



REDUÇÃO DA EMISSÃO DE POLUENTES DO TRANSPORTE DE CAFÉ POR MEIO DE UM MODELO DE SIMULAÇÃO COM OTIMIZAÇÃO

Eglon Rhuan Salazar Guimarães

Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes) – Campus Ibatiba

eglon@ifes.edu.br

Vinícius Jacinto de Oliveira

Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes) – Campus Ibatiba

Bárbara Marques Ferreira

Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes) – Campus Ibatiba

RESUMO

A eminente necessidade de reduzir os índices de emissão de gases causadores de efeito estufa implica a necessidade de encontrar soluções que atendam a essa necessidade sem comprometer a produtividade e sem gerar custos elevados. O presente trabalho visou desenvolver um modelo de simulação com otimização, para reduzir o índice de emissão de monóxido de carbono (CO) da frota de caminhões utilizada no transporte de café da Coocafé (Cooperativa dos Cafeicultores da Região do Caparaó). Os resultados encontrados mostraram que é possível reduzir a emissão de CO em aproximadamente 7%, sem afetar a produtividade do transporte e sem gerar custos adicionais.

PALAVRAS-CHAVE: Simulação com Otimização, Monóxido de Carbono, Transporte de café.

ABSTRACT

The uprising need to reduce the pollutant gases emission implies in finding solution that solves this need without compromising productivity and without generating high costs. This work sees to develop a simulation optimization model to reduce the emission of Carbon Monoxide (CO) from the trucks convoy used in coffee transportation from Coocafé. The results show that is possible to reduce CO emission in approximately 7%, without affect transportation's productivity and without raising costs.

KEYWORDS: Simulation Optimization, Carbon Monoxide, reduction of emissions, Transportation coffee.

1. INTRODUÇÃO

A constante alteração do cenário no qual as empresas estão inseridas normalmente implica desafios a serem superados, os quais requerem esforços dos gestores responsáveis pela tomada de decisão. Com a eminente necessidade de reduzir os



índices de emissão de gases causadores de efeito estufa, surge a necessidade de encontrar soluções, que não comprometam a produtividade e não gerem custos elevados. Gradualmente, através de estímulos e punições governamentais, presentes em diversos países, ou pela visão sustentável da própria empresa, o fator ambiental se faz presente na tomada de decisão.

Nesse contexto, o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem a tomada de decisão, levando-se em consideração a necessidade de diminuir a emissão de gases poluentes e, ao mesmo tempo, de manter ou aumentar a produtividade, faz-se oportuno. O presente trabalho tem por objetivo desenvolver um modelo de simulação com otimização, através do software Arena[®] 14 (KELTON, 2007) e do OptQuest, para analisar a possibilidade de reduzir o índice de monóxido de carbono (CO) emitido pela frota de caminhões utilizada no transporte de café da Coocafé, sem comprometer sua produção. Essa Cooperativa atua na região montanhosa do Espírito Santo e na zona da mata de Minas Gerais, e conta com mais de quatro mil cooperados, atuando diretamente em mais de vinte cidades.

O modelo de simulação não propõe a substituição dos caminhões que constituem a frota atualmente, mas pretende analisar os benefícios que podem ser gerados para o meio ambiente por meio da alocação dos caminhões, com critérios que levem em consideração os fatores ambientais. Assim, tenciona-se identificar possíveis cenários com menores níveis de emissão de gases nocivos ao meio ambiente, sem gerar custos adicionais ou diminuição dos lucros da Cooperativa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Cardoso, *et al.* (2012) realizaram uma análise das emissões de monóxido de carbono, utilizando um modelo de simulação de eventos discretos, integrado a um modelo de otimização por Algoritmos Genéticos. A análise aborda a taxa de emissão de gases em um sistema de transporte de cana de açúcar, normalmente utilizado nas usinas. Os resultados mostraram que a melhor maneira de reduzir a quantidade de CO emitida pode ser com a substituição de caminhões mais antigos por caminhões mais novos. Entretanto, a otimização mostrou ser possível reduzir as emissões de CO em 9,54% sem custos adicionais e, ao mesmo tempo, aumentar a capacidade de transporte de cana de açúcar em 29.69%.



Kuhl e Zhou (2009) apresentam um kit de ferramentas (*toolkit*) de sustentabilidade, voltado para o setor logístico, que permite uma estrutura flexível para a modelagem de simulação e análise dos fatores relacionados à sustentabilidade. O *toolkit* foi desenvolvido para ser de fácil implementação, permitindo considerar, além das medidas tradicionais de desempenho do setor, fatores como emissão de gases poluentes, entre outros fatores ambientais. O *toolkit* foi desenvolvido no ARENA, e aborda uma ampla variedade de aplicações e domínios, no qual a sustentabilidade desempenha um papel crítico nas decisões operacionais.

Zhou e Kuhl (2010 e 2011) desenvolveram uma série de melhorias do *toolkit* proposto em Kuhl e Zhou (2009) (sugestão, para mais clareza do texto: ‘nas obras de 2010 e 2011, os criadores do toolkit desenvolveram/propuseram uma série de melhorias, a fim de...’) a fim de se obter uma ferramenta mais generalizada. Foi criado um conjunto de módulos para a modelagem, análise de sistemas de transporte e logística, que também se mostraram eficientes para medir o desempenho de processos industriais e sistemas de manuseio de materiais em estoque, sempre considerando aspectos sustentáveis. Os autores realizaram uma série de experimentos, utilizando exemplos práticos para mostrar a usabilidade do *toolkit*.

Dellino, Kleijnen e Meloni (2009) propõem uma metodologia para a análise de sistemas, através de simulação com otimização. Os autores afirmam que as metodologias normalmente utilizadas (Fu, 2007) ignoram a incerteza presente em alguns dados de entrada, comprometendo, assim, os resultados gerados no processo. A metodologia proposta combina simulação e otimização com métodos estatísticos, para distinguir variáveis de decisão a serem otimizadas e variáveis de ambiente, que possuem incertezas.

Kleijnen e Wan (2007) aplicaram simulação com otimização em um sistema de gestão de estoque, comparando três diferentