distrito é apresentado na Figura 29, sendo composto por 12 pontos de clientes e o depósito, que é o centro de distribuição

onde o veículo inicialmente é carregado com a mercadoria e retorna ao final das entregas. Os clientes foram escolhidos aleatoriamente pelo autor. A Figura 30 apresenta a matriz simétrica D , de dimensão $n \times n$, onde a_{ij} representado a distância entre o cliente i, j e o depósito, para i e $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12$, depósito. As cordenadas x e y da localização dos clientes no distrito são detalhadas no Apêndice 1 deste trabalho.

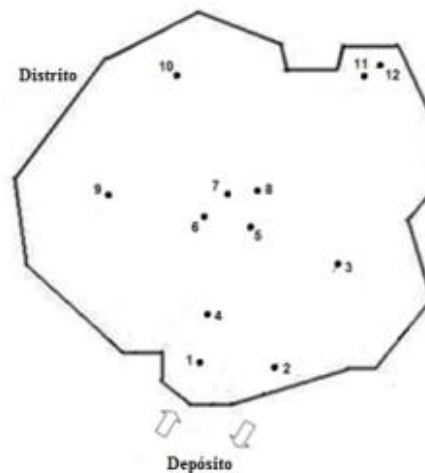


Figura 29: Distrito e clientes a serem atendido

$$D = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} & a_{1,3} & \dots & a_{1,n} \\ a_{2,1} & & & & & \dots \\ a_{3,1} & & & & & \dots \\ \dots & & & & & \dots \\ \dots & & & & & \dots \\ a_{n,1} & & & & & a_{n,n} \end{bmatrix} =$$

$$D = \begin{pmatrix} 0 & 2,3 & 5,2 & 1,6 & 4,4 & 4,5 & 5,2 & 5,6 & 5,8 & 8,8 & 10,1 & 10,7 & 85,7 \\ 0 & 3,8 & 2,7 & 4,4 & 5,3 & 5,5 & 5,5 & 7,3 & 9,4 & 9,4 & 9,8 & 9,8 & 87,7 \\ 0 & 4,3 & 2,9 & 4,8 & 4,0 & 3,4 & 7,3 & 7,6 & 5,8 & 6,2 & 91,1 \\ 0 & 2,9 & 3,0 & 3,6 & 4,0 & 4,7 & 7,3 & 8,7 & 9,2 & 87,5 \\ 0 & 1,9 & 1,3 & 1,2 & 4,4 & 5,1 & 5,8 & 6,4 & 90,9 \\ 0 & 1,3 & 2,2 & 2,5 & 4,3 & 6,8 & 7,4 & 90,8 \\ 0 & 0,9 & 3,5 & 3,9 & 5,6 & 6,2 & 91,9 \\ 0 & 4,4 & 4,2 & 4,8 & 5,4 & 92,1 \\ 0 & 4,2 & 8,5 & 9,1 & 92,1 \\ 0 & 5,7 & 6,2 & 96,1 \\ 0 & 0,6 & 97,6 \\ 0 & 98,3 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Figura 30: Matriz de Distância entre o cliente i, j e o depósito

A partir do distrito proposto e dos clientes localizados obteve-se o roteiro de mínima distância através da aplicação do problema do caixeiro viajante (PCV), do tipo 3-opt (SYSLO *et al.*, 2006). Este é apresentado na Figura 31. A distância total obtida pelo percurso (saindo do depósito, atendendo todos os clientes uma única vez e retornando ao depósito) foi de 204,1 km.

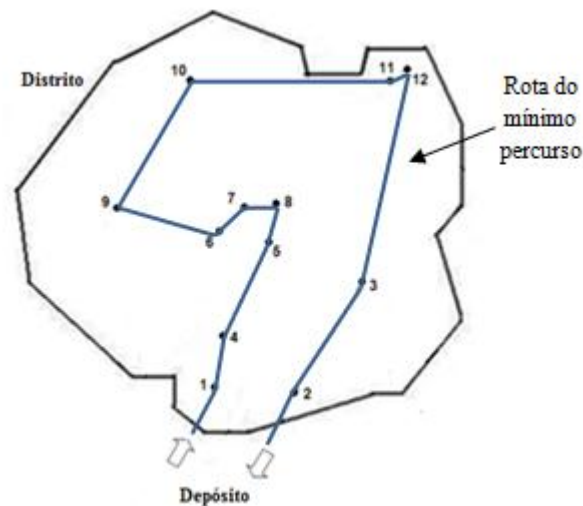


Figura 31: Roteiro de Entrega com base no PCV tipo 3-opt

A Tabela 1 apresenta a programação de todas as entregas do roteiro. Ela mostra a origem e o destino do veículo, bem como as distâncias entre os respectivos pontos, a quantidade de mercadoria a ser entregue em cada cliente, e o tempo necessário a cada entrega. Observa-se que os clientes 7 e 8 apresentam maiores quantidades de pedido (2,000 kg e 7,000 kg respectivamente), deste modo é necessário maior tempo para a realização da atividade de entrega. Aos demais clientes as quantidades a serem entregues são iguais, 300 kg. Contabilizando todos os pedidos o veículo inicia o trajeto com uma carga inicial embarcada de 12,000 kg.

Admitiu-se velocidade média de 60 km/h no trajeto entre o depósito e distrito (zona urbana), e no percurso inverso ao fim da operação de entrega do último cliente ao depósito. Dentro do distrito (zona urbana) a velocidade média considerada foi de 30 km/h.

Tabela 1: Dados da Programação de entrega pelo roteiro PCV

Tipo de Segmento	Ponto de Origem	Ponto de Destino	Distância Viajada (km)	Cliente Atendido	Carga entregue (kg)	Tempo de Entrega (m)
Saída	Depósito	1	84.3	-	-	-
Entrega	-	-	-	1	300	10
Viagem	1	4	1.6	-	-	-
Entrega	-	-	-	4	300	10
Viagem	4	5	2.9	-	-	-
Entrega	-	-	-	5	300	10
Viagem	5	8	1.2	-	-	-
Entrega	-	-	-	8	7,000	64
Viagem	8	7	0.9	-	-	-
Entrega	-	-	-	7	2,000	24
Viagem	7	6	1.3	-	-	-
Entrega	-	-	-	6	300	10
Viagem	6	9	2.5	-	-	-
Entrega	-	-	-	9	300	10
Viagem	9	10	4.2	-	-	-
Entrega	-	-	-	10	300	10
Viagem	10	11	5.7	-	-	-
Entrega	-	-	-	11	300	10
Viagem	11	12	0.6	-	-	-
Entrega	-	-	-	12	300	10
Viagem	12	3	6.2	-	-	-
Entrega	-	-	-	3	300	10
Viagem	3	2	3.8	-	-	-
Entrega	-	-	-	2	300	10
Chegada	2	Depósito	86.4	-	-	-

Veículo de Transporte

O veículo de transporte utilizado no roteiro é um caminhão da marca Volkswagen, modelo 8150 movido a diesel (143 cavalos). Composto por uma câmara frigorífica bipartida (com opção para

carga refrigerada e congelada) da marca LitoCargo, de dimensões 5,0 m de comprimento, 2,2 m de largura e 2,3 m de altura, constituída por painéis tipo “sanduíche” de densidade média de 40 kg.m^{-3} , com lâminas de fibra de vidro e recheio de poliuretano. Paredes, teto e piso da câmara de 100 mm de espessura e com volume interno de $20,2 \text{ m}^3$. Divisórias fixas, pintada externamente na cor branca e destinadas para a acomodação de produtos refrigerados e congelados.

Equipamento de Refrigeração

O equipamento de refrigeração escolhido para compor a câmara frigorífica é o da marca TransFrigor, modelo TF 6.4-RB MAXI. O gás refrigerante utilizado é o R 404A. Este sistema de refrigeração acoplou o compressor ao eixo do motor do caminhão (de marca Sanden e modelo SD7H15) composto por sete pistões de deslocamento fixo total de 154,7 mL e rotação máxima de 6000 rpm.

Carga Transportada

A carga refrigerada e congelada selecionada para o transporte foram peças de produtos cárneos e produtos embutidos (como linguiça, salame, presunto, carne processada, entre outro). As temperaturas limites, mínimas e máximas, que asseguram a qualidade deste tipo de produto são respectivamente 0° C a 8° C . O veículo foi abastecido com uma massa inicial de $\pm 12.000 \text{ kg}$, aproximadamente 12 toneladas, a temperatura do veículo após este carregamento foi de 5° C .

5.2. Simulação do comportamento térmico do veículo

Atualmente, o software CoolVan não está disponível comercialmente, mas seus elaboradores gentilmente se ofereceram para executar a simulação do cenário proposto para servir como base de dados para esta aplicação. A simulação foi realizada para a obtenção do comportamento térmico do veículo durante o percurso de entrega dos alimentos refrigerados e congelados. O roteiro simulado foi o roteiro obtido através do problema do caixeiro viajante, PCV. A programação do roteiro seguiu a sequência apresentada a seguir e também as características apresentada na Tabela 1:

Depósito - 1 - 4 - 5 - 8 - 7 - 6 - 9 - 10 - 11 - 12 - 3 - 2 - Depósito

Os dados de entrada requeridos pelo simulador são apresentados na

Tabela 2. Estes caracterizam o veículo, o equipamento de refrigeração, o produto e o ambiente externo.

Tabela 2– Entradas Simulação no CoolVan

• Características do Veículo:
• Volkswagen modelo 8150, diesel, 143 HP
• Dimensões internas da carroceria (m): 5.0 × 2.3 × 2.2 (25.3m ³)
• Isolamento e espessura da parede: 0,1 m; densidade isolamento: 40 kg/m ³
• Proteção de Porta (nenhuma, cortinas plásticas, cortinas verticais de ar: nenhuma)
• Idade do veículo: Novo veículo
• Fator de carga e espaço: 79%
• Carga carregada: 12,000 kg
• Característica do Refrigerador:
• Equipamento: Transfrigor tipo, RB -TF6, MAXI, refrigerante R404A
• Compressor Sandem, modelo SD7H15, 7 pistões, de deslocamento fixo de 154.7 mL, velocidade máxima de 6,000 rpm
• Tipo de Refrigeração: A vapor, acoplado ao motor do veículo
• Capacidade de Refrigeração (kW): 17530 BTU/h = 5.14 kW
• Características do Produto:
• Carne processada (presunto, peru e peito de frango, salame, salsicha)
• Temperatura do produto no carregamento do veículo: 5°C
• Características do Ambiente:
• Equivalente ao clima do Europa: dias quentes de julho (verão), aproximadamente e similar ao mês de fevereiro no estado de São Paulo, Brasil.
• Umidade Relativa: 70%
• Nuvens e cobertura: 40% (períodos de sol)
• Temperatura mínima: 18° C; máxima temperatura: 28° C

O programa forneceu dados de saída dos tempos e temperaturas praticados no interior do veículo durante o roteiro, disponibilizados em planilha Excel. Além disso, foi plotada uma figura com a evolução da temperatura em função do tempo que permitiu uma melhor visualização do cenário, Figura 32.

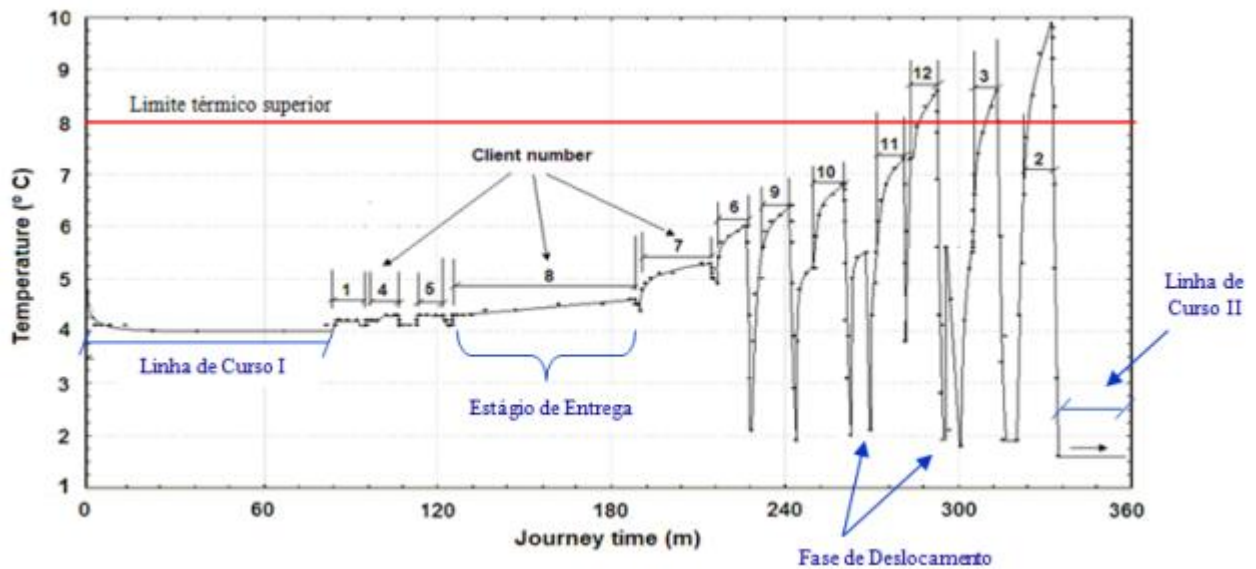


Figura 32: Plotagem dos dados de saídas da simulação no CoolVan

A simulação permitiu identificar algumas ocorrências importantes no roteiro planejado pelo PCV, como:

- ✓ A ocorrência de ampla variação da temperatura do veículo durante o roteiro de entrega;
- ✓ O aumento de temperaturas chegando a ultrapassar a temperatura limite superior específica a carga transporta;
- ✓ A variação da temperatura do veículo durante o processo não é linear;
- ✓ O aumento de temperatura enquanto ocorre a entrega de mercadoria;
- ✓ O acúmulo do gradiente térmico ao longo do processo, ocasionado pelas aberturas das portas nas entregas;
- ✓ A tentativa de recuperação da temperatura ideal pelo sistema de refrigeração quando a porta do veículo é fechada e o mesmo segue para o próximo destino;
- ✓ Quanto maior o número de entregas em um roteiro maior a variação térmica;

O aumento da temperatura do veículo no procedimento de entrega de mercadoria pode ser ressaltado devido a dois fatores. Primeiro pelo desligamento do motor do veículo quando este chega à plataforma de desembarque. Neste momento a unidade de refrigeração, que é acionada pelo motor principal, é cessada durante o tempo de descarga. Como consequência ocorre o

aumento da temperatura. O segundo fator é à abertura de porta que ocasiona à troca de calor entre o ambiente interno e externo, devido à ampla diferença de temperatura entre eles. Quanto a esta troca, observa-se que em veículos refrigerados modernos são utilizadas cortinas térmicas na porta de acesso ao compartimento de carga, que reduz significativamente a absorção de calor do ambiente externo. A forma tecnologicamente mais avançada é uma cortina vertical de ar refrigerado, lançada de cima para baixo na porta de acesso, que forma uma barreira à troca de calor entre os ambientes (GE e TASSOU, 2001). Outra forma mais barata é constituída por uma cortina de tiras de um plástico especial, colocadas verticalmente na porta, e que cedem à passagem dos carregadores e voltam à sua posição inicial logo que são liberadas. No Brasil é muito comum o travamento dessas tiras na lateral da porta do veículo, ou o lançamento destas sobre a carroceria do veículo sob a pretensa desculpa de facilitar a passagem de pessoas, mas com nefastas consequências na manutenção da qualidade do produto. Na simulação analisada neste trabalho esse efeito negativo é representado por um incremento discreto na temperatura (gradiente térmico) observado com a abertura da porta.

Observa-se que a tentativa de recuperação da temperatura ideal, pelo sistema de refrigeração, ocorre em duas etapas. No deslocamento entre as entregas, observa-se que o sistema tenta compensar o aumento da temperatura obtida com a entrega da mercadoria. No deslocamento entre o depósito e o distrito, observa-se que o equipamento de refrigeração vai baixando a temperatura do ambiente até o limite inferior ajustado no termostato. Muitas vezes a temperatura da mercadoria no momento de carregamento do veículo é superior à ideal, deste modo o percurso até o distrito ajuda na equalização térmica das parcelas embarcadas.

A simulação também possibilitou observar que, muitas vezes, as distâncias entre as entregas são muito curtas para que o sistema de refrigeração recupere a temperatura ideal do veículo. Na medida em que a sequência das entregas evolui, ao longo do trajeto, a temperatura sofre um aumento crescente e cumulativo.

Além de constatar estas ocorrências, a simulação permitiu entender que o processo de transporte é composto por três fases: (1) Linha de curso, que corresponde ao deslocamento do veículo entre o depósito e o primeiro cliente, e também o inverso, deslocamento entre o último cliente e a volta

ao depósito; (2) estágio de entrega, que corresponde ao período onde o veículo encontra-se estacionado e com a porta aberta para a retirada da mercadoria referente ao respectivo cliente; (3) deslocamento do veículo entre clientes, que corresponde ao período em que o veículo deixa um ponto atendido e segue em direção ao próximo. Portanto, o trajeto se iniciou na linha de curso I, saindo do depósito para o primeiro cliente no distrito, onde foram percorridos 84,3 Km. Em seguida ocorreu uma sequência de visitas aos clientes, intercalando o estágio de entrega com o estágio de deslocamento do veículo entre clientes, até o último cliente do percurso. Finalmente, a linha de curso II, que ligou o último cliente atendido ao depósito percorrendo 86,4 Km. Como cada fase apresenta estímulos e, conseqüentemente, comportamentos térmicos diferentes, elas serão analisadas separadamente no subcapítulo seguinte.

Os dados em Excel do tempo e temperatura praticados no roteiro foram analisados. O programa CoolVan realizou os registros dos dados a cada 1,47 passo de tempo, ou seja, no percurso planejado que teve duração de aproximadamente 420 minutos se obteve 286 valores de temperatura e tempo (TTI), cobrindo um percurso de ida e volta. A temperatura média calculada para os dados fornecidos foi de $\mu = 4,80$ °C, e o desvio padrão de $\sigma = 1,61$. A Figura 33(A) apresenta o histograma da temperatura θ do veículo, mostrando que a distribuição é positivamente inclinada. Ela também mostra uma grande concentração das temperaturas 4°C, 5°C e 6°C no roteiro, porém notam-se alguns pontos fora da faixa superior limite desejada (como 9°, 10° e 11°C). Por outro lado, a Figura 33 (B) mostra a frequência cumulativa dos dados observados de TTI.

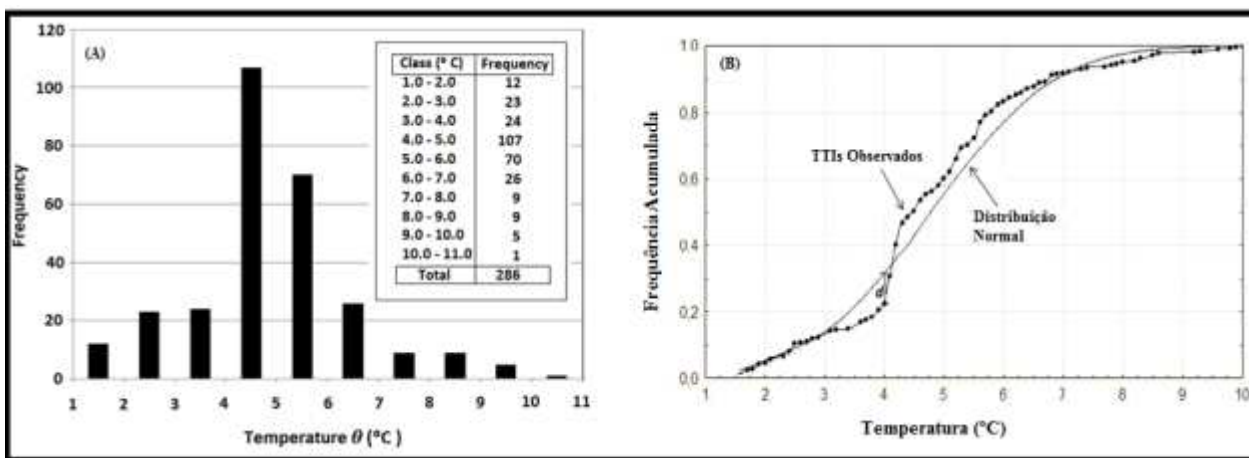


Figura 33: (A) Histograma dos TTIs ; (B) Frequência dos TTIs

O teste de Kolmogorov-Smirnov foi utilizado para verificar se o conjunto de observações de TTI poderia ser representado por uma distribuição normal. Para $F(x) = P(x \leq \theta)$ é a frequência acumulada dos valores observados de θ . Por outro lado, $G(x)$ correspondente a distribuição normal com média acumulada μ e desvio padrão α . Para determinar os pontos de amostragem:

$$d = \max|F(x) - G(x)| \quad (19)$$

A hipótese nula é rejeitada ao nível α se $\sqrt{n}d > K_\alpha$, onde K_α representa os valores críticos da distribuição de Kolmogorov e $n = 286$ é o tamanho da amostra. Foi observada a diferença máxima (1) para $x = 4,0$ ° C, com o $F(x) = 0,3097$ e $G(x) = 0,2168$, que conduz a $d = 0,0929$ e $\sqrt{n}d = 1.571$. Por outro lado, para $n = 286$ e $\alpha = 5\%$ tem $K_{(5\%)} = 1,36$, significando que a hipótese da distribuição das temperaturas θ ser normal é rejeitada a um nível de significância de 5%.

Em linhas gerais, a simulação do cenário de distribuição de alimentos refrigerados e congelados para o roteiro PCV permitiu avaliar o comportamento térmico da temperatura no interior do veículo durante o transporte deste tipo de carga. Esta mostrou que o roteiro que visa minimizar distância e tempo não consegue manter os níveis térmicos desejados dentro dos limites especificados pela carga, ao longo do percurso.

Apesar de o simulador CoolVan fornecer o comportamento da temperatura frente o percurso de entrega, ele não oferece soluções, ações ou mudanças no roteiro que ajuste e corrija a temperatura do veículo. Portanto, a simulação é complementar ao desenvolvimento da metodologia aqui proposta, pois ela fornece dados do roteiro prévio (dados de tempo e temperatura). Estes foram analisados e utilizados para a elaboração das funções matemáticas de comportamento térmico do veículo, que irão compor o programa computacional de roteirização. Esta etapa é apresentada a seguir.

5.3. Funções Matemáticas de Comportamento Térmico do Veículo

O objetivo desta etapa foi elaborar as funções matemáticas que expressem o comportamento da temperatura no interior do veículo em função do tempo. Estas foram desenvolvidas com bases no

trabalho de Hoang et al. (2012), adaptadas em função de cada etapa do processo de transporte (1 linha de curso; 2 estágio de entrega; 3 deslocamento entre clientes), e calibradas frente os dados resultantes da simulação do cenário no CoolVan. Por isso são apresentadas separadamente.

Linha de curso

A linha de curso representa a etapa em que o veículo parte do depósito em direção ao primeiro cliente (linha de curso I), e o inverso, quando o veículo deixa o último cliente e retorna ao depósito (linha de curso II). Portanto, os cálculos para a adaptação da função de Hoang et al. (2012) para a linhas de curso I e II seguem:

Considerando $i = 1, 2, \dots, n$ sendo n os pontos dos clientes a serem atendidos e ponto $n+1$ atribuído ao depósito, forma-se a matriz quadrada e simétrica D , de dimensão $n+1$. Considerando a velocidade da linha de curso médio do veículo como v_h . O tempo de viagem atribuído a linha de curso I será:

$$T_{n+1,1} = D_{(n+1,1)} / v_h \quad (20)$$

Por outro lado, o tempo de viagem da linha curso II, a partir do último ponto de cliente atendido será:

$$T_{n, n+1} = D_{(n, n+1)} / v_h \quad (21)$$

Considerando a temperatura inicial do veículo igual à temperatura do veículo depois do carregamento da mercadoria tem-se a adaptação de Hoang et al (2012), que fazem uma relação entre o tempo e a temperatura praticada no veículo:

$$\theta(\tau) = \theta_0 \exp\left(\beta \frac{H_{\theta st} \tau}{m C}\right) \quad (22)$$

sendo $\theta(\tau)$ a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) no interior do veículo no tempo τ (min), θ_0 é a temperatura inicial do produto no momento de saída (assumido uniforme), m é a massa total de produto contido no veículo, $H_{\theta st}$ é a condutância de transferência de calor W K^{-1} , C representa a capacidade térmica ($\text{J kg}^{-1} \text{k}^{-1}$), β é um coeficiente a ser calculado pela calibração dos dados obtidos pela simulação CoolVan, na etapa linha de curso I e II.

Considera-se a massa total inicial carregada no veículo como $m = 1$, e as demais cargas como uma fração da carga total transportada pelo veículo. Então, calibra-se a equação (22) para os resultados obtidos pela simulação no CoolVan, considera-se os valores de $H_{\theta st}$ e C como incorporados no valor resultante de β , além disso considerar o intervalos de tempo ao longo da simulação. Assim, a expressão (22) pode ser representada como:

$$\theta(j) = \theta_{j-1} \exp\left(\beta \frac{dt_{j-1,j}}{m}\right), \quad j=1,2,\dots, n \quad (23)$$

Aplicando ln em (23), obtém-se

$$\beta = \frac{\ln\left\{\frac{\theta_j}{\theta_{j-1}}\right\}}{\frac{dt_{j-1,j}}{m}} \quad (24)$$

Três eventos ao longo da linha de curso I foram considerados para entender o coeficiente de gradiente térmico β . Estes dados de tempo e temperatura são apresentados no Quadro 8. O veículo sai do depósito com uma temperatura inicial assumida de 5°C na simulação. Adotando $m = 1$ em (25) e aplicando a equação (26), obtêm-se dois valores para β . Para o intervalo aproximado de tempo 0 - 20 seg, uma utilidade de $\beta = - 0.7670$. Para o intervalo de tempo, aproximado, de 20 seg - 22 mim, uma utilidade $\beta = - 0.0044$. Para $T \geq 22$ min na etapa de linha de curso I a temperatura mantém-se constante e igual a 4°C .

Evento	T (Tempo decorrido em minuto)	dt(Intervalo de Tempo em minuto)	Temperatura ($^\circ\text{C}$)	β
1	0	-	5.0	---
2	0.17	0.17	4.4	- 0.7670
3	21.99	21.75	4.4	- 0.0044

Quadro 8 – Dados de Saída para a fase de linha de curso I

A expressão para calcular a variação da temperatura na linha de curso II é semelhante. Agora, a temperatura inicial é igual à temperatura do ar do veículo no momento em que termina a última

entrega da mercadoria, ou seja, $\theta = 10^{\circ}\text{C}$. A temperatura cai para $\theta_1 = 4^{\circ}\text{C}$, após um tempo decorrido $dt = 2$ mim. Supõe-se também que nenhum produto refrigerado é enviado de volta para o depósito, somente elementos como prateleiras, acessórios, bandejas vazias de trabalho, etc. permanecem no caminhão. Considerando a massa desses elementos como equivalentes a 2,5% da mercadoria total que foi assumido para tais elementos, então $m = 0.025$. Aplicando a equação (23) para o intervalo de tempo que se tem, $\beta = - 0.0112$. Para $T \geq 2$ mim ao final da viagem, a temperatura mantém-se constante e igual a 4°C .

A análise da etapa (1) linha de curso possibilitou a adaptação e calibração da equação de Hoang et al, (2012) para uma situação em que o veículo deixa o depósito e segue em direção ao primeiro cliente (linha de curso I), e também na situação em que o veículo deixa o último cliente e retorna ao depósito (linha de curso II). Deste modo, a equação que representa este comportamento térmico em função do tempo decorrido é a expressão (23). Os dados do parâmetro β obtidos para a calibração desta equação, tanto para o curso I como o II, foram elaborados através dos dados de comportamento térmico obtidos pela simulação do CoolVan calculados pela expressão (24). Nota-se que os valores adquiridos de β tiveram sinal negativo. Isto mostra que o delta da temperatura no sistema é negativo, ou seja, que a temperatura no início da fase é maior que a temperatura ao termino da mesma. Este fator corresponde à diminuição da temperatura originada pelo sistema de refrigeração, que tenta retomar a temperatura ideal até a temperatura regulada no termostato. Por fim, é possível observar que na medida em que a temperatura do veículo se aproxima da temperatura ideal, regulada no termostato como 4°C , o β diminui ao ponto de tender a zero.

Estágio de Entrega

Durante a fase de entrega de mercadorias, de uma forma geral, a porta do veículo permanece aberta, com o motor do caminhão e os equipamentos de refrigeração desligados. Para o caso apresentado, este fato acarreta um aumento de temperatura em função da diferença de temperatura entre o ambiente externo e o meio interno. Observa-se que a simulação realizada no CoolVan apresentou uma variação da temperatura externa do ambiente ao longo do percurso, representando uma situação real de mudanças térmicas ao longo do dia. O percurso teve duração

de aproximadamente 7 horas e meia e iniciou-se às 6 horas da manhã com temperatura de 9,3°C. Ao final do percurso, às 13h30, a temperatura externa chegou a 25°C.

Da mesma forma que a etapa anterior, a etapa do estágio de entrega assemelha-se ao comportamento térmico representado na equação (22), porém com um valor positivo devido ao aumento da temperatura do veículo ocorrido em função da expressiva influência do ambiente externo. De fato, esta variação expressiva ao longo do dia deve ser incorporada na expressão de comportamento térmico para a etapa de entrega de mercadoria. A expressão (22) foi adaptada à situação do estágio de entrega, para:

$$\frac{\theta(\tau)}{\theta_0} = \alpha_1 + (\theta_{ext})^{\alpha_2} \exp\left(\beta_{unl} \frac{H_{\theta st} \tau}{m c}\right) \quad (25)$$

onde θ_{ext} é a temperatura do ambiente externo, e α_1 , α_2 e β_{unl} são coeficientes a serem ajustadas através de montagem de regressão dos dados da simulação do CoolVan referentes a esta fase. Uma vez que a temperatura externa não se altera apreciavelmente durante uma operação de entrega de mercadoria, foi feita uma média destas temperaturas entre os valores observados no início e do final do processo de entrega.

Sendo $i = 1, 2, \dots, n$ a sequência das paradas para as entregas, $K(i)$ foi tomado como o cliente servido no ponto i^{th} a ser entregue a mercadoria. Deste modo m_k é a quantidade de carga a ser entregue ao cliente k representado por uma fração da carga total contida no veículo. Adota-se $Q_i^{(A)}$ como sendo a quantidade de carga a bordo do veículo, quando a operação de entrega i^{th} é iniciada. Assim, $Q_i^{(B)}$ é a quantidade de carga restante no veículo, quando terminada a operação de entrega de mercadoria no cliente i . As variáveis $Q_i^{(A)}$ e $Q_i^{(B)}$ são também expressa como uma fração da carga total. Contudo, a quantidade média de carga no veículo durante o processo de descarga é de aproximadamente obtido por:

$$Q_i = (Q_i^{(A)} + Q_i^{(B)}) / 2 \quad \text{tendo } (i = 1, 2, \dots, n) \quad (26)$$

Portanto:

$$Q_i^{(B)} = Q_i^{(A)} - m_{k(i)} \text{ tendo } (i = 1, 2, \dots, n) \quad e \quad (27)$$

$$Q_i^{(A)} = Q_{i-1}^{(B)} \text{ tendo } (i = 1, 2, \dots, n) \quad (28)$$

O veículo é assumido completamente carregado uma vez que $Q_i^{(A)} = 1$, quando deixa o depósito e segue para a primeira entrega. A equação (26), juntamente com as relações de repetição (27) e (28), permitem calcular a quantidade média de carga no veículo durante as diferentes paradas para entregas. A fim de calibrar a equação (25), foram utilizados os resultados da simulação no CoolVan, além de serem calculadas as quantidades relativas através da expressão (26). Estes dados estão apresentados no Quadro 9. As variáveis exibidas são: as temperaturas no início do processo de entrega da mercadoria (θ_0) e na sua extremidade (θ_{unl}) referente à temperatura ao final do carregamento, bem como a temperatura externa média θ_{ext} , o tempo de entrega τ_{unl} (minutos), a quantidade de carga relativa a bordo Q_i (expressa em fração) e as fases de entrega i .

Fase de Entrega i	Nº Cliente	τ_{unl} Tempo de entrega (min)	Q_i Quantidade de carga a bordo	θ_{ext} Temperatura externa média (°C)	θ_0 Temperatura Inicial (°C)	θ_{unl} Temperatura ao Final da entrega (°C)
1	1	10	0.988	11.9	4.1	4.2
2	4	10	0.963	12.5	4.1	4.3
3	5	10	0.937	13.2	4.1	4.3
4	8	64	0.633	14.8	4.1	4.6
5	7	24	0.259	16.8	4.4	5.3
6	6	10	0.163	17.8	4.9	6.0
7	9	10	0.138	18.5	5.0	6.4
8	10	10	0.113	19.4	5.2	6.8
9	11	10	0.088	20.4	4.9	7.3
10	12	10	0.063	20.9	5.9	8.6
11	3	10	0.038	21.9	5.5	8.6
12	2	10	0.025	22.7	5.3	10.0

Quadro 9- Dados da fase de entrega de mercadoria para realização da regressão

Estes valores apresentados foram utilizados para a análise de regressão com o objetivo de calibrar a expressão (25). Depois de simplificar esta expressão e aplicar o logaritmo, tem-se a expressão de comportamento térmico para a fase de entrega expressa na equação (29) a seguir:

$$\ln \left(\frac{\theta_{unl}}{\theta_0} \right) = \ln(\alpha_1) + \alpha_2 \ln(\theta_{ext}) + \beta_{unl} \left(\frac{\tau_i}{Q_i} \right) \quad (29)$$

Os resultados da análise de regressão são apresentados no Quadro 10. A regressão para a montagem de dados CoolVan mostrou um valor elevado de R^2 , próximo de um. Além disso, com $n = 12$ e três parâmetros de adaptação mostrados na expressão (29), foram obtidos para 9 graus de liberdade. Entretanto, o Quadro 10 apresenta a análise de *t Student* com 9 graus de liberdade, onde o valor crítico foi 3,250 com nível de significância de 0,005, indicando que os três coeficientes são significantes estatisticamente. Na regressão obtém-se γ sabe-se que $\ln(\alpha_1) = \gamma$, portanto $\alpha_1 = e^\gamma$.

	Valor	<i>t Student</i>	<i>t Significant</i>
$\ln(\alpha_1)$	-1.1290	-5.1497	0.005
α_2	0.4517	5.0773	0.005
β_{unl}	0.00081	5.5151	0.005
$R^2 = 0.965$			

Quadro 10- Dado de análise de significância e de *t student* dos parâmetros $\ln(\alpha_1)$, α_2 e β_{unl}

A expressão (29) será utilizada para estimar a variação de temperatura ao longo do tempo, frente diferentes configurações da etapa de entrega das mercadorias, considerando as diversas sequências das visitas. Uma vez que os valores da temperatura são calculados sequencialmente no modelo, a temperatura θ_0 no início da operação de descarga foi considerada igual à temperatura observada no final da fase anterior, e, portanto, conhecida. Assim, a partir da expressão (28) uma estimativa da temperatura $\theta(\tau)$ de quaisquer valores intermédios entre $0 \leq \tau \leq \tau_{unl}$ pode ser obtida.

$$\theta(\tau) = \alpha_1 \theta_0 (\theta_{ext})^{\alpha_2} \exp \left(\beta_{unl} \frac{\tau}{Q_i} \right) \quad (30)$$

Portando a expressão (30) pode ser utilizada para estimar os valores de temperatura em função do tempo no estágio de entrega de mercadorias. Esta expressão deve utilizar os valores de α_1 , α_2 e β_{uml} , indicados no Quadro 10.

Deslocamento entre Clientes

A etapa de deslocamento entre clientes após o encerramento da tarefa de entrega de mercadoria no cliente i . Para o caso estudado acontecem 11 deslocamentos entre os clientes, onde ocorrem as ligações entre dois pontos de entrega sucessivos ao longo do percurso (o cliente i e $i + 1$) conforme apresentado na Tabela 1. Para adaptar a equação (22) e calibrá-la a partir dos dados adquiridos com a simulação do CoolVan sob esta fase, foi preciso calcular as quantidades restantes no veículo após a entrega da carga no ponto i ($Q_i^{(B)}$), apresentado na etapa de entrega de mercadoria com as expressões (26), (27), e (28). Os dados utilizados para a realização da análise de regressão nesta etapa são apresentados no Quadro 11.

Deslocamento i	Ligação entre clientes	Distancia Viajada (km)	(τ_{tvl}) Tempo Viajado (min)	Q_i Quantidade de carga a bordo	θ_{ext} Média da temperatura externa (°C)	θ_0 Temperatura Inicial (°C)	θ_{tvl} Temperatura final do deslocamento (°C)
1	1-4	1.6	3.2	0.975	12.2	4.2	4.1
2	4-5	2.9	5.8	0.950	12.9	4.3	4.1
3	5-8	1.2	2.4	0.925	13.5	4.3	4.1
4	8-7	0.9	1.8	0.342	16.2	4.6	4.4
5	7-6	1.3	2.6	0.175	17.4	5.3	4.9
6	6-9	2.5	5.0	0.150	18.2	6.0	5.0
7	9-10	4.2	8.4	0.125	19.0	6.4	5.2
8	10-11	5.7	11.4	0.100	19.9	6.8	4.9
9	11-12	0.6	1.2	0.075	20.7	7.3	5.9
10	12-3	6.2	12.4	0.050	21.4	8.6	5.5
11	3-2	3.8	7.6	0.025	22.3	8.6	5.3

Quadro 11 - Dados da fase de deslocamento entre clientes

Uma expressão semelhante a (30) foi testado para esta análise de regressão:

$$\theta_{tvl} = \alpha_1 \theta_0 (\theta_{ext})^{\alpha_2} \exp\left(\beta_{tvl} \frac{\tau_{tvl}}{Q_i^{(B)}}\right) \quad (31)$$

onde θ_0 a temperatura referente a temperatura do veículo quando ele inicia o seu percurso depois da entrega no cliente i , θ_{tvl} é a temperatura do veículo quando o mesmo chega ao próximo cliente $i+1$, e τ_{tvl} é o tempo de viagem do veículo no trecho entre i e $i+1$. A temperatura externa θ_{ext} não é considerada estatisticamente significativa nesta etapa. Portanto a expressão (31) fica mais adequadamente apresentada pela expressão (32):

$$\theta_{tvl} = \alpha_1 \theta_0 (\tau_{tvl})^{\alpha_2} (Q_i^{(B)})^{\alpha_3} \quad (32)$$

Os resultados da análise de regressão para esta etapa são apresentados no Quadro 12. A regressão, também com base nos dados da simulação do CoolVan para esta fase, mostrou um valor R^2 satisfatório para os parâmetros aqui analisados. Por isso, com $n = 11$ nesta fase e os três parâmetros de adaptação (32), tem-se 8 graus de liberdade para esta etapa. Considerando a tabela de distribuição de t Student, com 8 graus de liberdade, o valor crítico é 3,355. Comparando-o com os dados obtidos nesta análise temos que α_3 é significativo ao nível de 0,005, α_2 é significativa ao nível de 0,01, e α_1 é significativo ao nível de 0,05 (Quadro 12).

	Valor	t Student	t Significant
$\ln(\alpha_1)$	0.08940	2.3293	0.05
α_2	-0.07446	-3.0811	0.01
α_3	0.10159	6.7642	0.005
$R^2 = 0.913$			

Quadro 12- Dado de análise de significância e de t student dos parâmetros $\ln(\alpha_1)$, α_2 e α_3 para a etapa de deslocamento entre clientes

Portando a expressão (32) pode ser utilizada para estimar os valores de temperatura em função do tempo na etapa de deslocamento entre clientes. Esta expressão deve utilizar os valores de a_1 , a_2 e a_3 , calibrados para esta fase e apresados no Quadro 12.

O passo três da metodologia, aqui detalhado, permitiu a elaboração das funções matemáticas que exprimem o comportamento térmico do veículo, passo a passo, ao longo do percurso. Estas puderam ser organizadas e calibradas especificamente para cada etapa de atividade que compõem o processo de transporte. As funções são: para linha de curso I função (27); para linha de curso II função (27); para estágio de entrega função (30); e para o deslocamento entre entregas função (32). A Figura 34 mostra a síntese das funções matemáticas elaboradas e calibradas para etapa identificada em um roteiro de transporte de mercadoria refrigerada e congelada, bem como as variáveis e os valores calculados que compoem cada uma delas.

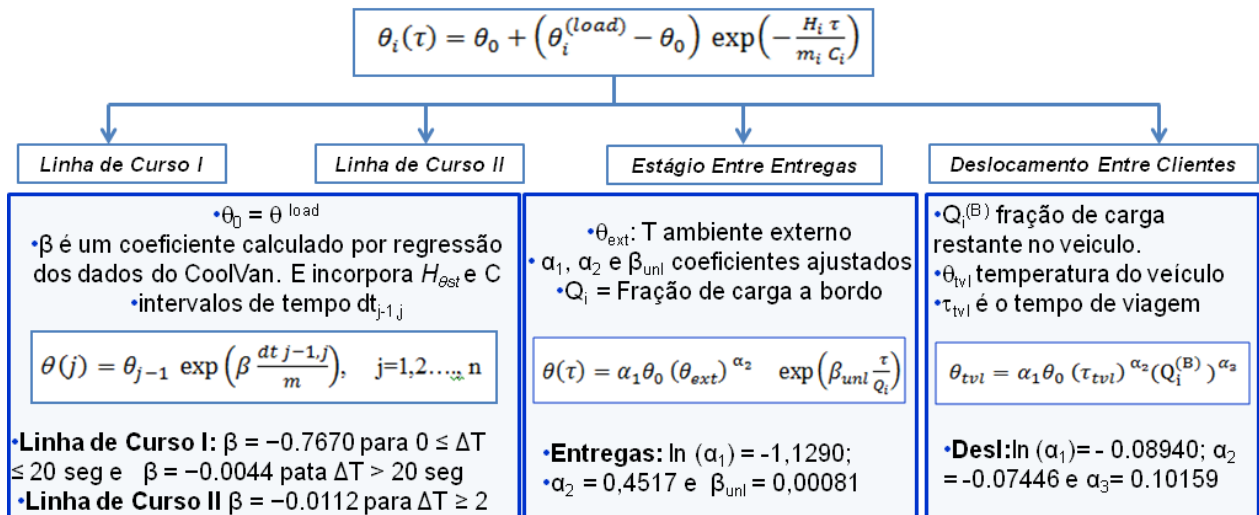


Figura 34: Síntese das funções matemáticas de comportamento térmico de veículo

Essas funções são complementares a metodologia proposta neste trabalho e, por isso, irão integrar o último passo da metodologia para estimares as temperaturas ao longo do percurso passo a passo.

5.4. Roteirização de Veículo Combinando Otimização Térmica e Logística

As equações ajustadas para as três etapas do processo de transporte, descritas na seção 5.3, foram consideradas na elaboração do algoritmo para roteirização de veículo combinando a otimização

térmica e logística. O algoritmo utilizou o programa de computador Turbo Pascal para obter as estimativas dos níveis de temperatura (TTI), passo a passo, ao longo de uma jornada diária, considerando-se diferentes sequências de visitas de entrega. Os coeficientes PCIs também foram calculados a fim de analisar o desempenho térmico destas diferentes sequências de entrega, levando à solução ótima que minimiza a distância percorrida e, ao mesmo, mantenha os níveis de temperatura dentro de limites pré-definidos.

Visto que a análise da simulação térmica, seção 5.2, mostrou que as temperaturas acumuladas observadas não configuram uma distribuição de comportamento normal, o índice PCI foi calculado a partir das expressões (9) e (10), baseado no trabalho Gonzalez e Werner (2009). Este método ajusta os valores PCIs de acordo com o grau de assimetria da população subjacente, utilizando fatores específicos para o cálculo dos desvios acima e abaixo da média da variável, neste caso do parâmetro temperatura que está sendo avaliado.

As análises foram organizadas para dois tipos de situações durante a execução do algoritmo e da eventual execução da rota: para uma situação estática (onde os valores das variáveis declaradas não mudam com o tempo) e para uma situação dinâmicas (onde os valores das variáveis podem mudar com o tempo). Estas duas abordagens são apresentadas a seguir.

Abordagem Estática

A abordagem estática apresenta algumas situações fornecidas pela execução do algoritmo, onde os valores das variáveis declaradas não se alteram durante a execução do roteiro de entrega.

A análise dos resultados da sequência se inicia com a análise do roteiro do PCV mostrado na Figura 31. A sequência do roteiro avaliado foi:

Depósito - 1 - 4 - 5 - 8 - 7 - 6 - 9 - 10 - 11 - 12 - 3 - 2 - Depósito.

Onde a distância total mínima percorrida no roteiro foi de 204,1 km. A formulação adotada para avaliar o processo do C_{pk} , expressões (9) e (10), forneceu os seguintes valores: $P_{\theta} = 0,552$, $D_{\theta} = 1,105$, e $C_{pk} = 0,35$. Com base nas referências um $C_{pk} < 1,33$ é insatisfatório, indicando que a

variação de temperatura ao longo da rota de entrega não se encaixa nos requisitos de temperatura especificados.

Além desta análise geral de C_{pk} para o roteiro PCV foi realizada uma análise detalhada do mesmo, considerar todas as paradas de entrega individualmente. Para isto t_i será o instante em que termina o i^{th} entrega da carga. Esta análise é apresentada na Tabela 3. Os valores de TTI_i para o processo de entrega i^{th} abrange o intervalo de tempo iniciado no instante zero (partida do depósito) até o momento t_i . Em seguida, para esta conjunto de TTI_i é calculado o valor de C_{pk} . O mesmo cálculo é realizado para avaliar o ciclo completo do veículo, 12 entregas, incluindo a etapa de retorno para o depósito. Os resultados, consolidados na Tabela 3, mostram que, até quinta entrega, onde foram atendidos respectivamente os clientes 1, 4, 5, 8 e 7, os coeficientes obtidos de C_{pk} tiveram valores satisfatórios, respeitando o limite superior e inferior requerido pela carga. Observa-se que o volume das cinco primeiras entregas corresponde a 82,5 % da demanda total do roteiro, sugerindo que para o caso estudado este seria um numero suficiente de clientes para não haver violação dos limites térmicos. O veículo realizaria rotas mais curtas, retornaria ao depósito para mais um carregamento do produto, e finalmente sairia para uma rota de distribuição subsequente para finalização das entregas, como ocorre no trabalho de Oswald e Stirn (2008).

Tabela 3: Análise detalhada PCI da entrega no roteiro PCV

Nº Cliente	Quantidade de Carga entregue (kg)	Tempo (min)	μ	σ	P_θ	C_{pk}	Critério de qualidade
1	300	94.9	4.2	0.205	0.545	3.903	Satisfatório
4	300	106.6	4.2	0.165	0.472	4.166	Satisfatório
5	300	122.5	4.2	0.149	0.469	4.601	Satisfatório
8	7,000	188.1	4.2	0.155	0.685	4.377	Satisfatório
7	2,000	214.8	4.3	0.284	0.774	2.046	Satisfatório
6	300	227.5	4.5	0.487	0.704	1.235	Insatisfatório
9	300	242.7	4.5	0.667	0.703	0.880	Insatisfatório
10	300	261.0	4.6	0.826	0.661	0.730	Insatisfatório
11	300	281.3	4.7	0.985	0.615	0.631	Insatisfatório
12	300	292.7	4.8	1.151	0.599	0.524	Insatisfatório
3	300	314.0	4.9	1.312	0.579	0.455	Insatisfatório
2	300	332.8	5.0	1.486	0.582	0.377	Insatisfatório
Depósito	-	418.9	4.8	1.611	0.552	0.412	Insatisfatório

Alguns fatores que, possivelmente, influenciaram a violação das temperaturas limites gerando um valor de C_{pk} insatisfatório:

- ✓ Distâncias entre os clientes muito curtas para que o sistema de refrigeração consiga recuperar o gradiente térmico adquirido na entrega anterior. O gradiente é cumulativo, então quando não é reestabelecido ele segue para a próxima entrega, o que agrava ainda mais o cenário;
- ✓ Tempo elevado com a porta do veículo aberta faz com que a troca de calor entre o ambiente externo e interno seja grande, aumentando significativamente a temperatura no interior do veículo;
- ✓ Temperatura externa aumenta gradativamente com o avançar do dia, fazendo com que lá pela quinta entrega o ambiente externo apresente uma variação muito grande comparando com o ambiente interno (um exemplo no registro do CoolVan onde no início do roteiro a temperatura externa é 9,3°C, ao término esta se encontra a aproximadamente 25°C);

Na tentativa de melhorar este cenário foi sugerido o inverso do PCV. Apesar da sequência do roteiro inverso do caixeiro viajante (Depósito - 2-3-12-11-10-9-6-7-8-5-4-1- Depósito) apresentar a mesma distância, 204,1 Km o valor do C_{pk} é ainda pior que o anteriormente analisado, $C_{pk} = 0,15$.

Para obter outras sequências de rotas é necessária uma sensatez na busca para garantir um valor satisfatório de C_{pk} e ao mesmo tempo não aumentar demasiadamente a distância total do roteiro. Para esta busca por novos roteiros foram seguidos os seguintes passos:

- 1) Seja m o número do estágio da busca;
- 2) Inicialmente não imponha uma restrição superior para D , distância total percorrida no roteiro. Executar busca para obter uma primeira solução, registrar o valor correspondente de D_m ;
- 3) Estabelecer uma restrição superior de comprimento da rota igual ao último valor observado de D : $D_{m+1} < D_m$, e executar a busca novamente;
- 4) Pare quando nenhuma outra solução é obtida.

Realizando este procedimento foram conseguidos novos cenários estes estão apresentados a seguir no Quadro 13.

Sequência de roteiro do veículo	Restrição de D (km)	C_{pk}	Distancia Total do Roteiro (km)	Excesso de distância comparada com o PCV (km)
Depósito-7-2-6-8-1-12-4-11-9-3-10-5- Depósito	livre	1.716	258.4	54.3
Depósito -7-5-9-2-8-10-1-12-4-11-6-3- Depósito	$D < 258.4$	1.354	254.5	50.4
Depósito -8-4-7-3-12-1-6-11-5-10-2-9- Depósito	$D < 254.5$	1.343	251.8	47.7
Depósito 8-4-7-9-6-1-11-2-10-5-12-3- Depósito	$D < 251.8$	1.333	248.0	43.9
Depósito -8-3-6-7-9-5-10-4-11-2-12-1- Depósito	$D < 248.0$	1.367	246.1	42.0
Depósito -7-8-10-5-9-1-6-3-11-4-12-2- Depósito	$D < 246.1$	1.333	242.8	38.7
Depósito -7-8-3-5-9-10-4-11-2-6-12-1- Depósito	$D < 242.8$	1.332	242.0	37.9
Depósito-1-4-5-8-7-6-9-10-11-12-3-2- Depósito (PCV)	-	0.347	204.1	0
Depósito -2-3-12-11-10-9-6-7-8-5-4-1- Depósito (PCV inverso)	-	0.150	204.1	0

Quadro 13 Sequências de roteiros com base na restrição da distância à do desempenho térmico

Ao utilizar um procedimento de pesquisa combinatória foi encontrado o roteiro:

Depósito -7- 8-3 -5- 9-10 -4- 11-2 -6- 12-1 - Depósito

A distância total estimada desse roteiro 242,0 km, sendo considerada 18,6 % maior que o roteiro obtido pelo PCV. Todavia, o valor obtido de C_{pk} para este roteiro foi 1,332, satisfatório. Este resultado pode representar um aumento significativo dos custos operacionais dos veículos, mas possíveis perdas de produto provocadas pela violação térmica limite podem ser evitadas. O padrão desta sequência pode parecer não intuitivo, mostrando um zigzague entre as entregas, porém ele aumenta a distância entre os clientes, fator que ajuda o sistema de refrigeração reduzir a temperatura interna do veículo para níveis aceitáveis. Esta sequência pode ser aconselhada para um tipo de mercadoria que necessite do controle da temperatura, porém que possua alto valor agregado, como é o caso de produtos como medicamentos, cosméticos, obras de arte, mercadorias eletrônicas, entre outros.

Um procedimento para o uso do *simulated annealing* foi desenvolvido para obter o caminho mais curto, entretanto com o objetivo de respeitar $C_{pk} \geq 1,33$.

O resultado deste procedimento para o estado estático foi uma rota ótima a partir da seguinte sequência:

Depósito- 1-7-8-6-9-10-5-11-3-12-2-4-Depósito

A distância total do roteiro é $D = 223,6$ km e um C_{pk} estimado satisfatório de 1,35. Esta sequência mostrou um aumento de 9,5% na distância percorrida, comparando-a com a solução apresentada PCV, mas manteve variação de temperatura dentro do intervalo desejado. A sequência dos valores de TTI para está roteiro permitiu a elaboração do histograma de frequência mostrando 418 valores de temperaturas estimadas (Figura 35). Observa-se que esta distribuição é inclinada para a esquerda, indicando um ótimo cenário, onde todas as temperaturas estimadas se encontram dentro dos limites de qualidade especificados. Esta inclinação também justifica o uso do mesmo cálculo do coeficiente C_{pk} , designado a comportamento de distribuição não normal das temperaturas.

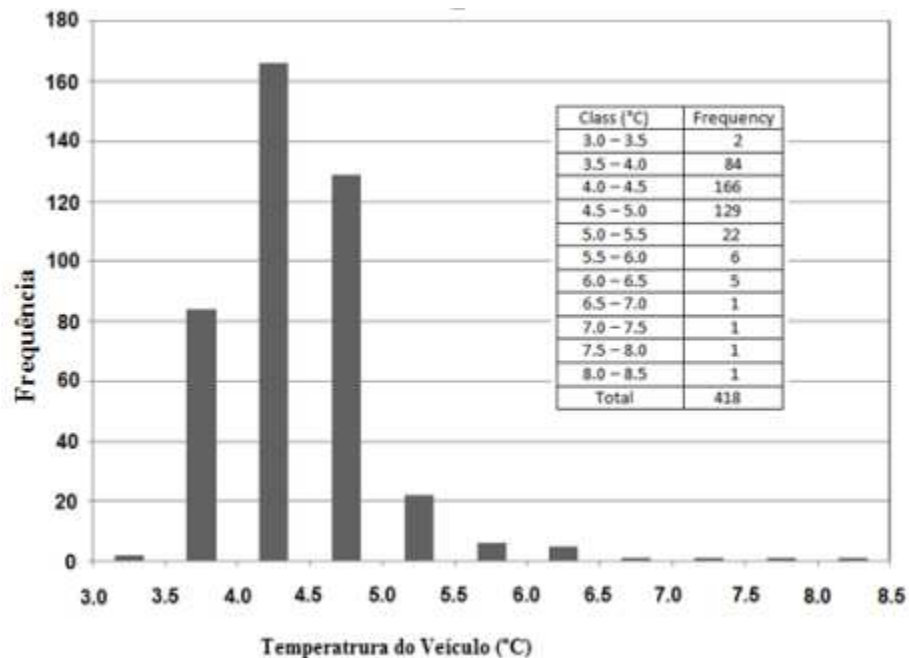


Figura 35: Histograma de TTIs do roteiro do *simulated annealing*

Frente os dois melhores roteiros estáticos apresentados para o cenário proposto (melhoria do PCV e melhoria do SA) foi elaborado um mapa com suas respectivas características e desempenho (Figura 36). A ele também foi adicionado a cenário do PCV, com o objetivo de comparação destes cenários que buscaram uma otimização híbrida, entre a distância e o comportamento térmico, e o tradicional roteiro do PCV, que busca minimização de custo (expresso em distância e tempo).

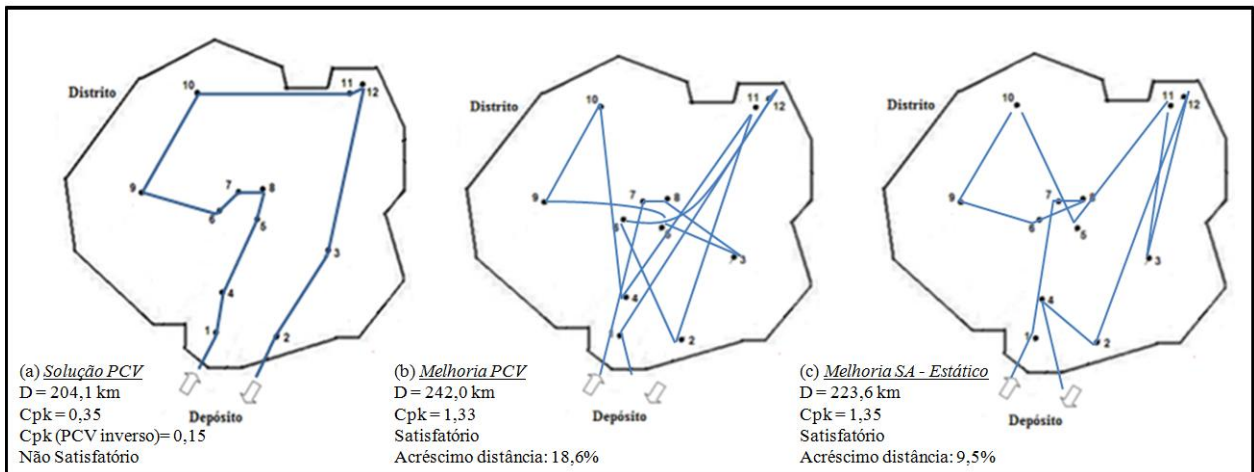


Figura 36: Mapa dos roteiros estáticos otimizados comparando-os com o PCV

Este passo da metodologia comprovou através de análise estatística (cálculos C_{pk}), que o roteiro de mínima distância obtido pelo PCV não respeita as temperaturas limites que garantem a qualidade da carga. Além disso, observa-se que os valores C_{pk} são muito sensíveis com o tempo, principalmente, na etapa de entrega de mercadoria, necessitando de uma redução substancial deste tempo. Para isto, outros elementos devem ser considerados na prática, como uma maior disciplina na abertura e fechamento das portas do veículo, a utilização de veículos menores que reduzem os tempos totais de percurso, um atendimento de um menor número de clientes, etc.

Para isso é necessário o treinamento profissional e técnico das pessoas que trabalham diretamente com este processo, além da necessidade de realizar campanhas de conscientização direcionadas ao varejista, que por vezes são responsáveis pelos atrasos inesperados na etapa de entrega.

O mapa dos cenários estáticos ótimos mostrou que os roteiros estimados conseguem obter um valor de C_{pk} satisfatório, mostrando que os limites térmicos foram respeitados ao longo do percurso. Todavia, permitiu observar que a distribuição de mercadorias refrigeradas e congeladas não é um processo trivial, exigindo, de fato, uma investigação mais detalhada e integrada dos seus aspectos térmicos. Este processo na prática está sujeito a muitas mudanças, como atrasos e por isso será analisado o cenário para situações dinâmicas.

Abordagem Dinâmica

A abordagem dinâmica apresenta algumas situações fornecidas pela execução do algoritmo, quando os valores das variáveis declaradas podem passar por atualizações durante a execução do roteiro de entrega. Este caso tenta mostrar situações que se assemelham ao problema encontrado na prática do processo de transporte de mercadoria refrigerada e congelada.

Para esta análise o primeiro roteiro avaliado foi o roteiro obtido através do S.A. estático, Figura 36 (c), de sequencia apresentada como:

Depósito – 1 – 7 - 8 – 6 – 9 – 10 – 5 – 11 – 3 – 12 – 2 – 4 – Depósito

Uma primeira situação dinâmica foi construída na tentativa de supor uma situação em que no decorrer da execução do roteiro acontece um atraso no processo de entrega de mercadoria em um dos clientes. No caso hipotético, supomos o atraso na entrega da mercadoria destinada ao cliente de número 8. O atraso foi de 10 minutos, ou seja, a operação programada para acontecer em 64 minutos ocorreu em 74 minutos. Ao executar novamente o programa com esta mudança o mesmo estimou as temperaturas e obteve um valor de $C_{pk} = 1,10$, que não foi satisfatória. O comportamento do aumento do C_{pk} no decorrer do tempo e da entrega com este atraso de 10 minutos no cliente 8 pode ser visualizado na Figura 37. Nota-se que ao longo do percurso o índice C_{pk} diminuiu e quando chega ao cliente número 2 já não consegue mais assegurar a temperatura específica que garante a qualidade da carga.

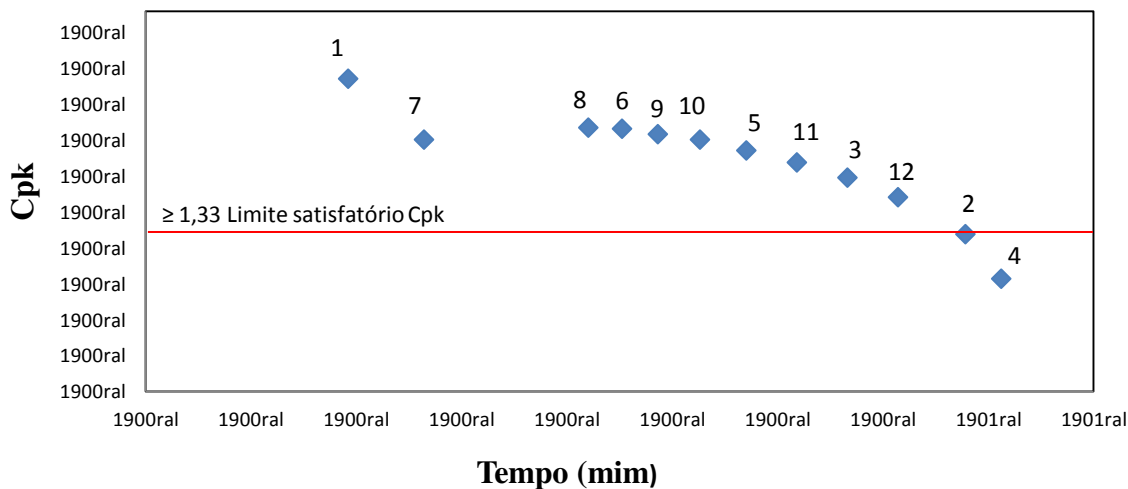


Figura 37: Comportamento Cpk com atraso de 10 mim no cliente 8 - Roteiro Dinâmico

Por outro lado, quando esse atraso aconteceu, os clientes 1, 7 e 8 já tinham sido visitados. Mantendo-se inalteradas essas visitas, ao final da entrega do cliente 8, foi aplicado novamente o programa com o procedimento do S.A. para reorganizar a sequência restante dos clientes no roteiro. A sequência ótima sugerida pelo algoritmo, após as visitas dos clientes 1, 7 e 8, foi 9-3-2-10-11-4-12-5-6, ou seja, o roteiro de entregas ficou:

Depósito – 1 – 7 – 8 – 9 – 3 – 2 – 10 – 11 – 4 – 12 – 5 – 6 – Depósito

A distância total deste novo roteiro foi de 239,3 km e o $C_{pk} = 1,33$, onde a distância total aumentou em aproximadamente 7% (15,7 km) comparando-o com o roteiro do S.A e 17% (35,2 km) comparando-o com o roteiro do PCV, e o índice C_{pk} ficou satisfatório. Embora a reprogramação de entregas possa não conseguir gerar uma sequência satisfatória, por exemplo, quando o ambiente sofre uma perturbação muito grande, essa dinâmica deve ser sempre analisada pelo sistema a fim de buscar, uma opção de custo mais baixo. A evolução do comportamento do índice C_{pk} desta nova sequência é apresentado na Figura 38.

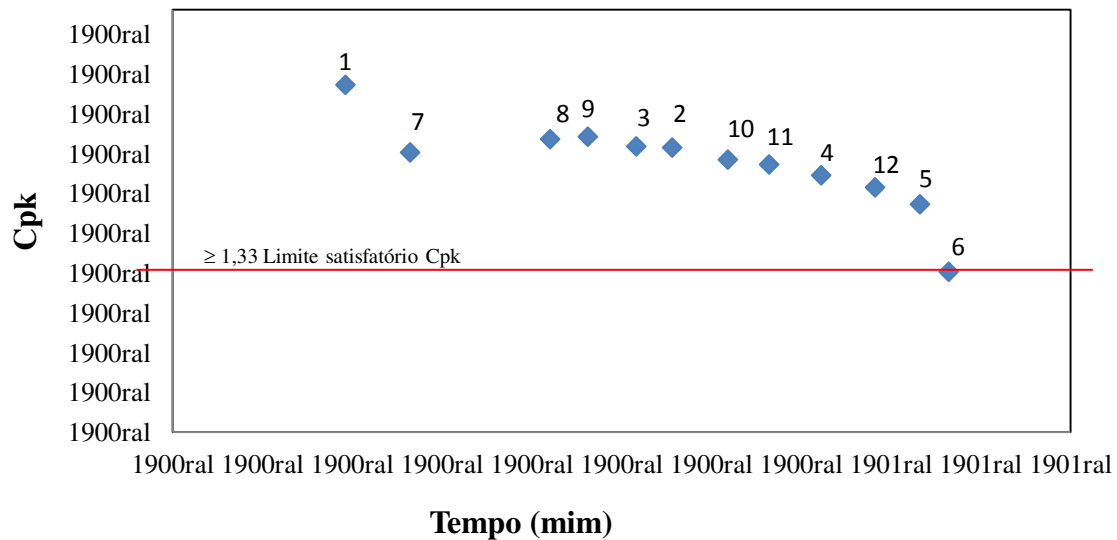


Figura 38: Comportamento Cpk Nova sequência com o atraso cliente 8 - Roteiro Dinâmico

Para esta situação dinâmica onde ocorre um atraso em uma das entregas e o veículo deve ser reprogramado para uma nova sequência é necessário um computador de bordo para tomada de decisão. O novo cenário deve ser analisado, ou seja, devem-se entender quais clientes foram visitados e quais ainda faltam ser atendidos. Também se deve conhecer a temperatura na qual o veículo se encontra. Na situação apresentada com a nova programação dos clientes mostra um acréscimo na distância total percorrida. Esse pequeno acréscimo no percurso aumenta o custo operacional, mas essa alteração dinâmica na rota tende a reduzir significativamente os custos originados pela deterioração do produto, evitando também impactos negativos na imagem do operador logístico.

Uma segunda situação dinâmica é vinculada ao cenário anterior, onde há 10 minutos de atraso na entrega da mercadoria do cliente 8. Entretanto, a sugestão do autor agora é ao invés de recalculer imediatamente a nova sequência perante o atraso, que o veículo feche as portas e permaneça 5 minutos parado no local com o sistema de refrigeração ligado, para o mesmo retomar a temperatura específica requerida ao veículo. Para este caso, não há nova programação da sequência de entrega. A única mudança neste cenário é a espera de 5 minutos para que o sistema volte ao seu estado ideal. Desse modo, executando o programa para este cenário se estima um índice de C_{pk} igual a 1,56, nível bastante satisfatório. Apesar de apresentar um bom índice de C_{pk} ,

esta situação deve ser avaliada em função do atraso que pode gerar no cronograma de entrega perante o tempo necessário para a recuperação do valor ideal do C_{pk} . Se o tempo necessário de recuperação for muito elevado, pode ocasionar impacto negativo quanto ao nível de serviço da empresa, por isso todos os custos que envolvem este atraso devem ser ponderados e avaliados em conformidade.

Uma terceira situação é proposta com base na ideia elaborada no trabalho de Novaes, et al. (2013) onde os autores analisaram a dinâmica de um problema de roteirização dinâmica aplicado a um sistema de coleta OEM (milk-run) em que as tarefas que excedem o tempo limite são alocadas a veículos suplementares, formando assim rotas auxiliares. Os resultados mostraram que essa formulação dinâmica melhora o nível de serviço do sistema quando comparada à versão estática. No caso da distribuição de produtos alimentícios refrigerados este processo é um pouco mais complicado, a transferência da carga para veículos auxiliares exige o estabelecimento de pontos de encontro dos veículos, com convergência tanto geográfica, como temporal. Todavia, melhor solução para esse tipo de problema é dimensionar o sistema com maior folga em termos do nível de qualidade (valores de C_{pk} mais elevados), de forma que ocorrências de desvios consigam ser corrigidas através de medidas como as discutidas. Outra alternativa para o problema é levar a carga, que esteja fora dos níveis de qualidade adequados (valores de $C_{pk} \leq 1,33$) de volta para o depósito e cobrar do varejista responsável os custos operacionais extras e o valor do produto perdido.

Um aspecto importante a ser considerado na aplicação do S.A. é a convergência do processo iterativo. Como mencionado anteriormente, na revisão da literatura, para minimizar uma determinada heurística interativa no decorrer da busca por resultados satisfatórios a sugestão é rejeitada somente quando o valor resultante da função de "custo" não é menor do que o resultado anterior iterativo (no caso deste trabalho o custo é representado pelo parâmetro C_{pk}). Na prática, a dinâmica envolvida em tais roteiros concentra a busca em vizinho mais próximo ao ponto analisado. O método de Metropolis-Hastings, por outro lado, admitem eventuais e controladas degradações sobre o valor da função de custo de acordo com uma avaliação probabilística (SOUZA DE CURSI e SAMPAIO, 2012). Esta análise pode ser observada na função inserida no

pseudocódigo gerado para a aplicação do S.A. Esta função encontra-se na linha (24) do Apêndice 2. A função é mostrada a seguir:

$$\text{Prob}(\text{accepting a degradation Delta}) = \exp\left(-\frac{\text{Delta}}{GT_{\text{var}}}\right) \quad (33)$$

Seguindo o teorema de Souza de Corsi e Sampaio (2012) que afirmam que se $\{U_i\}$ é uma sequência de variáveis randômicas (aleatórias) respeitando

$$U_{n+1} \leq U_n, \text{ com } n \geq 0, \text{ e} \quad (34)$$

$$U_n > m, \quad (35)$$

Tal que:

$$\text{Prob}(U_{n+1} > U_n) \leq \vartheta_n \quad \text{com} \quad \sum_{n=0}^{+\infty} \vartheta_n < \infty, \quad (38)$$

A sequência convergirá para:

$$U_n \rightarrow m. \quad (37)$$

Com a diminuição do valor de GT_{var} , a probabilidade de se aceitar um delta de degradação (β), dado por (33), satisfaz as condições de (34), (35) e (36), que conduz à convergência do método de Metropolis- Hastings (SOUZA CURSI e SAMPAIO, 2012). No geral, tal teorema possibilita uma condição suficiente, mas não necessária, porém na prática o método de Metropolis- Hastings tem mostrado ser eficaz para resolver um grande número de problemas.

Com relação ao problema específico aqui estudado a temperatura no interior do veículo tende a aumentar durante a fase de entrega de mercadoria e diminuir no deslocamento tanto para o próximo cliente como na saída e na volta do depósito. Entretanto, uma vez que os tempos de entrega de mercadoria (Etapa 2 do processo de transporte) são assumidos invariável nesta análise, o impacto do tempo nesta fase é assumido como nulo. O mesmo acontece com a saída e a volta ao depósito (Etapa Linha de curso I e II), que também apresentam um comportamento fixo nesta análise. Portanto, o único grau de liberdade para o programa tentar buscar uma sequência ideal ocorre quando o veículo está no deslocamento entre clientes (Etapa 3).

Uma vez que a massa m do produto dentro do veículo diminui no decorrer das entregas o valor da expressão $\exp\left[\beta \frac{(T_j - T_{j-1})}{m_j}\right]$ tende a diminuir a cada passo de SA. A probabilidade de se aceitar um delta de degradação (β) que satisfaz as condições de (34), (35) e (36) tende a diminuir rapidamente neste problema.

Aplicando o procedimento descrito no *Apêndice 3* para o problema de roteirização obteve os TTIs estimados e os valores de C_{pk} , Distancia total e nova sequencia para o problema dinâmico.

Depósito – 8 - 10 – 7 – 4 – 3 – 1 – 6 – 12 – 5 – 11 – 9 – 2 – Depósito

Simulando uma distancia total de 241,0 quilometros, cerca de 18% maior que a sequência proposta PCV. Por outro lado o indice de C_{pk} foi satisfatório com o valor de 1,57.

Conforme mencionado na revisão da literatura o procedimento de S.A faz uma segunda busca por vizinhos mais próximos, atingindo uma solução otimizada frente à primeira. Portanto, o segundo estágio, que envolve mais passos para encontrar a solução ótima, sugere a sequência:

Depósito – 8 - 7 – 4 – 6 – 9 – 10 – 11 – 3 – 12 – 5 – 2 – 1 – Depósito

Na qual apresenta uma distancia total do roteiro de 222.7 quiloometros e um C_{pk} satisfatório de 1.33. Este roteiro otimizado pelo S.A. é aproximadamente 9% mais extenso do que o roteiro PCV e encontra-se dentro das especificações térmicas pré-definidas. A evolução do comportamento do índice C_{pk} desta nova sequência para cada cliente visitado é apresentado na Figura 39. A figura mostra que todos os pontos deste indice estão dentro do padrão estipulado para cumprimento da temperatura limite. Estes indices foram coletados logo após o término da atividade de entrega de mercadoria no respectivo cliente.

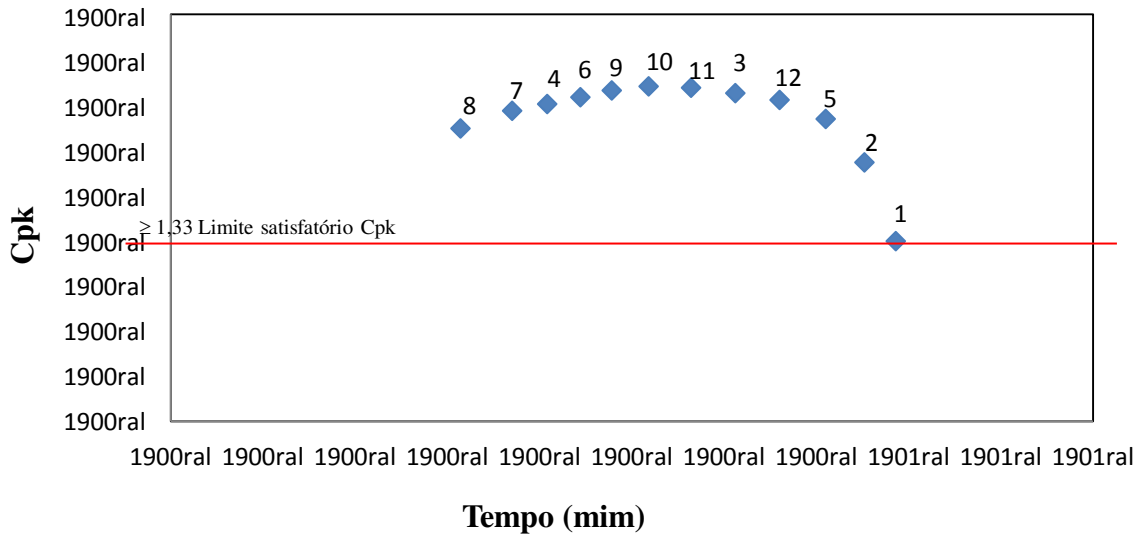


Figura 39: Comportamento Cpk sequencia dinâmica do S.A.

Com base no comportamento térmico ao longo do veículo é possível entender, observando os valores de TTIs estimados ao longo do percurso e também dos C_{pk} , que são nos tempos referentes à atividade de entrega de mercadoria onde ocorrem as maiores variações da temperatura e C_{pk} . É nesta etapa que se necessita maior atenção e também proposições de ações que melhorem o cenário. Por isso, é importante que a cada término da atividade de entrega de mercadoria seja realizada uma revisão dinâmica do processo. Esta revisão dinâmica do processo pode identificar situações eventuais que ocorreram no processo e que causaram um índice insatisfatório de C_{pk} , prejudicando as características térmicas do processo.

Frente os cenários dinâmicos apresentados e os roteiros sugeridos foi elaborado um mapa com os roteiros e seus respectivos valores de distância e C_{pk} . Estas situações aqui abordadas foram comparadas com o roteiro inicial obtido pelo PCV. Estas estão apresentadas na Figura 40.

A figura mostra que em qualquer das situações de roteiros obtidos através de alguma melhoria geraram sequências com algum acréscimo da distância, porém estes apresentaram índices satisfatórios de C_{pk} . Também foi possível visualizar que apesar de não serem roteiros intuitivos frente alguns zigzags sugeridos, um pequeno acréscimo na distância percorrida gerará índices térmicos satisfatórios. Nas situações dinâmicas que se referem ao atraso na entrega da mercadoria no cliente 8 observa-se que o roteiro (c), onde o veículo esperou estacionado 5 minutos para que

a temperatura interna do veículo fosse recuperada pelo sistema de refrigeração, obteve uma menor distância no trajeto e índice satisfatório. Já na proposição da melhoria (b) observa-se que ao recalcular e replanejar a rota a distância total trouxe um acréscimo de 17% em relação ao roteiro do PCV, um pouco maior que o roteiro onde foi sugerida a espera de 5 minutos para recuperação da temperatura interna.

Ja a melhoria proposta do roteiro (d) mostra que até as três primeiras entregas (cliente 1, 7 e 8) o índice térmico é cumprido, contudo nas seguintes rotas não será respeitado. Deste modo, o autor sugere que o veículo retorne ao centro de distribuição (caminho sugerido pelo tracejado verde) para pegar o restante das mercadorias e, assim, termine as entregas nos clientes restantes. Ou que ao terminar a entrega no cliente 8 este veículo encontre um novo veículo, com condições térmicas satisfatório, faça a transferência da mercadoria para o novo veículo e cumpra as sequência de entregas remanescentes (sugerido pelo caminho tracejado vermelho com o novo veículo). O último roteiro, melhoria (e) apresenta um melhoramento feito pelo S.A onde foi obtida a melhor distância total para o trajeto, de 222,7 km. Esta distância mostrou um acréscimo de 9% comparando com o roteiro do PCV e ainda um índice C_{pk} satisfatório.

Este mapa apresenta algumas situações que podem ocorrer em uma situação real, porém este processo na prática pode estar sujeito a muitas mudanças. Para os casos aqui apresentados e para casos reais de empresas que realizam este tipo de serviço é necessário um computador de bordo que mostre como se encontra o cenário para que sejam feitas sugestões de melhorias para adequar o ambiente refrigerado e ao mesmo tempo não aumentar substancialmente a distância total percorrida no roteiro.

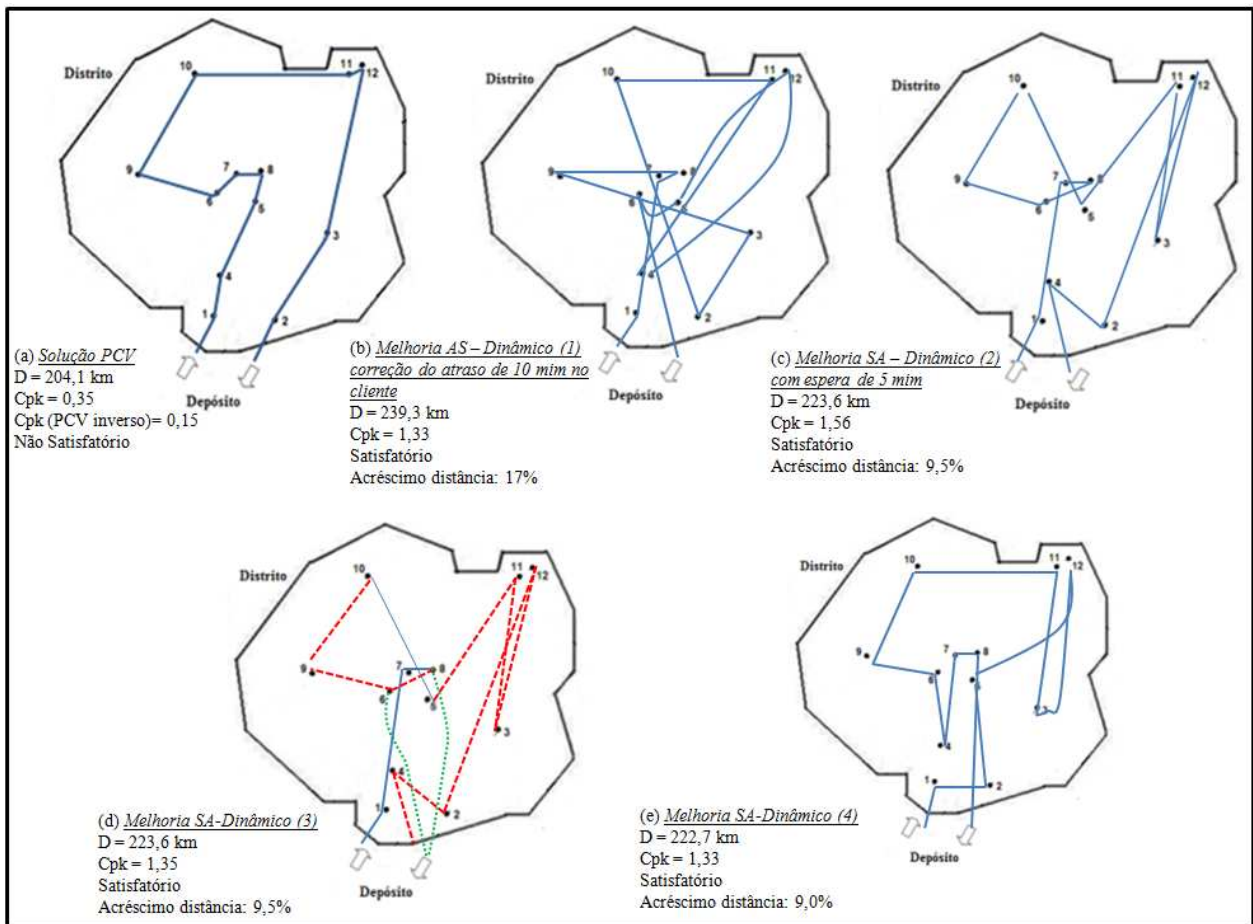


Figura 40: Mapa dos roteiros estáticos otimizados comparando-os com o PCV

Após obter um roteiro ótimo para uma situação dinâmica, melhoria (e) foi realizada observando-se as variabilidades das condições térmicas do processo de distribuição frente os tempos considerados. Para isso, foi adotada como variável básica o coeficiente de variação dos tempos da entrega, visto que esses tempos estão sujeitos a variações expressivas. O coeficiente de variação CV é a razão entre o desvio padrão e a média da distribuição probabilística, portanto a cada cliente será apresentado um comportamento de CV . Entretanto, com o objetivo de se obter uma análise geral esta variável básica foi considerada constante para todos os clientes. Em uma situação real de distribuição de mercadoria esta análise poderia ser realizada com maior fidelidade, adotando-se para isso dado estatístico mais específico.

Adotou-se a Log-Normal como distribuição probabilística dos tempos de entrega das mercadorias nos respectivos estabelecimentos varejistas ao longo da rota. Larsen (2001) explica as razões da

adoção da Log-Normal para análises deste tipo de problema. O autor afirma que a função densidade de probabilidade de uma distribuição Log-Normal, de uma variável aleatória x , pode ser obtida através de:

$$f(x) = \frac{1}{x b \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln x - a)^2}{2b^2} \right], \quad x > 0, \quad (38)$$

onde a é o parâmetro de localização e b é o parâmetro de escala, ou seja:

$$a = \ln(E[x]) - (1/2) b^2 \quad \text{e} \quad b^2 = \ln\{1 + \text{var}[x]/(E[x]^2)\}, \quad (39)$$

sendo $E[x]$ o valor esperado de x e $\text{var}[x]$ sua variância.

Nos quadros 15 a 23, do Apêndice 4, são apresentados os resultados de 9 simulações relativas a valores de CV variando de zero (configuração determinística básica) até 0,60. Nestes quadros a primeira coluna indica o estágio do processo, correspondentes aos 12 clientes do problema. A segunda coluna fornece o valor mínimo de C_{pk} gerado na simulação. Em seguida são apresentados os valores médios de C_{pk} e, posteriormente, os valores máximos observados. Na última coluna são apresentadas as probabilidades (ou frequências) da ocorrência de $C_{pk} \leq 1,33$ para cada situação. Essas simulações são realizadas através do programa *cold_13.pas*, em Pascal. No Quadro 14, sistetiza estas nove simulações e apresenta os valores da probabilidade de ocorrência de $C_{pk} < 1.33$ variando do estagio de zero a 0,60.

Este quadro possibilita observar que a ocorrência de $C_{pk} < 1.33$ é bastante sensível ao valor de CV . Por exemplo, se $CV = 0,20$, seria recomendável ao operador logístico fazer apenas 7 ou 8 entregas com o veículo. Sugerindo a possibilidade de realocação dessas cargas em outros veículos para a continuação do roteiro. Porém a melhor solução seria refazer a análise do problema considerando a composição de dois ou mais roteiros diferentes e agrupando os clientes a serem servidos de forma a buscar a melhor composição. Por exemplo, um caminho interessante seria a metodologia apresentada por Oswald e Stirm (2008), onde o veículo realizaria rotas mais

curtas, retorna ao depósito para mais um carregamento do produto, e finalmente sai para finalizar as entregas.

Estágio	Coeficiente de variação CV								
	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,005	0,005
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,025	0,035
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,005	0,040	0,055	0,065
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,035	0,085	0,115	0,155
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,040	0,150	0,200	0,265
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,025	0,090	0,220	0,260	0,380
9	0,00	0,00	0,00	0,005	0,045	0,160	0,300	0,380	0,490
10	0,00	0,00	0,00	0,030	0,095	0,275	0,365	0,455	0,555
11	0,00	0,00	0,025	0,120	0,160	0,390	0,430	0,535	0,635
12	0,00	0,430	0,440	0,495	0,550	0,610	0,635	0,725	0,775

Quadro 14: Probabilidade de ocorrência de $C_{pk} < 1.33$ para os 12 estágios em função do coeficiente de variação

Outros avanços que poderiam ocorrer para melhorar este cenário seria o treinamento dos trabalhadores que atuam diretamente na área realizando a entrega da mercadoria. Além disso, a melhora do processo é de grande importância. Atualmente já existem sistemas interligados com os veículos que ajudam no processo e programação da recepção da mercadoria no varejista. Isso melhoraria os tempos das entregas, melhorando conseqüentemente o desempenho térmico do processo.

5.5. Avaliação da Metodologia Aplicada a Casos Reais

Para que a metodologia desenvolvida neste trabalho seja aplicada é necessário o uso de algumas ferramentas que mostrem, em tempo real, todos os parâmetros envolvidos no problema de distribuição como: o comportamento da temperatura no interior do veículo e no ambiente externo no decorrer do roteiro; a localidade do veículo ao longo do percurso e as coordenadas dos pontos

de clientes a serem atendidos; a quantidade de massa da mercadoria embarcada; e o tempo decorrido de cada etapa do processo de transporte. Além disso, é necessário um computador de bordo que consiga armazenar estas informações e faça o cálculo necessário de distância total e do índice C_{pk} em cada etapa do processo de transporte. Com estas informações, em tempo real, é possível tomar uma decisão de qual a melhor sequência de roteiro para que as restrições de temperatura e distância sejam atendidas.

Alguns casos reais de empresas privadas e governamentais que realizam este tipo de serviço, para alimentos refrigerados e congelados, mostram a carência de tecnologias que possibilitem a visualização do que acontece neste processo. Além disso, frisam a necessidade de um sistema de monitoramento eficiente da carga que integre informações específicas ao longo da cadeia do frio. A integração de novas tecnologias, métodos de controle de distribuição de mercadorias e roteirização de veículos se tornaram mais urgente e cada vez mais utilizado neste tipo de cenário.

No cenário brasileiro a Associação Brasileira de Norma Técnicas (ABNT) recomenda que no processo de transporte de cargas refrigeradas e congeladas sejam registradas as temperaturas durante o transporte, além de ser obrigatório o processo de rastreabilidade. Porém não é o que se observa. Algumas tecnologias estão sendo inseridas neste contexto com o objetivo de monitoramento, como é o caso do uso dos integradores de tempo e temperatura - *TTI* - por radiofrequência passiva na forma de etiquetas adesivas, os chamados RFIDs, além do GPS.

O RFID (*Radio Frequency Identification*) foi desenvolvido com o objetivo de auxiliar e monitorar as cargas transportadas. Ele é uma tecnologia que permite receber informações, armazenar e disponibilizar dados através de um micro chip baseados em identificação de ondas eletromagnéticas. Esta tecnologia é considerada apropriada para o emprego em mercadorias que utilizam o frio como forma de conservação, pois são resistentes à temperatura baixas, capazes de armazenar uma quantidade de dados muito superior ao código de barras e têm um longo alcance (D'Hont e Frieden, 2000; Dejong, 1998; Gould, 2000; (RIZZOTTO e WOLFRAM, 2002; FORCINIO e WRIGHT, 2005; SILVA, 2010; WHITE, 2007). Todavia, o sistema de etiqueta RFID permite a obtenção dos dados de temperatura em tempo real, proporcionando uma visibilidade da rede de distribuição e, conseqüentemente, possibilitando ações de melhorias para

o processo. Estes sistemas são essenciais para a aplicação da metodologia desenvolvida, pois, fornecem os dados de tempo e temperatura ao longo do roteiro.

Por outro lado estes sistemas devem ter bom desempenho para que os dados fornecidos para a construção do cenário de distribuição seja fiel ao real. Um trabalho que traz uma avaliação de alguns sistemas de monitoramento de distribuição de produtos alimentícios refrigerados e congelado é o trabalho de Garcia, (2008). Ele avalia seis diferentes sistemas, explorando o potencial da informação e da tecnologia da informação como: *RFID loggers (A1)*; *ZigBee* com sistema *wireless (A2)*; *ZigBee* com uma rede de sensores ligados em *wireless (A3)*; sistema *CANbus* para monitoramento do transporte de frutas (*A4*) e *LVF-IR* com sensor específico para voláteis (*A5*). Eles detectam algumas dificuldades que os sistemas encontram para realizar o registro das informações, além de mostrarem que em alguns casos o alcance do sistema não é suficiente. Por isso, estas combinações e configurações de sistemas de informações devem ser melhor estudados, com o objetivo de se obter um modelo de bom desempenho que forneça informações fidedignas para serem utilizadas na metodologia proposta neste trabalho.

Além da necessidade da tecnologia ligada à comunicação para o fornecimento de dados em tempo real é necessário recursos humanos devidamente preparados, ou seja, é necessário o treinamento de usuário destes sistemas para operá-los. Segundo Neves (2010) a maior dificuldade refere-se à cultura ou formação dos envolvidos neste tipo de cadeia que envolve a manutenção da temperatura. Os usuários precisam entender a necessidade da temperatura ao longo da cadeia para que consigam realizar os procedimentos envolvidos no processo de transporte sem haver a quebra do frio. Este tipo de investimento ajuda a minimizar as perdas e no caso do cenário avaliado reduz a variação da temperatura no processo de entrega de mercadoria. Não só o usuário do sistema é importante, todos os atores envolvidos na cadeia devem se organizar e compreender a importância do controle da temperatura como, por exemplo, os varejistas. Esta conscientização dos atores envolvidos no processo de distribuição de mercadoria refrigerada e congelada ajuda melhorar a eficiência do processo e, conseqüentemente, minimizam o gradiente térmico adquirido a cada abertura de porta para a entrega. Além disso, reduzem os atrasos que podem ocorrer no roteiro por esperas excessivas nas plataformas até que o varejista autorize o embarque.

Quanto à regulamentação brasileira se desenvolveu depois que as normas internacionais surgiram. O Instituto Brasileiro de Frio (IBF), a Associação Brasileira de Refrigeração, ar condicionado, ventilação e aquecimento (ABRAVA) e Associação Nacional dos Fabricantes de Implementos Rodoviários (ANFIR) financiadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) elaboraram uma norma, ABNT NBR 15457 -Carrocerias Termicamente Isoladas – Desempenho Térmico-, que hoje fiscaliza este tipo de serviço no território brasileiro. Esta norma especifica os requisitos de desempenho térmico para carrocerias termicamente isoladas com ou sem aparelho de refrigeração. Outra norma brasileira é a NBR 14701, também editada pela ABNT, que fornece especificações nos diversos processos que compõem a cadeia do frio como, por exemplo, estocagem, transporte, equipamentos de refrigeração. Além disso, ela fornece as temperaturas limites específicas para cada tipo de alimento como congelados, resfriados, climatizado, etc.

Um órgão bastante conhecido no Brasil é a ANVISA. Este tem o papel fiscalizador, porém é sabido que isto não ocorre assiduamente e com eficácia, resultando em um cenário de elevados danos e perdas deste tipo de mercadoria. É possível observar que o cenário brasileiro de distribuição e transporte da carga refrigerada e congelada apresenta grande variação da temperatura, variável determinante da qualidade, sanidade e integridade da carga transportada. Frente aos estudos realizados nos capítulos anteriores é possível observar como ocorrem as variações, principalmente o trabalho de Pereira, *et al* (2010) que retratam claramente esta situação brasileira e mostram a necessidade de melhoria no processo de distribuição e transporte. Para a metodologia desenvolvida neste trabalho a fiscalização auxiliaria na qualidade inicial da carga que chega ao processo de transporte. Quanto melhor a qualidade da carga menor chances de sofrer danos durante o processo de distribuição.

Um dos grandes problemas enfrentados para a distribuição deste tipo de carga é o meio urbano. Para que a mercadoria chegue ao cliente final é necessário vencer barreiras como congestionamentos, restrições de imposta segundo o poder público como restrições de rotas, de tamanho de caminhão, horários de circulação de veículos, entre outros. Por isso, o ganho com o desenvolvimento desta metodologia é auxiliar na decisão de cenários cada vez mais complexos, como os centros urbanos. Nos centros urbanos, as distâncias entre clientes são pequenas e não

ajudam o sistema de refrigeração a recuperar a temperatura ideal para o transporte, ou seja, não ha tempo suficiente para o sistema resfriar o veículo até a temperatura limite. Todavia, a metodologia aqui desenvolvida contribui para a prática logística dando elementos para empresas transportadoras aprimorem o planejamento de roteiros de distribuição incorporando as restrições de manutenção da temperatura dentro de limites aceitáveis.

6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A questão de pesquisa levantada no início deste trabalho foi: como melhorar o desempenho térmico do transporte de mercadorias refrigeradas e congeladas no sentido de preservar a qualidade do produto? A resposta à questão de pesquisa, com base no escopo adotado, é através da realização de melhorias de roteiros que busquem percorrer distâncias ótimas, ou seja, distância entre clientes que geram tempo suficiente para que o sistema de refrigeração consiga recuperar a temperatura ideal, perdida com a abertura de porta pela entrega da mercadoria. Esta busca sensata, por uma distância ótima, conseguirá assegurar a temperatura ideal da carga durante todo o roteiro de entrega, garantindo a qualidade da mercadoria transportada e evitando roteiros longos e dispendiosos.

O objetivo geral do trabalho, de propor uma metodologia para roteirização de veículo para o transporte de carga refrigerada e congelada combinando a otimização térmica com a eficiência logística, foi alcançado. A metodologia foi estruturada em quatro passos: definição do cenário de distribuição; simulação do comportamento térmico do veículo ao longo do roteiro; elaboração das funções matemáticas que exprimam o comportamento térmico do veículo em função do tempo; e elaboração do algoritmo de roteirização combinando a otimização térmica e logística. A aplicação desta metodologia ao cenário hipotético possibilitou, através de um programa computacional, estimar os níveis de temperatura, passo a passo, durante o roteiro de distribuição proposto. Com esta estimativa foi possível realizar os cálculos dos índices térmicos e entender se o roteiro analisado poderia garantir estes índices ou não ao longo do tempo. Diferentes sequências de entregas foram testadas com o objetivo de alcançar um roteiro ótimo para o problema.

Os objetivos específicos também foram atendidos. Primeiramente, foi elaborado o panorama do problema da distribuição de alimentos refrigerados e congelados. Este panorama mostrou que ao longo da cadeia do frio existem vários processos e atividades que não são capazes de assegurar a temperatura ideal à mercadoria, acarretando danos e perdas a elas. Apesar deste fato ser causado por diversos pontos críticos encontrados nas diferentes atividades integrantes desta cadeia, é na atividade de transporte que são observados estes maiores índices.

O segundo objetivo específico, de avaliar o comportamento da temperatura no interior do veículo durante o transporte em um roteiro de entrega obtido através do modelo convencional de roteirização PCV (problema do caixeiro viajante), foi alcançado. Observou-se, através do cenário fornecido pela simulação deste roteiro, que roteiros que visam minimizar distância não conseguem manter o índice térmico necessário para assegurar a qualidade da mercadoria transportada. Isso ocorre devido às pequenas distâncias entre os clientes que não proporcionam tempo suficiente para que o sistema de refrigeração consiga recuperar a temperatura ideal, alterada devido à abertura de porta na entrega da mercadoria.

O terceiro objetivo, de elaborar funções matemáticas que exprimem o comportamento da temperatura em função do tempo ao longo de um roteiro de entrega, também foi atingido. Estas foram elaboradas para cada etapa que compõem o processo de transporte (saída do depósito, entrega da mercadoria, deslocamento entre clientes e retorno ao depósito).

O quarto objetivo específico também foi alcançado. Foi elaborado o algoritmo para roteirização de veículo conjugando a otimização térmica a atributos logísticos. Utilizaram-se as funções matemáticas de comportamento, além de serem integrados ao algoritmo os cálculos dos índices térmicos. A aplicação do algoritmo, em programa pascal, possibilitou a indicação de roteiro de sequência otimizada em uma situação dinâmica. Neste roteiro foi respeitado o limite térmico ao longo do percurso e não foi elevando drasticamente a distância total percorrida em relação ao roteiro do PCV. Comparando este cenário com o modelo convencional do caixeiro viajante tem-se que ele atende as especificações térmicas e gera um aumento de 9% de distância no roteiro, sugerindo um sequenciamento de pontos alternativos.

O último objetivo específico, a avaliação da aplicação da metodologia para casos reais, foi alcançado. A partir do entendimento dos limites e ganhos da metodologia constatou-se que, de forma econômica, se consegue estimar os dados das temperaturas ao longo do roteiro e, deste modo, avaliar se o roteiro será satisfatório ou não quanto aos parâmetros avaliados. Além disso, em casos dinâmicos se o programa for adaptado a um veículo de entrega ou a uma central de informações permitirá que o cenário seja avaliado, em tempo real, e se a continuação do roteiro não mostrar um cenário termicamente satisfatório, o programa poderá propor uma nova sequência satisfatória. Se a sequência ainda for satisfatória, o motorista prosseguirá com segurança no roteiro pré-programado. De forma geral, a metodologia desenvolvida fornece um modelo para roteirização de veículo que auxilia a decisão de rotas avaliando o comportamento térmico e, ao mesmo tempo, minimizando a distância total do roteiro. Na prática, a metodologia auxiliará empresas que fazem o transporte de mercadorias refrigeradas e congeladas a realizarem esta atividade com um melhor nível de serviço e, conseqüentemente, melhorando o cenário atual de perdas e danos no processo de transporte.

Uma recomendação para a aplicação desta metodologia em tempo real, para empresas transportadoras, é a utilização de um sistema de localização para o veículo que forneça as coordenadas de onde o mesmo se encontra, dos pontos dos clientes a serem atendidos e do depósito. Este sistema deve ser integrado a alguma tecnologia que monitore e armazene, em tempo real, as temperaturas praticadas no ambiente interno e externo do veículo ao longo do trajeto. Atualmente existem tecnologias embarcadas no veículo que monitoram localização de veículo em tempo real, aberturas de portas, paradas, tempo de percurso, velocidade média do veículo, etc. Também para o programa ser aplicado com eficiência é necessário o treinamento dos motoristas com a finalidade de entender as coordenadas e continuar o roteiro que o sistema fornecerá. Para ser ainda mais eficiente a conscientização dos atores envolvidos no processo e a criação de um sistema integrado que forneça, em tempo real, a localização e o programa das chegadas e partidas do veículo é necessário. Isto auxiliará os varejistas a se planejarem para a atividade de entrega ser o mais breve possível, reduzindo o tempo de espera na plataforma para o desembarque e o tempo de abertura de porta na retirada da mercadoria. Este compartilhamento da informação na cadeia entre os atores minimizaria os recálculos dos roteiros. Neste trabalho, as

temperaturas analisadas foram às temperaturas adquiridas no interior do veículo. Sabe-se que esta temperatura varia de uma forma muito mais rápida que a temperatura do alimento, tanto para positivo (diminuição da temperatura) quando para o negativo (aumento da temperatura na abertura de porta). Isto ocorre em função da embalagem utilizada, da capacidade calorífica do alimento, de sua densidade, entre outros fatores. Por isso, deveria ser entendido como este fato reflete na qualidade do produto ou não e qual a diferença ao considerar a temperatura do alimento ao invés de considerar a temperatura do veículo.

As sugestões para pesquisas futuras podem evoluir em três frentes diferentes: alternativas de implementação da metodologia; inclusão da variável custo no modelo de roteirização; e simulação do roteiro ótimo para comparação dos resultados de TTI adquiridos através do algoritmo.

Outras alternativas de implementação podem ser sugeridas para cada passo da metodologia. No primeiro passo, cenários alternativos podem ser indicados podendo variar parâmetros conforme o que se deseja avaliar, como por exemplo:

- ✓ Tamanho do distrito;
- ✓ Mudança do produto embarcado (como outros produtos alimentícios ou outro tipo de produtos refrigerado e congelados como produtos fármacos, eletroeletrônico, etc.);
- ✓ Uso de outro tipo de equipamento de refrigeração (variando a potência e tipo de gás utilizado para a refrigeração);
- ✓ Tamanho e número de veículos utilizados para o transporte das mercadorias no roteiro;
- ✓ Número diferente de cliente a ser atendido e quantidade diferente a ser entregue;
- ✓ Mudança da temperatura relativa ao ambiente externo (podendo ser maior ou menor a analisada e podendo apresentar maior variabilidade ao longo do dia).

Já no passo dois o objetivo foi obter os dados de TTI ao longo do percurso. O trabalho utilizou o programa CoolVan para isto. Outras formas alternativas são: utilizar outro simulador; ou realizar a simulação do cenário em laboratório (como é o caso do trabalho de James, et al 2006); ou adquirir os dados a partir de uma situação real. Claro que a simulação ferramental, através de um simulador, é mais econômica, sendo uma melhor opção para obtenção dos dados. Já sugestões

alternativas para o passo três, elaboração das funções de comportamento, podem ocorrer a partir da inclusão de novas variáveis, como a temperatura do alimento ou uma variável de perda de qualidade do produto específica a mercadoria analisada. Outra alteração pode ocorrer nos modelos aqui propostos, foram sugeridas as análises de roteiros obtidos através do modelo PCV (problema do caixeiro viajante) e do SA (*simulated annealing*) onde foram consideradas algumas premissas. Outros métodos podem ser testados.

Com relação a segunda frente de pesquisa, a inclusão da variável custo, pode ser de grande importância, pois possibilitará entender se o aumento da distância total do roteiro, sugerido para assegurar as temperaturas ideais ao longo do percurso, é compensado pela diminuição dos custos originados pelas perdas e danos às mercadorias ou não. Nesta linha de pesquisa é necessário entender qual o valor da mercadoria embarcada no veículo e qual a sua diminuição ao longo do percurso quando a temperatura ideal é violada. É sabido que transportadores e empresas que oferecem este tipo de serviço trabalham com a possibilidade de violação da temperatura. Se este fato ocorrer, os clientes podem aceitar ou rejeitar a mercadoria ao chegar a sua plataforma. Se a mercadoria for rejeitada pode ser reemcaminhada a sua origem na qual poderá ser remanufaturada, originando outro tipo de produto, que poderá ser vendido a um valor mais baixo. Outra possibilidade é imediatamente vendê-la, a um valor menor, para outro tipo de cliente que irá processá-la originando outro produto. No caso da carne quando há rejeição do lote uma alternativa é vendê-la para uma empresa produtora de charque ou graxaria, no qual o valor do produto é considerado muito menor. A vantagem deste caso é que não se tem a perda completa da mercadoria, esta pode ser redirecionada e originar alguma renda. Dependendo do tipo de produto talvez isso não seja possível, como é o caso de medicamentos.

Uma última frente de pesquisa sugerida para estudos futuros é realizar a simulação do roteiro ótimo no programa CoolVan, com o objetivo de comparar os valores de TTI obtidos pelo algoritmo e os valores obtidos pela simulação no programa. Também seria interessante, obter estes dados na prática através de uma empresa transportadora deste tipo de mercadoria e compará-la aos dados estimados pelo algoritmo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aarts, E. H. L. (1989) Boltzmann machines for the travelling salesman problems, *European Journal of Operational Research*, V. 39 (1): 79-95.

ABIAF, Associação Brasileira da Indústria de Armazenagem Frigorificada. Apostila técnica: alimentos congelados e resfriados, 2008. Disponível em: < [http://www.abiaf.org.br/?abiaf=\[artigos\]](http://www.abiaf.org.br/?abiaf=[artigos])>. Acesso em: 16/10/2012.

ABNT (2001) – *Transporte de Produtos Alimentícios Refrigerados – Procedimentos e Critérios de Temperatura*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 14701, São Paulo, SP.

ABNT (2007) – *Carrocerias Termicamente Isoladas – Desempenho Térmico*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 15457, São Paulo, SP.

Adhikari, A. M. (2012) Provisions for Cold Chain Industry in India. *Business*
Amendola, M., Souza, A. L., e Barros, L. C. (2005). Manual do uso da teoria dos conjuntos fuzzy no matlab 6.5. Versão 2005 do manual apresentado no Ciclo de Palestras/2004, realizado na FEAGRI/UNICAMP. Disponível em: <http://www.ime.unicamp.br/biomat/revistas.htm>, Acesso em 120/Mai/2013.

ANVISA, Agência Nacional de Vigilância Sanitária. (2004) Cartilha sobre Boas Práticas para Serviços de Alimentação – Resolução -RDC nº 216/2004. 3. ed. Cap. 5. BRASÍLIA.

Aragon, C.R.; Johnson, D.S.; McGeoch, L.A.; Schevon, C. (1984) Optimization by simulated annealing: an experimental evaluation; Workshop on Statistical Physics in Engineering and Biology, 1984.

Ashby, B.H. (1995) *Protecting Perishable Foods During Transport by Truck*. Agricultural Marketing Service, Handbook nº 669, USDA, Washington, DC, USA.

Ashrae (1994) ASHRAE Handbook: Refrigeration – Systems and Applications, (SI Edition). American Society of Heating, Refrigerating and Air - Conditioning Engineers.

ATP (1970) Agreement on the international carriage of perishable foodstuffs and on the special equipment to be used for such carriage (ATP). Geneva,

Badurina, G., Majic, Z. e Pavlin, S. (2011) Evaluation of Air Transportation Under Controlled Room Temperature for Pharmaceuticals. *Traffic & Transportation*, v. 23, Nº 2, 121-130.

Baptista, P. (2006) Higiene E Segurança No Transporte De Produtos Alimentares. Guimarães: Forvisão - Consultadoria Em Formação Integrada, S.A.

Baptista, V. (2005) Controle preciso, monitoramento em tempo real. *Revista ABRAVA*, edição 226, p.48-50.

Bennahmias, R. (1990) Transport de fruits et légumes frais à température dirigée. *Revue Internationale du Froid*, vol. 13.

Berbeglia G. *et al.*, “Dynamic pickup and delivery problems” *European Journal of Operational Research*, Volume 202, Issue 1, Pages 8-15, 2010.

- Billiard, F. (2003) *New Developments in the Cold Chain: Specific Issues in Warm Countries*. EcoLibrium. In: Indoor air quality conference, Sydney, Australia, 21, pp. 1-5.
- Blum, C. e Roli, A. (2003) Metaheuristics in combinatorial optimization overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys*, v. 35, n. 3, p. 268-308.
- Blum, C.; Roli (2008) Hybrid metaheuristics: an introduction. In: BLUM, C.; Aguilera, M.J. B.; Roli, A.; Sampels, M. (Ed.). *Hybrid metaheuristics: studies in computational intelligence*. Berlin/Heidelberg: Springer, p. 1.
- Bodin, L.D., Golden, B.L., Assad, A.A., e Ball, M.O. (1983) Routing and scheduling of vehicles and crews. The state of the art , *Computers and Operations Research* 10, 69-211.
- Bogataj, Marija.; Bogataj, Ludvik. e Vodopivec, Robert (2005) Stability of Perishable Goods in Cold Logistics Chains. *International Journal of Production Economics*, 93-94, pp.345-356, 2005.
- Campañone, L.A., Giner, S.A. and R.H. Mascheroni (2002) Generalized model for the simulation of food refrigeration: Development and validation of the predictive numerical method. *International Journal of Refrigeration*, 25, 975-984.
- Chang YS, Bai, DS (2001) Control charts for positively-skewed populations with weighted standard deviations. *Quality and Reliability Engineering Int.* 17: 397-406.
- Chang YS, Choi IS, Bai DS (2002) Process capability indices for skewed populations. *Quality and Reliability Engineering Int.* 18: 383-393.
- Chang, R. (1981) *Physical Chemistry With Applications to Biological Systems*. Macmillan Publishing Co., New York.
- Chang, Y.S. and D.S. Bai (2001). Control charts for positively-skewed populations with weighted standard deviations. *Quality and Reliability Engineering Int.*, V. 17, 397-406.
- Chang, Y.S., I.S. Choi and D.S. Bai (2002). Process capability indices for skewed populations. *Quality and Reliability Engineering Int.*, V. 18, 383-393.
- CHAVES, A. A (2009) Uma Meta-Heurística Híbrida com Busca por Agrupamentos Aplicada a Problemas de Otimização Combinatória. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - IMPE. [S.l.].
- Christofides, N. (1985) "Vehicle routing", in: E.L. Lawler, J.K. Lenstra, A.H.G. Rinnooy Kan and D.B. Shmoys, (eds.). *The Traveling Salesman Problem. A Guided Tour of Combinatorial Optimization*, Wiley, Chichester, 431-448.
- CoolVan Manual – Version 3.0 (2000). Food Refrigeration & Process Engineering Research Centre (FRPERC), University of Bristol, UK.
- Cordenonsi, A. Z. *Ambientes, Objetos e Dialogicidade: Uma Estratégia de Ensino Superior em Heurísticas e Metaheurísticas*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2008
- Coulomb, D. (2008) Refrigeration and the cold chain serving the global food industry and creating a better future: Two key IIR challenges for improving health and environment. *Trends in Food Science & Technology*, 19, 413–417.

Coyle, W.; Hall, W. e Ballenger, N. (2001). Transportation technology and the rising share of U.S. perishable food trade. In: U.S. Department of Agriculture. *Changing Structure of Global Food Consumption and Trade*. Agriculture and Trade Report WRS- 01. Washington, USA. D'hont, S. e Frieden, D. (2000) *Radio Frequency ID – the digital link to improved logistics management*. Em: *Council of Logistics Management Annual Conference, Council of Logistics Management*, New Orleans.

Cuesta, J.F., M. Lamúa and J. Moreno (1990) Graphical calculation of half-cooling times. *Int. J. Refrigeration*, Vol. 13, pp. 317-324.

Cunha, C. B. (2000) Aspectos práticos da aplicação de modelos de roteirização de veículos a problemas reais. *Transportes*, v. 8, n. 2, p. 51.

Cunha, Cláudio Barbieri, “Experimentos computacionais com heurísticas de melhorias para o problema do caixeiro viajante”, Trabalho apresentado no XVI Congresso da Anpet – Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes e publicado nos anais do evento. 2002.

Cunha, Cláudio Barbieri, “Uma contribuição para o para o problema de roteirização de veículos com restrições operacionais”. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1996.

Dejong, C. A. (1998) *Material Handling Turns In*. *Automotive Manufacturing & Production*, 110(7), pp. 66-69.

Desrochers, M., Lenstra, J.K., and Savelsbergh, M.W.P. (1990), "A classification scheme for vehicle routing and scheduling problems", *European Journal of Operational Research* 46, 322-332.

Estrada-Flores, S. e Eddy, A. (2006) Thermal Performance Indicators for Refrigerated Road Vehicles, *International Journal of Refrigeration*, v. 29, pp. 889-898.

Estrada-Flores, S. e Tanner, D. 2005. Temperature variability and prediction of food spoilage during urban delivery of food products. *ISHS Acta Horticulturae* 674: 63-69. III International Symposium on Applications of Modelling as an Innovative Technology in the Agri-Food Chain; MODEL-IT.

Estrada-Flores, S., Smale. N e Tanner, D.J. (2006) Temperature Regulations during the Transport of Perishables in Australia. *Food Science Australia*. IUFoST 2006 DOI: 10.1051/IUFoST:20060704

Favero, L. A. (2005) Curso de Mercados Agrícolas e Agroindustriais, CD-ROM UFRPE/PADR.

Flick, D., Hoang, H.M., Alvarez, G., Laguerre, O. (2012) Combined deterministic and stochastic approaches for modeling the evolution of food products along the cold chain. Part I: Methodology. *International Journal of Refrigeration* 35 (4), 915 e 926.

Fonseca, J. M., Njie, D. N. (2006) Addressing Food Losses due to Non-Compliance with Quality and Safety Requirements in Export Markets: the case of Fruits and Vegetables from the Latin America and the Caribbean Region. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, Rome, 00153 Italy

Forcinio, H. e Wright, C. (2005) “Cold Chain Concerns”. *Pharmaceutical Technology*, 29(4), pp.44-50.

Garcia, L.R. (2008). Development of Monitoring applications for refrigerated perishable goods transportation. PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, Spain.

- Garcia, L.R. (2008). *Development of Monitoring applications for refrigerated perishable goods transportation*. PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, Spain.
- Gaspar P.D., Pitarma R.A. (2003) Avaliação das condições de transporte e exposição de produtos alimentares perecíveis conservados em frio. Portugal. Associação da Restauração e Similares de Portugal.
- Ge, Y.T. and S.A.Tassou (2001) Simulation of the performance of single jet air curtains for vertical refrigerated display cabinets. *Applied Thermal Engineering*, 21, 201-219.
- Ge, Y.T. e Tassou, S.A. (2001) Simulation of the Performance of Single Jet Air Curtains for Vertical Refrigerated Display Cabinets, *Applied Thermal Engineering*, v. 21, pp. 201-219.
- Gehlhar, Mark e Coyle, William (2001) Global food consumption and impacts on trade patterns. In: U.S. Department of Agriculture. *Changing Structure of Global Food Consumption and Trade*. Agriculture and Trade Report WRS-01. Washington, USA.
- Giannakourou MC, Koutsoumanis K, Nychas GJ, Taoukis P.S (2001) "Development and assesment of intelligent shelf life decision system for quality optimization of food chill chain". *Journal of Food Protection*, 64 (7), pp. 1051-1057.
- Giannakourou MC, Koutsoumanis K, Nychas GJ, Taoukis P.S. (2005) Field Evaluation of the application of time temperature integrators for monitoring fish quality in the chill chain. *Int. J. Food Microbiology* 102: 323-336.
- Giannakourou MC, Taoukis PS (2003) Application of a TTI-based distribution management system for quality optimization of frozen vegetables at the consumer end. *Journal of Food Science* 68 (1): 201-209.
- Giannakourou, M.C., Koutsoumanis, K., Nychas, G.J.E. and P.S. Taoukis (2005) Field evaluation of the application of time temperature integrators for monitoring fish quality in the chill chain. *International Journal of Food Microbiology*, 102, 323-336.
- Gigiel AJ, James SJ, Evans JA (1998). Controlling temperature during distribution and retail. *Proceedings 3rd Karlsruhe Nutrition Symposium, Karlsruhe, Germany: 284-292.*
- Gigiel, A.J., S.J. James and J.A. Evans (1998). Controlling temperature during distribution and retail. *Proceedings 3rd Karlsruhe Nutrition Symposium: European Research towards Safer and Better Food, Karlsruhe, Germany, pp. 284-292.*
- Glover, F. (1986) Future paths for integer programming and links to arti_cial intelligence. *Computers and Operations Research*, v. 5, p. 553{549, 1986.
- GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. R. *Otimização Combinatória e Programação Linear*. Rio de Janeiro: Campus, 2000.
- Gonçalez PU, Werner L (2009) Comparison of process capability indices for non-normal distribution (in Portuguese). *Gestão e Produção* 16: 121-132.
- Gonçalez PU, Werner L (2009). Comparison of process capability indices for non-normal distribution (in Portuguese). *Gestão e Produção* 16: 121-132.

Gould, L.S. *What you need to know about RFID*. Automotive Manufacturing & Production, 112(2), pp.46-49, 2000.

Harvey, J. M. (1978). Reduction of losses in fresh market fruits and vegetables. *Ann. Rev. Phytopathol.*, n. 16, p. 321 v. 41.

Hastings W (1970). "Monte Carlo Sampling Methods Using Markov Chains and Their Applications." *Biometrika*, 57(1), 97-109.

Heap, R. D. (2006) Cold chain performance issues now and in the future. *IIR Bulletin*, n. 4, p. 1-11.

Heap, R.; Kierstan, M.; Ford, G. (1998) *Food transportation*. Londres: Blackie Academic & Professional.
Herrera, B. A. L. D. M. (2007) *Combinação de Enxame de Partículas com Inspiração Quântica e Método Lin-Kernighan-Helsgaun aplicado ao Problema do Caixeiro Viajante*. Pontifícia Universidade de Curitiba.

Hoang, M.H., D. Flick, E. Derens, G. Alvarez e O. Laguerre (2012a). Combined deterministic and stochastic approaches for modelling the evolution of food products along the cold chain. Part II: A case study. *Int. J. Refrigeration*, Vol.35, pp. 915-926.

Hoang, M.H., O. Laguerre, J. Moureth e D. Flick (2012b). Heat transfer modelling in a ventilated cavity loaded with food product: Application to a refrigerated vehicle. *J. of Food Engineering*, Vol. 113, pp. 389-398.

Hoffman, W. (2006). *Hot Market, Cool Freight*. Journal of Commerce.

International Institute of Refrigeration - IIR (1976) *Guide to refrigerated storage*. International Institute of Refrigeration. Paris: IIR, 188p.

International Institute of Refrigeration – IIR (2003) *Refrigerated Transport: Progress Achieved and Challenges to be Met*, IIR 16th Informatory Note on Refrigeration Technologies, Paris, France.

International Institute of Refrigeration – IIR (2004) *Temperature indicators and time-temperature integrators – 3rd informatory note on refrigeration and food*. International Institute of Refrigeration. Paris: IIR, 3p.

International Institute of Refrigeration – IIR. (1986) *Recommendations for the processing and handling of frozen foods*. Paris. 418 p.

Irving A.R. e Sharp, A.K. (1976) *Measurement of air circulation in a refrigerated ISO container*. *Refig. Sci and Technol*, v.1, p. 485-492.

J. E. Souza de Cursi e R. Sampaio. *Modelagem Estocástica e Quantificação de Incertezas*. Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional, São Carlos (SP), Brasil, 2012.

Jacxsens, Devlieghere e Debevee (2001) *Temperature dependence of shelf-life as affected by microbial proliferation and sensory quality of equilibrium modified atmosphere packaged fresh produce*. *Postharvest Biology and Technology*. n. 26. 59–73.

- Jacxsens, L., F. Devlieghere and J. Debevere (2002) Predictive modelling for packaging design: equilibrium modified atmosphere packages of fresh-cut vegetables subjected to a simulated distribution chain. *Int. J. Food Microbiology*, Vol. 73, pp. 331-341.
- James, S.J. and I. Scholfield (1998). Modelling of food refrigeration systems. Proceedings 3rd Karlsruhe Nutrition Symposium: European Research towards Safer and Better Food, Karlsruhe, Germany, pp. 293-301.
- James, S.J.; James, C. e Evans, J.A. (2006) Modelling of Food Transportation Systems – a Review, *International Journal of Refrigeration*, v. 29, pp. 947-957.
- Joshi, K. Thakur, J.S. e Singh (2008) A. *Knowledge and practice of oral polio vaccine vial monitor among health personnel in India*. *Indian J Community Medicine*; 32: pp. 283-285.
- Kefford, J.F. Impact of climate variability on food processing. *CSIRO Food Research Quarterly*. Sidney 39, p- 1-10, 1979.
- Kirkpatrick, S., Gelatt Jr., C.D., and Vecchi, M.P., (1983) "Optimization by simulated annealing", *Science* 220, p. 671-680.
- Kourti, T. (2006) The Process Analytical technology initiative and multivariable process analysis, monitoring and control. *Anal Bioanal Chem*, 384, 1043-1048
- Laguerre, O. and D. Flick (2010). Temperature prediction in domestic refrigerators: deterministic and stochastic approaches, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 33 (1), pp. 41-51.
- Lang SQ, Fruh-Green GL, Bernasconi SM, Lilley MD, Proskurowski G, Mehay S, Butterfield DA (2012) Microbial growth on abiotic carbon and hydrogen in a serpentinite-hosted system. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 92 ,p. 82–99.
- Laporte, G (2009) Fifty years of vehicle routing, *Transportation Science* 43 (4) 408–416.
- Laporte, G, Louveaux, F. Mercure, H. (1992) The vehicle routing problem with stochastic travel times, *Transportation Science* 26 (3) 161–170.
- Laporte, G. (1990), "Developpements algorithmiques récents et perspectives de recherche en distributive", *Les Cahiers Scientifiques du Transport* 21, 61-84.
- Laporte, G., and Nobert, Y. (1987), "Exact algorithms for the vehicle routing problem", in: S. Martello, G. Laporte, M. Minoux and C. Ribeiro (eds.), *Surveys in Combinatorial Optimization*, North-Holland, Amsterdam, 147-184.
- LARSEN, A. (2001) *The Dynamic Vehicle Routing Problem*. Technical Unisersity of Denmark. Lyngby, Dinamarca.
- Likar, K.; Jevsnik, M. (2006) "Cold Chain Maintaining in Food Trade". *Food Control*, v. 17, pp. 108 – 113.
- Lopes, R. L. T. (2007) Dossiê Técnico: Conservação de alimentos. Sistema Brasileiro de Respostas Técnicas.

Lui J., Higgins, A. e Tan, Y. (2010) IT enabled redesign of export procedure for high-value pharmaceutical product under temperature control: the case of Drug Living Lab. *Proceedings of the 11th Annual International Conference on Digital Government Research*.

Lui J., Higgins, A. e Tan, Y. (2010) IT enabled redesign of export procedure for high-value pharmaceutical product under temperature control: the case of Drug Living Lab. *Proceedings of the 11th Annual International Conference on Digital Government Research*.

Marino, S (2008) *Especial Operadores frigorificados*. Revista Tecnológica, São Paulo, pg 72-79.

Medeiros, F.O.; Favero, L.A.; Silva, L.S.; Ferreira, R.A.D. (2008) Estudo de uma operadora logística da cadeia do frio situada no nordeste Brasileiro: o caso tru-logística. SOBER - Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociedade Rural. Rio Branco – Acre, 20 a 23 de julho de 2008.

Metropolis, N., Rosenbluth, A., Rosenbluth, M., Teller, A., and Teller, E. (1953), "Equation of state calculations by fast computing machines", *The Journal of Chemical Physics* 21, 1087-1092.

Moureh, J. e Derens, E. (2000) Numerical Modelling of the Temperature Increase in Frozen Food Packaged in Pallets in the Distribution Chain, *International Journal of Refrigeration*, v. 23, pp. 540-552.

Moureth, J., Menia, N. and D. Flick (2002) Numerical and experimental study of airflow in a typical refrigerated truck configuration loaded with pallets. *Computers and Electronics in Agriculture*, 34, 25-42.

Neves e Filho. *Refrigeração e Alimentos* (1997). Faculdade de Engenharia de Alimentos UNICAMP. Campinas: 340 p.

Neves Filho, L. C. (1997). *Refrigeração e Alimentos* – Apostila do Curso Engenharia de Alimentos. Universidade Estadual de Campinas. Campinas; SP.

Neves Filho, L. C. (2006) Transporte, um elo vital na cadeia do frio. *Jonhis On Line*, 08/12/2006 disponível em:http://www.jonhis.com.br/ndigital/foods/montar.asp?ed_atual=2&montar_acao=2&id_artigo=31. Acesso em: 05/12/2012

Neves Filho, L. C.. (2006) – Algumas questões sobre tempos de resfriamento e congelamento. *Revista Nacional da Carne*, vol. 30, nº 353, p. 86-102, SP.

Neves Filho, L. C.. (2011) *Refrigeração e Alimentos – Parte II*. *Revista Abrava* . Edição 288.

Neves Filho, L.C. e Silveira Jr. V. (2010) Alguns aspectos no transporte refrigerado. *Revista Tecnológica*.

Neves Filho; L. C.; Silveira Junior. V. (2008) Alguns aspectos no transporte refrigerado. *Revista Tecnológica*. pp. 60-71.

Nga, M.T. (2010). *Enhancing Quality Management of Fresh Fish Supply Chains Through Improved Logistics and Ensured Traceability*, PhD Thesis, University of Iceland, Reykjavik.

Novaes, A. G (2004) *Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição: estratégia, operação e avaliação*. Ed. Elsevier. Rio de Janeiro, 2004

Novaes, A. G. (2001). *Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribuição*. Rio de Janeiro: Campus. 2001

Novaes, A.G.; Bez, E.T.; Burin, P.J. e Aragão Neto, D. P. (2013). Dynamic milk-run OEM operations in over-congested traffic conditions. *Computers & Industrial Engineering* (artigo submetido a publicação)

Novaes, A.G.; Frazzon, E.M., and Burin, P.J. (2010). Dynamic Routing in Over Congested Urban Areas, *Proceedings LDIC 2009*, Second International Conference on Dynamics in Logistics, Bremen, August, pp. 103-112

Novaes, A. G. N.; Lima Junior, O. F.; Carvalho, C. C.; Bez, E. T. (2014) Dynamic temperature control in the distribution of perishable food. 4th International Conference on Dynamics in Logistics – LDIC 2014 and the Conference „Impact of Virtual, Remote and Real Logistics Labs – ImViReLL.

Osman, I. H.; Laporte, G. (1996) Metaheuristics: A bibliography. *Annals of Operations Research*, 63, n. 5, October.

Oswald, A. and L.Z. Stirn (2008). A vehicle routing algorithm for the distribution of flesh vegetables and similar perishable food. *Journal of Food Engineering*, Vol. 85, pp. 285-295.

Panozzo, G.; Cortella, G. (2008) Standards for transport of perishable goods are still adequate? Connections between standards and technologies in perishable foodstuffs transport. *Trends in Food Science and Technology*, n. 19, pp. 432 – 440.

Peão, G. F. R. (1998) Instrumentação e monitoração de uma carroceria comercial frigorificada com avaliação da temperatura de transporte. Dissertação de mestrado – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 121p.

Pereira, V. F.; Doria, E. C. B.; Carvalho Júnior, B. C.; Neves Filho, L. C.; Silveira Júnior, V. (2010) Avaliação de temperaturas em câmaras frigoríficas de transporte urbano de alimentos resfriados e congelados. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas-SP, v. 30, n. 1, p 158-165.

Pillac, V., Gendreau, M., Guéret, C., Medagli, A.L. (2013) A review of dynamic vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research* 225 1–11.

Pinto, J., e Neves, R. (2010). *Análise de riscos no processamento alimentar*. Porto: publindústria, edições técnicas.

Pitarma, R. A. (1998) Modelação matemática e experimental de câmaras frigoríficas de veículos. Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Prestes, A. N. (2006) Uma Análise Experimental de Abordagens Heurísticas Aplicadas ao Problema do Caixeiro Viajante. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, p. 84.

Psaraftis, H.N. (1998) “Dynamic Programming Solution to the Single Vehicle Many-to-many immediate request Dial-a-ride Problem”. *Transport Science* 14, 130-154.

Rizzotto, P. e Wolfram, G. (2002) *Intelligent Tagging – getting supply chain smart*. Em: 2002 Official ECR Europe Conference, ECR Europe, Barcelona, Spain.

Robazza, W.S., Teleken, J.T Gomes, G.A. (2010) Modelagem Matemática do Crescimento de Microrganismos em Alimentos. *TEMA Tend. Mat. Apl. Comput.*, 11, No. 1 101-110.

- Rodrigue, Jean-Paul; Craig, Mathew. (2010) New York, Hofstra University Disponível em: <<http://people.hofstra.edu/geotrans/eng/ch5en/app15en/ch5a5en.html>>. Acesso em: 21/09/2012
- Rosa, F. S.; Lunkes, R. J. (2006) A Logística das Flores: Uma Contribuição ao Estudo sobre a Cadeia Produtiva de Flores e Plantas Ornamentais. *III Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia*. pp. 1-12.
- Ruiz-Garcia, L., Barreiro, P., Rodríguez-Bermejo, J. & Robla, J. I. (2007) Monitoring intermodal refrigerated fruit transport using sensor networks: a review. *Spanish Journal of Agricultural Research*.
- Ruiz-Garcia, L.; Lunadei, L. (2010) Monitoring cold chain logistics by means of RFID. *In: Sustainable Radio Frequency Identification Solutions*; Turcu, C., Ed.; INTECH: Vienna, Austria; pp. 37–50.
- Sahin, E., Babaï, M.Z., Dallery, Y., Vaillant, R. (2007), Ensuring supply chain safety through time temperature integrators. *Int. J. Logistics Management*, 18 (1), 102-124.
- Salin, V.; Nayga, R. M. (2002) “A Cold Chain Network for Food Exports to Developing Countries”. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 33, pp. 918-933.
- Sánchez López, T.; Daeyoung, K. (2008) Wireless Sensor Networks and RFID integration for Context Aware Services. In White Paper series ed. A. – I. L. W. Paper.
- SAUER, João Guilherme. (2007) abordagem de evolução diferencial híbrida com busca local aplicada ao problema do caixeiro viajante. Dissertação – Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Programa de Pós) Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas.
- Seabury database (2007) disponível em: <http://www.seaburygroup.com/management-consulting/cargo-logistics>. Acesso em 15/01/2013.
- SEST/SENAT. (2009) Itinerário formativo de transporte de cargas: carga frigorificada. Brasília. Pp. 17-22
- Silva, G. B. (2010) “Evaluating the logistics key factors in physical distribution of cold chain”. In: *Proceedings of the 4th International Workshop Cold Chain Management*, Bonn, Germany, September 27-28.
- Silva, G. B. A (2010) Gestão da Cadeia do Frio: Uma Análise de fatores logísticos. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. pp. 02-68.
- Silva, M.; Cristiano, A.; Ferreira, F.; Virgílio, J. M. (2001). Sistemas De Roteirização E Programação De Veículos. *Pesqui. Oper.* [online] vol.21, n.2, pp. 223-232. ISSN 0101-7438.
- Silva, R.C. O. (2007) Avaliação da implantação de softwares de roteirização de veículos. Dissertação (mestrado). Programa de pós-graduação da Politécnica Universidade Católica do Rio de Janeiro, Engenharia Industrial.
- Simpson, R., S. Almonacid, H. Nuñez, M. Pinto, A. Abakarov and A. Teixeira (2012). Time-temperature indicator to monitor cold chain distribution of fresh salmon (salmo salar). *Journal Food Process Engineering*, Vol. 35, (5), pp. 742-750.
- Solomon, M. M. ; Desrosiers, J. “Time window constrained routing and scheduling problems”. *Transportation Science*, v.22, n.1, p.1-13, 1988.

- Syslo, M.M.; Deo, N. e Kowalik, J. (2006) *Discrete Optimization Algorithms with Pascal Programs*, Dover Publications, Mineola, N.Y.
- Tassou, S.A., DE LILLE, G. e GE, Y.T. (2008) *Carbon Dioxide Cryogenic Transport Refrigeration Systems*. The Centre for Energy and Built Environment Research, Brunel University. England, 2008.
- Tassou, S.A.; DE LILLE, G. e GE, Y.T. (2009) Food Transport Refrigeration – approaches to reduce energy consumption and environmental impact of road transport. *Appl Therm Eng*, 29 pp. 1467-1477.
- Tijsskens, L. M. M., Polderdijk, J. J. (1996) *A Generic Model for Keeping Quality of Vegetable Produce During Storage and Distribution*. *Agricultural Systems*, v. 51, n. 4, pp. 431- 452.
- Toth, P. e Vigo, D. (1996) Fast local search algorithms for the handicapped persons transportation problem. In: Osman, I. H. e Kelly, J. P. (eds). *Meta-heuristics: Theory and applications*. Kluwer, Boston, 677- 690.
- Toth, P.; Vigo, D. (2002) *The Vehicle Routing Problem*, SIAM Monographs on Discrete Mathematics, vol. 9, SIAM Philadelphia.
- Tso, C.P., Yu, S.C.M., Poh, H.J. and P.G. Jolly (2002) Experimental study on the heat and mass transfer characteristics in a refrigerated truck. *International Journal of Refrigeration*, 25, 340-350.
- Wanteman, K.C. (2012) Accelerated Stability Assessment Program (ASAP): Using Science to Set Shelf Life. *The Journal of Pharmaceutical & Biopharmaceutical Contract Services*.
- White Martins. (2010) Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos. Produto: Dióxido de Carbono, Líquido Refrigerado. *FISPQ* n°: P – 4573 – D.
- White, J. (2007) “How Cold Was It? Know the Whole Story”. *Frozen Food Age*, 56(3), pp.38-40.
- Zhang, G.; Sun, G. e Li, J. (1994), A New Method to Determine the Heat Transfer Coefficient of Refrigerated Vehicles, *International Journal of Refrigeration*, v. 17, n. 8, pp. 516-523
- Zhang, Lujie. (2007) *Cold chain management*. MSc Thesis. Cranfield University. Bedfordshire; England; 2007.

APÊNDICES

Apêndice 1: Coordenadas x e y dos pontos de clientes 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 e o depósito.

xp [1]: = 5.75; xp [2]: = 7.75; xp[3]: = 9.45;
xp [4]: = 5.97; xp[5]: = 7.10; xp[6]: = 5.5;
xp[7]: = 6.45; xp[8]: = 7.25; xp[9]: = 3.38;
xp[10]: = 5.17; xp[11]: = 10.10; xp[12]: = 10.55;

yp[1]: = 1.75; yp[2]: = 1.60; yp[3]: = 4.40;
yp[4]: = 3.10; yp[5]: = 5.35; yp[6]: = 5.64;
yp[7]: = 6.23; yp[8]: = 6.35; yp[9]: = 6.25;
yp[10]: = 9.40; yp[11]: = 9.43; yp[12]: = 9.70;

Apêndice 2: S.A. pseudo-código para o problema da distribuição de produto refrigerado

```
procedure SimulatedAnnealing
   $\emptyset b, \emptyset a$  : type solution
  input  $k \leftarrow 0$     % SA stage %
  input  $n$               % number of retailers to be served in the route %
  input  $GT_0$           % initial generalized temperature value %
  input  $GT_{min}$        % minimum generalized temperature value %
  input  $rt$            % cooling rate %
  input  $i \leftarrow 0$   % step counter %

  % initialization %

1    $k \leftarrow k + 1$ 
2   if  $k = 1$  then
3      $GT_{var} \leftarrow GT_0$     %  $GT_{var}$  is the generalized temperature along the SA process %
4      $\emptyset b.RT \leftarrow x_B$   % generate route  $x_B$  via procedure  $route(k)$  and assign it to  $\emptyset b$  %
5      $\emptyset b.C_{pk} \leftarrow C_{pk}$  % compute  $C_{pk}$  for route  $x_B$  and assign it to %  $\emptyset b$  %
6      $\emptyset b.RTex \leftarrow RT_B$  % compute route extension for route  $x_B$  and assign it to  $\emptyset b$  %
7     If  $(C_{pk}^{(B)} < 1.33)$  then  $L^* \leftarrow GT_0$  else  $L^* \leftarrow RT_B$ 
8     end-if

  % minimum  $RT_B$  search %

9   while  $GT_{var} > GT_{min}$  do
10     $i \leftarrow i + 1$ 
11     $\emptyset a.RT \leftarrow x_A$     % generate route  $x_A$  via procedure  $route(k)$  and assign it to  $\emptyset a$  %
12     $\emptyset a.C_{pk} \leftarrow C_{pk}$  % compute  $C_{pk}$  for route  $x_A$  and assign it to %  $\emptyset a$  %
13     $\emptyset a.RTex \leftarrow RT_A$  % compute route extension for route  $x_A$  and assign it to  $\emptyset a$  %
14     $\Delta \leftarrow \text{abs}(RT_A - RT_B)$ 
15    if  $C_{pk}^{(A)} < 1.33$  then
16       $RT_A \leftarrow 2 \times RT_A$ 
17    else
18      if  $RT_A < L^*$  then
```

```

19          $\emptyset b \leftarrow \emptyset a$ 
20          $L^* \leftarrow RT_A$ 
21          $C_{pk}^* \leftarrow C_{pk}^{(A)}$ 
22     else
23          $r \leftarrow$  random number [0,1)
24         if  $r < \exp\left(-\frac{Delta}{GT_{var}}\right)$  then
25              $\emptyset b \leftarrow \emptyset a$ 
26              $L^* \leftarrow RT_A$ 
27              $C_{pk}^* \leftarrow C_{pk}^{(A)}$ 
28     end-if
29      $GT_{var} \leftarrow rt \times GT_{var}$ 
30 end-while
31 if  $k < 2$  go to 1 else
32     write  $i, x_B, L^*, C_{pk}^*$  % SA results %
28 end-procedure

```

Apêndice 3: Procedimento de Monte Carlo para rotas genéricas de veículos

Procedure route(*k*)

```
1   if k = 1 then

% fully randomized routing sequence , except the depot inserted in position n + 1 %

2   for i = 1 to n do
3     OK[i] ← true
4   for i = 1 to n do
5     flag ← false
6     while not flag do
7       j ← 0
8       while (j = 0) do
9         r ← random [0,1]
10        j ← trunc (r × n + 0.5)
11      end-while
12      if (j > 0) and (OK[j] = true) then
13        begin
14          flag ← true
15          OK[j] ← true
16          x[i] ← j
17        end-if
18      end-while
19    end for
20    x[n + 1] ← n + 1
21  if k = 2 then

% partially randomized routing sequence , except the depot maintained in position n + 1 %

22  for i = 1 to n + 1
23    x[i] ←  $\emptyset$ .x[i]
24  flag ← false
25  while not flag do
26    r ← random [0,1]
```

```

27      $i_1 \leftarrow \text{trunc}(r \times n + 0.5)$ 
28     if ( $i_1 > 0$ ) then  $flag \leftarrow true$ 
29 end-while
30  $flag \leftarrow false$ 
31 while not  $flag$  do
32      $r \leftarrow \text{random}[0,1]$ 
33      $i_2 \leftarrow \text{trunc}(r \times n + 0.5)$ 
34     if ( $i_2 > 0$ ) and ( $i_2 \neq i_1$ ) then  $flag \leftarrow true$ 
35 end-while
36  $\ell \leftarrow x[i_1]$ 
37  $x[i_1] \leftarrow x[i_2]$ 
38  $x[i_2] \leftarrow \ell$ 
39  $\emptyset b. x[i] \leftarrow x[i]$ 
40 end-procedure

```


Apêndice 4: Quadros de coeficientes de variação CV simulações relativas a valores de CV variando de zero (configuração determinística básica) até 0,60

Coeficiente de variação 0,00 (200 simulações)				
	Min C_{pk}	Med C_{pk}	Max C_{pk}	Pr $C_{pk} < 1.33$
1	2.162	2.162	2.162	0.000
2	2.286	2.286	2.286	0.000
3	2.336	2.336	2.336	0.000
4	2.386	2.386	2.386	0.000
5	2.436	2.436	2.436	0.000
6	2.472	2.472	2.472	0.000
7	2.460	2.460	2.460	0.000
8	2.421	2.421	2.421	0.000
9	2.366	2.366	2.366	0.000
10	2.228	2.228	2.228	0.000
11	1.909	1.909	1.909	0.000
12	1.332	1.332	1.332	0.000

Quadro 15: Dados CV de Variação 0,00

Coeficiente de variação 0,05 (200 simulações)				
	Min C_{pk}	Med C_{pk}	Max C_{pk}	Pr $C_{pk} < 1.33$
1	2.073	2.144	2.209	0.000
2	2.220	2.267	2.297	0.000
3	2.300	2.336	2.373	0.000
4	2.344	2.395	2.439	0.000
5	2.348	2.431	2.488	0.000
6	2.334	2.452	2.544	0.000
7	2.290	2.437	2.544	0.000
8	2.200	2.383	2.513	0.000
9	2.028	2.299	2.457	0.000
10	1.914	2.179	2.387	0.000
11	1.576	1.921	2.282	0.000
12	1.033	1.352	2.083	0.430

Quadro 16: Dados CV de Variação 0,05

Coeficiente de variação 0,10 (200 simulações)				
	Min C_{pk}	Med C_{pk}	Max C_{pk}	Pr $C_{pk} < 1.33$
1	2.073	2.147	2.287	0.000
2	2.220	2.272	2.324	0.000
3	2.291	2.337	2.408	0.000
4	2.268	2.338	2.459	0.000
5	2.242	2.417	2.499	0.000
6	2.171	2.430	2.540	0.000
7	2.056	2.387	2.518	0.000
8	1.826	2.309	2.461	0.000
9	1.633	2.204	2.386	0.000
10	1.502	2.076	2.281	0.000
11	1.264	1.837	2.081	0.025
12	0.788	1.323	1.670	0.440

Quadro 17: Dados CV de Variação 0,10

Coeficiente de variação 0,15 (200 simulações)				
	Min C_{pk}	Med C_{pk}	Max C_{pk}	Pr $C_{pk} < 1.33$
1	2.073	2.155	2.397	0.000
2	2.212	2.278	2.342	0.000
3	2.233	2.338	2.432	0.000
4	2.138	2.379	2.484	0.000
5	2.984	2.395	2.516	0.000
6	2.807	2.389	2.542	0.000
7	2.661	2.320	2.510	0.000
8	1.471	2.215	2.467	0.000
9	1.274	2.096	2.380	0.005
10	1.106	1.960	2.273	0.030
11	0.871	1.743	2.099	0.120
12	0.554	1.289	1.695	0.495

Quadro 18: Dados CV de Variação 0,15

Coeficiente de variação 0,20 (200 simulações)				
	Min C_{pk}	Med C_{pk}	Max C_{pk}	Pr $C_{pk} < 1.33$
1	2.073	2.169	2.483	0.000
2	2.194	2.282	2.376	0.000
3	2.171	2.332	2.454	0.000
4	2.003	2.364	2.509	0.000
5	1.779	2.369	2.548	0.000
6	1.593	2.349	2.553	0.000
7	1.395	2.255	2.517	0.000
8	1.235	2.142	2.467	0.025
9	1.050	2.017	2.397	0.045
10	0.848	1.874	2.280	0.095
11	0.638	1.663	2.084	0.160
12	0.434	1.255	1.732	0.550

Quadro 19: Dados CV de Variação 0,20

Coeficiente de variação 0,30 (200 simulações)				
	Min C_{pk}	Med C_{pk}	Max C_{pk}	Pr $C_{pk} < 1.33$
1	2.073	2.200	2.563	0.000
2	2.169	2.287	2.3456	0.000
3	1.967	2.313	2.491	0.000
4	1.572	2.309	2.538	0.000
5	1.143	2.281	2.564	0.005
6	0.906	2.205	2.537	0.035
7	0.742	2.065	2.521	0.040
8	0.608	1.912	2.447	0.090
9	0.495	1.772	2.378	0.160
10	0.386	1.624	2.278	0.275
11	0.297	1.453	2.130	0.390
12	0.211	1.143	1.731	0.610

Quadro 20: Dados CV de Variação 0,30

Coeficiente de variação 0,40 (200 simulações)				
	Min C_{pk}	Med C_{pk}	Max C_{pk}	Pr $C_{pk} < 1.33$
1	2.073	2.202	2.581	0.000
2	2.029	2.286	2.515	0.000
3	1.727	2.298	2.543	0.000
4	1.393	2.271	2.554	0.000
5	1.018	2.224	2.585	0.040
6	0.826	2.110	2.551	0.085
7	0.621	1.953	2.520	0.150
8	0.473	1.794	2.456	0.220
9	0.366	1.653	2.394	0.300
10	0.295	1.523	2.283	0.365
11	0.223	1.365	2.097	0.430
12	0.147	1.087	1.768	0.635

Quadro 21: Dados CV de Variação 0,40

Coeficiente de variação 0,50 (200 simulações)				
	Min C_{pk}	Med C_{pk}	Max C_{pk}	Pr $C_{pk} < 1.33$
1	2.074	2.221	2.570	0.000
2	1.776	2.278	2.544	0.000
3	1.271	2.271	2.565	0.005
4	0.633	2.221	2.560	0.025
5	0.470	2.146	2.534	0.055
6	0.323	2.012	2.560	0.115
7	0.228	1.821	2.520	0.200
8	0.123	1.648	2.466	0.260
9	0.074	1.500	2.383	0.380
10	0.035	1.367	2.270	0.455
11	0.007	1.225	2.163	0.535
12	-0.026	0,998	1.756	0.725

Quadro 22: Dados CV de Variação 0,50

Coeficiente de variação 0,60 (200 simulações)				
	Min C_{pk}	Med C_{pk}	Max C_{pk}	Pr $C_{pk} < 1.33$
1	2.073	2.224	2.581	0.000
2	1.592	2.275	2.555	0.000
3	0.860	2.249	2.582	0.005
4	0.631	2.178	2.575	0.035
5	0.444	2.080	2.557	0.065
6	0.256	1.918	2.551	0.155
7	0.180	1.715	2.515	0.265
8	0.114	1.535	2.479	0.380
9	0.068	1.391	2.410	0.490
10	0.029	1.259	2.288	0.555
11	-0.024	1.128	2.158	0.635
12	-0.039	0,927	1.828	0.775

Quadro 23: Dados CV de Variação 0,60

Apêndice 5: Programa Pascal para Roteirização de veículo combinando eficiência térmica e minimização da distância

Obs:

Program Cold_12;

(* Calcula Cpk desagregado por cliente, ao longo do roteiro *)

(* Roteiro Simulated Annealing *)

(* Pode colocar o TSP, por exemplo, e ele determina os Cpk etapa por etapa *)

Uses WinCrt;

Type Event = Record

Flag : String[6];

IFlg : Integer;

(* 0 = Saida base, SAIDA;

1 = Line-haul depósito até 1ª parada, LH_01

2 = Abertura de porta, AB_PT

3 = Descarga, DESCG

4 = Trajeto entre entregas, VIAGM

5 = Line-haul última entrega até depósito,

LH_02

6 = Parada com refrigeração desligada (espera), ST+RF

7 = Parada com motor ligado ST-RF *)

NdsG : Integer; (* nº da descarga *)

ClientA : Integer; (* nº do cliente onde inicia o deslocamento, zero caso contrário *)

ClientB : Integer; (* nº da próxima parada, se deslocamento, ou próxima entrega, se descarga *)

mfr : Real; (* fração da carga dentro do veículo *)

T : Integer; (* tempo instantaneo do evento, minutos *)

G : Real; (* Temperatura, grau Celsius *)

End;

Agenda = Record

TA,TB : Integer; (* Instantes de início e de término da operação, minutos *)

Oper : Integer; (* Tipo de operação: 1 ;

1 = Line-haul até cliente 1;

2 = Line-haul do último cliente

à base;

3 = Descarga no cliente

4 = Deslocamento entre clientes

*)

ISeq : Integer; (* nº de ordem da descarga ou do deslocamento *)

NClientA : Integer; (* nº do cliente onde se inicia a operação, no caso de deslocamento *)

NClientB : Integer; (* nº do cliente onde termina a operação, no caso de deslocamento,

ou nº do clientes onde é feita a descarga *)

End;

OutPut = Record

Rota : Array[1..20] of Integer; (* Rota final otimizada *)

Indice1,Indice2 : Real; (* Índice de avaliação da temperatura *)

XRota : Real; (* Extensão da rota ótima, em km *)

End;

Carga_Ponto = Record

NCliP : Integer; (* nº do cliente atendido *)

Wcli : Real; (* carga descarregada no cliente, fração da carga total *)

WCGPt : Real; (* carga acumulada no veículo até esse ponto =

fração da carga total *)

End;

Carga_Rota = Record

NCli_A : Integer; (* nº do ponto (cliente) início do deslocamento *)

NCli_B : Integer; (* nº do ponto (cliente) que finaliza o deslocamento *)

WCGRt : Real; (* carga acumulada no veículo até esse ponto = fração da carga total *)

End;

Var A,delta,Vz,Vh,Dh,Gin,GmaxS,GminS,GT : Real;

Tdd,Tdsc,DeltaG,betaDG : Real;

N,Nmax,NTT,Nevento,NLimit,Caso : Integer;

Ev : Array[1..1000] of Event;

Age : Array[1..200] of Agenda;

ArqG : Text;

Route : Array[1..20] of Integer;

MX : Array[0..20] of Real;

WP : Array[1..21,1..21] of Real; (* matriz de distância entre N+1 pontos da rota *)

NR : Integer; (* nº de pontos do roteiro, igual a N+1 para incluir o depósito *)

ERT : Real; (* extensão do roteiro, em KM *)

WV : Real; (* lotação do caminhão, toneladas *)

xp,yp : Array[1..20] of Real; (* coordenadas dos pontos de entrega *)

W : Array[1..20] of Real; (* fração da carga destinada ao cliente I *)

NSim : Real; (* nº de simulações *)

Cp,DRota,Carga_Total,X : Real;

UmOut,TOut : OutPut;

ArqOut : File of OutPut;

CgPt : Array[1..20] of Carga_Ponto;

CgRt : Array[1..20] of Carga_Rota;

WW,dT : Array[1..20] of Real; (* carga relativa para o cliente I *)

Position : Array[1..20] of Integer;

I : Integer;

TITULO : String[50];

Procedure Dados_Gerais;

Var I,J,K,L : Integer;

z : Real;

IOK : Char;

Begin

N:=12;

A:=73; (* area da zona de entrega, Km2 *)

Vz:=30; (* velocidade média na zona de entrega, Km/hr *)

Vh:=60; (* velocidade média line-haul, km/hr *)

Dh:=84.3; (* distancia da base à zona de entrega, Km *)

WV:=12; (* lotação do caminhão, toneladas *)

Gin:=5; (* temperatura inicial *)

GT:=2; (* Thermostat *)

GmaxS:=7; (* temperatura máxima especificada *)

GminS:=2; (* temperatura mínima especificada *)

DeltaG:=0.0; (* Gradiente de temperatura ao abrir a porta na descarga - não considerado na presente versão *)

(* Dados dos pontos de entrega *)

xp[1]:=5.75;xp[2]:=7.75;xp[3]:=9.45;xp[4]:=5.97;

xp[5]:=7.10;xp[6]:=5.5;xp[7]:=6.45;xp[8]:=7.25;

xp[9]:=3.38;xp[10]:=5.17;xp[11]:=10.10;xp[12]:=10.55;

yp[1]:=1.75;yp[2]:=1.60;yp[3]:=4.40;yp[4]:=3.10;

yp[5]:=5.35;yp[6]:=5.64;yp[7]:=6.23;yp[8]:=6.35;

yp[9]:=6.25;yp[10]:=9.40;yp[11]:=9.43;yp[12]:=9.70;

For I:=1 to N do

Begin

For J:=1 to N do

Begin

If (I <> J) then

Begin

z:=Sqr(Sqr(xp[J]-xp[I])+Sqr(yp[J]-yp[I]));

WP[I,J]:=0.85*1.35*z;

End;

If (I = J) then WP[I,J]:=0;

(* Write(I:5,J:5,WP[I,J]:10:2);Readln; *)

End;

End;

(* Distâncias ao depósito; depósito = ponto N+1 *)

WP[N+1,N+1]:=0;

WP[1,N+1]:=Dh+1.35*1;

WP[2,N+1]:=Dh+1.35*2.5;

WP[3,N+1]:=Dh+1.35*5;

WP[4,N+1]:=Dh+1.35*2.35;


```

WP[5,N+1]:=Dh+1.35*4.9;
WP[6,N+1]:=Dh+1.35*4.85;
WP[7,N+1]:=Dh+1.35*5.6;
WP[8,N+1]:=Dh+1.35*5.8;
WP[9,N+1]:=Dh+1.35*5.75;
WP[10,N+1]:=Dh+1.35*8.75;
WP[11,N+1]:=Dh+1.35*9.85;
WP[12,N+1]:=Dh+1.35*10.35;
For I:=1 to N do
  WP[N+1,I]:=WP[I,N+1];

```

(* demanda por cliente *)

```

For I:=1 to N do
Begin
  WW[I]:=0.3;
End;
WW[8]:=7;
WW[7]:=2;
Carga_Total:=0;
For I:=1 to N do
  Carga_Total:=Carga_Total+WW[I];

```

```

For I:=1 to N do
  WW[I]:=WW[I]/Carga_Total;
(* Tempo de descarga do veículo *)

```

```

For I:=1 to N do
Begin
  dT[I]:=10;
  If (I = 8) then dT[I]:=64;
  If (I = 7) then dT[I]:=24;
End;
End;

```

Procedure Dados_Especificos;

Var I,J,K,L : Integer;

X : Real;

WCargA,WCargB : Array[0..20] of Real; (*
carregamento
fracionário no veículo *)

Begin

(* Alocação de carga pelos clientes da rota *)

For I:=1 to N do

Begin

J:=Route[I];

CgPt[I].NClip:=J;

CgPt[I].Wcli:=WW[J];

End;

For I:=1 to N do

Begin

J:=Route[I];

If (I = 1) Then

Begin

WcargA[I]:=1;WcargB[I]:=WcargA[I]-WW[J];

CgPt[I].WCGPt:=(WcargA[I]+WcargB[I])/2;

End;

IF (I > 1) Then

Begin

WcargA[I]:=WcargB[I-1];

WcargB[I]:=WcargA[I]-WW[J];

CgPt[I].WCGPt:=(WcargA[I]+WcargB[I])/2;

End;

If (CgPt[I].WCGPt < 0.025) then

CgPt[I].WCGPt:=0.025;

End;

(* Alocação de carga nos trechos de deslocamento entre
clientes *)

For I:=1 to N-1 do

Begin

J:=Route[I];L:=Route[I+1];

CgRt[I].Ncli_A:=J;CgRt[I].Ncli_B:=L;

CgRt[I].WCGRt:=WcargB[I];

End;

J:=CgRt[N-1].Ncli_B;L:=N+1;;

CgRt[N].Ncli_A:=J;CgRt[N].Ncli_B:=L;CgRt[N].WCGRt
:=0.025;

(* Na volta ao depósito sobra 2.5% de
carga no veículo: prateleiras, carrinhos, etc *)

End;

```

Procedure Temperatura_Ambiente(TP : Real;
    var Gamb : Real);
Var TP1,TP2,G1,G2,a,b : Real;
(* dados extaridos da curva de temperatura ambiente obtida
da simulação CoolVan *)
Begin
    If (TP = 0) then Gamb:=9.3;
    If ((TP > 0) and (TP <= 36.9)) then
        Begin
            TP1:=0;TP2:=36.9;G1:=9.3;G2:=10.3;
        End;
    If ((TP > 36.9) and (TP <= 85.0)) then
        Begin
            TP1:=36.9;TP2:=85.0;G1:=10.3;G2:=11.7;
        End;
    If ((TP > 85.0) and (TP <= 102.5)) then
        Begin
            TP1:=85.0;TP2:=102.5;G1:=11.7;G2:=12.4;
        End;
    If ((TP > 102.5) and (TP <= 147.0)) then
        Begin
            TP1:=102.5;TP2:=147.0;G1:=12.4;G2:=14.1;
        End;
    If ((TP > 147.0) and (TP <= 201.8)) then
        Begin
            TP1:=147.0;TP2:=201.8;G1:=14.1;G2:=16.3;
        End;
    If ((TP > 201.8) and (TP <= 251.0)) then
        Begin
            TP1:=201.8;TP2:=251.0;G1:=16.3;G2:=18.5;
        End;
    If ((TP > 251.0) and (TP <= 300.0)) then
        Begin
            TP1:=251.0;TP2:=300.0;G1:=18.5;G2:=20.6;
        End;
    If ((TP > 300.0) and (TP <= 349.1)) then
        Begin
            TP1:=300.0;TP2:=349.1;G1:=20.6;G2:=22.6;
        End;
    If ((TP > 349.1) and (TP <= 401.7)) then
        Begin
            TP1:=349.1;TP2:=401.7;G1:=22.6;G2:=24.5;

```

```

        End;
        If ((TP > 401.7) and (TP <= 418.9)) then
            Begin
                TP1:=401.7;TP2:=418.9;G1:=24.5;G2:=25.0;
            End;
        If ((TP > 418.9) and (TP <= 450.0)) then
            Begin
                TP1:=418.9;TP2:=450.0;G1:=25.0;G2:=26.0;
            End;
        If ((TP > 450.0) and (TP <= 500.0)) then
            Begin
                TP1:=450.0;TP2:=500.0;G1:=26.0;G2:=27.4;
            End;
        If ((TP > 500.0) and (TP <= 550.0)) then
            Begin
                TP1:=500.0;TP2:=550.0;G1:=27.4;G2:=28.6;
            End;
        If ((TP > 550.0) and (TP <= 600.0)) then
            Begin
                TP1:=550.0;TP2:=600.0;G1:=28.6;G2:=29.5;
            End;
        b:=(G2-G1)/(TP2-TP1);
        a:=G2-b*TP2;
        Gamb:=a+b*TP;
    End;

Procedure Eventos_na_Rota;
Var TLH,Tab,wd,dd : Real;
    Tdd,Tdsc : Real;
    I,III,J,M,TX,Tcor,XA,XB,NN,IR,JR,Iseq : Integer;
    Ok : Boolean;
Begin
    (* Instante de saida da base *)
    Tcor:=0;
    (* Line-Haul 1 *)
    IR:=Route[N+1];JR:=Route[1];
    M:=0;
    TLH:=60*WP[IR,JR]/Vh;
    TX:=Trunc(TLH);
    For I:=1 to TX do

```

```

Begin
  With Ev[I] do
    Begin
      Flag:='LH_01';IFlg:=1;T:=I;ClientA:=N+1;ClientB:=JR;Nd
      sg:=0;G:=0;
      mfr:=CgPt[1].WCGPt;
      End;
      End;
      Tcor:=TX;

      M:=M+1;Age[M].TA:=1;Age[M].TB:=TX;Age[M].Oper:=
      1;Age[M].NClientA:=0;Age[M].NClientB:=JR;

      ISeq:=0;
      For NN:=1 to N do
        Begin
          IR:=Route[NN];
          (* Tempo de descarga cliente NN *)
          wd:=CgPt[NN].WCLI;
          Tdsc:=7.58+96.77*wd;

          (* Descarga no cliente J *)
          XA:=TCor+1;
          TX:=Tcor+Trunc(Tdsc+0.5)+1;
          XA:=TCor+1;XB:=TX;
          For I:=XA to TX do
            Begin
              With Ev[I] do
                Begin
                  Flag:='DESCG';IFlg:=3;T:=I;Ndsg:=NN;G:=0;
                  ClientA:=0;ClientB:=IR;
                  mfr:=CgPt[NN].WCGPt;
                  End;
                End;
                Tcor:=Tx;

                M:=M+1;Age[M].TA:=XA;Age[M].TB:=XB;Age[M].Oper
                :=4;Age[M].NClientA:=IR;Age[M].NClientB:=JR;
                End;
                End;

                (* Line-Haul de volta oa depósito *)
                IR:=Route[N];JR:=N+1;
                TLH:=60*WP[IR,JR]/Vh;
                TX:=Tcor+Trunc(TLH);
                XA:=TCor+1;XB:=TX;
                For I:=TCor+1 to TX do
                  Begin
                    With Ev[I] do
                      Begin

```

```

Flag:='LH_02';IFlg:=5;T:=I;Ndsg:=0;G:=0;
mfr:=CgRt[N+1].WCGRt;
ClientA:=IR;ClientB:=JR;
End;
End;
Tcor:=TX;

```

```

M:=M+1;Age[M].TA:=XA;Age[M].TB:=XB;Age[M].Oper
:=5;Age[M].NClientA:=IR;Age[M].NClientB:=JR;
NTT:=Tcor;Nevento:=M;
End;

```

```

Procedure Ver_Etapas;
Var I,J : Integer;
    Fr : Array[1..100] of Integer;
Begin
    For I:=1 to 100 do
        Fr[I]:=0;
    J:=0;
    For I:=1 to NTT do
        Begin
            With Ev[I] do
                Begin
                    Write(I:8,'          ',Flag,'
',IFlg:5,Ndsg:5,ClientA:5,ClientB:5,G:10:2);Readln;
                End;
            End;
        End;
    End;
End;

```

```

Procedure Grau_LineHaul1(IA,IB : Integer);
Var I,IR,JR : Integer;
    beta,dT,X,m,Z,GG : Real;
    G0,G1 : Real;
Begin
    IR:=Route[N+1];JR:=Route[1];
    dT:=60*WP[IR,JR]/Vh;
    m:=CgPt[1].WCGPt;beta:=-0.002303;
    G0:=Gin;
    For I:=IA to IB do
        Begin
            IF (IA = 1) then GG:=G0 else GG:=EV[I-1].G;

```

```

X:=I-IA;
Ev[I].G:=GG*(Exp(beta*X/m));
If (Ev[I].G < GT) then Ev[I].G:=GT;
GG:=Ev[I].G;
End;
End;

```

```

Procedure Beta_Descarga(IA,IB,ISQ : Integer;
    G0 : Real;
    Var G1 : Real);
Var Tamb,f,m : Real;
    a0,a1,a2 : Real;
    wd,Tdsc,X : Real;
Begin
    m:=CgPt[ISQ].WCGPt;
    wd:=CgPt[ISQ].WCLI;
    Tdsc:=7.58+96.77*wd;
    X:=(IB+IA)/2;
    Temperatura_Ambiente(X,Tamb);
    a0:=exp(-1.16488);
    a1:=0.46726;
    a2:=0.00085;
    f:=a0*exp(a1*ln(Tamb));
    f:=f*exp(a2*Tdsc/m);
    G1:=f*G0;
End;

```

```

Procedure Grau_Descarga(IA,IB,KA,KB,ISQ : Integer);
Var I : Integer;
    X,G0,G1,GG,m,beta : Real;
Begin
    G0:=Ev[IA-1].G+DeltaG;
    Beta_Descarga(IA,IB,ISQ,G0,G1);
    X:=IB-IA;m:=CgPt[ISQ].WCGPt;
    beta:=ln(G1/G0)/(X/m);
    GG:=G0;
    For I:=IA to IB do
        Begin
            X:=I-IA;

```

```

    Ev[I].G:=GG*exp(beta*X/m);
End;
End;

Procedure Beta_Travel(IA,IB,ISQ : Integer;
    G0 : Real;
    Var G1 : Real);
Var X,m,f,dT : Real;
    a0,a1,a2,Tamb : Real;
    KA,KB : Integer;
Begin
KA:=CgRt[ISQ].Ncli_A;
KB:=CgRt[ISQ].Ncli_B;
m:=CgRt[ISQ].WCGRt;
X:=WP[KA,KB];
dT:=60*X/Vz;
a0:=exp(0.089400);
a1:=-0.074457;
a2:=0.101594;
f:=a0*exp(a1*ln(dT));
f:=f*exp(a2*ln(m));
G1:=f*G0;
If (G1 > G0) then G1:=G0;
End;

Procedure Grau_Desloc(IA,IB,KA,KB,ISQ : Integer);
Var G0,G1,GG,X,m : Real;
    beta,GGamb : Real;
    I : Integer;

    dd,Tdd : Real;
Begin
G0:=Ev[IA-1].G;
Beta_Travel(IA,IB,ISQ,G0,G1);
X:=IB-IA;m:=CgRt[ISQ].WCGRt;
beta:=ln(G1/G0)/(X/m);
GG:=G0;
For I:=IA to IB do
Begin
X:=I-IA;
Ev[I].G:=GG*exp(beta*X/m);
End;
End;

```

```

End;

Procedure Grau_LineHaul2(IA,IB : Integer);
Var beta,GG,X,m,dT,dd,GGamb : Real;
    I,KA,KB : Integer;
Begin
m:=CgRt[N].WCGRt;
KA:=Route[N];KB:=N+1;
dd:=WP[KA,KB];
dT:=60*dd/Vz;
X:=(IB+IA)/2;
Temperatura_Ambiente(X,GGamb);
beta:=-0.0085;
GG:=Ev[IA-1].G;
For I:=IA to IB do
Begin
X:=I-IA+1;
Ev[I].G:=GG*Exp(beta*X);
If (Ev[I].G < GT) then Ev[I].G:=GT;
GG:=Ev[I].G;
End;
End;

Procedure Temperaturas;
Var I,J,IA,IB,M,KA,KB,ISQ,TT : Integer;
Begin
For M:=1 to Nevento do
Begin

(* Line-Haul 1 *)
If (Age[M].Oper = 1) then
Begin
IA:=1;IB:=Age[M].TB;
Grau_LineHaul1(IA,IB);
End;

(* Descarregamento de produto *)
If (Age[M].Oper = 3) then
Begin
KA:=Age[M].NclientA;KB:=Age[M].NclientB;
IA:=Age[M].TA;IB:=Age[M].TB;

```

```

ISQ:=Age[M].Iseq;
Grau_Descarga(IA,IB,KA,KB,ISQ);
End;

(* Deslocamento entre clientes *)
If (Age[M].Oper = 4) then
Begin
KA:=Age[M].NClientA;KB:=Age[M].NClientB;
IA:=Age[M].TA;IB:=Age[M].TB;
Grau_Desloc(IA,IB,KA,KB,ISQ);
End;

(* Line-Haul 2 *)
If (Age[M].Oper = 5) then
Begin
IA:=Age[M].TA;IB:=Age[M].TB;
Grau_LineHaul2(IA,IB);
NLimit:=IA-1;
End;

End;
End;
Procedure Evaluation;
Var mu,sigma,S1,x1,x2,Cpk,Dx,Check,Pteta : Real;
M,Ix,I,J,IR,JR : Integer;
Begin
S1:=0.0;NLimit:=Position[N];
For M:=2 to NLimit do
Begin
S1:=S1+Ev[M].G;
End;
mu:=S1/(NLimit-1);
S1:=0.0;
For M:=2 to NLimit do
S1:=S1+Sqr(Ev[M].G-mu);
sigma:=S1/(NLimit-1-1);
sigma:=Sqr(sigma);

(* Calculo de Cp *)

Ix:=0;
For M:=2 to Nlimit do

```

```

Begin
If ((mu - Ev[M].G) >= 0) then Ix:=Ix+1;
End;
Pteta:=Ix/(NLimit-1);
Check:=Abs(1-2*Pteta);
Dx:=1+Check;
Cp:=(GmaxS-GminS)/(3*2*sigma*Dx); (* 6 sigma! *)

(* Cálculo de Cpk *)

x1:=(GmaxS-mu)/(6*Pteta*sigma);
x2:=(mu-GminS)/(6*(1-Pteta)*sigma);
If (x1 <= x2) then Cpk:=x1 else Cpk:=X2;

(* Distância percorrida na rota *)
DRota:=0;
For I:=1 to N-1 do
Begin
IR:=Route[I];JR:=Route[I+1];
DRota:=DRota+WP[IR,JR];
End;
IR:=N+1;JR:=Route[1];
DRota:=DRota+WP[IR,JR];
JR:=Route[N];
DRota:=DRota+WP[IR,JR];
Check:=-100;
If ((Cpk >= Check) and (DRota <= 500) ) then
Begin
With UmOut do
Begin
For I:=1 to N do
Rota[I]:=Route[I];
Indice1:=Cp;Indice2:=Cpk;
XRota:=DRota;
End;
Write(ArqOut,UmOut);
End;
End;

Procedure Segmented_Evaluation;
Var mu,sigma,S1,x1,x2,Cpk,Dx,Check,Pteta : Real;

```

```

M,Ix,I,J,IR,JR,NL,JJ : Integer;
Begin
For JJ:=1 to N do
Begin
S1:=0.0;NL:=Position[JJ];
For M:=2 to NL do
Begin
S1:=S1+Ev[M].G;
End;
mu:=S1/(NL-1);
S1:=0.0;
For M:=1 to NL do
S1:=S1+Sqr(Ev[M].G-mu);
sigma:=S1/(NL-1-1);
sigma:=Sqrt(sigma);

(* Calculo de Cp *)

Ix:=0;
For M:=2 to NL do
Begin
If ((mu - Ev[M].G) >= 0) then Ix:=Ix+1;
End;
Pteta:=Ix/(NL-1);
Check:=Abs(1-2*Pteta);
Dx:=1+Check;
Cp:=(GmaxS-GminS)/(3*2*sigma*Dx); (* 6 sigma! *)

(* Cálculo de Cpk *)

x1:=(GmaxS-mu)/(6*Pteta*sigma);
x2:=(mu-GminS)/(6*(1-Pteta)*sigma);
If (x1 <= x2) then Cpk:=x1 else Cpk:=X2;
Writeln(' ',JJ:5,' ',NL:5,' ',Cpk:10:2);
End;
End;
Procedure Arq_Texto;
Var Nome,SS : String[30];
Sx : String[30];
I : Integer;
Begin
Nome:='GRAU_TSP.TXT';

```

```

Assign(ArqG,Nome);
ReWrite(ArqG);
SX:='N ';
Write(ArqG,SX);
SX:='G ';
Write(ArqG,SX);
Writeln(ArqG);
For I:=1 to NTT do
Begin
With Ev[I] do
Begin
STR(I:10,SS);Write(ArqG,SS);
STR(10*G:10:0,SS);Write(ArqG,SS);Writeln(ArqG);
End;
End;
Close(ArqG);
End;

Procedure Gera_Roteiro_1;
Begin
Route[N+1]:=N+1;Route[1]:=1;Route[2]:=4;Route[3]:=5;Route[4]:=8;Route[5]:=7;Route[6]:=6;

Route[7]:=9;Route[8]:=10;Route[9]:=11;Route[10]:=12;Route[11]:=3;Route[12]:=2; (* TSP 1 *)
End;

Procedure Gera_Roteiro_2;
Begin
Route[N+1]:=N+1;Route[1]:=2;Route[2]:=3;Route[3]:=12;Route[4]:=11;Route[5]:=10;Route[6]:=9;

Route[7]:=6;Route[8]:=7;Route[9]:=8;Route[10]:=5;Route[11]:=4;Route[12]:=1; (* TSP 2 reverse *)
End;
Procedure Gera_Roteiro;
Var Ok : Array[1..12] of Boolean;
Flag : Boolean;
I,NNN : Integer;
r : Real;

```

```

Begin
  For I:=1 to N do
    Ok[I]:=True;
  For I:=1 to 12 do
    Begin
      Flag:=False;
      While (Flag = False) do
        Begin
          r:=Random;
          NNN:=Trunc(r*12+0.5);
          If (Ok[NNN] = True) Then
            Begin
              Flag:=True;
              Ok[NNN]:=False;
              Route[I]:=NNN;
            End;
          End;
        End;
      Route[N+1]:=N+1;
    End;

  Procedure Ve_Result;
  Var I : Integer;
      A : Real;
  Begin
    A:=1.0E+10;
    Assign(ArqOut,'OUT_PUT');
    ReSet(ArqOut);
    While not Eof(ArqOut) do
      Begin
        Read(ArqOut,UmOut);
        With UmOut do
          Begin
            For I:=1 to N do
              Begin
                Write(Rota[I]:5);
              End;
            Writeln;Writeln('Cpk = ',Indice2:7:2);
            Write('Extensão (km)',XRota:6:1);Readln;
            If (XRota < A ) then
              Begin
                TOut:=UmOut;
                A:=XRota;
              End;
            End;
          End;
        End;
      End;
    End;
  End;

  If (Caso = 2) then Close(ArqOut);
End;

Begin
  N:=12;

  TITULO:='ROTEIRO SIMULATED ANNEALING';
  (* Roteiro obtido com Simulated Annealing *)

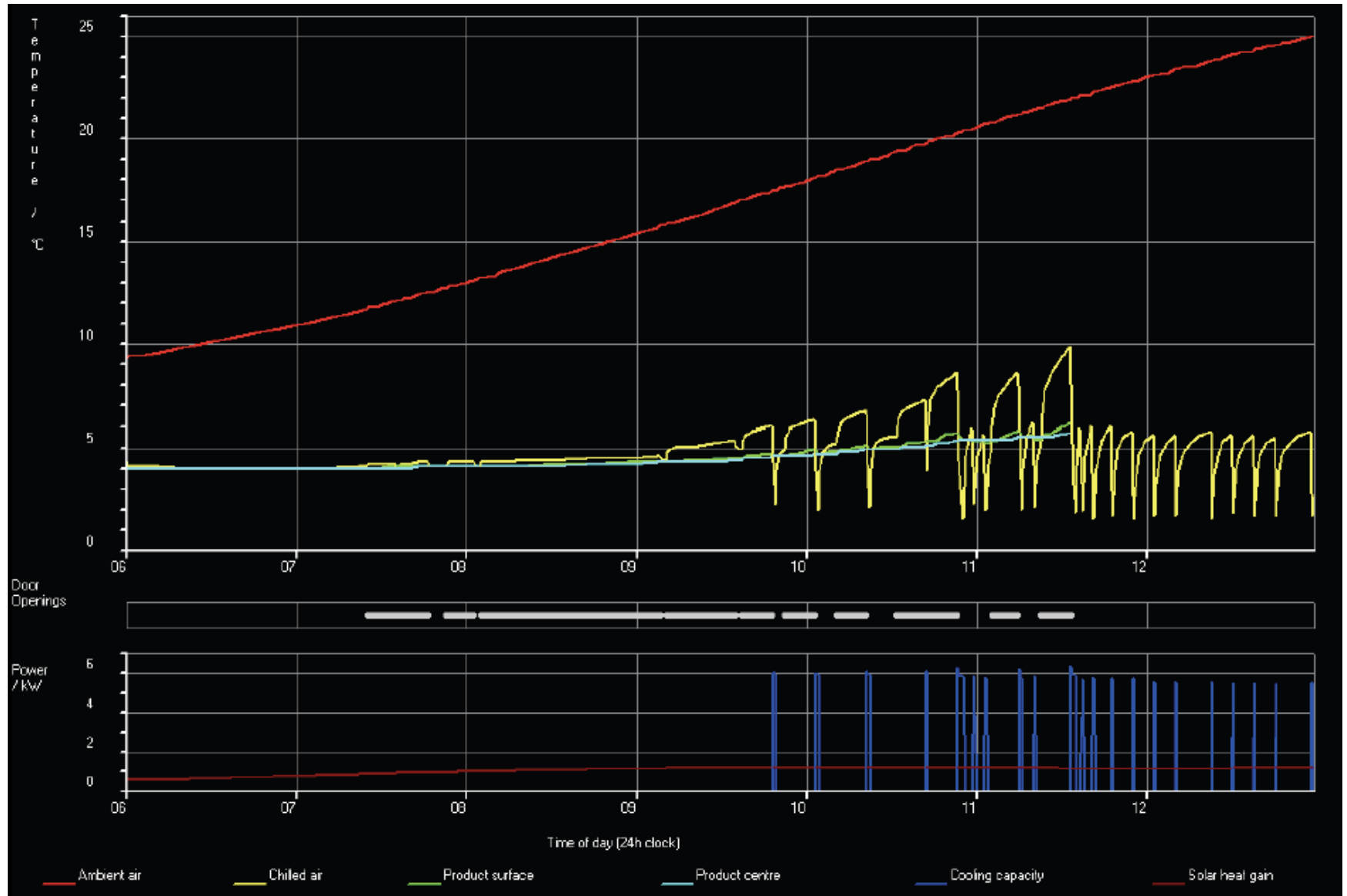
  Route[N+1]:=N+1;Route[1]:=8;Route[2]:=7;Route[3]:=4;Route[4]:=6;Route[5]:=9;Route[6]:=10;

  Route[7]:=11;Route[8]:=3;Route[9]:=12;Route[10]:=5;Route[11]:=2;Route[12]:=1; (* Tour Simulated Annealing *)

  Dados_Gerais;
  Dados_Especificos;
  Assign(ArqOut,'OUT_PUT');
  ReWrite(ArqOut);
  Eventos_na_Rota;
  Temperaturas;
  (* Ver_Etapas; *)
  Writeln(TITULO);Writeln;
  Evaluation;
  Writeln('Descarga nº Instante (min) Cpk');Writeln;
  Segmented_Evaluation;
  Writeln;Writeln;Writeln('Roteiro');
  Ve_Result;
  Arq_texto;
  Close(ArqOut);
  ClrScr;
  Readln;
End.

```


Apêndice 6: Resultados Simulação CoolVan



A. Van Detail

Truck Volkswagen Model 8150 diesel-powered (143 hp).

1. Truck internal dimensions (Lincoln): 5.0 X 2.3 X 2.2= 25.3 m³

2. Racking: No Racking

3. Insulation and Wall: Thickness (m) = 0.1; Density (Kg/m³) = 40; k Walls (W/mk) = 0,023; Cp Walls (kJ/kgK) = 1,6

4. Open Protection: No Protection

5. Insulation Ageing: Simulation with a New Van

Internal loading factor: $\pm 79\% \rightarrow 20.2 \text{ m}^3$

Product Density (kg/m³) = Embedded (ham, turkey breast, chicken breast, salami, sausage) $\rightarrow \pm 850 \text{ Kg/m}^3$

Result: cargo load $\pm 12,000\text{kg} \pm 12 \text{ tons}$

Temperature of the cargo upon loading: 5° C

Thermal gradient when opening the door: 3° C

B. Product Detail

Embedded: processed meat as ham, turkey breast, chicken breast, salami, sausage, etc.

Refrigerated product (not frozen)

Allowed temperature variation: 0° C to 8° C

1. Product: Sausages

2. Initial Mass of Food (Kg): 12.000 Kg

3. Initial Temperature of Food (°C): 4°C

4. Packaging: Un-or individually wrapped in trays

C. Environment detail

Simulation for a typical day in Brazil. Maximum and minimum averages of São Paulo in February of 2012.

1. Type of UK Day: Hot

2. Month: July (As the software works with types of UK day we are trying that closer to Brazil day. Therefore, I pick-up July because it is summer in Europe. The software is adapted to the climate of England.

3. Relative Humidity: 70%

4. Cloud Cover: 40% (sunny spells)

5. Mean Daily Temperature: 18°C

6. Maximum Daily Temperature: 28°C

D. Fridge Detail:

Example Article Lincoln: The cooling equipment was installed in the chamber Transfrigor brand, model RB-TF6.4 MAXI, and used the refrigerant R404A. The compressor SANDEN brand, model SD7H15 with seven piston, fixed displacement total of 154.7 mL and maximum speed of 6000 rpm.

1. Types of Refrigeration: Vapour Comp of Van Engine

2. Thermostat: 4°C

3. Refrigeration Details:

Rated Refrigeration Capacity (kW): 17530 BTU/h = 5,14 kW

Chilled air temperature (°C): 4°C

Ambient Temperature (°C): 28°C

E. Journey Detail:

1. Type of Trip: Complex Journey

✓ Number of delivery stops: 12

✓ Delivery sequence (travelling salesman problem sequence):

Depot – 1 – 4 – 5 – 8 – 7 – 6 – 9 – 10 – 11 – 12 – 3 – 2 – Depot

2. Complex Journey Information:

Delivery Time (24 h Clock):

Time Van is stopped (mim) = Time door is open (mim)

Position	Leave Depot	Delivery time (24h)	Distance from last delivery (miles)	Time van is stopped (mins)	Time door is open (mins)	% of product removed from total (1200 kg full Van)
Depot - 1	300 kg	6h00	52,38	10	10	2,5
1 - 4	300 kg		0,99	10	10	2,5
4 - 5	300 kg		1,8	10	10	2,5
5 - 8	7000 kg		0,75	64	64	58,33
8 - 7	2000 kg		0,56	24	24	16,66
7 - 6	300 kg		0,81	10	10	2,5
6 - 9	300 kg		1,55	10	10	2,5
9 - 10	300 kg		2,61	10	10	2,5
10 - 11	300 kg		3,54	10	10	2,5
11 - 12	300 kg		0,37	10	10	2,5
12 - 3	300 kg		3,85	10	10	2,5
3 - 2	300 kg		2,36	10	10	2,5
2 - Depot	-		53,69	-	-	-

I. Travelling distances and Time the van is stopped at each delivery:

Depot - 1 : 84.3 km = 52,38 Miles (speed 60 km/h)

1 - 4: 1.6 km = 0,99 miles (speed 30 km/h = 37,28 miles/h)

4 - 5 : 2.9 km = 1,8 miles (speed 30 km/h = 18,64 miles/h)

5 - 8 : 1.2 km = 0,75 miles (" " " " " ")

8 - 7 : 0.9 km = 0,56 miles (" " " " " ")

7 - 6 : 1.3 km = 0,81 miles (" " " " " ")

6 - 9: 2.5 km = 1,55 miles (" " " " " ")

9 - 10: 4.2 km = 2,61 miles (" " " " " ")

10 - 11: 5.7 km = 3,54 miles (" " " " " ")

11 - 12: 0.6 km = 0,37 miles (" " " " " ")

12 - 3: 6.2 km = 3,85 miles (" " " " " ")

3 - 2 : 3.8 km = 2,36 miles (" " " " " ")

2 - Depot : 86.4 km = 53,69 miles (speed 60 km/h = 37,28 miles/h)

II. Deliver loads:

Retail points:

Number 8 : 7,000 kg → 64 min, time of discharge (Van Stopped in deliver)

Number 7: 2,000 kg → 24 min, time of discharge (Van Stopped in deliver)

Remaining 10 points: 300 kg each → 10 min, time of each discharge (Van Stopped in deliver).

Total truck load: 12,000 kg

Apêndice 7: Artigo aceito e apresentado no congresso nacional da Anpet 2012

Carvalho, C.C., Novaes, A.G., Lima Jr., O.F. A logística da distribuição de produtos alimentícios refrigerados: problemas e perspectivas no contexto brasileiro. In: XXVI ANPET - Associação Nacional de Ensino e Pesquisa em Transporte, 2012, JOINVILLE - SC.

A LOGÍSTICA DA DISTRIBUIÇÃO DE PRODUTOS ALIMENTÍCIOS REFRIGERADOS: PROBLEMAS E PERSPECTIVAS NO CONTEXTO BRASILEIRO

Carolina Corrêa de Carvalho¹

Antônio Galvão Novaes²

Orlando Fontes Lima Júnior¹

Laboratório de Aprendizagem em Logística e Transportes – LALT
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP¹
Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas²
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

RESUMO

Na cadeia do frio, o controle da temperatura é fator determinante para manter a qualidade e prolongar o *shelf life* de produtos alimentícios. Desse modo, qualquer alteração desse parâmetro fora da faixa padrão pode levar a danos e perdas de produtos. O problema da distribuição de produtos refrigerados é de grande importância atualmente e vem sendo cada vez mais estudado. O objetivo do trabalho é abordar, de forma preliminar, o problema da distribuição de produtos refrigerados a partir do desenvolvimento de um modelo de simulação genérico que permite analisar a variação da temperatura ao longo de um roteiro de distribuição de produtos refrigerados. Uma simulação paramétrica foi realizada com base em dados secundários possibilitando um melhor entendimento do processo e apontando para a necessidade de investigações mais próximas de cenários realistas, envolvendo condições dinâmicas no processo de distribuição de carga refrigerada.

ABSTRACT

Temperature control in the cold chain is a determinant factor to maintain the quality and the shelf life of food products. Thus, any variation of such a parameter outside the standard levels can lead to product injuries and losses. The distribution problem of refrigerated products has great importance today and has been extensively studied. The objective of this paper is to focus the problem of analyzing temperature variation along a route when delivering refrigerated products, based on a preliminary generic simulation model. Such parametric simulation was based on secondary data, leading to a better understanding of the distribution process, indicating the way to investigate scenarios closer to reality, and also incorporating dynamic conditions in the process of distributing refrigerated products.

1. INTRODUÇÃO

O desafio da cadeia do frio é assegurar, à mercadoria transportada, um ambiente adequado e contínuo ao longo da mesma para que se garanta sua qualidade durante todos os processos envolvidos, como armazenamento, conservação, distribuição, transporte e manipulação dos produtos, até o consumidor final (Zhang, Sun, e Li, 1994; Ruiz-Garcia *et al.*, 2007; IIR 2004). Nesses processos as condições ambientais devem ser específicas à carga e têm como variável chave a temperatura. Dependendo do tipo de carga transportada, outros parâmetros de controle devem ser monitorados, tais como umidade, atmosfera modificada, pressão, etc., a fim de preservar as características intrínsecas do produto manipulado.

Desse modo, a importância dos ajustes da refrigeração na cadeia alimentícia se dá pelo fato de que, qualquer rompimento do frio pode ocasionar danos à qualidade e levar até à perda do produto. As velocidades das reações químicas, bioquímicas e microbiológicas observadas nos produtos refrigerados ou congelados estão diretamente relacionadas à temperatura, o que influencia sua sanidade e qualidade nutricional, física e sensorial desses produtos. Portanto, assegurar temperaturas adequadas ao produto voltado à comercialização durante todos os processos envolvidos na cadeia produtiva do frio, é essencial (Pereira, *et al.*, 2010; IIR, 2004).

Segundo Heap, Kierstan e Ford (1998) a perda de qualidade do produto é cumulativa e irreversível, o que ressalta, ainda mais, a necessidade de conhecer e respeitar os limites mínimos e máximos de temperaturas necessários para manter os atributos essenciais que caracterizam o produto comercializado. Temperaturas mais altas podem ocasionar danos à mercadoria; no entanto, a baixa temperatura pode também provocar avarias e comprometer o produto final. Perdas e danos de mercadorias perecíveis durante o armazenamento e transporte são questões substancialmente globais e que, pela sua importância, exigem soluções logísticas que possam oferecer operações adequadas de transporte, estocagem e transferência e que garantam a qualidade dos produtos. *The Cool Chain Association* (CCA) estima que 30% dos produtos sensíveis à temperatura são perdidos durante o transporte (Hoffman, 2006). Um estudo publicado por While (2007) e conduzido em Beverly, Massachusetts, mostra que há uma variação significativa da temperatura no processo de transporte da cadeia do frio, onde 30% das viagens do fornecedor ao centro de distribuição sofrem aumento de temperatura e 19% dos casos apresentam temperatura abaixo do especificado. Por outro lado, nas viagens ocorridas desde o centro de distribuição até o varejo, esses índices são de 15% e 36% respectivamente. Isto mostra que o transporte é um ponto crítico dentro dos processos envolvidos na cadeia do frio e deve ser monitorado com o objetivo de minimizar perdas e danos das mercadorias, melhorando assim o seu nível de serviço.

Nesse contexto, nota-se um aumento significativo de artigos na literatura científica que apontam para a necessidade de priorização do monitoramento e controle da temperatura no processo de distribuição de alimentos perecíveis. Muitos desses trabalhos apresentam modelos matemáticos que procuram explicar o comportamento da mercadoria transportada em função do ambiente de acondicionamento e de transporte, como também em função do tempo de duração do processo de distribuição (Bandurina, Majic e Pavlin, 2011; Estrada Flores e Eddy, 2006; Kourti, 2006; Lui, Higgins e Tan, 2010; Pereira, *et. al.*, 2010; Tijssens e Polderdijk, 1996; Wanteman, 2012; Zhang, Sun, e Li, 1994). Em geral, modelos de roteirização buscam minimizar custos operacionais, quase sempre expressos indiretamente através do tempo e da distância percorrida pelo veículo. Na sua grande maioria, a otimização da roteirização é obtida com a aplicação de uma heurística do tipo PCV (Problema do Caixeiro Viajante). No entanto, e como se verá adiante, no processo de roteirização de um veículo envolvendo a distribuição de produtos refrigerados ou congelados, a variação da temperatura não é linear. Além disso, a matriz de custos não é simétrica, exigindo modelagem matemática específica, e obviamente mais complexa.

Assim, abordaremos – ainda em forma preliminar – o problema da distribuição de produtos refrigerados, mostrando suas especificidades e apontando para os avanços metodológicos futuros, que serão investigados proximamente. O foco central dessas pesquisas é conjugar a otimização de atributos que preservem a qualidade do produto no processo de distribuição, juntamente com a modelagem clássica de roteirização, levando a uma modelagem de otimização integrada e híbrida. Essa conjugação desses dois aspectos não é corrente na literatura, embora diversos autores analisem e discutam modelos matemáticos ligados à qualidade e perecibilidade de alimentos. Por exemplo, um trabalho que traz um modelo conceitual importante de qualidade, é o de Tijssens e Polderdijk (1996). Os autores formulam um modelo genérico para alimentos perecíveis, denominados de *Keeping Quality*, que exprime o tempo máximo que o produto suporta no ambiente exposto, antes de ser descartado por falta de qualidade. Tal modelo baseia-se na cinética da redução dos atributos de qualidade e incluem efeitos de temperatura, danos

causados pelo frio, níveis iniciais de qualidade do produto e diferentes limites de aceitação do consumidor frente às diversas culturas regionais.

O trabalho está estruturado em quatro seções, além da Introdução: 1) revisão bibliográfica, abordando aspectos operacionais na distribuição de produtos alimentícios refrigerados e trabalhos voltados a modelos de distribuição na cadeia do frio que visem à manutenção da qualidade; 2) análise metodológica mostrando as diferenças fundamentais entre o processo de roteirização clássico e o problema de distribuição de alimentos refrigerados; 3) análise paramétrica, mostrando resultados numéricos comparativos; 4) conclusões e indicações das próximas etapas da pesquisa.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Aspectos operacionais na distribuição de produtos alimentícios refrigerados

A distribuição de produtos refrigerados é apenas uma parte da cadeia do frio. Na realidade, a cadeia do frio se inicia logo após a colheita de produtos agrícolas ou o abate de animais destinados à alimentação Tijksens e Polderdijk (1996). Um aspecto importante na distribuição de produtos alimentícios refrigerados é o monitoramento das condições térmicas dos mesmos, que afetam sua qualidade alimentar (Estrada-Flores e Eddy, 2006; James *et al*, 2006; Pereira *et al.*, 2010). É reconhecido amplamente pelas autoridades sanitárias, indústrias e empresas varejistas de renome que os vários estágios que formam a cadeia do frio, tais como pontos de transferência, instalações de armazenagem e unidades transportadoras constituem segmentos críticos do processo, requerendo monitoramento constante e adequado. Por exemplo, no carregamento de produtos refrigerados para distribuição, a carga deve ser embarcada com a temperatura situada dentro da faixa prescrita, pois a unidade de refrigeração do veículo não é projetada para resfriá-la, mas sim mantê-la dentro dos padrões adequados (Estrada-Flores e Eddy, 2006; Pereira *et al*, 2010). Em muitos casos ocorrem esperas excessivas nas plataformas de embarque, a armazenagem no depósito não é adequada, o processo de carregamento e descarga ocorre lentamente com a porta do veículo aberta durante tempo apreciável, etc., levando à elevação da temperatura além do permitido. De uma maneira geral, produtos alimentícios refrigerados que não sejam empacotados, transportados e armazenados apropriadamente, tendem a se deteriorar em tempo relativamente mais curto (Giannakourou *et al*, 2005).

2.2. Modelos de análise da qualidade do produto na cadeia do frio

Atualmente, é crescente o número de trabalhos que discutem as dificuldades operacionais e de controle de qualidade encontradas na cadeia do frio, buscando formular modelos matemáticos que representem adequadamente os problemas, e de forma a respeitar as variáveis e restrições requeridas pela carga. O trabalho de Tijksens e Polderdijk (1996) traz uma definição de *keeping quality* e formula um modelo genérico para manter a qualidade em função do tempo e do ambiente de transporte. O chamado *keeping quality* se baseia no comportamento do produto (composto por fatores químicos, bioquímicos, físicos, etc.) e parte dos requisitos do consumidor (composto por fatores sensoriais, de aceitação, culturais, etc.), convergindo na determinação do tempo limite em que o produto se torna inaceitável. Esse tempo é representado como sendo inversamente proporcional à soma das taxas (curvas) de perda de qualidade (danos), e é baseado na cinética das reações químicas, incluindo os efeitos da temperatura, danos pelo frio, diferentes níveis de qualidade inicial e limites de aceitação da qualidade do produto. O autor discute que o

conceito básico do *keeping quality* é fornecer o Δt (o gradiente na variação do tempo) após o qual o produto será considerado inaceitável. Com isso é simplificado o processo tradicional de avaliação da qualidade, que se baseia no estado do produto frente às condições ambientais e ao tempo exposto, processo esse muito empírico e discutível. A Figura 1 mostra exemplos de representação de *keeping quality* conforme diferentes variações temporais.

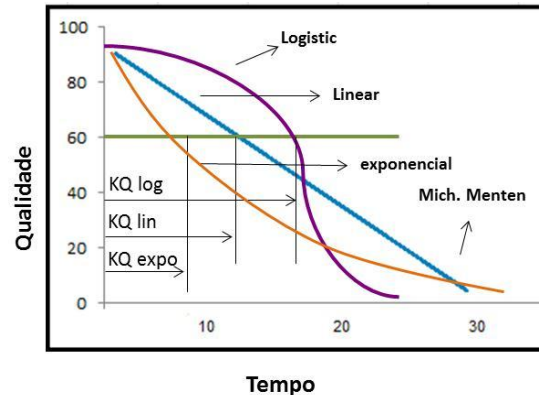


Figura 1: Redução da qualidade pelos diferentes tipos de funções
Fonte: Tijskens e Polderdijk (1996)

A equação 1 indica a formulação genérica do *keeping quality* (KQ) e compreende duas expressões: a função da qualidade $f(Q)$, que depende do tipo de cinética envolvida englobando os níveis de qualidade inicial (Q_0) e limite (Q_i); e a curva de reação da qualidade (k) que varia em função do temperatura e pode ser construída de acordo com a lei de Arrhenius (Chang, 1981).

$$KQ = \frac{f(Q)}{k} \quad (1)$$

Outro trabalho com abordagem semelhante é o de Zhang, Sun, e Li (1994), que elabora um novo método para a determinação rápida do coeficiente de transferência de calor K em veículos refrigerados e isolados. Através do cálculo da distribuição de temperatura no isolamento, utilizando o método de diferença finita, o novo modelo permite a realização de avaliações mais rápidas e adequadas para testes de controle de qualidade em veículos refrigerados, em ensaios de produção. Outros autores nessa linha de enfoque são Jacxsens, Devlieghere e Debevee (2001) que apresentam um método para definir *Shelf Life* em pacotes de vegetais minimamente processados. O trabalho exhibe mudanças na qualidade sensorial, proliferação de agentes patogênicos humanos e deterioração microrganismos em três produtos levemente processados e embalados em função da temperatura de armazenamento ao qual o produto foi exposto.

Lui, Higgins e Tan (2010) analisam e redesenham o processo de exportação de carga farmacêutica de alto valor agregado de uma empresa de medicamentos, com necessidade de controle de temperatura, no roteiro da Irlanda para os Estados Unidos. O trabalho utilizou a metodologia *e³-control*, modelo baseado em procedimentos de redesenho de metodologia de controle, que possibilitou mostrar a necessidade e viabilidade do fornecimento da temperatura da carga embarcada e dados relacionados à localização em tempo real. Estas informações disponibilizadas permitem um melhor controle do processo, cumprimento de exigências regulatórias e redesenho dos processos logísticos que favoreçam a qualidade da carga e atendam

suas especificações. Outro caso semelhante é o trabalho de Bandurina, Majic e Pavlin (2011) que mostra que há desvio de temperatura durante uma operação de transportes multimodal de produtos farmacêuticos a partir do depósito em Zagreb, Croácia ao centro de distribuição para o mercado dos EUA em Forest, Virgínia. A ferramenta utilizada é a temperatura média cinética (MKT - *Mean Kinetic Temperature*), que simula a influência dos diferentes desvios de temperatura no qual o produto foi submetido durante o período de monitorização (armazenamento e / ou distribuição). O estudo além de mostrar os desvios durante o processo de transporte, também aponta o risco de utilizar processos multimodais devido às operações de aeronaves serem menos estáveis.

Já o trabalho de Pereira, *et al.*, (2010) teve como objetivo apresentar uma fotografia de um caso real na distribuição de alimentos perecíveis refrigerados e congelados de uma empresa distribuidora brasileira. Esse trabalho avalia as condições de funcionamento do processo urbano de distribuição, como também analisa o efeito térmico da abertura de portas. Observou-se que há um forte incremento da temperatura nas aberturas de porta durante as entregas. Observou-se também a influência do número de paradas na variação da temperatura. Por outro lado, muitas vezes os veículos são obrigados a esperar antes da entrega da carga ao varejista, e nessas ocasiões é comum parar o motor, parando assim a refrigeração.

3. ASPECTOS METODOLÓGICOS

Embora não seja o único parâmetro que afeta a qualidade e a vida útil dos produtos refrigerados, a temperatura é uma variável importante na dinâmica da atividade microbiana, consequentemente afetando a vida útil do produto. Por isso, o monitoramento das condições de temperatura na cadeia do frio constitui um ponto de grande importância (Giannakourou *et al.*, 2005; Pereira *et al.*, 2010).

Na distribuição de produtos de uma forma geral, procura-se definir roteiros para os veículos de forma a reduzir os custos operacionais, o que é normalmente representado pela minimização do percurso total, em quilômetros. A otimização é então conseguida através da aplicação de uma heurística apropriada, formalizando-se um problema genericamente denominado de PCV – Problema do Caixeiro Viajante (Syslo *et al.*, 2006). No entanto, os métodos de resolução do PCV adotam matrizes de distâncias fixas entre os pontos a serem visitados, e tais matrizes são simétricas (isto é, a distância $d_{i,j}$ entre os pontos i e j , é igual à distância $d_{j,i}$ no sentido contrário). No caso da distribuição de produtos refrigerados e congelados essas propriedades não são observadas, porque o processo de variação da temperatura ao longo do tempo não é linear e a simetria na variação da temperatura ao longo do tempo não é observada (Zhang *et al.*, 1994; Estrada-Flores e Eddy, 2006; Pereira *et al.*, 2010). Isso pode ser observado através da Figura 2, em que é mostrada a variação de temperatura ao longo de um roteiro hipotético de distribuição de produtos refrigerados num determinado distrito. Nota-se que a variação da temperatura com o tempo não é linear. Se fosse invertida a sequência de entregas, poderia ser observado que o processo não é simétrico.

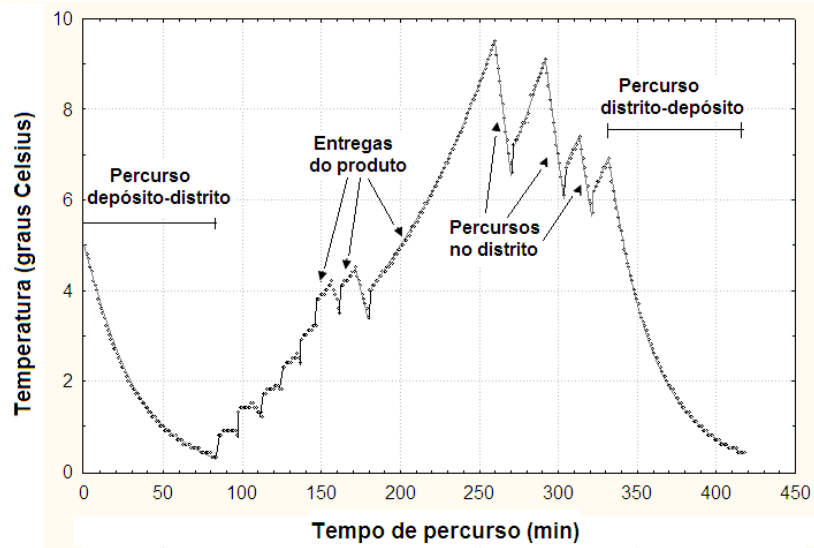


Figura 2: Variação da temperatura num roteiro hipotético de distribuição de produto refrigerado (fonte: os autores)

Observa-se, nos casos de distribuição de produtos refrigerados ou congelados, que a solução otimizada para a roteirização do veículo não é necessariamente a obtida com o PCV, exigindo então outro enfoque para se obter a solução ótima, que respeite também as restrições de variação de temperatura ao longo do roteiro. De fato, a variação da temperatura interna nos veículos refrigerados não é linear ao longo do tempo. Diversos modelos teóricos têm sido desenvolvidos para exprimir a transferência térmica no processo de refrigeração observada nos veículos (Zhang *et al*, 1994; Moureh e Derens, 2000; James *et al*, 2006). Zhang *et al* (1994) apresentam, entre outras formulações, a seguinte equação diferencial para exprimir a curva da temperatura em função do tempo, dentro do veículo

$$K = K_s - \frac{W}{A_R \cdot \theta} \left(\frac{d\theta}{d\tau} \right), \quad (2)$$

onde K é o coeficiente de transferência de calor ($W m^{-2}K^{-1}$), K_s é o coeficiente de transferência de calor na fase de regime ($W m^{-2}K^{-1}$), W é o equivalente em água do corpo do veículo ($J K^{-1}$), A_R é a área de transferência de calor (m^2), θ é a diferença de temperatura entre o ar interno e externo (K) e τ é o tempo (s). A integração da função (2) permite exprimir a variação da temperatura ao longo do tempo de percurso do veículo através de uma função teórica, não-linear, $\theta = f(\tau)$, cujas características dependem de inúmeros fatores.

Formas alternativas para estimar uma função desse tipo são também descritas na literatura como, por exemplo, medições em laboratório (Moureh e Derens, 2000; Estrada-Flores e Eddy, 2006; Garcia, 2008) ou levantamentos em campo (Giannakourou *et al*, 2005; Pereira *et al*, 2010). Muitos fatores influem nos resultados dessas medições: tipo de carga, faixa de variação permissível da temperatura, tipo e dimensões do veículo, tipo e características do equipamento de refrigeração, características do isolamento térmico, disposição interna da carga, existência ou não de cortina térmica na porta de acesso, precisão das medições, distância percorrida na distribuição, etc.

Uma vez de posse dos coeficientes das funções que representam empiricamente o processo de variação da temperatura, pode-se desenvolver um modelo representativo e simular temporalmente o processo, de modo a analisar parametricamente as condições operacionais e propor medidas mitigadoras que permitam melhorar as características de qualidade dos produtos transportados.

4. ANÁLISE PARAMÉTRICA

4.1 Estrutura do modelo

Com base em modelos de distribuição de produtos perecíveis desenvolvidos em pesquisas acadêmicas sob diferentes enfoques teóricos, em ambiente laboratorial (Estrada-Flores e Eddy, 2006) ou com base em levantamento de campo (Pereira, *et al*, 2010), desenvolvemos modelo de simulação que permite analisar, em caráter preliminar, a variação da temperatura ao longo de um roteiro de distribuição de produtos refrigerados. A simulação paramétrica baseou-se em dados secundários levantados na região de Campinas, SP e apresentados em Pereira *et al* (2010). Foi programada em linguagem Pascal, minuto-a-minuto no processo de distribuição, e considerando roteiros hipotéticos. As variáveis são: a distância entre o Centro de Distribuição (CD) e os distritos de entrega, o número de pontos atendidos, a área da zona atendida, além de outros parâmetros a serem apresentados a seguir. O produto em questão é frango eviscerado embalado em sacos plásticos, com densidade aproximada de 380 kg/m^3 e devendo ser mantido na faixa de temperatura entre 0° a 8° . O distrito a ser atendido é mostrado na Figura 3, apresentando 12 pontos de entrega que são interligados por um roteiro de percurso total mínimo, obtido através de um algoritmo de PCV (Problema do Caixeiro Viajante), do tipo 3-opt (Syslo *et al*, 2006).

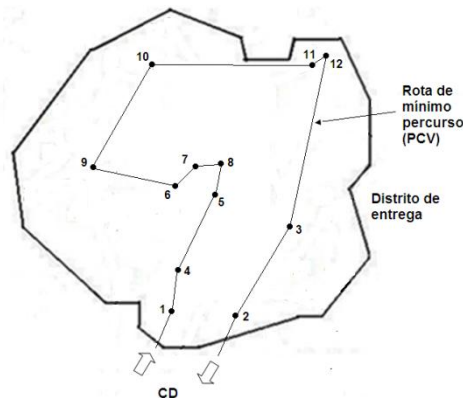


Figura 3 – Distrito genérico de distribuição de produto refrigerado, com 12 pontos de entrega

A área A do distrito influi indiretamente no processo de variação da temperatura da carga refrigerada através da distância entre os pontos de entrega. Desde que o roteiro de distribuição seja realizado seguindo a sequência do PCV, a distância média entre dois pontos de entrega consecutivos do roteiro pode ser estimado com razoável precisão através da fórmula (Daganzo, 1996; Novaes *et al*, 2000).

$$E[d_{i,i+1}] \cong 0,765 k \delta^{-1/2} \quad (2)$$

onde $d_{i,i+1}$ é a distância entre dois pontos de entrega consecutivos do roteiro, k é um fator para

corrigir o efeito da malha urbana sobre a distância Euclidiana (*route factor*) e δ é a densidade de pontos no distrito, dada por $\delta = N/A$, onde N é o número de pontos atendidos no roteiro. As distâncias $d_{i,i+1}$ ($i = 1, 2, \dots, N - 1$) influem no processo de variação da temperatura, pois enquanto o veículo transita dentro do distrito entre uma entrega e a seguinte, o equipamento de refrigeração vai reduzindo aos poucos a temperatura. E, se a distância $d_{i,i+1}$ for muito curta, o nível térmico da carga pode ir paulatinamente aumentando ao longo das paradas, eventualmente atingindo níveis inadequados.

Outra variável importante nesta análise é a distância (ou tempo) entre o CD e o distrito de distribuição do produto. À medida que o veículo se desloca do CD ao distrito, o equipamento de refrigeração vai atuando e baixando paulatinamente a temperatura, até o limite inferior ajustado no termostato. Muitas vezes a temperatura da carga no momento de carregamento do veículo é superior à ideal. Noutras vezes, há diferenças de temperatura significativas entre lotes de carga, e o percurso até o distrito ajuda na equalização térmica das parcelas embarcadas.

Uma terceira variável é o número de entregas a serem realizadas no distrito. Enquanto é feita a descarga num cliente, a porta de acesso ao veículo permanece aberta, com o motor parado. Como a unidade de refrigeração é acionada pelo motor principal, o processo de refrigeração cessa durante o tempo de descarga. Como consequência, a temperatura vai subindo paulatinamente. Veículos refrigerados modernos possuem uma cortina térmica na porta de acesso ao compartimento de carga, que reduz significativamente a absorção de calor do ambiente externo. A forma tecnologicamente mais avançada é uma cortina vertical de ar refrigerado, lançada de cima para baixo na porta de acesso, e formando uma barreira à troca de calor com o meio ambiente (Ge e Tassou, 2001). Outra forma mais barata é constituída por uma cortina de tiras de um plástico especial, colocadas verticalmente na porta, e que cedem à passagem dos carregadores e voltam à sua posição inicial logo que são liberadas. No Brasil é muito comum o travamento dessas tiras lateralmente à porta, ou lançadas sobre a carroceria do veículo sob a pretensa desculpa de facilitar a passagem de pessoas, mas com nefastas consequências na manutenção da qualidade do produto. Na simulação analisada neste trabalho esse efeito negativo é representado por um incremento discreto na temperatura (gradiente térmico) quando da abertura da porta. Outras variáveis são também consideradas numa simulação mais pormenorizada (por exemplo, Estrada-Flores e Eddy, 2006), mas a restrição de espaço e a natureza mais geral desta análise restringem um pouco nosso elenco de parâmetros.

4.2 Simulação paramétrica dos roteiros de entrega

A carroceria do veículo tem 5m de comprimento, 2,2 m de largura e 2,3 m de altura, e a câmara refrigerada tem um volume útil de cerca de 20 m^3 , levando a uma capacidade útil de carga aproximada de 7.600 kg. A faixa de variação permitida da temperatura do produto transportado é de 0°C a 8°C . Admitiu-se velocidade média de 60 km/h no trajeto entre o CD e a zona, e no percurso inverso ao fim da operação de entrega. Dentro do distrito (zona urbana) a velocidade média cai para 30 km/h. A temperatura ambiente externa ao veículo é de 32°C , refletindo o clima tropical da região.

As seguintes variáveis foram consideradas no modelo de simulação:

- D_h - distância do CD até o distrito (km), com valores de 10, 20, 40, 60 e 80 km;

- A – área do distrito (km^2), com valores de 10, 30 e 60 km^2 ;
- N - número de pontos de entrega no roteiro, com valores de 2, 5, 10, 15 e 20;
- $\Delta\theta$ – gradiente de temperatura na abertura da porta de acesso ao compartimento refrigerado por ocasião das descargas (grau centrígrado), com valores de 0° , 2° , 3° , 4° e 5° ;
- θ_{emb} – temperatura do produto no embarque da carga, com valores de 2° , 3° , 5° , 8° e 10° ;
- β – fração do tempo em que a temperatura da carga permanece dentro do intervalo estipulado, neste caso na faixa entre $0^\circ C$ a $8^\circ C$.

Inicialmente foram simulados 31 cenários, variando parametricamente as variáveis D_h , A , e N . A variável β dá a medida da qualidade do processo. Em cada cenário foram simulados 400 arranjos aleatórios de pontos de distribuição no distrito, obtendo-se o roteiro ótimo do PCV em cada situação, para, em seguida, realizar a simulação térmica. Quando β tende à unidade, o sistema de refrigeração cumpre integralmente sua função. Ao contrário, quando β tende a zero, o sistema não consegue atender às condições térmicas de conservação do produto. Através de regressão múltipla foi ajustada estatisticamente a seguinte função para exprimir β em função de D_h , A , e N .

$$\beta = 0,5961 + 0,5383 * 10^{-2} D_h - 0,2091 \ln(N) + 0,629 * 10^{-3} \ln(A), \quad (3)$$

com $R^2 = 0,942$, bastante satisfatório. No entanto, muito embora o intercepto e as variáveis D_h e N tenham apresentado t de Student significativo, o mesmo não ocorreu com a variável A , que por isso foi eliminada da equação, levando ao seguinte ajuste

$$\beta = 0,5981 + 0,5384 * 10^{-2} D_h - 0,2091 \ln(N), \quad (4)$$

com $R^2 = 0,948$ e todas as variáveis e intercepto estatisticamente significativos.

Utilizando a equação (4) para estimar valores de β em função dos dois parâmetros estatisticamente significativos e, em seguida comparando-os com os valores de β calculados previamente através da simulação, observou-se que a regressão fornece valores bem próximos aos simulados, como se pode observar na Figura 4. Dessa forma podemos realizar análises paramétricas dos resultados utilizando a função (4) como base.

A Figura 5, por sua vez, mostra a representação de β em função das variáveis D_h e N . Quanto mais o valor de β estiver próximo da unidade, melhor será o nível de qualidade térmica do processo de distribuição.

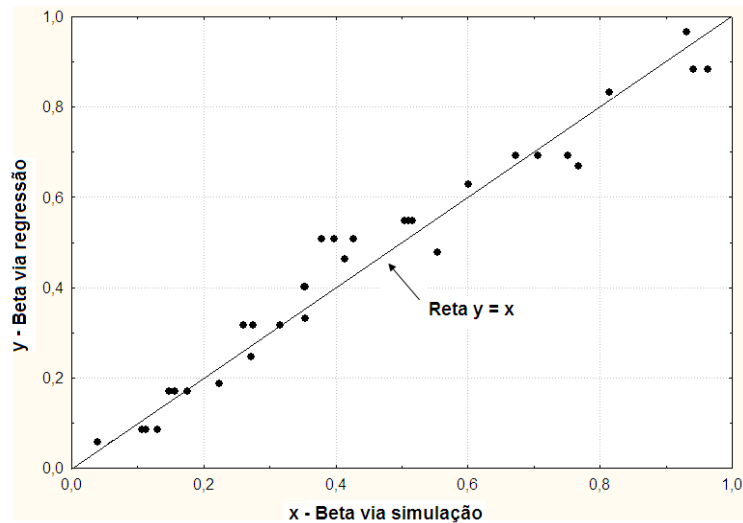


Figura 4 – Confronto entre os valores de β obtidos na simulação e os estimados via regressão

Dessa forma, o operador logístico deve operar sua frota preferencialmente dentro do retângulo mostrado à esquerda superior da Figura 5. Ou seja, os roteiros de distribuição devem realizar de uma a quatro entregas por viagem. Nos casos em que a demanda dos produtos corresponder a quantidades relativamente pequenas, o operador logístico deve utilizar veículos menores. No caso de distritos mais próximos do CD, o ideal é realizar uma ou duas entregas no roteiro e, paralelamente, utilizar veículos com maior capacidade de refrigeração, que permita redução mais rápida da temperatura nos trajetos do percurso.

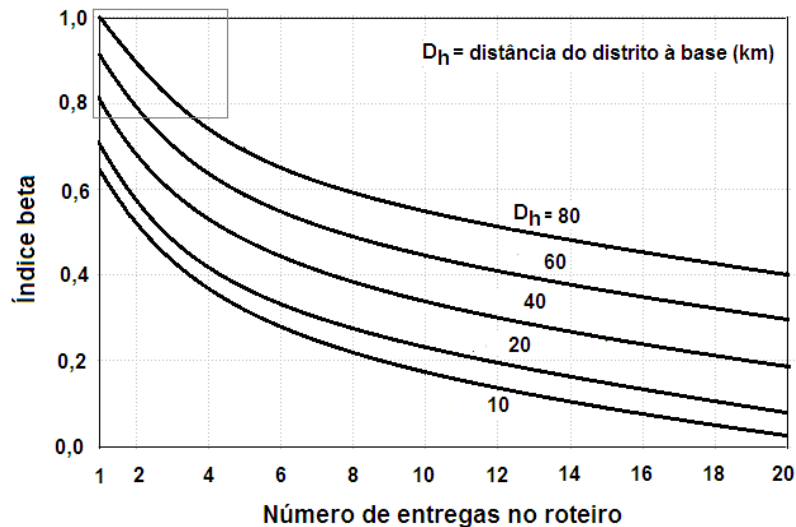


Figura 5 - Variação de β em função de N e D_h

Além da análise paramétrica anteriormente descrita, foi analisado o efeito da ocorrência de gradiente térmico $\Delta\theta$ quando da abertura da porta da câmara refrigerada, por ocasião das entregas. Para tanto foi admitido um distrito com uma área de 30 km^2 , situado a 20 km do CD, e

um roteiro de 5 entregas. O produto refrigerado é carregado no CD a uma temperatura de 5° C. Variou-se o gradiente térmico de 0 a 5° C, obtendo-se os resultados indicados na Tabela 1.

Tabela 1: Efeito do gradiente térmico $\Delta\theta$ no desempenho do sistema

Gradiente térmico $\Delta\theta$	β	θ mínimo (°C)	θ máximo (°C)
0° C	1,000	2,6	5,1
2° C	0,404	2,7	19,7
3° C	0,311	2,7	26,8
4° C	0,261	2,7	31,4
5° C	0,157	2,7	32,0

Os resultados indicados na Tabela 1 mostram alguns aspectos interessantes. Em primeiro lugar, a qualidade do tratamento térmico na distribuição do produto refrigerado, expressa pelo índice β , tende a cair rapidamente à medida que o gradiente térmico $\Delta\theta$ cresce. Em segundo lugar, e relacionado com o primeiro fator, a máxima temperatura observada no roteiro tende a atingir o limite superior que, no caso, é a temperatura ambiente externa, ou seja, 32 °C. Dessa forma, é de primordial importância instalar e manter uma cortina térmica eficaz no veículo refrigerado.

5. CONCLUSÕES E PRÓXIMAS ETAPAS

Muitos outros aspectos podem ser discutidos a partir de um modelo de simulação como o descrito neste trabalho. A ideia de se dispor de um modelo de simulação mais genérico é o de permitir o melhor entendimento do processo, buscando soluções que, uma vez definidas, podem ser simuladas em maior detalhe, variando para isso o porte do veículo, suas características técnicas e térmicas, a organização dos roteiros, a quantidade ideal de carga a transportar, tempos de espera nas entregas, etc. Numa próxima etapa da pesquisa o modelo será transformado numa simulação probabilística, permitindo a análise de cenários mais realistas, e envolvendo condições dinâmicas que permitam alterar as configurações do sistema sempre que fatores exógenos o exigirem. Por exemplo, no caso de uma entrega demorar muito mais do que o planejado, pode ser necessário alterar a sequência restante das entregas de forma a manter o ciclo térmico dentro dos níveis preconizados.

Agradecimento

Esta pesquisa foi apoiada financeiramente pela Capes, Projeto Bragecrim (Brasil/Alemanha), nº 2009-2.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Badurina, G., Majic, Z. e Pavlin, S. (2011) Evaluation of Air Transportation Under Controlled Room Temperature for Pharmaceuticals. *Traffic & Transportation*, Vol. 23, Nº 2, 121-130.
- Brecht, J.K.; Chau, K.V.; Fonseca, S.C., Oliveira, F.A.R.; Silav, F.M.; Nunes, M.C.N. e Bender, R. J. (2003). Maintaining optimal atmosphere conditions for fruits and vegetables throughout the postharvest handling chain. *Postharvest Biology and Technology*, v. 27, n. 1, p. 87-101.
- Chang, R. (1981). *Physical Chemistry With Applications to Biological Systems*. Macmillan Publishing Co., New York.
- Daganzo, C.F. (1996). *Logistics Systems Analysis*, Springer, Berlin.
- Estrada-Flores, S. e Eddy, A. (2006). Thermal Performance Indicators for Refrigerated Road Vehicles, *International Journal of Refrigeration*, V. 29, pp. 889-898.
- Garcia, L.R. (2008). *Development of monitoring applications for refrigerated perishable goods transportation*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.

- Ge, Y.T. e Tassou, S.A. (2001). Simulation of the Performance of Single Jet Air Curtains for Vertical Refrigerated Display Cabinets, *Applied Thermal Engineering*, V. 21, pp. 201-219.
- Giannakourou, M.C.; Koutsoumanis, K.; Nychas, G.J. e Taoukis, P.S. (2005), Field Evaluation of the Application of Time Temperature Integrators for Monitoring Fish Quality in the Chill Chain, *International Journal of Food Microbiology*, V. 102, pp. 323-336.
- Heap, R.; Kierstan, M.; Ford, G. (1998), Food transportation. Londres: Blackie Academic & Professional.
- Hoffman, W. (2006). Hot Market, Cool Freight. *Journal of Commerce*.
- International Institute Of Refrigeration – IIR (2004). Temperature indicators and time-temperature integrators: *3rd informatory note on refrigeration and food*. Paris.
- Jacxsens, Devlieghere e Debevee (2001) Temperature dependence of shelf-life as affected by microbial proliferation and sensory quality of equilibrium modified atmosphere packaged fresh produce. *Postharvest Biology and Technology*. N. 26. 59–73.
- James, S.J.; James, C. e Evans, J.A. (2006) Modelling of Food Transportation Systems – a Review, *International Journal of Refrigeration*, V. 29, pp. 947-957.
- Kourti, T. (2006) The Process Analytical technology initiative and multivariable process analysis, monitoring and control. *Anal Bioanal Chem*, 384, 1043-1048.
- Lui J., Higgins, A., Tan, Y. (2010) IT enabled redesign of export procedure for high-value pharmaceutical product under temperature control: the case of Drug Living Lab. *Proceedings of the 11th Annual International Conference on Digital Government Research*.
- Moureh, J. e Derens, E. (2000). Numerical Modelling of the Temperature Increase in Frozen Food Packaged in Pallets in the Distribution Chain, *International Journal of Refrigeration*, V. 23, pp. 540-552.
- Novaes, A.G.; Cursi, J.E.S. e Graciolli, O.D. (2000). A Continuous Approach to the Design of Physical Distribution Systemas, *European Journal of Operational Research*, V. 27, n.9, pp. 877-893.
- Pereira, V.F.; Dória, E.C.B.; Carvalho Jr, B.C.; Neves Fº, L.C. e Silveira Jr, V. (2010), Avaliação de Temperaturas em Câmaras Frigoríficas de Transporte Urbano de Alimentos Resfriados e Congelados, *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, V. 30, Nº 1, pp. 158-165.
- Ruiz-Garcia, L., Barreiro, P., Rodríguez-Bermejo, J. & Robla, J. I. (2007). Monitoring intermodal refrigerated fruit transport using sensor networks: a review. *Spanish Journal of Agricultural Research*.
- Syslo, M.M.; Deo, N. e Kowalik, J. (2006), *Discrete Optimization Algorithms with Pascal Programs*, Dover Publications, Mineola, N.Y.
- Tijskens, L. M. M., Polderdijk, J. J. (1996) A Generic Model for Keeping Quality of Vegetable Produce During Storage and Distribution. *Agricultural Systems*, Vol. 5 1, No. 4, pp. 431- 452.
- Wanteman, K.C. (2012) Accelerated Stability Assessment Program (ASAP): Using Science to Set Shelf Life. *The Journal of Pharmaceutical & Biopharmaceutical Contract Services*.
- White, J. (2007). How Cold Was It? Know the Whole Story. *Frozen. Food Age*, 56,3, 38-40.
- Zhang, G.; Sun, G. e Li, J. (1994), A New Method to Determine the Heat Transfer Coefficient of Refrigerated Vehicles, *International Journal of Refrigeration*, V. 17, N. 8, pp. 516-523.

Prof. Dr. Antônio G. N. Novaes (novaes@deps.ufsc.br)
Departamento de Engenharia de Produção
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC
Campus Universitário, Trindade, 88040-970, Florianópolis - SC, Brasil

Prof. Dr. Orlando Fontes Lima Júnior (offimaj@fec.unicamp.br) e
Doutoranda Carolina Corrêa de Carvalho (carolina.cdc@fec.unicamp.br)
LALT - Laboratório de Aprendizagem em Logística e Transportes
Unicamp – Universidade Estadual de Campinas
FEC- Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo
DGT - Departamento de Geotecnia e Transportes
Rua Albert Einstein, 951, Sala 08, Caixa Postal 6021 - Cidade Universitária Zeferino Vaz
13083-852, Barão Geraldo - Campinas - SP - Brasil

Apêndice 8: Artigo aceito e apresentado no congresso internacional WCTR 2013

Novaes, A.G., Lima JR, O.F., Carvalho, C.C., Takebayashi, F. (2013). *Routing effects on the thermal performance of refrigerated vehicles in the distribution of perishable products*. WCTR 2013 - XIII World Conference on Transport Research, Rio de Janeiro, 15 -18 July.

ROUTING EFFECTS ON THE THERMAL PERFORMANCE OF REFRIGERATED VEHICLES IN THE DISTRIBUTION OF PERISHABLE PRODUCTS

*NOVAES, Antonio G.N., Federal University of Santa Catarina, Brazil,
novaes@deps.ufsc.br*

LIMA JR., Orlando F., State University of Campinas, SP, Brazil, oflimaj@fec.unicamp.br

*CARVALHO, Carolina C. de, State University of Campinas, SP, Brazil,
carolina_cdc@yahoo.com.br*

*TAKEBAYASHI, Fabiana, Polytechnic School, University of São Paulo, Brazil,
fabitakebayashi@gmail.com*

ABSTRACT

The temperature of chilled and frozen products along the distribution process must be maintained within close limits to ensure optimum food safety levels and high quality. The variation of cargo temperature along the vehicle routing sequence is represented by non-linear functions which depend on the process stage (line haul, unloading at customer's premises, local displacements, etc.). The temperature variability is also correlated with the time required for the refrigeration unit to recover after cargo unloading, due to door openings and the cargo discharging process. The vehicle routing optimization strategy employed in traditional cargo distribution applications is generally based on a *TSP* (Travelling Salesman Problem) sequence, with the objective of minimizing travelled distance or time. It is shown in the paper that in order to maintain the temperature variability within adequate restriction limits, other routing strategies, apart from the *TSP* criterion, should be considered.

Keywords: cold chain, perishable cargo distribution, TTI, vehicle routing

1 INTRODUCTION

Lifestyle changes over the past decades led to increasing consumption of refrigerated and frozen foods, which are easier and quicker to prepare than the traditional types of food. In order to ensure product quality and health safety, the control of temperature throughout the cold chain is necessary. Since temperature largely determines the rate of microbial activity, which is the main cause of spoilage of most fresh food products, continuous monitoring of the full time

temperature history usually allows for an adequate control of the process along the short and medium distance distribution situations (Giannakourou et al, 2005; Garcia, 2008). In practical terms, the maintenance of an adequate temperature throughout the postproduction handling chain is one of the most difficult tasks, and is far from being universally attained. In short or medium distance delivery runs, the chilled or frozen product can be subjected to many door openings, where there is heat ingress directly from outside air and from personnel entering to select and remove product (James et al, 2006; Pereira et al, 2010). Additionally, the design of the vehicle refrigeration system has to allow for extensive variation in load distribution, which is a function of different delivery rounds, days of the week and the removal of product during a delivery run (Tassou et al, 2009; 2012). As a result, there are substantial difficulties in maintaining the temperature of refrigerated products transported in small and medium-size refrigerated vehicles that perform multi-drop deliveries to retail stores and caterers (James et al, 2006).

This paper reports a Time–Temperature Integrators (TTI) analysis of a distribution case of refrigerated products along a route containing a number of retail customers with different demand levels. TTI are defined as specific devices that can show an easily measurable, time and temperature dependent changes that cumulatively indicate the thermal history of the product from the point of manufacture to its destination (Giannakourou et al, 2005; Estrada-Flores and Eddy, 2006; Sahin et al, 2007). Process Capability Indices (PCI), on the other hand, can additionally be calculated to yield easily computed coefficients measured with dimensionless functions on TTI parameters and specifications (Chang and Bai, 2001; Chang et al, 2002; Estrada-Flores and Eddy, 2006). This kind of TTI application, combined with PCI analysis, helps to reveal undesired thermal conditions that may impair the compliance of product quality requirements along the supply chain.

Problems on the distribution of fresh food are analysed by Tarantilis and Kiranoudis (2002) and Oswald and Stirn (2008). This paper analyses alternative vehicle routing strategies intended to minimize travel cost, but at same time keeping thermal PCI performance indicators within the required levels. It is shown that the standard *TSP (Travelling Salesman Problem)* approach, used to solve classical routing problems where vehicle travel distance or time is minimized, usually leads to temperature restriction violations. Thus, instead of using a heuristic routine to get the optimized *TSP* vehicle routing sequence, such as the largely employed 2-opt and 3-opt improvement methods (Syslo *et al*, 2006), other routing strategies, apart from the *TSP* criterion, are considered.

2 THERMAL PERFORMANCE ANALYSES

Papers investigating the thermal performance of refrigerated vehicles can be classified into four groups: (a) approaches of pure theoretical nature, (b) performance laboratory tests, (c) experimental field tests, and (d) TTI-based simulations. Studies of the first group use pure mathematical CFD (computational fluid dynamics) models based on physical aspects of heat

transfer (Cuesta et al, 1990; Zhang et al, 1994, Campañone et al, 2002). In the second group are the papers describing controlled laboratory tests, such as Moureh and Derens (2000), Tso et al (2002), Estrada-Flores and Eddy (2006), and Garcia (2008). In the third group are the papers involving field tests, with information eventually supplemented with laboratory data, such as the CoolVan experiment (Gigiél et al, 1998; James and Scholfield, 1998; James et al, 2006), as well as other similar efforts (Giannakourou et al, 2005; Pereira et al, 2010; Nga, 2010). The fourth group comprises TTI – Time-Temperature Indicator analyses, usually employing computer simulations (CoolVan Manual, 2000, Hoang et al, 2012a,b). Of course, a good part of these papers employ combined methods.

2.1 Theoretical models

Laguerre and Flick (2010) and Flick et al (2012) developed a simplified steady-state heat transfer model for a loaded refrigerated unit. Let T_C be the temperature of the cold wall, T_W the temperature of the warm wall, and T_L the temperature of the load, all of them expressed in Kelvin degrees (K). Assuming the thermal steady state has been reached, one has (Laguerre and Flick, 2010)

$$(T_C - T_L) = \alpha_L (T_W - T_L), \quad \text{with} \quad (1)$$

$$\alpha_L = \exp \left[-K_{value} \left(\frac{A_L}{f_m c_p} \right) \right], \quad (2)$$

where K_{value} is the heat transfer coefficient ($W m^{-2} K^{-1}$), A_L is the load surface, f_m is the mass flow rate of the air in the refrigerated unit ($Kg s^{-1}$), and c_p is the air heat capacity ($J kg^{-1} K^{-1}$). In a refrigerated truck, the cooling process is not the same, but a similar relationship among variables still holds. However, during the most part of a cold food distribution process, the heat transfer follows a sequence of transient states, and equations (1) and (2) do not apply.

Hoang et al (2012) presented a mathematical expression to measure the evolution of the temperature of a product placed inside a refrigerated container

$$\theta_i(\tau) = \theta_0 + \left(\theta_i^{(load)} - \theta_0 \right) \exp \left(-\frac{H_i \tau}{m_i c_i} \right), \quad (3)$$

where $\theta_i(\tau)$ is the temperature of the product i at time τ , θ_0 is the temperature inside the refrigerated container, $\theta_i^{(load)}$ is the temperature of the product i at loading time, H_i is the heat transfer conductance of product i ($W K^{-1}$), m_i is the mass of product i (kg), and c_i is the thermal capacity of the product ($J kg^{-1} k^{-1}$). It is assumed that $\theta_i^{(load)} > \theta_0$.

The paper by Ge and Tassou (2001) presents a comprehensive model, based on the finite difference technique, to predict and optimise the performance of air curtains. Air curtains are widely used in doorways of retail premises, as well as doors of refrigerated vehicles. The main purpose of the air curtain is to reduce the air exchange and hence heat and moisture transfer

between the conditioned environment and the surrounding ambient. The model was validated against results from tests on a vertical refrigerated display cabinet air curtain.

Apart from the research results summarized above, the literature shows a good number of papers dealing with theoretical approaches to problems related to the thermal performance of refrigerated vehicles.

2.2 Thermal performance laboratory tests

Thermal performance laboratory tests serve as benchmarking instruments to compare diverse refrigerated transport systems and to ensure that these systems provide a minimum level of operating effectiveness. Relevant laboratory tests (Moureth et al, 2002; Estrada-Flores and Eddy, 2006; Nga, 2010) normally evaluate the insulation effectiveness (heat leakage) of the insulated body, measured as a K_{value} (overall heat transfer coefficient), by means of creating a temperature differential of no less than 20 °C between the cargo space and the external environment. Estrada-Flores and Eddy (2006) research included measurement of at least 12 temperatures encompassing the corners, sidewalls, ceiling and floor of the vehicle. Another performance test evaluates the ability of the truck to maintain the set-point temperature within the cargo space during 8 h of uninterrupted operation. The vehicle was tested for a further 4 h with an additional heat load. A third trial was the *in-service*, or *pull-down* test, which measures the time required to cool down the empty truck to the pre-established temperature.

Tso et al (2002) performed an experimental study on the heat and mass transfer characteristics in the body of a refrigerated truck for cases without an air curtain, with a fan air curtain and with a plastic strip curtain. The main purpose of door curtains in refrigerated vehicles is to reduce the air exchange and hence heat and moisture transfer between the conditioned environment and the surrounding ambient. In fact, during delivery runs, the chilled product can be subjected to many door openings, where there is heat ingress directly from outside air and from personnel entering to select and remove the product. In the Tso et al (2002) experiment, the testing focus was the temperature variation and the relative humidity inside the stationary truck during a short period after the door was opened. Comparison between the experiment and numerical results showed reasonable agreement in terms of average temperature inside the body. The test results showed that, in general, when the truck door is opened, the average temperature and relative humidity of the air inside the body increase rapidly. It could be deduced from the tests that both air and plastic strip curtains are useful to prevent hot air from infiltrating into the refrigerated body when the door is opened. It was observed that the air curtain would become less effective when the ambient temperature is too high (> 40 °C). For the cases without any protective device across the door, the rate of temperature rise is the highest, as expected. From temperature comparisons, it could be deduced that the plastic strip curtain is able to reduce hot air infiltrating into the refrigerated space, but would not be as effective as the air curtain. Other papers also report thermal performance laboratory tests as, for example, Moureh and Derens (2000), Ge and Tassou (2001), and Garcia (2008), among others.

2.3 Time-Temperature Indicators (TTI) associated with simulation models

A number of papers on refrigerated food address the TTI evaluation along the cold chain process (Gigiel et al, 1998; James and Scholfield, 1998; Jacxsens et al, 2002; Giannakourou and Taoukis, 2003; Giannakourou et al, 2005; Estrada-Flores and Eddy, 2006). The main purpose of maintaining good temperature control during refrigerated transport is to decrease the rate of microbial growth and hence maintaining the safety and eating quality of the food. In fact, there are many microbial models that can be applied to represent the growth of microorganisms in food during transport. But since temperature largely determines the rate of microbial activity, which is the main cause of spoilage of most fresh and frozen food products, continuous monitoring of the full time temperature history usually allows for the adequate control of the process along medium distance distribution situations.

One of the most systematic attempts to predict the temperature of refrigerated food during multi-drop deliveries has been the CoolVan research programme. CoolVan is a software developed by the Food Refrigeration and Process Engineering Research Centre at the University of Bristol, UK. The brief description set forth was extracted from Gigiel (1997), Gigiel et al (1998), and the Cool Van Manual (2000). The objective of CoolVan is to aid the design and operation of small and medium delivery vehicles intended to distribute refrigerated food products (Gigiel, 1997; Gigiel et al, 1998; James and Schofield, 1998; James et al, 2006; CoolVan Manual, 2000). The software contains a mathematical model that predicts food temperatures inside a refrigerated delivery vehicle, analysing the temperature changes that take place during a delivery journey as well as the energy used by the refrigeration equipment. The model is solved using an implicit finite difference method. It starts with the given initial conditions and proceeds to the end of the journey with variable time steps. The heart of the CoolVan program is the temperature of air inside the vehicle. The internal air exchanges heat with the outside environment by the movement of air into and out of the truck, while the doors are either opened or closed.

The usual food distribution scheme starts with the vehicle being loaded at the distributor's premises and travelling next to a series of retail outlets, where the individual lots are discharged in sequence. Often, the vehicle has a large number of servicing stops in a journey, when the doors are opened and food is removed. Sometimes, food which has passed its shelf-life date, together with empty trays, return from the retail shops to the distributor. In another cases the insulation, door protection and refrigeration equipment fitted to the vans prove to be inadequate to maintain food temperature as cold as required. Vehicle data are fed into the CoolVan program: the thermal properties of the insulation system, the year of the van manufacture, the ageing rate which depends on the vehicle maintenance characteristics, etc. Then, the program calculates the reduced thermal properties of the vehicle insulation. The mathematical structure of the program also allows for different external heat transfer coefficients to be entered for each side of the vehicle. Solar radiation onto each surface of the van is modelled separately. The infiltration of outside air into the van is dependent on the van structure, the degree of maintenance and the speed of the vehicle. These effects were measured empirically in several vans, allowing for the fitting of appropriate equations and parameters into the model.

2.4 Thermal performance field tests

To confirm the possible effectiveness of TTI as monitoring tools in the real distribution of refrigerated products, and detect the eventual problematic points of its application, field tests are frequently performed. These tests simulate in reality the temperature conditions recorded in laboratory experiments or predicted through theoretical models.

Simpson et al (2012) report a TTI monitoring field test covering a multimodal fresh salmon transport from Puerto-Montt (Chile) to Gainesville (Florida). Another interesting field test was performed in 2007 by Pereira et al (2010). The tests were carried out in the Campinas region, state of São Paulo, Brazil, where the authors installed sensors in a refrigerated truck operated by a large industry of refrigerated and frozen meat products. These tests were performed in August and September 2007. The delivery tours started from the company's distribution centre and attended retail outlets in towns placed around the town of Campinas. TTI data were gathered from seven daily delivery tours of cold food products. The vehicle rounds covered different days of the week, with a total of 60 delivery stops, representing an average of 8.6 stops per tour. There was a tour with only 2 stops, and another with 28 stops, showing great variability in the number of delivery calls per round.

Field tests, as this one performed by Pereira et al (2010), are important to detect drawbacks in the local cold chain practice. They indicate technical aspects and logistics operating points that require improvements. For instance, the combined distribution of chilled and frozen products in the way it has been performed in several cases in Brazil must be revised, since the performance results are frequently poor.

3 PROCESS CAPABILITY INDICES TO ASSESS THERMAL PERFORMANCE

Process Capability Indices (PCI) are frequently used as an integral part of the statistical control of process quality and productivity. The relationship between the actual process performance and the specification limits or tolerance may be quantified using appropriate variables. We closely follow Chang and Bai (2001), Chang et al (2002) and Estrada-Flores and Eddy (2006) in applying PCI analysis to the distribution of refrigerated food products.

Let USL and LSL , respectively, be the upper and lower value limits of the specified temperature to carry the refrigerated product in analysis. The two most widely used standard PCIs are C_p and C_{pk} defined as (Chang et al, 2002)

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (4)$$

$$C_{pk} = \min \left\{ \frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \right\}, \quad (5)$$

where μ and σ are, respectively, the mean and the standard deviation of the temperature θ inside the vehicle, and assuming θ is normally distributed. The first coefficient C_p is defined as

the ratio of the allowable tolerance spread and the actual spread of the data. If $C_p > 1$ it indicates that the temperature variation fits within the specified temperature limits. On the other hand, the coefficient C_{pk} accounts for the data that is normally distributed but it is not centred on the targeted mean μ (Pearn and Chen, 1999; Estrada-Flores and Eddy, 2006).

As a rule of thumb, a $C_{pk} = 1.33$ or higher is indicative of a capable process. In this application, a capable process means that a vehicle will be able to maintain a temperature distribution along the journey within the specification limits all the time (Estrada-Flores and Eddy, 2006). When the distribution of θ is normal and the mean is at the midpoint of USL and LSL , then $C_p = C_{pk} = 1$, implying that 99.73% of the observations will fall within the specified values of θ . In such a case, the proportion of non-conforming items will be only 0.27%. In many situations, however, the probability distribution of the evaluating variable is not normal, showing a skewed pattern instead. As it will be seen in Section 5, this is the case of this application. Several approaches to the PCI problem with skewed populations have been suggested in the literature (Chang et al, 2002). Some methods are complicate to apply or require large samples. A simple approximate method for adjusting the values of PCI by considering the skewness of the underlying population is due to Chang and Bai (2001).

The method is based on the idea that σ can be divided into upper and lower deviations, σ_U and σ_L , which represent the dispersions of the upper and lower sides around the mean μ , respectively. An asymmetric probability density function $f(x)$ can be approximated with two normal pdfs

$$f_U(x) = \frac{1}{2\sigma_U} \phi \left[\frac{\theta - \mu}{2\sigma_U} \right] \quad \text{and} \quad f_L(x) = \frac{1}{2\sigma_L} \phi \left[\frac{\theta - \mu}{2\sigma_L} \right], \quad (6)$$

with the same mean μ but different standard deviations $2\sigma_U$ and $2\sigma_L$, where ϕ represents the standard normal pdf. The upper and lower sides of $f(\theta)$ are approximated with the upper side of $f_U(x)$ and the lower side of $f_L(x)$, respectively. The values of σ_U and σ_L are computed as (Chang et al, 2002)

$$\sigma_U = P_\theta \sigma \quad \text{and} \quad \sigma_L = (1 - P_\theta) \sigma, \quad \text{with} \quad P_\theta = Pr\{\theta \leq \mu\} \quad (7)$$

The C_p based on the Chang and Bai (2002) method, after some transformations, is

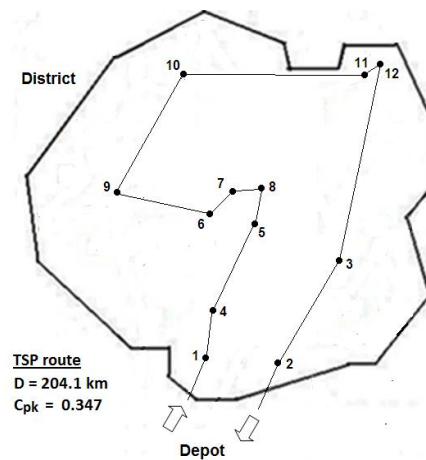
$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \frac{1}{D_\theta}, \quad (8)$$

with $D_\theta = 1 + |1 - 2P_\theta|$ and where $1/D_\theta$ is a corrective coefficient on (8) due to the skewness of the probability distribution of θ (Chang et al, 2002). On the other hand, according to the Chang and Bai (2002) method, the value of C_{pk} corrected for skewness can be estimated as

$$C_{pk} = \min \left\{ C_{pk}^{(U)}, C_{pk}^{(L)} \right\} = \min \left\{ \frac{USL - \mu}{6P_\theta \sigma}, \frac{\mu - LSL}{6(1 - P_\theta) \sigma} \right\} \quad (9)$$

4. PROBLEM DESCRIPTION

The objective of the problem is to analyse a regional distribution of ready-to-eat refrigerated meat products (ham, turkey and chicken breasts, salami, sausage). The urban distribution



district is located about 84 km from the base depot. The served urban district has an approximated area of 73 sq.km, where are located 12 retail shops to be attended, as shown in Figure 1. Traditionally, the optimal sequence of points to be visited is the one obtained via a TSP (Travelling Salesman Problem) algorithm, which yields the shortest Hamiltonian cycle that includes, in this application, all the retail outlets, plus the depot. Figure 1 depicts the TSP route, obtained with a 3-opt local search heuristic (Syslo et al, 2006), with a total extension of 204.1 km.

Figure 1 – Vehicle TSP route

The search for an optimal vehicle routing sequence requires quite a number of combinatory evaluations. On the other hand, the process for obtaining accurate TTI data is not a simple task, since it requires special laboratory settings (Section 2.2) and/or elaborate field tests (Section 2.4). One possibility is to apply the simulation approach, such as the CoolVan software (Section 2.3), in order to gather basic data to be used in a computer-aided routing analysis. This is because the CoolVan program does not permit automatic replications of the runs, whereas combinatorial routeing analysis implies automatic changes of the delivering sequences in order to obtain the corresponding TTI evaluating results. In fact, the basic objective of the CoolVan effort was to produce a program that could be used by transport managers to predict food temperature during a given journey (Gigiel, 1997).

After analysing the pro and con of the modelling possibilities, a hybrid approach was devised. It involves a combination of methods divided in three steps. First, the CoolVan software was used to simulate the thermal characteristics of the basic routing scheme represented by the TSP formulation as shown in Figure 1. Next, taking the CoolVan simulation results, the operating stages that compose the temperature evolution along the distribution journey were analysed individually in order to define mathematical functions that relate temperature to the explaining variables. Third, a computer program was developed to estimate temperature levels step by step, considering different delivering sequences and forming TTI sets. PCI coefficients are then computed in order to analyse the thermal performance of the delivery sequences, leading to an optimal solution that minimizes travelled distance, but at same time maintaining temperature levels within satisfactory limits. This methodology will be described in more detail in the next sections.

This line of research has some points in common with the work by Oswald and Stirn (2008). Their approach differs from the present investigation in two aspects. First, the variable that expresses product quality in our research is temperature, whereas in Oswald and Stirn paper (2008) product quality is based on market acceptance. One has 100% quality when the product can be sold entirely at the current market price and the quality drops to 0% when the product loses completely its commercial value (Oswald and Stirn, 2008). Second, the mathematical routing model developed by these authors builds up the routes to be assigned to the vehicles step by step, while in this application there is only one truck and the best route is searched in a combinatorial way.

4.1 CoolVan Simulation

Presently, the CoolVan software is not available commercially, but its developers kindly offered to run the basic TSP configuration to serve as a data base for this application. The necessary inputs for the simulation are presented in Table 1. Next, the food data are fed into the CoolVan program (CoolVan Manual, 2000). The product is ready-to-eat refrigerated meat products (ham, turkey and chicken breasts, salami, sausage). A total of 12,000 kg of assorted products are distributed in the daily round, with two retailers receiving larger quantities (7,000 and 2,000 kg respectively), while the other ten clients getting 300 kg each (Table 2). The basic delivery sequence shown in Table 2 is the one obtained via the TSP optimization algorithm, with a total travelled distance of 204.1 km. Table 2 also shows the distance travelled along the various segments of the route and the delivering time at the retail premises. As previously mentioned, the time steps in the CoolVan simulation vary along the run. The size of these time steps increase when there are few events during the journey. The time steps decrease, however, in order to represent in detail any special event which occurs, as for example, the opening of the door at a client premise. In the CoolVan run the average time step was 1.47 minutes. The results of the CoolVan simulation are saved in Excel format. The program also plots on the screen the output data graphically allowing the visual inspection of the thermal evolution during the journey. The simulation starts with a line-haul phase, which goes from the depot to the first client in the district, and taking 84.3 minutes (line-haul I in Figure 2). It is followed by a sequence of visits, intercalating cargo discharging tasks with vehicle displacements between successive delivery points. Finally, there is the line-haul II segment, linking the last served client to the depot (Figure 2).

4.2 Operating stages along the routing sequence

Three different stage types were considered in the analysis: (1) line-haul, which corresponds to the vehicle displacement from the depot to the first visiting retail outlet and, inversely, from the last served client back to the depot; (2) product discharge at a retailer premise; (3) vehicle displacement from a served retail outlet to the next.

4.2.1 Line-haul stage

Let $i = 1, 2, \dots, n$ be the n retail outlets to be attended in sequence along the journey. The number $n + 1$ is assigned to the depot. A square and symmetric matrix D , of dimension $n + 1$, represents the distances between points. Let v_h be the vehicle average line-haul speed. The outbound line-haul travelling time is then

$$T_{n+1,1} = D(n + 1,1)/v_h. \quad (10)$$

Table 1 – CoolVan simulation inputs

-
- **Vehicle characteristics:**
 - Volkswagen model 8150, diesel-powered, 143 HP
 - Internal dimensions of cargo compartment (m): $5.0 \times 2.3 \times 2.2$ (25.3 m^3)
 - Insulation and Wall thickness: 0.1 m; insulation density: 40 kg/m^3
 - Door protection (none, plastic strip curtain, vertical air curtain): none
 - Insulation ageing: new vehicle
 - Cargo space loading factor: 79%
 - Cargo load: 12,000 kg
 - **Refrigeration characteristics:**
 - Equipment: Transfrigor type, RB-TF6, MAXI, refrigerant R404A
 - Compressor Sandem, model SD7H15, 7 pistons, fixed displacement, total of 154.7 mL, max speed of 6,000 rpm
 - Refrigeration type: Vapour Comp of Van Engine
 - Refrigeration capacity (kW): $17530 \text{ BTU/h} = 5.14 \text{ kW}$
 - **Product characteristics:**
 - Meat products (ham, turkey and chicken breasts, salami, sausage)
 - Product temperature when loaded in the vehicle: 5°C
 - **Environmental details:**
 - Equivalent UK weather: hot day (summer in July), approximately similar to February in São Paulo, Brazil
 - Relative humidity: 70%
 - Cloud covering: 40% (sunny spells)
 - Mean temperature: 18°C ; maximum temperature: 28°C

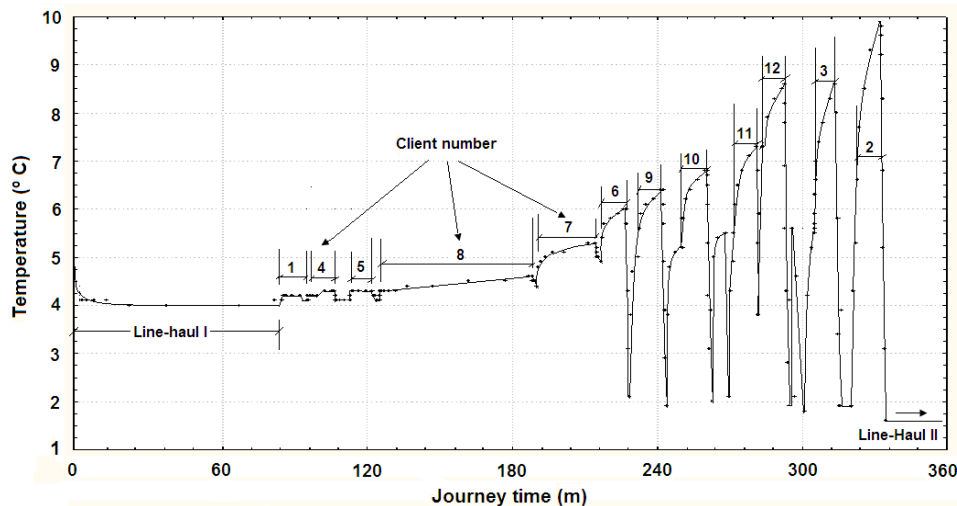


Figure 2 – Plotting of CoolVan simulated temperature during journey

Conversely, the inbound line-haul travelling time, from the last servicing stop to the depot, is

$$T_{n,n+1} = D(n, n + 1)/v_h \quad (11)$$

Let $\theta(\tau)$ be the air temperature ($^{\circ}\text{C}$) inside the vehicle at time τ , along the outbound line-haul (Hoang et al, 2012)

$$\theta(\tau) = \theta_0 \exp\left(\beta \frac{H_{\theta_{st}} \tau}{m C}\right), \quad (12)$$

where θ_0 is the product initial temperature at departure time (assumed uniform), m is the total product mass contained in the vehicle, $H_{\theta_{st}}$ is the heat transfer conductance (W K^{-1}), C is the thermal capacity ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$), and β is a coefficient to be fitted on the CoolVan simulation data. In the application, m is expressed as a fraction of the total load carried by the vehicle. Since the vehicle is assumed to be fully loaded when leaving the depot, $m = 1$ in the outbound line-haul, with τ expressed in minutes.

Table 2 – Input data for the TSP sequence of delivery points

Segment Type	Point of origin	Point of destination	Distance travelled (km)	Attended client	Cargo discharged (kg)	Delivering time (m)
Line-haul	Depot	1	84.3	-	-	-
Delivery	-	-	-	1	300	10
Travel	1	4	1.6	-	-	-
Delivery	-	-	-	4	300	10
Travel	4	5	2.9	-	-	-
Delivery	-	-	-	5	300	10
Travel	5	8	1.2	-	-	-
Delivery	-	-	-	8	7,000	64
Travel	8	7	0.9	-	-	-
Delivery	-	-	-	7	2,000	24
Travel	7	6	1.3	-	-	-
Delivery	-	-	-	6	300	10
Travel	6	9	2.5	-	-	-
Delivery	-	-	-	9	300	10
Travel	9	10	4.2	-	-	-
Delivery	-	-	-	10	300	10
Travel	10	11	5.7	-	-	-
Delivery	-	-	-	11	300	10
Travel	11	12	0.6	-	-	-
Delivery	-	-	-	12	300	10
Travel	12	3	6.2	-	-	-
Delivery	-	-	-	3	300	10
Travel	3	2	3.8	-	-	-
Delivery	-	-	-	2	300	10
Line – haul	2	Depot	86.4	-	-	-

When calibrating expression (12) on CoolVan simulation results, the values of $H_{\theta_{st}}$ and C are embedded in the resulting value of β . Furthermore, considering time steps $dt_{j-1,j}$ along the simulation, expression (12) can be represented as

$$\theta_j = \theta_{j-1} \exp\left(\beta \frac{dt_{j-1,j}}{m}\right), \quad j=1,2,\dots \quad (13)$$

Applying logarithms to (13), one gets

$$\beta = \frac{\ln\left\{\frac{\theta_j}{\theta_{j-1}}\right\}}{\frac{dt_{j-1,j}}{m}}. \quad (14)$$

Three events along the outbound line-haul were considered, as shown in Table 3, starting with the vehicle departure from the depot when the temperature was assumed to be 5°C in the simulation. Putting $m = 1$ in (13) and applying equation (14), one gets two values for β . For the time interval 0 – 20 seg, one uses $\beta = -0.7670$. For the time interval 20 seg – 22 min, one uses $\beta = -0.0044$. From $T \geq 22$ min to the end of the outbound line-haul the temperature remains constant and equal to 4°C.

Table 3 – Output data concerning the outbound line-haul stage

Event	T - Time elapsed (minute)	dT - time interval (minute)	Temperature (°C)	β
1	0	-	5.0	-
2	0.17	0.17	4.4	-0.7670
3	21.99	21.75	4.4	-0.0044

The expression to compute the temperature variation for the inbound line-haul is similar. Now, the initial temperature is equal to the vehicle air temperature at the moment the last cargo delivery is accomplished, $\theta_0 = 10^\circ\text{C}$. The temperature drops to $\theta_1 = 4^\circ\text{C}$ after an elapsed time $d_t = 2$ min. It is also assumed that no chilled product is sent back to the depot, only working elements such as racks, fittings, empty trays, etc. remain in the truck. An equivalent mass equal to 2.5% of the total load was assumed for such elements, and therefore $m = 0.025$. Applying equation (14) for this time interval one gets $\beta = -0.0112$. For $T \geq 2$ min, to up the end of the journey, the temperature remains constant and equal to 4°C.

4.2.2 Cargo unloading stage

During the unloading stage the door remains opened, with the truck engine and the refrigerating equipment turned down. Temperature variation during the unloading stage follows a thermal process similar to the one represented in equation (12), with β assuming a positive value instead. However, during the fitting analysis of a representative mathematical expression it was noticed that the external ambient temperature has an important influence in the thermal process. In fact, the truck departing time from the depot, in the CoolVan simulation, was 6 a.m., with an external temperature of 9.3°C, reflecting a typical UK situation in the month of July. Assuming an approximate 7 ½ h daily round trip, the journey would end up about 1:30 p.m., indicating that

it could reach 25° C or more, and showing a expressive variation along the day. Because of this fact we adopted a modified expression of (12), as follows

$$\frac{\theta(\tau)}{\theta_0} = a_1 (\theta_{ext})^{a_2} \exp(\beta_{unl} \frac{H_{\theta_{st}} \tau}{m C}), \quad (15)$$

where θ_{ext} is the external ambient temperature, and a_1 , a_2 and β_{unl} are coefficients to be adjusted via regression fitting. Since the external temperature does not change appreciably during a specific cargo unloading operation, it was taken, in the calculations, the average temperature between the values observed at the beginning and at the end of the unloading process.

Let $i = 1, 2, \dots, n$ be the sequence of delivery stops, and let $K(i)$ be the retailer outlet served at the i^{th} discharge point. Let m_K be the quantity of cargo to be delivered to client K , represented by a fraction of the full truck load. On the other hand, let $Q_i^{(A)}$ be the quantity of cargo aboard the vehicle when the i^{th} discharging operation starts and, conversely, let $Q_i^{(B)}$ be the quantity of cargo remaining in the truck when the discharging operation terminates. The variables $Q_i^{(A)}$ and $Q_i^{(B)}$ are also expressed as a fraction of the full load. The mean quantity of cargo in the truck during the i unloading process is approximately

$$Q_i = (Q_i^{(A)} + Q_i^{(B)})/2. \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (16)$$

The following expressions hold:

$$Q_i^{(B)} = Q_i^{(A)} - m_{K(i)}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad \text{and} \quad (17)$$

$$Q_i^{(A)} = Q_{i-1}^{(B)} \quad (i = 2, 3, \dots, n), \quad (18)$$

with $Q_1^{(A)} = 1$ since it is assumed that the vehicle departs from the depot full loaded. Equation (16), together with recurrent relations (17) and (18), allow to compute the mean quantity of cargo in the vehicle during the various unloading stops. In order to calibrate equations (16-18) with the CoolVan simulation results, input data were extracted from the 12 delivery stages of the CoolVan simulation, as exhibited in Table 4. Temperatures at the beginning of the unloading process (θ_0) and at its end (θ_{unl}) were taken from the Coolvan simulation results. The values of Q_i were obtained via relation (16). Table 4 shows the input values to be used in the regression analysis.

Table 4 – Regression input data concerning the cargo unloading stages

Unloading stage i	Client number	Unloading time τ_{unl} (m)	Q_i – relative quantity of cargo aboard	θ_{ext} average external temperature (°C)	θ_0 – Initial temperature (°C)	θ_{unl} Final temperature (°C)
1	1	10	0.988	11.9	4.1	4.2
2	4	10	0.963	12.5	4.1	4.3
3	5	10	0.937	13.2	4.1	4.3
4	8	64	0.633	14.8	4.1	4.6
5	7	24	0.259	16.8	4.4	5.3

6	6	10	0.163	17.8	4.9	6.0
7	9	10	0.138	18.5	5.0	6.4
8	10	10	0.113	19.4	5.2	6.8
9	11	10	0.088	20.4	4.9	7.3
10	12	10	0.063	20.9	5.9	8.6
11	3	10	0.038	21.9	5.5	8.6
12	2	10	0.025	22.7	5.3	10.0

After simplifying equation (15) and applying logarithms one has

$$\ln\left(\frac{\theta_{unl}}{\theta_0}\right) = \ln(a_1) + a_2 \ln(\theta_{ext}) + \beta_{unl} \left(\frac{\tau_{unl}}{Q_i}\right). \quad (19)$$

The results of the regression analysis are shown in Table 5. The regression fitting to the CoolVan data has shown a high R^2 value, close to one. Furthermore, with $n = 12$ and three parameters to adjust (19), one has 9 degrees of freedom. Entering into a t Student distribution table with 9 degrees of freedom, the critical value is 3.250 at a 0.005 significance level, indicating that the three coefficients are quite significant statistically.

Table 5 – Regression output data concerning the cargo unloading stages

	Value	t Student	t Significant at
$\ln(a_1)$ (intercept)	-1.1290	-5.1497	0.005
a_2	0.4517	5.0773	0.005
β_{unl}	0.00081	5.5151	0.005
$R^2 = 0.965$			

In Section 5, relation (19) will be used to estimate temperature variation along different discharging settings, considering diverse sequences of visits. Since the temperature values are calculated sequentially in the model, the temperature θ_0 at the beginning of the unloading operation is equal to the temperature observed at the end of the previous stage, and therefore known. Thus, from (19) one estimates $\theta(\tau)$ for any intermediate values of $0 \leq \tau \leq \tau_{unl}$ by applying the expression

$$\theta(\tau) = a_1 \theta_0 (\theta_{ext})^{a_2} \exp\left(\beta_{unl} \frac{\tau}{Q_i}\right), \quad (20)$$

with the values of a_1 , a_2 and β_{unl} indicated in Table 5.

4.2.3 Local vehicle displacement stage

Upon terminating the unloading task at retail outlet i , the vehicle moves to client $i + 1$ following the planned sequence of visits as indicated in Table 2. In order to calibrate a mathematical function for $\theta(\tau)$ with the CoolVan simulation results, the 11 vehicle local vehicle displacements were selected from the data, which are the links between two successive delivery points along the route. The quantity of cargo in the truck when it travels from point i to point $i + 1$ is $Q_i^{(B)}$, defined in Section 4.2.2. The input data for the regression analysis are exhibited in Table 6.

An expression similar to (x9) was tested in the regression analysis:

$$\theta_{tvl} = a_1 \theta_0 (\theta_{ext})^{a_2} \exp\left(\beta_{tvl} \frac{\tau_{tvl}}{Q_i^{(B)}}\right), \quad (21)$$

where θ_0 is the temperature observed when the vehicle initiates its travel along the link, θ_{tvl} is the temperature when the vehicle arrives at the next client shop, and τ_{tvl} is the vehicle travelling time (Table 2). The external temperature θ_{ext} was not statically significant in this case. The best fitting expression was

$$\theta_{tvl} = a_1 \theta_0 (\tau_{tvl})^{a_2} (Q_i^{(B)})^{a_3} \quad (22)$$

The results of the regression analysis are shown in Table 7. The regression fitting to the CoolVan data has shown a satisfactory R^2 value. Furthermore, with $n = 11$ and three parameters to adjust (22), one has 8 degrees of freedom. Entering into a t Student distribution table with 8 degrees of freedom, the critical value is 3.355, indicating a_3 is significant at the 0.005 level; a_2 is significant at the 0.01 level, and a_1 at the 0.05 level.

Table 6 – Regression input data concerning local vehicle displacement stages

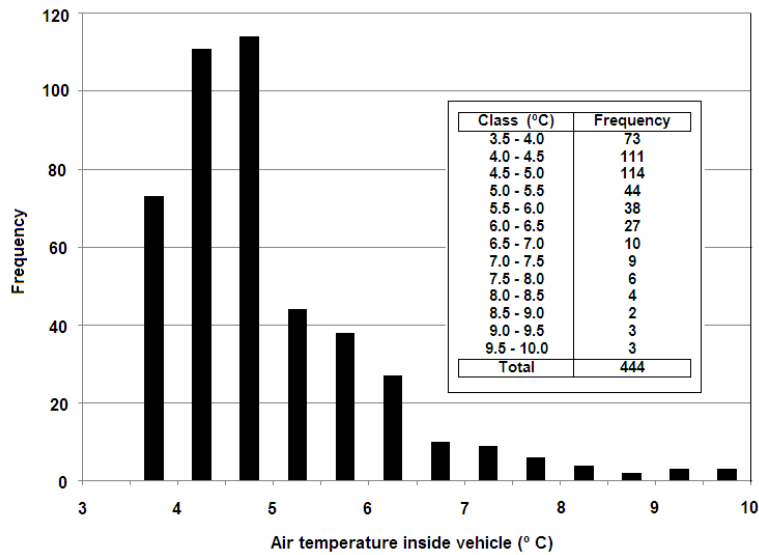
Vehicle displacement stage i	Link between clients	Travelled distance (km)	Travelling time (τ_{tvl}) (m)	Quantity of cargo aboard as a fraction of total load	θ_{ext} average external temperature (°C)	θ_0 – Initial temperature (°C)	θ_{tvl} – Final temperature (°C)
1	1-4	1.6	10	0.975	12.2	4.2	4.1
2	4-5	2.9	10	0.950	12.9	4.3	4.1
3	5-8	1.2	10	0.925	13.5	4.3	4.1
4	8-7	0.9	64	0.342	16.2	4.6	4.4
5	7-6	1.3	24	0.175	17.4	5.3	4.9
6	6-9	2.5	10	0.150	18.2	6.0	5.0
7	9-10	4.2	10	0.125	19.0	6.4	5.2
8	10-11	5.7	10	0.100	19.9	6.8	4.9
9	11-12	0.6	10	0.075	20.7	7.3	5.9
10	12-3	6.2	10	0.050	21.4	8.6	5.5
11	3-2	3.8	10	0.025	22.3	8.6	5.3

Table 7 – Regression output data concerning local vehicle displacement stages

	Value	t Student	t Significant at
$\ln(a_1)$ (intercept)	0.08940	2.3293	0.025
a_2	-0.07446	-3.0811	0.01
a_3	0.10159	6.7642	0.005
$R^2 = 0.913$			

5 RESULTS AND RESEARCH PROSPECTS

The fitting equations for the three stages of the process described in Section 4 were assembled in a computer program written in Turbo Pascal to estimate TTI values along a daily journey, considering different sequences of delivery visits, calculating the corresponding PCI values, and selecting the appropriate routing sequences that satisfy thermal requirements but reducing the travelled distance as much as possible. As previously mentioned, the time steps in the CoolVan simulation vary along the run. In fact, the average time step in the CoolVan simulation was 1.47



minutes. In our application a fixed time step of one minute was assumed, which showed to be sufficient for the purpose of this investigation.

The analysis of the results starts with the TSP routing sequence shown in Figure 1, with a minimum travelling distance of 204.1 km. The TSP vehicle tour sequence is

$$\text{Depot} - 1 - 4 - 5 - 8 - 7 - 6 - 9 - 10 - 11 - 12 - 3 - 2 - \text{Depot}. \quad (23)$$

The methodology described in Section 4 is then applied to evaluate the thermal performance of the TSP shortest path travel circuit. Temperature values inside the vehicle are measured every minute, and the complete journey takes 444 minutes, starting at the depot, performing all the distribution tasks, and returning to the base afterwards. Figure 3 exhibits the histogram and frequency table of the 444 temperature observations, showing the distribution is not normal, being skewed to the right.

Figure 3 – Frequency table and histogram of internal vehicle temperature

Next, the PCI methodology (Section 3) is applied to the TTI data, obtaining $\hat{\theta} = 4.66\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\hat{\sigma} = 1.53\text{ }^{\circ}\text{C}$, $USL = 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $LSL = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. A total of 218 observations of θ showed values smaller than the mean $\hat{\theta}$, and then $P_{\theta} = \frac{218}{444} = 0.491$, leading to $D_{\theta} = 1 + |1 - 2P_{\theta}| = 1.018$ and yielding, through (12), $C_p = 0.535$. On the other hand, equation (15) yields $C_{pk} = 0.519$. Since $C_{pk} < 1.33$, the temperature variation along the route does not fit into the specified temperature requirements. It means that other vehicle routing sequences must be searched until one gets a route with $C_{pk} \geq 1.33$, in case a mathematical solution exists. The inverse of the TSP tour sequence (23) has the same travelled distance of 204.1 km, but showed an unsatisfactory C_{pk} value as well.

In case one of the TSP tours shows a satisfactory C_{pk} value, the problem is solved since its travel distance is at minimum. Otherwise, a greedy search routine can be applied to find an optimal solution where the objective is to get a sequence of stops with minimum total travelling

distance, but maintaining the C_{pk} coefficient within the prescribed limits. The search routine comprises the following steps:

- 1) Let m be the searching stage number;
- 2) Initially do not impose an upper restriction to D , which is the total distance travelled in the vehicle tour cycle. Run the greedy search routine and get a first solution, registering the corresponding value of D_m ;
- 3) Establish an upper tour length restriction equal to the last observed value of D : $D_{m+1} < D_m$, and run the search routine again;
- 4) Stop when no further solution is obtained.

Table 8 exhibits the results of the searching process showing the tested tours, the C_{pk} values, the tour length, and the observed distance increase as referred to the basic TSP tour. For the final tour solution indicated in Table 8 and depicted in Figure 4 it is observed a 18.6% (37.9 km) increase in the travelled distance over the TSP value (Figure 1). This result may represent a significant increase in vehicle operating costs but possible product losses due to unsatisfactory thermal conditions will possibly justify the extra effort. The zigzag sequence pattern of the final solution exhibited in Figure 1b might look non intuitive, but the increased distances linking some servicing points help the vehicle refrigeration equipment to reduce the internal temperature to acceptable levels. Of course, other operating solutions can be contemplated. For example, smaller vehicles could be used, which would perform shorter routes and, returning to the depot, would take another load of preserved product and then proceed to a subsequent distribution round as in Oswald and Stirn (2008).

Table 8 – Search results of tour sequences with decreasing travel distance

Vehicle tour sequence	Tour restriction (km)	C_{pk}	D (km)	Excess tour length (km)
7-2-6-8-1-12-4-11-9-3-10-5	free	1.716	258.4	54.3
7-5-9-2-8-10-1-12-4-11-6-3	$D < 258.4$	1.354	254.5	50.4
8-4-7-3-12-1-6-11-5-10-2-9	$D < 254.5$	1.343	251.8	47.7
8-4-7-9-6-1-11-2-10-5-12-3	$D < 251.8$	1.333	248.0	43.9
8-3-6-7-9-5-10-4-11-2-12-1	$D < 248.0$	1.367	246.1	42.0
7-8-10-5-9-1-6-3-11-4-12-2	$D < 246.1$	1.333	242.8	38.7
7-8-3-5-9-10-4-11-2-6-12-1 (final)	$D < 242.8$	1.332	242.0	37.9
1-4-5-8-7-6-9-10-11-12-3-2 (TSP)	-	0.347	204.1	0
2-3-12-11-10-9-6-7-8-5-4-1 (TSP)	-	0.150	204.1	0

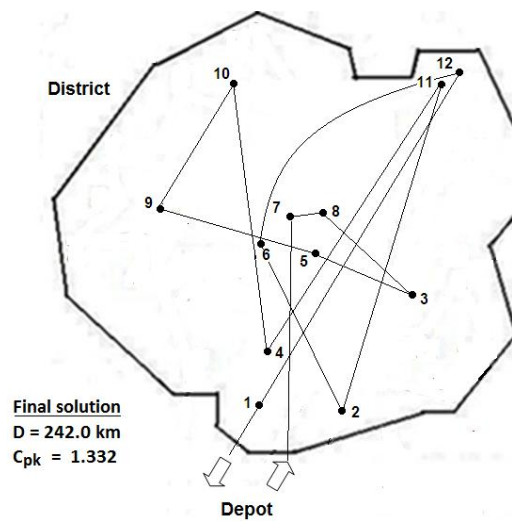


Figure 4 – Final vehicle tour respecting temperature constraints

This research continues in three ways. First, more efficient search algorithms are being developed, involving simulated annealing and genetic algorithm among others, with the objective of getting a vehicle tour that respects temperature variation requirements but, at same time, minimizing travel distance. Second, additional TTI data on the problem under investigation will be gathered in order to improve the regression fittings and the results. Finally, a dynamic version of this cold-chain distribution planning problem will be developed considering possible time deviations that might deserve routing revisions. For example, unexpected delays in the cargo unloading activities, traffic delays, and other fault occurrences will be dynamically incorporated into the problem in such a way as to devise corrective on-line measures.

Acknowledgment

This research has been supported by Capes Foundation (Brazil) and DFG - German Research Foundation, Bragecrim Project nº 2009-2.

References

- Campañone, L.A., S.A. Giner and R.H. Mascheroni (2002). Generalized model for the simulation of food refrigeration. Development and validation of the predictive numerical method. *Int. J. Refrigeration*, Vol. 25, pp. 975-984.
- Chang, Y.S. and D.S. Bai (2001). Control charts for positively-skewed populations with weighted standard deviations. *Quality and Reliability Engineering Int.*, V. 17, 397-406.
- Chang, Y.S., I.S. Choi and D.S. Bai (2002). Process capability indices for skewed populations. *Quality and Reliability Engineering Int.*, V. 18, 383-393.
- CoolVan Manual – Version 3.0 (2000). FRPERC – Food Refrigeration & Process Engineering Research Centre, University of Bristol, UK.
- Cuesta, J.F., M. Lamúa and J. Moreno (1990). Graphical calculation of half-cooling times. *Int. J. Refrigeration*, Vol. 13, pp. 317-324.
- Estrada-Flores, S. and A. Eddy (2006). Thermal performance indicators for refrigerated road vehicles. *Int. J. Refrigeration*, Vol. 29, pp. 889-898.

- Flick, D., H.M. Hoang, G. Alvarez and O. Laguerre (2012). Combined deterministic and stochastic approaches for modelling the evolution of food products along the cold chain. Part I: Methodology. *Int. J. Refrigeration*, Vol. 35, pp. 907-914.
- Garcia, L.R. (2008). Development of Monitoring applications for refrigerated perishable goods transportation. PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, Spain. X
- Ge, Y.T. and S.A. Tassou (2001). Simulation of the performance of single jet air curtains for vertical refrigerated display cabinets, *Applied Thermal Engineering*, 21, pp. 201-219.
- Giannakourou, M.C. and P.S. Taoukis (2003). Application of a TTI-based distribution management system for quality optimization of frozen vegetables at the consumer end. *Journal of Food Science*, Vol. 68 (1), pp. 201-209.
- Giannakourou, M.C., K. Koutsoumanis, G.J. Nychas and P.S. Taoukis (2005). Field Evaluation of the application of time temperature integrators for monitoring fish quality in the chill chain, *Int. J. Food Microbiology*, Vol. 102, pp. 323-336.
- Gigiel, A. (1997). Predicting food temperature in refrigerated transport. *Proceedings: The Institute of Refrigeration*, UK, pp. 7-1 to 7-12. X
- Gigiel, A.J., S.J. James and J.A. Evans (1998). Controlling temperature during distribution and retail. *Proceedings 3rd Karlsruhe Nutrition Symposium: European Research towards Safer and Better Food*, Karlsruhe, Germany, pp. 284-292.
- Hoang, M.H., D. Flick, E. Derens, G. Alvarez and O. Laguerre (2012a). Combined deterministic and stochastic approaches for modelling the evolution of food products along the cold chain. Part II: A case study. *Int. J. Refrigeration*, Vol.35, pp. 915-926.
- Hoang, M.H., O. Laguerre, J. Moureth and D. Flick (2012b). Heat transfer modelling in a ventilated cavity loaded with food product: Application to a refrigerated vehicle. *J. of Food Engineering*, Vol. 113, pp. 389-398.
- Jacxsens, L., F. Devlieghere and J. Debevere (2002) Predictive modelling for packaging design: equilibrium modified atmosphere packages of fresh-cut vegetables subjected to a simulated distribution chain. *Int. J. Food Microbiology*, Vol. 73, pp. 331-341.
- James, S.J. and I. Scholfield (1998). Modelling of food refrigeration systems. *Proceedings 3rd Karlsruhe Nutrition Symposium: European Research towards Safer and Better Food*, Karlsruhe, Germany, pp. 293-301.
- James, S.J., C. James and J.A. Evans (2006). Modelling of food transportation systems – a review, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 29, pp. 947-957.
- Laguerre, O. and D. Flick (2010). Temperature prediction in domestic refrigerators: deterministic and stochastic approaches, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 33 (1), pp. 41-51.
- Moureth, J. and E. Derens (2000). Numerical modelling of the temperature increase in frozen food packaged in pallets. *Int. J. Refrigeration*, Vol. 23, pp. 540-552.
- Moureh, J., N. Menia and D. Flick (2002). Numerical and experimental study of airflow in a typical refrigerated truck configuration loaded with pallets. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 34, pp. 25-42.
- Nga, M.T. (2010). Enhancing Quality Management of Fresh Fish Supply Chains Through Improved Logistics and Ensured Traceability, PhD Thesis, University of Iceland, Reykjavik.

- Oswald, A. and L.Z. Stirn (2008). A vehicle routing algorithm for the distribution of flesh vegetables and similar perishable food. *Journal of Food Engineering*, Vol. 85, pp. 285-295.
- Pearn, W.L. and K.S. Chen (1999). Making decisions in Assessing Process Capability Index C_{pk} . *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 15, pp. 321-326.
- Pereira, V.F., E.C. Dória, B.C. Carvalho Jr, L.C. Neves Jr, and V. Silveira Jr (2010). Evaluation of temperatures in a refrigerated container for chilled and frozen food transport (in Portuguese). *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, 30 (1), 158-165.
- Sahin, E., M.Z. Babaï, Y. Dallery, and R. Vaillant (2007). Ensuring supply chain safety through time temperature integrators. *Int. J. Logistics Management*, Vol.18 (1), pp. 102-124.
- Simpson, R., S. Almonacid, H. Nuñez, M. Pinto, A. Abakarov and A. Teixeira (2012). Time-temperature indicator to monitor cold chain distribution of fresh salmon (*salmo salar*). *J. Food Process Engineering*, Vol. 35, (5), pp. 742-750.
- Syslo, M.M, N. Deo and J.S. Kowalik (2006). *Discrete Optimization Algorithms with Pascal Programs*. Dover Publications, Mineola, NY.
- Tarantilis, C.D. and C.T. Kiranoudis (2002). Distribution of fresh meat. *Journal of Food Engineering*, Vol. 51, pp. 85-91.
- Tassou, S.A., G. De-Lille and Y.T. Ge (2009). Food transport refrigeration - Approaches to reduce energy consumption and environmental impacts of road transport. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp. 1467- 1477.
- Tassou, S.A.; G. De-Lille and J. Lewis (2012). Food transport refrigeration. Centre for Energy and Built Environment Research, School of Engineering and Design, Brunel University, UK.
- Tso, C.P., S.C. Yu, H.J. Poh and P.G. Jolly (2002). Experimental study of the heat and mass transfer characteristics in a refrigerated truck. *Int. J. Refrigeration*, V. 25, pp. 340-350.
- Zhang, G. and G. Sun (1994). A new method to determine the heat transfer coefficient of refrigerated vehicles. *Int. J. Refrigeration*, Vol. 17 (8), pp. 516-523.

Apêndice 9: Artigo aceito e apresentado no congresso internacional ICPR22

Novaes, A.G., Lima JR, O.F., Carvalho, C.C., Takebayashi, F. (2013) Process Capability Indices to Evaluate Thermal Performance of Refrigerated Vehicles. 22nd International Conference on Production Research. Foz do Iguaçu, 28 july to 01 ago.

PROCESS CAPABILITY INDICES TO EVALUATE THERMAL PERFORMANCE OF REFRIGERATED VEHICLES

A.G. Novaes⁽¹⁾, O.F. Lima Jr⁽²⁾, C.C. de Carvalho⁽²⁾, F. Takebayashi⁽³⁾

⁽¹⁾Department of Production Engineering, UFSC, Florianópolis, SC, Brazil

⁽²⁾Faculty of Civil Engineering, Unicamp, Campinas, SP, Brazil,

⁽³⁾Department of Production Engineering, USP, São Paulo, SP, Brazil

Abstract

The temperature of refrigerated products along the cold chain must be kept within pre-defined limits to ensure adequate safety levels and high product quality. Since temperature largely determines the rate of microbial activity, continuous monitoring of the full cycle temperature history usually allows for the adequate control of the process along short and medium distance distribution routes. Time-Temperature Integrators (TTI) are tools to monitor temperature impacts on product quality, offering a way to detect drawbacks in the cold chain. Process Capability Indices (PCI) are then calculated on TTI data to evaluate the thermal performance of the process. In this application a refrigerated food delivery route is analysed considering non-homogeneous retailer demands and alternative delivery schemes, with the objective of evaluating the thermal capability of the process via TTI and PCI analysis.

Keywords:

Refrigerated products, distribution, TTI, PCI

1 INTRODUCTION

Lifestyle changes over the past decades led to increasing consumption of refrigerated and frozen foods, which are easier and quicker to prepare than the traditional types of food. In order to ensure product quality and health safety, the control of temperature throughout the cold chain is necessary. In fact, a number of factors affect the maintenance of quality and the incidence of losses in fresh food products, such as (a) the initial quality of the commodity; (b) the temperature at which the product is held during handling, storage, transport, and distribution; (c) the relative humidity of the postproduction environment; (d) the use of controlled or modified atmospheres during storage or transit; (e) chemical treatments for the control of decay or physiological disorders; (j) heat treatments for decay control; and (g) packaging and handling system. But, since temperature largely determines the rate of microbial activity, which is the main cause of spoilage of most fresh food products, continuous monitoring of the full time temperature history usually allows for an adequate control of the process along the short and medium distance distribution process [1,2]. The quality of these products might change rapidly, because they are submitted to a variety of risks during transport and storage that are responsible for material quality losses. Metabolic activities generally increase as storing temperatures are elevated. On the other hand, short interruptions in the control of the cold chain may result quick deterioration of product quality [3]. Hence, the required temperature range should be maintained from production to consumption.

However, the main difficulties are encountered at the weakest links or interfaces of the cold chain as delivery, loading or unloading operations and temporary storage where products are generally handled in somewhat uncontrolled temperature ambiances. For an adequate control of the cold chain, some practical recommendations have been presented in the literature. Many investigations have been carried out over the past years on the logistic

food chain in order to characterize the temperature variation as a function of product properties, ambient conditions, the size and kind of packaging, solar exposure, and the use of insulating pallet covers [4].

In practical terms, the maintenance of an optimal temperature throughout the postproduction handling chain is one difficult tasks. Even when road transport can provide satisfactory temperatures within the limits of acceptability, the displacement time may be too long for short-life products to be transported over long distances. On the other hand, in short or medium distance delivery runs, the chilled or frozen product can be subjected to many door openings, where there is heat ingress directly from outside air and from personnel entering to select and remove product [5,6]. Frequent door openings can also lead to increased evaporator frosting, resulting in a reduction of the evaporator's performance and an increase in the need for defrosts, particularly in humid weather conditions [4]. Additionally, the design of the vehicle refrigeration system has to allow for extensive variation in load distribution, which is a function of different delivery rounds, days of the week and the removal of product during a delivery run. A refrigeration system's ability to respond to sudden demands for increased refrigeration is often restricted by the power available from the vehicle. As a result, there are substantial difficulties in maintaining the temperature of refrigerated products transported in small and medium-size refrigerated vehicles that perform multi-drop deliveries to retail stores and caterers [5].

A number of papers on refrigerated food transport address the time-temperature evaluation along the cold chain process [4,6,7,8] For short and medium distance product delivery, as in the case of this work, it suffices to observe that the temperature of the product is maintained within pre-established limits. This condition is, in fact, adopted in a number of studies reported in the literature based on Time-Temperature Indicators (TTI).

TTI are tools that can effectively be used to monitor the time/temperature impacts on product quality, offering a cost-effective way to detect problematic points in the chill chain. TTI are defined as specific devices that can show an easily measurable, time and temperature dependent changes that cumulatively indicate the thermal history of the product from the point of manufacture to its destination [4,8,9]. One simple type of TTI application involves the registration of temperature measurements along a pre-defined time horizon and the subsequent analysis of this historical data to get the corresponding probabilistic temperature distribution, its average and standard deviation, unexpected temperature rises and drops, and other elements which occur along the transport, storage, and distribution processes [1,4,6]. On the other hand, Process Capability Indices (PCI) can yield easily computed coefficients measured with dimensionless functions on TTI parameters and specifications intended to evaluate the thermal performance of the system [4,10,11]. This kind of PCI application helps to reveal undesired thermal conditions that may impair the compliance of product quality requirements along the supply chain.

This paper analyses the thermal performance of a refrigerated vehicle along a route formed by a number of delivery stops. The objective of the problem is to analyse a local distribution of ready-to-eat refrigerated meat products (ham, turkey and chicken breasts, salami, sausage). Traditionally, the optimal sequence of points to be visited in a general distribution tour is the one obtained with a TSP (Travelling Salesman Problem) algorithm, which yields the shortest Hamiltonian cycle that includes, in this application, all the retail outlets plus the depot.

The search for an optimal vehicle routing sequence requires quite a number of combinatory evaluations. On the other hand, the process for obtaining accurate TTI data is not a simple task, since it requires special laboratory settings and/or elaborated field tests. The main contribution of this work is the development of an integrated thermal analysis of refrigerated cargo transport with combinatorial routing optimization. To do this, the TTI data was obtained with the aid of the CoolVan simulator [5,7,12,13], which made it possible to run a very large number of alternatives, and leading to a minimum cost solution, but respecting minimum PCI values.

2 TIME-TEMPERATURE INDICATORS (TTI) ASSOCIATED WITH SIMULATION

A number of papers on refrigerated food address the TTI evaluation along the cold chain [4,7,8,13]. The main purpose of maintaining good temperature control during refrigerated transport is to decrease the rate of microbial growth and hence maintaining the safety and eating quality of the food. In fact, there are many microbial models that can be applied to represent the growth of micro-organisms in food during transport. But since temperature largely determines the rate of microbial activity, continuous monitoring of the full time temperature history usually allows for the adequate control of the process along short and medium distance distribution situations.

One of the most systematic attempts to predict the temperature of refrigerated food during multi-drop deliveries has been the CoolVan research programme. CoolVan is a software developed by the Food Refrigeration and Process Engineering Research Centre at the University of Bristol, UK [7,12]. The objective of CoolVan is to aid the design and operation of small and medium delivery vehicles intended to distribute refrigerated food products [5,7,12]. The software contains a mathematical model that predicts food temperatures inside a refrigerated

delivery vehicle, analysing the temperature changes that take place during a delivery journey, as well as the energy used by the refrigeration equipment. The model is solved using an implicit finite difference method. It starts with the given initial conditions and proceeds to the end of the journey with variable time steps. The heart of the CoolVan program is the temperature of air inside the vehicle. The internal air exchanges heat with the outside environment by the movement of air into and out of the truck, while the doors are either opened or closed.

The usual food distribution scheme starts with the vehicle being loaded at the distributor's premises and travelling to a series of retail outlets, where the individual lots are discharged in sequence. Often, the vehicle has a large number of servicing stops in a journey, when the doors are opened and food is removed. Sometimes, food which has passed its shelf-life date, together with empty trays, return from the retail shops to the distributor. In another cases the insulation, door protection and refrigeration equipment fitted to the vans prove to be inadequate to maintain food temperature as cold as required. Vehicle data are fed into the CoolVan program: the thermal properties of the insulation system, the year of the van manufacture, the ageing rate which depends on the vehicle maintenance characteristics, etc. Then, the program calculates the reduced thermal properties of the vehicle insulation. The mathematical structure of the program also allows for different external heat transfer coefficients to be entered for each side of the vehicle. Solar radiation onto each surface of the van is modelled separately. The infiltration of outside air into the van is dependent on the van structure, the degree of maintenance and the speed of the vehicle. These effects were measured empirically in several vans, allowing for the fitting of appropriate equations and parameters into the model. Presently, the CoolVan software is not available commercially, but its developers kindly offered to run the basic TSP configuration to serve as a data base for this application.

The necessary inputs for the simulation are presented in Table 1. The food data are also fed into the CoolVan program [12]. The product is ready-to-eat refrigerated meat products (ham, turkey and chicken breasts, salami, sausage). A total of 12,000 kg of assorted products are distributed in the daily round, with two retailers receiving larger quantities (7,000 and 2,000 kg respectively), while the other ten clients getting 300 kg each (Figure 1). The basic delivery sequence shown in Figure 1 is the one obtained via the TSP optimization algorithm, with a total travelled distance of 204.1 km per cycle. As previously mentioned, the time steps in the CoolVan simulation vary along the run. The size of these time steps increase when there are few events during the journey. The time steps decrease, however, in order to represent in detail any special event which occurs, as for example, the opening of the door at a client premise. In the CoolVan run the average time step was 1.47 minutes. The results of the CoolVan simulation are saved in Excel format. The simulation starts with a line-haul phase, which goes from the depot to the first client in the district, and taking 84.3 minutes. It is followed by a sequence of visits, intercalating cargo discharging tasks with vehicle displacements between successive delivery points. Finally, there is the line-haul II segment, linking the last served client to the depot. The TTI results from this specific CoolVan simulation are represented by 288 temperature and time values, covering a typical round-trip journey that took 418.9 minutes. The mean temperature is $\bar{\mu} = 4.80$ °C, and the standard deviation is $\hat{\sigma} = 1.61$. Figure 2 exhibits the histogram of the temperature θ , showing that the distribution is positively skewed. Figure 3, on the other

hand, shows the cumulative frequency of the observed TTI data, together with the corresponding normal distribution.

Table 1 : Input data to CoolVan Simulation

- Vehicle characteristics:
 - Volkswagen model 8150, diesel, 143 HP
 - Internal dimensions (m): $5.0 \times 2.3 \times 2.2$ (25.3 m^3)
 - Insulation density: 40 kg/m^3
 - Wall thickness: 0.1 m
 - Door protection: none
 - Insulation ageing: new vehicle
 - Cargo space loading factor: 79%
 - Cargo load: 12,000 kg
- Refrigeration characteristics:
 - Equipment: Transfrigor type, RB-TF6, MAXI
 - Refrigerant R404A
 - Compressor Sandem, model SD7H15, 7 pistons total of 154.7 mL, max speed of 6,000 rpm
 - Refrigeration type: Vapour Comp of Van Engine
 - Refrigeration capacity (kW): 17530 BTU/h
- Product characteristics:
 - Meat products (ham, turkey and chicken breasts, salami, sausage)
 - Product temp. when loaded in the vehicle: 5°C
- Environmental details:
 - Equivalent UK weather: hot day (summer in July) similar to February in São Paulo, Brazil
 - Relative humidity: 70%
 - Cloud covering: 40% (sunny spells)
 - Mean temperature: 18°C , max. temp: 28°C

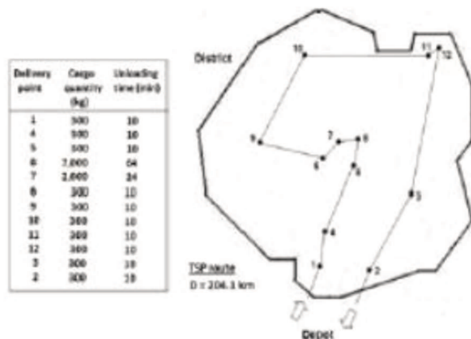


Figure 1 : Food distribution configuration

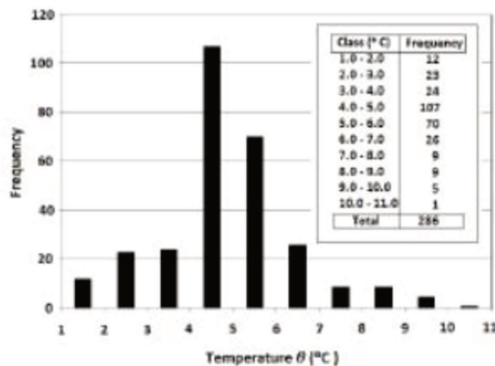


Figure 2 : Histogram of TTI data

The Kolmogorov-Smirnov test was applied to verify whether the set of TTI observations can be represented by a normal distribution. Let $F(x) = P(x \leq \theta)$ be the cumulative frequency of the observed values of θ . On the other hand, let $G(x)$ be the corresponding cumulative normal distribution with mean $\hat{\mu}$ and standard deviation $\hat{\sigma}$. For the sample points determine

$$d = \max|F(x) - G(x)|. \quad (1)$$

The null hypothesis is rejected at level α if $\sqrt{n}d > K_\alpha$, where K_α represents the critical values of the Kolmogorov distribution and $n = 286$ is the sample size. The maximum difference (1) was observed for $x = 4.0^\circ\text{C}$, with $F(x) = 0.3097$ and $G(x) = 0.2168$ (see Figure 3), leading to $d = 0.0929$ and $\sqrt{n}d = 1.571$. On the other hand, for $n = 286$ and $\alpha = 5\%$ one has $K_{5\%} = 1.36$, meaning that the hypothesis that the θ distribution is normal is rejected at a significance level 5%

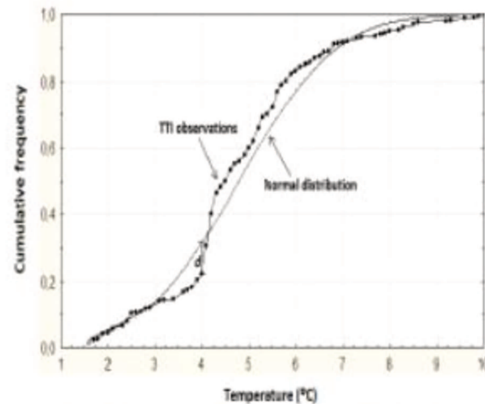


Figure 3 : Cumulative frequency of TTI values

3 PROCESS CAPABILITY INDICES IN THERMAL PERFORMANCE ANALYSIS

A process capability index is a numerical element that compares the characteristics of a production or servicing process to engineering specifications. A value of such an index equal or larger than a pre-established level indicates that the current process is capable of producing results that, in all likelihood, will meet or exceed the pre-defined requirements. A capability index of this sort is convenient because it reduces complex information about the quality of the process to a single control number.

Quality is a challenge that must be taken up equally by manufacturers and service providers in today's global market. In general, there are different tools to assess quality in practice, such as team work methods (e.g. brainstorming, quality circles), problem solving methods (e.g. flow diagrams, decisions diagrams, cause and-effect diagrams), and statistical techniques. Statistical methods in quality management includes statistical process control (SPC), measurement system analysis (MSA), statistical acceptance plans and statistical methods in process improvement (ANOVA, for example). Among the statistical methods mentioned above, statistical process control (SPC) is perhaps the most significant [14]. SPC is a large class of methods aiming at evaluating, monitoring and possibly reducing variability in industrial production processes and in services such as logistics activities, for example. Two different approaches can be followed in the definition of process variability. The first considers variability *per se*, that is, in terms of the variance of the

measured data. The second takes into account some information about the desired (or, rather, acceptable) level of variability for the process. Such an acceptable variability is often expressed in terms of specification limits for the measured quantities of interest [15]. Thus, *process capability indices* can be defined as measurements of the ability of the production or servicing processes to meet the specifications.

The starting point of the process capability analysis is the definition of a few measurable properties which can give a significant insight into the quality of the output of the process under consideration. For that, one has to associate a specification interval, that is, an upper specification limit (USL) and a lower specification limit (LSL), to each of the measurements of interest. Of course, some measurement values might be out of the specification limits. Thus, the capability analysis problem consists in the estimation of a statistical model for the process in order to be able to predict the number of points falling out of the specification limits, and therefore giving a measure of the process capability [15].

Process Capability Indices (PCI) are frequently used as an integral part of the statistical control of process quality and productivity. The relationship between the actual process performance and the specification limits or tolerance may be quantified using appropriate PCI. They are statistically designed to provide common and easily computed coefficients measured with a dimensionless function of its parameters and specifications. In our application case, the analysis of the temperature variability inside a refrigerated vehicle is performed by means of TTI information showing the temperature distribution on the data collected along a typical distribution journey. Since temperature largely determines the rate of microbial activity, continuous monitoring of the full temperature history usually allows for the adequate control of the process along short and medium distance situations.

3.1 Capability indices C_p , C_{pk} , C_{pm} and C_{pmk} for normally distributed data

Usually, capability indices are employed to relate the process parameters to engineering specifications that may include unilateral or bilateral tolerances, with or without a target value (nominal value). The resulting indices are dimensionless and provide a common, easily understood way for quantifying the performance of a process. In this application, the monitored variable is the temperature θ inside the vehicle along a typical distribution journey of refrigerated food products, with mean μ and standard deviation σ . These are unknown elements and are estimated by $\hat{\mu}$ and $\hat{\sigma}$ respectively. In this case there is two-sided specification limits for θ , respectively the upper value *USL* and the lower value *LSL*. Four capability indices are commonly used for variables normally distributed: C_p , C_{pk} , C_{pm} and C_{pmk} [16]. The C_p index is defined as

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (2)$$

Clearly, the aim of process control is to make C_p as large as possible. The adoption of the C_p index presupposes that the variable θ is normally distributed and that the mean $\hat{\mu}$ is equal to the specified target value T . The coefficient C_p is defined as the ratio of the allowable tolerance spread and the actual spread of the data. If $C_p > 1$, it indicates that the temperature variation fits within the specified limits. In practice, if $C_p < 1$, the process does not meet the defined specifications; if $1 \leq C_p < 1.33$ the process probably meets the requirements but additional attention must be taken; if $C_p \geq 1.33$ the process is fully capable [16]. The six-sigma coverage represents the spread of 99.73% of the data in

normally distributed processes. In practice, there are cases in which the process is not centred on the target value T , i.e. $\mu \neq T$. To avoid such drawback, the index C_{pk} is defined

$$C_{pk} = \min \left\{ \frac{USL - \hat{\mu}}{3\hat{\sigma}}, \frac{\hat{\mu} - LSL}{3\hat{\sigma}} \right\} \quad (3)$$

As with C_p , if $C_{pk} < 1$, the process does not meet the defined specifications; if $1 \leq C_{pk} < 1.33$ the process probably meets the requirements but additional attention must be taken; if $C_{pk} \geq 1.33$ the process is fully capable. When the distribution of θ is normal and the mean $\hat{\mu}$ is centred on the target value T , then $C_p = C_{pk}$.

On the other hand, the index C_{pm} explicitly considers the distance between the mean and the target value T [16]:

$$C_{pm} = \frac{USL - LSL}{6\sqrt{\hat{\sigma}^2 + (\hat{\mu} - T)^2}} \quad (4)$$

Additionally, one has the index C_{pmk} [16]:

$$C_{pmk} = \min \left\{ \frac{USL - \hat{\mu}}{3\sqrt{\hat{\sigma}^2 + (\hat{\mu} - T)^2}}, \frac{\hat{\mu} - LSL}{3\sqrt{\hat{\sigma}^2 + (\hat{\mu} - T)^2}} \right\} \quad (5)$$

3.2 Capability analysis for non-normal data

When it is detected that the process control variable is not normally distributed, one way to introduce the effect of non-normality into the data is to generalize the definition (3) as follows:

$$C_{pk} = \min \left\{ \frac{USL - \hat{\mu}}{\theta_{0.9987} - m}, \frac{\hat{\mu} - LSL}{m - \theta_{0.0013}} \right\} \quad (6)$$

where m is the median of the distribution and $\theta_{0.9987}$ and $\theta_{0.0013}$ are the percentiles corresponding to probabilities 0.9987 and 0.0013, respectively. It is clear that in the normal case this formulation reduces to (3), since then $\hat{\mu} = m$, $\theta_{0.0013} = \hat{\mu} - 3\hat{\sigma}$, and $\theta_{0.9987} = \hat{\mu} + 3\hat{\sigma}$.

This nonparametric method seems very attractive because of its simplicity, but unfortunately it suffers from two major drawbacks. First, when working with small samples or noisy data, the nonparametric estimation of tail percentiles becomes a difficult task and the obtained estimates can be very inaccurate. Therefore, this approach is likely to be very sensitive to sampling in actual applications. Second, the estimated percentiles do not provide a very clear picture of the distribution underlying the data. This means that it cannot serve as a mean for process monitoring, because of its limited ability to detect changes in the process distribution [15].

Another approach is to search for a type of probability distribution that best fits to the data. One way to do this is to base the analysis on parametric families of frequency curves to select an adequate probability distribution to that objective. The method of moments is a known approach to the problem of estimating the parameters from a family of frequency curves [15,17]. It is based on the following: given a family of probability distributions which depends on a number of parameters, one can manage to derive close form expressions for the first moments, by applying the operators

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(\theta, \varphi) \theta^i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

to the probability density function $f(\theta, \varphi)$ of θ , where $\varphi \in R^n$ is the vector of unknown parameters. Then, by equating such parametric expressions to the numerical estimates of the moments obtained from the data, one has a set of n equations which can be solved for the n unknown parameters. For common families of distributions the number of parameters is not very large. Thus it is usually possible to solve the equations analytically and obtain transformations with the estimated moments as inputs, and the values of the parameters as outputs [15].

The Pearson system of curves is defined as the set of the functions $f(\theta)$ satisfying the following differential equation [15,17]:

$$\frac{df(\theta)}{d\theta} = \frac{(\theta-a)f(\theta)}{b_0+b_1\theta+b_2\theta^2} \quad (8)$$

where a, b_0, b_1 and b_2 are four real coefficients. It can be shown that among the solutions to (8), curves of very different kinds can be found, like, for example, bell-shaped, J-shaped or U-shaped distributions [15]. The solution of (8) varies according to the roots of the second order polynomial [17]

$$b_0 + b_1\theta + b_2\theta^2 = 0. \quad (9)$$

As proposed by Pearson, the various forms or curve types can be classified according to the value of the so-called critical element K :

$$K = \frac{b_1^2}{4b_0b_2}, \quad (10)$$

which ranges from $-\infty$ to $+\infty$. Another form to express K is [15]

$$K = \frac{\beta_1(\beta_1+3)^2}{4(4\beta_2-3\beta_1)(2\beta_2-3\beta_1-6)}. \quad (11)$$

with

$$\beta_1 = \frac{m_2}{m_1^2} \quad \text{and} \quad \beta_2 = \frac{m_4}{m_1^2}, \quad (12)$$

and where m_2, m_3 and m_4 are the second, third and fourth central moments of $f(\theta)$.

Pearson defined 13 such types of curves but, for practical applications, three main types are of interest [15,17]:

Pearson's Type I: Expression (9) has two real roots of opposite sign, yielding $K < 0$. The solution of (9) is

$$f(\theta) = y_0 \left(1 + \frac{\theta}{a_1}\right)^{b_1} \left(1 - \frac{\theta}{a_2}\right)^{b_2} \quad (13)$$

where a_1, a_2, b_1, b_2 are the coefficients to be fitted to the data and y_0 is the normalization factor. The corresponding pdf of (13) only exists when θ is limited to the range

$$-a_1 < \theta < a_2, \quad (14)$$

over which θ is real and positive.

Pearson's Type IV: It corresponds to values of K between 0 and 1, i.e. to situations where (9) has two complex conjugate roots, leading to the solution

$$f(\theta) = y_0 \left(1 + \left(\frac{\theta}{a} - \frac{v}{r}\right)^2\right)^{-b} e^{-v \arctan((\theta/a) - (v/r))}, \quad (15)$$

where a, v, r, b are the four parameters to be fitted to the data and y_0 is the normalization factor. The range of θ in this case is unlimited, i.e. $-\infty < \theta < \infty$.

Pearson's Type VI: It corresponds to values of K greater than one, i.e., to situations where (9) has two real roots of the same sign, leading to the solution

$$f(\theta) = y_0 \left(1 + \frac{\theta}{a_1}\right)^{b_1} \left(1 + \frac{\theta}{a_2}\right)^{b_2}, \quad (16)$$

with the pdf of $f(\theta)$ limited to the range $a_1 < \theta < +\infty$, or $-\infty < \theta < a_2$, depending on the sign of the roots of polynomial (9). Thus, while Type I curves are adequate for the representation of variates with both an upper and a lower limit, Type VI curves can be used when only one such limit exists as, for example, the case of a pdf of a nonnegative variable to be fitted to the data [15].

All other Pearson's curve types, sometimes indicated as transition types, correspond to single values of K . For instance, when K is nil, it indicates that the distribution is symmetrical and, in the Pearson system of frequency curves, it can be the Normal, the Uniform, the Pearson type II and the Pearson type VII.

In our application, the variable θ is not represented by a normal distribution (Section 2). Computing its main central moments, one has $m_2 = 2.585$, $m_3 = 2.464$ and $m_4 = 26.155$. Expression (11), associated with (12), yields $K = -0.936$, meaning that the probability distribution of θ is inserted on Pearson's Type I curve. A possible candidate for $f(\theta)$ is the bell-shaped Beta distribution

$$f(\theta) = \frac{\theta^{\alpha-1}(1-\theta)^{\beta-1}}{B(\alpha,\beta)}, \quad (17)$$

where B is the beta function

$$B(\alpha,\beta) = \int_0^1 x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1} dx. \quad (18)$$

The fitting of a distribution such as (17) is not simple and usually requires large samples in order to adequately represent the tail effect in the mathematical representation. As a result, several approximate approaches to the PCI problem with skewed populations have been suggested in the literature [11,16].

3.4 An approximate PCI evaluation method

Gonçalez and Werner [16] have compared a number of approximate methods to evaluate non-normal situations and suggested that the method of Cheng and Ding [10] reflects with accuracy the number of non-conforming items in the evaluated sample, being superior to the other analysed methods. Such method adjusts the values of $PCIs$ in accordance to the degree of skewness of the underlying population, by using specific factors in computing the deviations above and below the variable mean.

The method is based on the idea that σ can be divided into upper and lower deviations, σ_U and σ_L , which represent the dispersions of the upper and lower sides around the mean μ , respectively. An asymmetric probability density function $f(x)$ can be approximated with two normal pdfs

$$f_U(x) = \frac{1}{2\sigma_U} \phi\left(\frac{x-\mu}{2\sigma_U}\right) \quad \text{and} \quad f_L(x) = \frac{1}{2\sigma_L} \phi\left(\frac{x-\mu}{2\sigma_L}\right), \quad (19)$$

with the same mean μ but different standard deviations $2\sigma_U$ and $2\sigma_L$, where ϕ represents the standard normal pdf. The upper and lower sides of $f(\theta)$ are approximated with the upper side of $f_U(x)$ and the lower side of $f_L(x)$, respectively. The values of σ_U and σ_L are computed as [11]

$$\sigma_U = P_\theta \sigma \quad \text{and} \quad \sigma_L = (1 - P_\theta) \sigma, \quad (20)$$

with $P_\theta = Pr(\theta \leq \mu)$.

The value of C_p is defined as [10]

$$C_p = \min\left\{\frac{USL-LSL}{6 \times 2\sigma_U}, \frac{USL-LSL}{6 \times 2\sigma_L}\right\} = \min\left\{\frac{USL-LSL}{6 \times 2P_\theta\sigma}, \frac{USL-LSL}{6 \times 2(1-P_\theta)\sigma}\right\} = \frac{USL-LSL}{6\sigma} \min\left\{\frac{1}{2P_\theta}, \frac{1}{2(1-P_\theta)}\right\}. \quad (21)$$

Making $D_\theta = 1 + |1 - 2P_\theta|$, expression (21) can be simplified to

$$C_p = \frac{USL-LSL}{6\sigma} \frac{1}{D_\theta}, \quad (22)$$

where $1/D_\theta$ is a corrective coefficient on (2) due to the skewness of the probability distribution of θ . On the other hand, according to [11], the value of C_{pk} corrected for skewness can be estimated as follows. First, the upper and lower capability indices are defined as

$$C_{pk}^{(U)} = \frac{USL-\mu}{3 \cdot 2\sigma_U} = \frac{USL-\mu}{6P_\theta\sigma}, \quad (23)$$

$$C_{pk}^{(L)} = \frac{\mu-LSL}{3 \cdot 2\sigma_L} = \frac{\mu-LSL}{6(1-P_\theta)\sigma}. \quad (24)$$

The PCI of the temperature θ , for the case of two-side specifications (upper and lower values) is

$$C_{pk} = \min\{C_{pk}^{(U)}, C_{pk}^{(L)}\} = \min\left\{\frac{USL-\mu}{6P_\theta\sigma}, \frac{\mu-LSL}{6(1-P_\theta)\sigma}\right\} \quad (25)$$

In equations (23) and (24), $2\sigma_U$ and $2\sigma_L$ are used in place of σ to reflect the degree of skewness in the probability

distribution of θ . When the underlying distribution of θ is symmetric $P_\theta = 0.5$, repeating the value given by (2). However, if it is skewed, the value of C_{pk} given by (25) is smaller than the standard one given by (2).

The numerical estimation of C_p and C_{pk} is performed as follows. Let $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ be the sample containing n values of the temperature θ . The mean $\hat{\theta}$ and the standard deviation $\hat{\sigma}$ of the sample are computed. The probability P_θ can be estimated by using the number of observations less than or equal to $\hat{\theta}$ [11]:

$$\hat{P}_\theta \cong \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g(\hat{\theta} - \theta_i), \quad (26)$$

where $g(x) = 1$ for $x \geq 0$ and $g(x) = 0$ for $x < 0$. Then C_{pk} can be estimated by substituting $\hat{\mu}$, $\hat{\sigma}$, and \hat{P}_θ for μ , σ and P_θ respectively in equation (25).

4 RESULTS

It was shown in Section 2 that, for this application, the probability distribution of the resulting TTI data series is not normal, being positively skewed. The specification limits for the temperature of the refrigerated product is $LSL = 2^\circ\text{C}$ and $USL = 7^\circ\text{C}$. Moreover, there is no target value for the temperature θ in this case, only the lower and upper limits represented by LSL and USL respectively. Thus, the C_{pk} formulation can be adopted for the evaluation of this process.

Applying expression (25), one has $P_\theta = 0.552$, $D_\theta = 1.105$, and $C_{pk} = 0.412$, meaning that since $C_{pk} < 1.33$, the temperature variation along the delivery route does not fit into the specified temperature requirements. One possible drawback in this case is the external ambient temperature which has an important influence in the thermal process. In fact, the truck departing time from the depot in the CoolVan simulation was 8 a.m., with an external temperature of 9.3°C , reflecting a typical UK situation in the month of July. Assuming an approximate $7 \frac{1}{2}$ h daily round trip, the journey would end up about 1:30 p.m., a time of the day when the temperature could reach 25°C or more, and showing an expressive variation during the day.

One possible alternative to set the process within the specified limits could be the reduction of delivery stops per vehicle round. The C_{pk} analysis has been detailed accordingly in order to consider the deliveries individually. Let T_i be the instant when the i^{th} cargo unloading ends, as shown in the third column of Table 2. The TTI_i temperature figure for the i^{th} delivery covers the time interval from instant zero (departure from the depot) up to time T_i . Next, for each TTI_i set, the value of C_{pk} is computed. The same calculation is performed to evaluate the full vehicle cycle, which includes the returning segment to the depot. The results exhibited in Table 2 show that up to the fifth stop one has $C_{pk} > 1.33$, meaning that the temperature variation fits into the specified requirements. The first five deliveries represent 82.5% of the total demand. Thus, a possible alternative scheme would be the assignment of less deliveries per round. The vehicle would perform shorter routes and, returning to the depot, would take another product load, and then proceeding to a subsequent distribution route.

Another possibility is to search for an alternative route as referred to the TSP basic scheme. By using a combinatorial search procedure it was found the route *depot-7-8-3-5-9-10-4-11-2-6-12-1-depot* [13], with a cycle of 242.0 km, 18.6% greater than the TSP tour, but with a satisfactory $C_{pk} = 1.332$ value. The zigzag sequence pattern of this alternative solution might look non intuitive, but the increased distances linking some servicing points

help the vehicle refrigeration equipment to reduce the internal temperature to acceptable levels.

Another aspect to be investigated further is the effect of probabilistic demand, i.e. how the PCI values will vary when the retailer's orders are not deterministic, but rather follow some probabilistic pattern.

This analysis has shown that the assignment of refrigerated vehicles to the distribution of perishable products is not a trivial process, requiring, in fact, a more detailed and integrated investigation of its thermal aspects. This will be the objective of further research.

5 ACKNOWLEDGMENTS

This research has been supported by Capes Foundation (Brazil) and DFG - German Research Foundation, Bragecim Project nº 2009-2.

6 REFERENCES

- [1] Simpson, R., Almonacid, S., Nuñez, H., Pinto, M., Abakarov, A., Teixeira, A. (2012). Time-temperature indicator to monitor cold chain distribution of fresh salmon (*salmo salar*). *J. Food Process Engineering*, 35 (5), 742-750.
- [2] Flick, D., Hoang H.M., Alvarez, G., Laguerre, O. (2012). Combined deterministic and stochastic approaches for modelling the evolution of food products along the cold chain. Part I: Methodology. *Int. J. Refrigeration*, 35, 907-914.
- [3] Garcia, L.R. (2008). Development of monitoring applications for refrigerated perishable goods transportation, PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, Spain.
- [4] Estrada-Flores, S., Eddy A. (2006). Thermal performance indicators for refrigerated road vehicles. *Int. J. Refrigeration*, 29, 889-898.
- [5] James, S.J., James, C., Evans, J.A. (2006). Modelling of food transportation systems – a review. *Int. J. Refrigeration*, 29, 947-957.
- [6] Pereira, V.F., Dória, E.C., Carvalho Jr, B.C., Neves Jr, L.C., Silveira Jr, V. (2010). Evaluation of temperatures in a refrigerated container for chilled and frozen food transport (in Portuguese). *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, 30 (1), 158-165.
- [7] Gigiel, A.J., S.J. James and J.A. Evans (1998). Controlling temperature during distribution and retail. *Proceedings 3rd Karlsruhe Nutrition Symposium: European Research towards Safer and Better Food*, Karlsruhe, Germany, pp. 284-292.
- [8] Giannakourou, M.C., Koutsoumanis, K., Nychas, G.J., Taoukis, P.S. (2005). Field evaluation of the application of time temperature integrators for monitoring fish quality in the chill chain. *Int. J. Food Microbiology*, 102, 323-336.
- [9] Sahin, E., Babaı, M.Z., Dallery, Y., Vaillant, R. (2007). Ensuring supply chain safety through time temperature integrators. *Int. J. Logistics Management*, 18 (1), 102-124.
- [10] Chang, Y.S., Bai, D.S. (2001). Control charts for positively-skewed populations with weighted standard deviations. *Quality and Reliability Engineering Int.*, 17, 397-406.
- [11] Chang, Y.S., Choi, I.S., Bai, D.S. (2002). Process capability indices for skewed populations. *Quality and Reliability Engineering Int.*, 18, 383-393.

- [12] CoolVan Manual – Version 3.0 (2000), FRPERC – Food Refrigeration & Process Engineering Research Centre, University of Bristol, UK.
- [13] Novaes, A.G., Lima Jr, O.F., Carvalho, C.C., Takebayashi, F. (2013). Routing effects on the thermal performance of refrigerated vehicles in the distribution of perishable products. WCTR 2013 - XIII World Conference on Transport Research, Rio de Janeiro, 15 -18 July, 2013.
- [14] Czarski, A., Estimation of process capability indices in case of distribution unlike the normal one, Archives of Materials Science and Engineering, 2008, 34 (1), 39-42.
- [15] Bittanti, S., Lovera, M., Moiraghi, L. (1998). Application of non-normal process capability indices to semiconductor quality control. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 11 (2), 296-303.
- [16] Gonçalves, P.U., Werner, L., Comparison of process capability indices for non-normal distribution (in Portuguese), Gest.Prod., 2009, 16, 121-132.
- [17] Elderton, W.P., Johnson, N.L.1969, Systems of Frequency Curves, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.

Table 2 – Desagregated PCI analysis of the delivery cycle

Client number	Cargo Quantity (kg)	Time (min)	μ	σ	P_{θ}	C_{pk}	Pass/fail criterion
1	300	94.9	4.2	0.205	0.545	3.903	Pass
4	300	106.6	4.2	0.165	0.472	4.166	Pass
5	300	122.5	4.2	0.149	0.469	4.601	Pass
8	7,000	188.1	4.2	0.155	0.685	4.377	Pass
7	2,000	214.8	4.3	0.284	0.774	2.046	Pass
6	300	227.5	4.5	0.487	0.704	1.235	Fail
9	300	242.7	4.5	0.667	0.703	0.880	Fail
10	300	261.0	4.6	0.826	0.661	0.730	Fail
11	300	281.3	4.7	0.985	0.615	0.631	Fail
12	300	292.7	4.8	1.151	0.599	0.524	Fail
3	300	314.0	4.9	1.312	0.579	0.455	Fail
2	300	332.8	5.0	1.486	0.582	0.377	Fail
Depot	-	418.9	4.8	1.611	0.552	0.412	Fail

Apêndice 10: Artigo aceito e apresentado no congresso nacional Anpet 2013

Carvalho, C.C., Novaes, A.G., Lima JR., O.F.; Paiva, E.L. (2013) Roteirização de Veículos na Distribuição de Produtos Refrigerados e Congelados. In: XXVII ANPET - Associação Nacional de Ensino e Pesquisa em Transporte, Belém, PA.

ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS NA DISTRIBUIÇÃO DE PRODUTOS REFRIGERADOS E CONGELADOS

Carolina Corrêa de Carvalho¹

Antônio Galvão Novaes²

Orlando Fontes Lima Júnior¹

Eduardo Paiva¹

Laboratório de Aprendizagem em Logística e Transportes – LALT
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP¹
Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC²

RESUMO

Em geral, modelos de roteirização de veículos buscam minimizar o custo operacional envolvido no processo de distribuição de mercadoria, geralmente expressos por variáveis como tempo de viagem e a distância percorrida pelo veículo. Contudo, quando se trabalha com produtos que necessitam de controle e manutenção de temperatura, é possível observar que esses roteiros não são satisfatórios, pois ignoram os limites térmicos dentro do veículo, que objetivam garantir a qualidade e a integridade da mercadoria transportada. O objetivo deste trabalho é analisar o problema da roteirização de veículos na distribuição de produtos refrigerados e congelados, indicando os fatores que influenciam a variação de temperatura no veículo durante o processo de transporte, e apontar a necessidade de pesquisas futuras. Além de contribuir para a pesquisa acadêmica, os avanços nesta área de roteirização também podem contribuir para a prática logística, fornecendo elementos para as empresas transportadoras aprimorarem o planejamento de roteiros de distribuição e incorporarem a manutenção da temperatura dentro de limites aceitáveis.

ABSTRACT

In general, the vehicle routing models aim to minimize the operational cost involved in the process of product distribution, usually expressed by variables such as vehicle travel time and distance. However, when they deal with products that require temperature maintenance and control, they reveal themselves as inefficient because they do not consider the vehicle environmental thermal restrictions which ensure the quality and the integrity of the transported goods. The objective of this paper is to analyze the vehicle routing problem in the distribution of refrigerated and frozen products, indicating the logistic factors that influence the vehicle temperature variation during the transportation process, and to demonstrate the need for further research. Besides contributing to the academic research, the resulting developments will also contribute to the logistic practice, providing the transportation companies with elements to improve the distribution planning and to maintain the temperature limits inside the acceptable levels.

1. INTRODUÇÃO

No cenário atual da distribuição de produtos refrigerados e congelados, constata-se uma grande variação da temperatura ao longo do processo de transporte, o que acarreta perdas e danos à mercadoria transportada (Hoffman, 2006). Em geral, modelos de roteirização utilizados para traçar percursos de entregas buscam minimizar custos operacionais, quase sempre expressos indiretamente através do tempo e da distância percorrida pelo veículo. Na maior parte dos casos, a roteirização é otimizada com a aplicação de uma heurística do tipo PCV - Problema do Caixeiro Viajante (Carvalho *et al.*, 2012). Porém, quando esses modelos são empregados a cargas específicas, como as refrigeradas e congeladas, nota-se que não respeitam os limites térmicos relativos ao transporte dessas mercadorias (Novaes, *et al.*, 2013 a, b). Esse cenário aponta para a necessidade do desenvolvimento de uma modelagem matemática específica ao problema e, obviamente, mais complexa, que considere esses limites de temperatura para de garantir a qualidade dos produtos transportados.

Nota-se um aumento significativo de trabalhos que buscam entender o comportamento térmico

no interior do veículo como os de Campanone *et al.* (2002); Tso *et al.* (2002); Giannakourou *et al.* (2005); Estrada Flores e Eddy (2006); James *et al.* (2006); Kouarti (2006); Garcia (2008); Lui *et al.* (2010); Pereira *et al.* (2010); Nga (2010); Bandurina *et al.* (2011); Hoang *et al.* (2012a, b); Wanteman (2012); entre outros. Esses trabalhos sugerem algumas práticas para melhorar a variação da temperatura ao longo do processo, como o uso de cortina térmica na abertura de portas, o uso de embalagens reforçadas, o tratamento químico das mercadorias, porém não buscam uma abordagem do problema com base em melhorias dos roteiros de entregas.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar o problema da roteirização de veículos na distribuição de produtos refrigerados e congelados, indicando os fatores logísticos influenciadores da variação de temperatura do veículo durante o processo de transporte e apontando as necessidades de pesquisas futuras. Além da contribuição acadêmica para a área de roteirização, os avanços nesta área de pesquisa podem contribuir para a prática logística, fornecendo elementos para empresas transportadoras aprimorarem o planejamento de roteiros de distribuição e incorporarem as restrições de manutenção da temperatura dentro de limites aceitáveis.

Este estudo está dividido em cinco seções: a primeira é a introdução. A segunda apresenta conceitos básicos relacionados aos modelos de roteirização de veículos e sua evolução; a terceira aborda problemas de distribuição de diferentes tipos de produtos refrigerados e congelados; a quarta discute a roteirização de veículos para cargas refrigeradas e congeladas; finalmente, a quinta seção apresenta as conclusões e indicações das próximas etapas da pesquisa.

2. ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS

O problema da roteirização de veículos, conhecido como *vehicle routing problem (VRP)*, tem crescido consideravelmente durante os últimos anos. Segundo Laporte (1992), ele desempenha papel fundamental na logística e distribuição física de produtos e mercadorias comercializadas, pois possibilita, a partir da utilização de modelos matemáticos adotados segundo a especificidade de cada problema, um melhor planejamento e execução de rotas de entregas. Os modelos clássicos de *VRP* visam à redução de custos operacionais no sistema de distribuição e, conseqüentemente, de tempos e distâncias percorridas no trajeto. Recentemente, outras variantes vêm sendo incluídas e adaptadas aos modelos matemáticos com a finalidade de aproxima-los do problema real, tal como: restrições de rotas e horários em determinados trechos devido a novas leis adotadas em centros urbanos, restrição de horário de chegada em clientes, entre outros.

Para Ghiani, *et al* (2007), os problemas de roteirização de veículo podem ser classificados em estáticos ou dinâmicos. A roteirização estática se dá quando se conhecem todas as variáveis do problema antes do início do processo de roteirização, e as mesmas não sofrem modificações ao longo do percurso. Nesse tipo de problema o algoritmo de solução é único durante a execução da rota (Psaraftis, 1998). Já os problemas de roteirização dinâmica podem ser definidos como problemas em que as entradas analisadas podem mudar durante a execução do algoritmo e da eventual execução da rota (Pillac *et al.* 2013). Nesses problemas, a dimensão de tempo é essencial. Além disso, o cenário na roteirização dinâmica é considerado como um processo aberto, que continua por um período indefinido, devido a essas atualizações. Nos últimos anos, em função da rápida evolução tecnológica, da telecomunicação e dos tratamentos de informações, os problemas dinâmicos de roteirização de veículo (DVRP) têm recebido cada vez mais atenção.

Esses sistemas e tecnologias permitem a obtenção de informações em tempo real e, conseqüentemente, oferecem a possibilidade de tomada de decisão baseada em cenários dinâmicos (Novaes e Burin, 2010).

Um modelo considerado clássico para solução de problemas de roteirização de veículos é o problema do caixeiro viajante (PCV). Esse tem como objetivo oferecer o melhor roteiro de entregas, ou seja, apresentando a menor distância no trajeto total e ao mesmo tempo visitando todos os pontos necessários de entrega uma única vez (Cunha, 2000). Este problema de roteirização é considerado básico e geralmente se caracteriza por ignorar um grande número de restrições e variáveis frequentemente encontradas em problemas reais. A otimização é conseguida através da aplicação de uma heurística apropriada, formalizando-se um problema genericamente denominado de PCV – Problema do Caixeiro Viajante (Syslo *et al.*, 2006). Nota-se um aumento de pesquisas que utilizam o PCV adaptado a variáveis e restrições com o objetivo de melhorar a representação e aproximá-las do problema real.

Os problemas de roteirização de veículos podem ser explorados a partir de métodos exatos, métodos heurísticos e/ou meta-heurísticas. Isso depende do nível de complexidade que os mesmos envolvem. Métodos exatos abrangem problemas menos complexos e de menor tamanho, tais como o método simplex, plano de corte ou *branch and bound*. Os métodos heurísticos, por sua vez, não atingem o ótimo absoluto, mas produzem resultados aproximados, mas satisfatórios. São indicados para problemas de roteirização de média e alta complexidade (Prestes 2006; e Herrera, 2007). Já os métodos heurísticos do tipo meta-heurística empregam soluções analógicas em relação a fenômenos físicos, biológicos, etc., buscando soluções também aproximadas (Blum e Roli, 2003). Entre as meta-heurísticas mais conhecidas encontram-se: Colônia de Formigas (ACO), Algoritmo Genético (AG), Busca Tabu (TS), Recozimento Simulado (SA – Simulated Anneling), entre outras. (Chaves, 2009).

3. O PROBLEMA DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NO PROCESSO DE DISTRIBUIÇÃO DE PRODUTOS REFRIGERADOS E CONGELADOS

O desempenho térmico do veículo é de extrema importância no processo de distribuição de produtos refrigerados e congelados, por ser um dos elementos responsáveis pela qualidade da mercadoria. Ao longo do roteiro de entregas, observa-se uma grande variação da temperatura. Essa variação pode ocorrer em função de dois diferentes fatores: as características técnicas específicas do veículo refrigerado (como tipo de equipamento refrigerante, nível de capacidade do condensador, tipo de isolante térmico da carroceria, característica da ventilação interna, etc.); e as características logísticas referentes ao processo de transportes (como número de clientes a serem atendidos em um roteiro de entrega, duração da abertura de porta em uma entrega, distância entre paradas, etc.). No entanto, o escopo deste trabalho visa a discutir apenas as características logísticas referentes ao processo de transportes, admitindo-se as características técnicas do veículo como previamente otimizadas.

As características ligadas ao roteiro de entrega podem influenciar a variação da temperatura ao longo do processo de transporte. Por exemplo, quanto maior o número de clientes a serem visitados em um roteiro, maior será o número de abertura de portas e, conseqüentemente, maior será a variação da temperatura (diferença de temperatura entre o ambiente interno e externo). Este fato pode ser observado no trabalho de Pereira, *et al.* (2010), que constata o aumento de

temperatura durante a abertura da porta em entregas de mercadorias refrigeradas e congeladas. Os autores monitoraram uma empresa brasileira de transporte de carga refrigerada e congelada durante sete dias de operação. Observaram que, quanto maior o número de entregas, maior a entrada de ar quente e úmido proveniente do ambiente externo, com variação da temperatura interna do veículo e danos ao equipamento de refrigeração. Esses fatos são observados no trabalho de Estrada-Flores e Eddy (2006), que, em simulação laboratorial de transporte de carga refrigerada, testaram a eficácia do isolamento do veículo. Para isso, os autores realizaram o mapeamento da variação da temperatura durante o percurso simulado nas aberturas de portas do veículo. O trabalho mostrou o aumento da temperatura no interior do veículo durante a entrega e também a perda de eficiência do sistema de refrigeração devida à absorção de umidade do ar externo do equipamento refrigerante e a formação de gelo no evaporador. No trabalho de Neves Filho (2010), observou-se que esse fato dificultava a troca de calor entre a superfície da serpentina e o ar circulado dentro da câmara, podendo bloquear totalmente a passagem de ar pela serpentina. A elevação da temperatura com a abertura da porta também é observada nos trabalhos de Giannakourou *et al.* (2005); Heap (2006); James *et. al* (2006); Rodrigue e Craig (2010).

A abertura da porta do veículo transportador ocorre no processo de descarga da mercadoria ao chegar ao cliente de destino. Durante esse procedimento de entrega, observa-se que o aumento da temperatura pode ser agravado por três fatores importantes: o tempo de duração da entrega; o desligamento do motor acoplado ao equipamento de refrigeração; e a diferença da temperatura entre o ambiente interno e o externo. No trabalho de Pereira, *et al.* (2010), é observado que, quanto maior o tempo de duração das entregas, maior a carga térmica proveniente do ambiente externo, o que dificulta o trabalho do sistema de refrigeração durante as retomadas de temperatura. Quanto à parada do motor, os mesmos autores constataam que esse aumento da temperatura interna do veículo ocorre muitas vezes em função da decisão do motorista de economizar combustível. Esse fato é também observado no trabalho de Kefford (1979), que, além disso, comparou a eficiência do equipamento de refrigeração do veículo em duas situações: quando o veículo encontra-se parado e quando o mesmo encontra-se em movimento, entre as entregas. O resultado obtido no experimento foi que o veículo parado apresentou menor capacidade frigorífica e, conseqüentemente, menor carga térmica. O terceiro fator agravante da variação da temperatura é a diferença da temperatura entre o meio interno do veículo e o meio externo do ambiente. Rodrigue e Craig (2010) e Kefford (1979), em seus trabalhos, mostram que a diferença entre essas temperaturas, quando acentuadas, pode prejudicar o ambiente específico da carga transportada. Em países tropicais, principalmente no verão quando as temperaturas são elevadas, ocorre um rápido aumento da temperatura no interior do veículo de transporte. Por outro lado, nos países mais frios, quando as temperaturas externas são muito baixas, ocorre o decréscimo de temperatura do veículo. Em ambos os casos, há o ganho de gradiente térmico em função da variação térmica do ambiente externo no processo de descarga de mercadorias e deve-se evitar ao máximo a entrada de ar do ambiente externo (IRR, 1976).

Pereira *et al.* (2010) observam que as variações de temperatura ao longo do percurso acarretam ao veículo um gradiente cumulativo, ou seja, muitas vezes os equipamento de refrigeração não conseguem voltar à temperatura requerida em função da frequente abertura da porta e do aumento da temperatura. Esse efeito cumulativo pode ser ocasionado pelas pequenas distâncias entre entregas. A esse respeito, o trabalho de Novaes *et al.* (2013) mostra que as pequenas distâncias entre os clientes não são suficientes para que o sistema de refrigeração recupere e atinja a

temperatura específica de transporte da mercadoria comercializada. Portanto, ainda sem atingir a temperatura ideal que assegura a qualidade da carga transportada, ocorre a próxima parada, com nova abertura de porta e, conseqüentemente, novo acréscimo de gradiente térmico ao veículo. Neste trabalho o processo de transporte é dividido em três fases, em que ocorrem diferentes comportamentos da temperatura: (1) fase da *linha de curso*, referente ao trecho onde o veículo se desloca do depósito em direção ao primeiro cliente e, inversamente, a volta do veículo desde o último cliente atendido ao depósito; (2) fase de *descarga* da mercadoria, em que ocorre a abertura da porta do veículo para a entrega da mercadoria destinada ao cliente; (3) fase de *deslocamento local* do veículo, referente ao trecho de deslocamento entre clientes sucessivos. Este tipo de análise permitiu a identificação de parâmetros que interferem na variação da temperatura durante o processo de transporte, como: a temperatura inicial da carga; a temperatura inicial e final do veículo em cada fase; a temperatura externa ao veículo; a distância entre o depósito e o primeiro cliente e a distância do último cliente ao depósito, configurando a fase 1; as distâncias entre clientes, fase 3; a quantidade de mercadoria inicial e final da fase em questão, etc.

Além disso, questões operacionais devem também ser observadas (Heap, 2006; IIR,1976), tais como: a necessidade de carregar o veículo com o produto na temperatura correta; pré-resfriamento da carroceria antes do início do carregamento; não ocorrência de esperas excessivas nas plataformas de embarque, etc. Porém, essas questões fogem ao escopo deste trabalho.

No geral, os trabalhos até o momento referenciados indicam fatores influenciadores da variação da temperatura no processo de distribuição de produtos refrigerados e congelados. Estes são apresentados na Tabela 1, desenvolvida pelos autores: quando tais fatores não são devidamente ajustados podem ocorrer grandes variações de temperatura no interior do veículo.

Tabela 1: Fatores influenciadores da variação da temperatura no veículo de transporte

Fatores Gerais		
Número de entregas em um roteiro; distância total percorrida; e número de aberturas de porta.		
Fatores Específicos		
Fase linha de curso	Fase de descarga da mercadoria	Fase de deslocamento do veículo
Distâncias entre: o depósito e o primeiro cliente, e entre o último cliente e o depósito; Temperatura inicial do veículo; Massa da carga inicial a ser transportada.	Temperatura inicial (antes da abertura de porta), Temperatura do ambiente externo; tempo de abertura de porta.	Temperatura do veículo depois da entrega; distância ou tempo de deslocamento até o próximo cliente; massa restante no veículo.

Fonte: Autores

Apesar dos diferentes enfoques, os trabalhos referenciados identificam o problema da variação da temperatura no interior do veículo no processo de transporte e também apontam algumas soluções paliativas, como: inclusão de cortina de ar para minimizar a troca de calor ocorrida com a abertura de porta; redução do tempo de abertura de porta; redução do número de entregas por veículo, melhoria de sistemas de refrigeração.

As subseções a seguir discutem trabalhos que abordam casos de problemas da distribuição de produtos refrigerados e congelados. Eles estão organizados por tipos de produtos e trazem as dificuldades encontradas por cada um deles quanto a suas características e tipo de cadeia de suprimento pertencente.

3.1. Distribuição de hortaliças e frutas

Os autores Jacxsens *et al.* (2001) apresentam, em seu trabalho, o impacto da flutuação da temperatura ao longo de uma cadeia de distribuição do frio. Uma simulação foi realizada com vegetais minimamente processados, mostrando que essa flutuação acarreta danos às mercadorias. As mudanças de qualidade observadas em função da temperatura e do ambiente exposto foram: sensoriais, surgimento de agentes patogênicos humanos e deterioração por microrganismos. O trabalho expôs a sensibilidade desse tipo de produto e apontou para a necessidade de melhorias no transporte desse tipo de carga, com objetivo de preservar as qualidades do produto.

Também nesta linha, foi conduzido o trabalho de Brecht *et al.* (2003), em que os autores apresenta o problema enfrentado pela pós-colheita de produtos como frutas e hortaliças. Os autores afirmam que a manutenção de uma temperatura constante ideal ao longo desta cadeia é uma tarefa difícil e longe de ser alcançada. Apontam, como principal causa, a perecibilidade desses produtos, ou seja, mesmo quando o transporte consegue proporcionar temperaturas satisfatórias, pode ser muito longo quando comparado à curta vida útil do produto. Desse modo, os autores propõem utilizar o controle de atmosfera modificada para aumentar o tempo de maturação dos produtos. Os autores ainda sugerem estudos mais avançados para entender os diversos estágios de maturidade dos produtos, além da necessidade de se conhecer o binômio tempo-temperatura ao longo da cadeia, com a finalidade de se obter a combinação da atmosfera ideal.

Nota-se uma crescente utilização da análise denominada de *integradores tempo-temperatura* (TTI) na cadeia do frio. Esta tem, como objetivo, obter um histórico da variável temperatura em função do tempo e do processo ocorridos na cadeia do frio. Esta técnica tem ajudado a entender o comportamento do ambiente ao qual a carga é submetida, bem como seu histórico. Um trabalho que utiliza esta técnica é de Giannakourou e Taoukis (2003). Os autores testaram a eficácia e a veracidade do monitoramento e dos dados obtidos através do TTI, sistema utilizado para monitorar passo a passo o comportamento térmico do produto ao longo da cadeia. Este sistema foi comparado com as medições reais do índice de qualidade do monitoramento de 200 vegetais minimamente processados. A comparação mostrou que a resposta TTI fornece uma indicação fiável do estado dos produtos e pode ser usada para obtenção de melhorias do comportamento térmico deste tipo de mercadoria. Além disso, o trabalho iniciou um estudo para o desenvolvimento de um sistema que, utilizando as informações fornecidas pelo TTI na tomada de decisões em pontos importantes da cadeia, a fim de alcançar uma distribuição ótima de qualidade, sinalizou a necessidade de pesquisas que caminhem nesta área de melhoria do processo de distribuição de carga refrigerada e congelada.

Fonseca e Njie (2006) relatam, em sua pesquisa, uma ampla gama de falhas na cadeia do frio quanto à exportação de produtos refrigerados. Este fato representa um elevado risco para a qualidade dos produtos, que atinge compradores internacionais. A pesquisa foi conduzida através de um estudo de caso de uma empresa exportadora de abacaxi para países da América Latina, Caribe e União Europeia. Ela constatou a perda de qualidade do produto ao longo da cadeia e, além disso, mostrou que há pouco investimento em tecnologia na área para monitorar e identificar as falhas, frequentes nesse tipo de mercado.

Em geral, os trabalhos aqui discutidos, referentes ao problema da distribuição de hortaliças e frutas, apontaram a necessidade de melhorias no processo de transporte, com a finalidade de minimizar as oscilações térmicas. Além disso, identificaram a sensibilidade desse tipo de produto e ressaltaram sua característica de vida útil de curto prazo, o que exige agilidade da cadeia de suprimentos e/ou distâncias mais curtas entre a produção e o mercado.

3.2. Distribuição de carnes e de pescado

O trabalho de Giannakourou *et al.* (2005) mostrou que a quebra da temperatura é a principal causa da deterioração de pescados, pois determina o aumento da taxa de atividade microbiana do produto. Por isso, o monitoramento contínuo do histórico tempo-temperatura da mercadoria é de grande importância. Este trabalho utilizou a abordagem TTI para avaliar sua aplicabilidade a este tipo de produto, monitorando o aumento da população natural de *pseudomonas imax*, bactéria mais importante na deterioração desse tipo de carga. Com base no teste de campo, observou-se a eficiência do TTI e concluiu-se que o efeito da temperatura pode ser controlado, e quantitativamente convertido para qualidade alimentar, ou seja, o TTI enzimático foi desenvolvido para obter um sistema de previsão fiável da vida útil restante do produto em qualquer ponto do seu percurso.

Outro trabalho que aborda o problema da distribuição de mercadorias refrigeradas e congeladas e apresenta uma visão logística do processo de transporte, é o artigo de Pereira *et al.* (2010). Os autores, em sua pesquisa, monitoram roteiros de transporte de uma empresa brasileira distribuidora de produtos cárneos refrigerados e congelados. Diferentes rotas de entregas foram monitoradas durante um mês e apresentaram grandes variações de temperatura ao longo do processo. O efeito térmico foi observado em função de alguns parâmetros inerentes ao processo de transporte, como: a abertura de porta para entrega de produto ao cliente, número de paradas por roteiro, tempo de entrega de mercadoria, entre outros. Os dados TTI obtidos neste trabalho permitiram entender que o ganho de temperatura do veículo é cumulativo durante as entregas e também que longos roteiros são responsáveis pela dificuldade do sistema de refrigeração em retomar a temperatura ideal. Observou-se também que o desligamento do motor do veículo, durante o momento de espera para o descarregamento, contribuiu para a elevação da temperatura na câmara frigorífica e que, quanto maior o tempo de duração das entregas, maior a carga térmica proveniente do ambiente externo. Esse trabalho reflete o cenário típico brasileiro do problema de distribuição deste tipo de carga, onde é frequente, no transporte, a exposição do produto a temperaturas relativamente elevadas.

Simpson *et al.* (2012) relatam o acompanhamento de teste de campo cobrindo um transporte multimodal de salmão fresco de Puerto-Montt (Chile) para Gainesville (Florida). Os autores sintetizam a aplicação e validação do TTI para monitorar a vida de prateleira do salmão refrigerado ao longo da sua distribuição na cadeia de frio. A cinética da reação do processo de deterioração foi caracterizada determinando-se o crescimento da população microbiana e da degradação química (quebra de nucleotídeos). O efeito combinado dessas reações provocou a perda de qualidade organoléptica, que foi percebida, tanto no teste sensorial, como nas análises previstas. Os resultados mostraram que os TTIs utilizados nesse estudo com E_a (Energia de Ativação) foram capazes de prever a vida de prateleira do salmão refrigerado e ainda que, no roteiro realizado, ocorreu a exposição das mercadorias a temperaturas fora dos níveis aceitáveis, prejudicando a qualidade da carga.

Os artigos que abordam produtos cárneos e pescados mostraram que, nesse tipo de cadeia, há ruptura do frio e apontam que esta pode ser proveniente de procedimentos comumente encontrados no processo de transporte. Além disso, os trabalhos abordam fortemente o TTI, frequentemente empregado para monitorar esse tipo de processo por sua eficiência e confiabilidade.

3.3. Distribuição de fármacos

O trabalho de Lui *et al.* (2010) analisa e redesenha o processo de exportação de carga farmacêutica de alto valor agregado de uma empresa de medicamentos, com necessidade de controle de temperatura, no roteiro da Irlanda para os Estados Unidos. O trabalho utilizou a metodologia *e³-control*, modelo baseado em procedimentos de redesenho de metodologia de controle, que possibilitou mostrar a necessidade e a viabilidade do fornecimento da temperatura da carga embarcada e dados relacionados à localização em tempo real. Estas informações disponibilizadas permitem um melhor controle do processo, o cumprimento de exigências regulatórias e o redesenho dos processos logísticos que favoreçam a qualidade da carga e atendam a suas especificações. Os procedimentos de uma empresa foram analisados e foi possível identificar algumas falhas ocorridas no processo como, por exemplo, o não controle da temperatura em níveis aceitáveis.

Outra abordagem com produtos fármacos é o trabalho de Bandurina *et al.* (2011), que mostra o desvio de temperatura durante uma operação de transportes multimodal de produtos farmacêuticos a partir do depósito em Zagreb, Croácia, ao centro de distribuição, para o mercado dos EUA em Forest, Virgínia. A ferramenta utilizada foi a temperatura média cinética (MKT - *Mean Kinetic Temperature*), que simula a influência dos diferentes desvios de temperatura aos quais o produto foi submetido durante o período de monitorização (armazenamento e/ou distribuição). O estudo, além de mostrar os desvios durante o processo de transporte, também aponta o risco de se utilizar processos intermodais, onde o controle da temperatura durante a troca de um modal para o outro, geralmente, é deficiente. Os resultados mostraram que há a necessidade de maior atenção nesta etapa para evitar grandes variações de temperatura no processo de embarque e desembarque das aeronaves. Este trabalho possibilitou ter uma visão completa da cadeia do frio utilizando-se o transporte multimodal.

Os trabalhos apresentados mostram que o comportamento na cadeia do frio para produtos fármacos não tem assegurado os níveis térmicos recomendados às mercadorias. Estes são produtos de alto valor agregado, pequenos volumes e alta frequência nos pontos de entrega, tornando mais difícil assegurar o ambiente controlado.

4. ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULO PARA CARGA REFRIGERADA E CONGELADA

A proposta de abordagem deste trabalho para o problema da distribuição de carga refrigerada e congelada é buscar melhores roteiros de entrega que, além de minimizar custos de entrega, expressos em distância e tempo, atendam os níveis térmicos exigidos pela carga. Os fatores logísticos que afetam o comportamento da temperatura, identificados na seção anterior, como o número de vezes e o tempo em que a porta é aberta em uma entrega, a distância de entrega entre clientes, a distância total do percurso, entre outros, foram aqui abordados para melhorar um cenário de entrega. Para obter melhores roteiros, a metodologia da análise proposta utilizou uma

combinação de três diferentes métodos: a simulação do comportamento térmico de um cenário de distribuição realizado através do simulador Coolvan (CoolVan, 2000); o desenvolvimento de um programa computacional, em Pascal, para estimar os níveis de temperatura passo a passo, formando conjuntos de TTI; e cálculo dos índices de capacidade térmica – PCI (Chang and Bai, 2001; Chang et al, 2002; Estrada-Flores e Eddy, 2006), a fim de analisar o desempenho térmico da sequência de entrega.

O cenário aqui avaliado se caracteriza por um veículo de transporte abastecido com 12.000 kg de produtos cárneos refrigerados e congelados (linguiça, salame, presunto, carne processada, entre outros). O roteiro diário deve atender a 12 clientes, dois dos quais recebem grandes quantidades (7.000 e 2.000 kg respectivamente) e outros clientes, 300 kg cada um. A sequência básica de entrega foi obtida através do algoritmo 3-opt para solução do PCV (Syslo et al., 2006), levando a uma distância total mínima de percurso igual a 204,1 km. Por outro lado, as temperaturas do veículo devem respeitar os limites térmicos de qualidade desta carga, entre 0°C e 8°C.

A simulação, além de mostrar a violação dos limites da temperatura no roteiro de entrega, forneceu os valores dos TTIs ao longo do roteiro. O gráfico desse comportamento, é apresentado na Figura 1, e dados em excel do tempo e temperatura constatados ao longo do processo. Os valores dos TTIs foram analisados separadamente considerando as três fases que compõem o processo, nos quais ocorrem diferentes comportamentos de variação da temperatura: (1) fase da *linha de curso*; (2) fase de *descarga* da mercadoria; (3) fase de *deslocamento local* do veículo. As equações de comportamento de cada fase foram desenvolvidas com base no trabalho de Hoang *et al.* (2012) e integraram o programa computacional em Pascal para estimar os níveis de temperatura passo a passo, formando conjuntos de TTI para cada caso analisado.

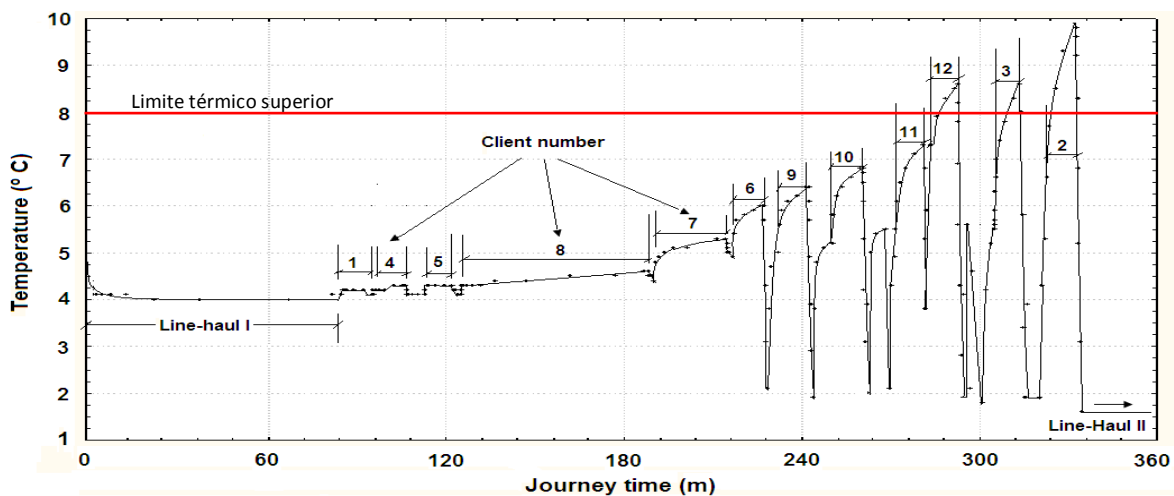


Figura 1: Comportamento térmico do veículo em relação ao roteiro de entrega

Fonte: Autores

Foram consideradas diferentes sequências de visitas de entrega, e calculados os valores correspondentes ao índice de capacidade térmica, PCI, expresso em valores de C_{pk} (Chang *et al.*, 2002), que é um índice utilizado como parte integrante do controle estatístico de qualidade de processos. Quando seu valor é maior que 1,33, significa que está assegurado o nível térmico desejado ao longo do percurso. Este cálculo foi baseado nos trabalhos de Chang e Bai (2001),

Chang et al. (2002) e Estrada-Flores e Eddy (2006), a fim de analisar o desempenho térmico da sequência de entrega. Os resultados são apresentados na tabela 2.

Tabela 2. Sequências de roteiros com base na restrição de distância a do desempenho térmico

Sequência de roteiro do veículo	Restrição de Distância do roteiro (km)	C_{pk}	D (km)	Excesso de distância comparada com o PCV (km)
7-2-6-8-1-12-4-11-9-3-10-5	livre	1.716	258.4	54.3
7-5-9-2-8-10-1-12-4-11-6-3	$D < 258.4$	1.354	254.5	50.4
8-4-7-3-12-1-6-11-5-10-2-9	$D < 254.5$	1.343	251.8	47.7
8-4-7-9-6-1-11-2-10-5-12-3	$D < 251.8$	1.333	248.0	43.9
8-3-6-7-9-5-10-4-11-2-12-1	$D < 248.0$	1.367	246.1	42.0
7-8-10-5-9-1-6-3-11-4-12-2	$D < 246.1$	1.333	242.8	38.7
7-8-3-5-9-10-4-11-2-6-12-1 (final)	$D < 242.8$	1.332	242.0	37.9
1-4-5-8-7-6-9-10-11-12-3-2 (PCV)	-	0.347	204.1	0
2-3-12-11-10-9-6-7-8-5-4-1 (PCV inverso)	-	0.150	204.1	0

A análise dos resultados da sequência dos roteiros mostra que a solução prévia de roteiro com base no PCV apresenta a menor distância percorrida no roteiro de entrega 204,1 km, porém não consegue assegurar a observância dos limites térmicos, obtendo um C_{pk} muito baixo. Observando o caminho inverso do PCV, tem-se a mesma distância percorrida, porém um nível de C_{pk} ainda pior que o anterior analisado. Seguindo as sequências simuladas, observa-se que as distâncias totais percorridas no roteiro são maiores do que a observada para o PCV, porém o índice C_{pk} respeita o limite mínimo de 1,33, satisfazendo, assim, os níveis térmicos estipulados para manter a qualidade da carga transportada. Observa-se que a sequência final obtida, considerada ótima, considerando os objetivos do problema analisado, mostrou um acréscimo da distância total percorrida, comparada com o roteiro do PCV, de 18,6%, ou seja, 37,9 km. Ao mesmo tempo, esse roteiro obteve um índice C_{pk} de 1,332, considerado adequado, e mostrou que os limites térmicos foram respeitados ao longo do percurso. Mas outros elementos devem ser considerados na prática, como uma maior disciplina na abertura e fechamento das portas do veículo, a utilização de veículos menores, que reduzem os tempos totais de percurso, com atendimento de um menor número de clientes, etc.

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo de apresentar e discutir o problema da roteirização de veículos na distribuição de produtos refrigerados e congelados indicando os fatores logísticos que influenciam na variação de temperatura durante o processo de transporte, foi atingido. A revisão bibliográfica apresentada e discutida mostrou que os fatores influenciadores da variação do comportamento térmico do veículo podem ser ocasionados em função da característica técnica e específica ao veículo refrigerado e as características logísticas referentes ao processo de transportes. A proposta do trabalho procurou focar os aspectos logísticos. Os fatores gerais identificados foram: o número de entregas em um roteiro; a distância total percorrida; e o número de aberturas de porta. Já os fatores logísticos específicos foram: a temperatura inicial da carga; a temperatura inicial e final do veículo nas diversas fases; a temperatura externa ao veículo; a distância entre o depósito e o primeiro cliente e a distância do último cliente ao depósito; as distâncias entre clientes; e a quantidade de mercadoria entregue aos clientes.

A identificação dos fatores logísticos gerais e específicos foi importante, pois permitiu que os mesmos fossem trabalhados na busca de melhores roteiros que minimizassem os custos

operacionais, mas também atendessem o nível térmico necessário à carga. A partir da metodologia desenvolvida, foi possível visualizar que o roteiro obtido pelo PCV, apesar de apresentar uma menor extensão para o percurso, pode não respeitar os limites térmicos da carga transportada. Também foi possível observar que um roteiro que configure essas duas restrições, distância e PCI, geralmente exhibe aumento na distância total em comparação com o roteiro do PCV. Para pesquisas futuras, a sugestão é comparar os custos desse aumento de distância com o valor das perdas ou dos danos da mercadoria transportada quando são violados os limites térmicos que asseguram a qualidade da carga. Além de o trabalho sugerir ações de melhorias para o cenário de distribuição de mercadoria refrigerada e congelada, ele também aponta para a necessidade de pesquisas futuras que contribuam para avanços nesta área de roteirização e, também, para a prática logística.

Agradecimentos

Esta pesquisa é apoiada pela Capes como parte do projeto Brazilian-German Collaborative Research Initiative on Manufacturing Technology (BRAGECRIM).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Badurina, G., Majic, Z. e Pavlin, S. (2011) Evaluation of Air Transportation Under Controlled Room Temperature for Pharmaceuticals. *Traffic & Transportation*, v. 23, Nº 2, 121-130.
- Blum, C.; Roli, A. (2003) Metaheuristics in combinatorial optimization overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys*, v. 35, n. 3, p. 268-308.
- Brecht, J.K., Chau, K.V., Fonseca, S.C., Oliveira, F.A.R., Silva, F.M., Nunes, M.C.N., Bender, R.J. (2003) Maintaining optimal atmosphere conditions for fruits and vegetables throughout the postharvest handling chain. *Postharvest Biology and Technology*, n. 27, 87-101.
- Campañone, L.A., Giner, S.A., Mascheroni R.H. (2002) Generalized model for the simulation of food refrigeration: Development and validation of the predictive numerical method. *International Journal of Refrigeration*, 25, 975-984.
- Carvalho, C.C., Novaes, A.G., Lima Jr., O.F. (2012) A logística da distribuição de produtos alimentícios refrigerados: problemas e perspectivas no contexto brasileiro. In: XXVI ANPET - Associação Nacional de Ensino e Pesquisa em Transporte, Joinville-SC.
- Chang, Y.S., Bai, D.S. (2001). Control charts for positively-skewed populations with weighted standard deviations. *Quality and Reliability Engineering Int.*, V. 17, 397-406.
- Chang, Y.S., Choi, I.S., Bai D.S. (2002). Process capability indices for skewed populations. *Quality and Reliability Engineering Int.*, V. 18, 383-393.
- Chaves, A. A (2009) Uma Meta-Heurística Híbrida com Busca por Agrupamentos Aplicada a Problemas de Otimização Combinatória. *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - IMPE*. [S.l.].
- CoolVan Manual – Version 3.0 (2000). Food Refrigeration & Process Engineering Research Centre (FRPERC), University of Bristol, UK.
- Cunha, C. B. (2000) Aspectos práticos da aplicação de modelos de roteirização de veículos a problemas reais. *Transportes*, v. 8, n. 2, p. 51.
- Estrada-Flores, S., Eddy, A. (2006) Thermal Performance Indicators for Refrigerated Road Vehicles, *International Journal of Refrigeration*, v. 29, pp. 889-898.
- Fonseca, J. M., Njie, D. N. (2006) Addressing Food Losses due to Non-Compliance with Quality and Safety Requirements in Export Markets: the case of Fruits and Vegetables from the Latin America and the Caribbean Region. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, Rome, 00153 Italy
- Garcia, L.R. (2008). *Development of Monitoring applications for refrigerated perishable goods transportation*. PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, Spain.
- Ghiani, G., Quaranta, A., Triki C. (2007) New policies for the dynamic traveling salesman problem. *Optimization Methods and Software*, vol. 22, No. 6, December, 971–983.
- Giannakourou, M.C., Koutsoumanis, K., Nychas, G.J.E. and P.S. Taoukis (2005) Field evaluation of the application of time temperature integrators for monitoring fish quality in the chill chain. *International Journal of Food Microbiology*, 102, 323-336.
- Giannakourou, M.C., Taoukis P.S. (2003) Application of a TTI-based Distribution Management System for Quality Optimization of Frozen Vegetables at the Consumer. *Journal of food science: Food Engineering and Physical*

Properties. Vol. 68, Nr. 1.

Giannalourou, M. C., Koutsoumanis, K., Nychas, G. J. E., Taoukis, P. S. (2001) Development and assesment of intelligent shelf life decision system for quality optimization of food chill chain. *Journal of Food Protection*, 64 (7), pp. 1051-1057.

Heap, R. D. (2006) Cold chain performance issues now and in the future. *IIR Bulletin*, n. 4, p. 1-11.

Herrera, B. A. L. D. M. (2007) Combinação de Enxame de Partículas com Inspiração Quântica e Método Lin-Kernighan-Helsgaun aplicado ao Problema do Caixeiro Viajante. *Pontifícia Universidade Católica do Paraná*. Curitiba.

Hoang, M.H., D. Flick, E. Derens, G. Alvarez and O. Laguerre (2012a). Combined deterministic and stochastic approaches for modelling the evolution of food products along the cold chain. Part II: A case study. *International Journal of Refrigeration*, Vol.35, pp. 915-926.

Hoang, M.H., O. Laguerre, J. Moureth and D. Flick (2012b). Heat transfer modelling in a ventilated cavity loaded with food product: Application to a refrigerated vehicle. *Journal of Food Engineering*, Vol. 113, pp. 389-398.

Hoffman, W. (2006). Hot Market, Cool Freight. *Journal of Commerce*.

International Institute of Refrigeration - IIR (1976) *Guide to refrigerated storage*. International Institute of Refrigeration. Paris: IIR, 188p.

Jacxsens, Devlieghere, Debevee (2001) Temperature dependence of shelf-life as affected by microbial proliferation and sensory quality of equilibrium modified atmosphere packaged fresh produce. *Postharvest Biology and Technology*. n. 26. 59–73.

James, S.J., C. James and J.A. Evans (2006). Modelling of food transportation systems – a review, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 29, pp. 947-957.

Kefford, J.F. (1979). Impact of climate variability on food processing. *CSIRO Food Research Quaterly*. Sidney 39, p- 1-10.

Laporte, G., Louveaux, F., Mercure, H. (1992) The vehicle routing problem with stochastic travel times, *Transportation Science*, 26 (3) 161–170.

Lui J., Higgins, A. e Tan, Y. (2010) IT enabled redesign of export procedure for high-value pharmaceutical product under temperature control: the case of Drug Living Lab. Proceedings of the 11th Annual International Conference on Digital Government Research.

Neves Filho, L.C. e Silveira Jr. V. (2010) Alguns aspectos no transporte refrigerado. *Revista Tecnológica*.

Nga, M.T. (2010). Enhancing Quality Management of Fresh Fish Supply Chains Through Improved Logistics and Ensured Traceability, PhD Thesis, University of Iceland, Reykjavik.

Novaes, A. G. N. ; Burin, P.J. (2010) Um Problema de Roteirização Dinâmica de Veículos. Transporte em Transformação XIV. Brasília, DF: CNT - Confederação Nacional do Transporte, v., p. 197-216.

Novaes, A.G., Lima Jr, O.F., Carvalho, C.C., Takebayashi, F. (2013a). Routing effects on the thermal performance of refrigerated vehicles in the distribution of perishable products. WCTR 2013 - XIII World Conference on Transport Research, Rio de Janeiro, 15 -18 July, 2013a.

Novaes, A.G., Lima Jr, O.F., Carvalho, C.C., Takebayashi, F. (2013b) Process Capability Indices to Evaluate Thermal Performance of Refrigerated Vehicles. 22nd International Conference on Production Research. Foz do Iguaçu, 28 July to 01 ago, 2013b.

Novaes, A.G., Souza de Cursi, J.E., Graciolli, O.D. (2000) A Continuous Approach to the Design of Physical Distribution Systems, *Computers & Operations Research*, v. 27, n. 9, p. 877-893.

Pereira, V. F.; Doria, E. C. B.; Carvalho Júnior, B. C.; Neves Filho, L. C.; Silveira Júnior, V. (2010) Avaliação de temperaturas em câmaras frigoríficas de transporte urbano de alimentos resfriados e congelados. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas-SP, v. 30, n. 1, p 158-165.

Pillac, V., Gendreau, M., Guéret, C., Medagli, A.L. (2013) A review of dynamic vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research* 225 1–11.

Prestes, A. N. (2006) Uma Análise Experimental de Abordagens Heurísticas Aplicadas ao Problema do Caixeiro Viajante. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, p. 84.

Psaraftis, H.N. (1998) “Dynamic Programming Solution to the Single Vehicle Many-to-many immediate request Dial-a-ride Problem”. *Transport Science* 14, 130-154.

Rodrigue, J., Craig, M. (2010) New York, Hofstra University Disponível em: <<http://people.hofstra.edu/geotrans/eng/ch5en/app15en/ch5a5en.html>>. Acesso em: 21/09/2012

Simpson, R., S. Almonacid, H. Nuñez, M. Pinto, A. Abakarov and A. Teixeira (2012). Time-temperature indicator to monitor cold chain distribution of fresh salmon (*salmo salar*). *Journal Food Process Engineering*, Vol. 35, (5), pp. 742-750.

Syslo, M.M.; Deo, N. e Kowalik, J. (2006) Discrete Optimization Algorithms with Pascal Programs, Dover

Publications, Mineola, N.Y.

Tso, C.P., Yu, S.C.M., Poh, H.J. e P.G. Jolly (2002) Experimental study on the heat and mass transfer characteristics in a refrigerated truck. *International Journal of Refrigeration*, 25, 340-350.

Wanteman, K.C. (2012) Accelerated Stability Assessment Program (ASAP): Using Science to Set Shelf Life. *The Journal of Pharmaceutical & Biopharmaceutical Contract Services*.

Kourti, T. (2006) The Process Analytical technology initiative and multivariable process analysis, monitoring and control. *Anal Bioanal Chem*, 384, 1043-1048.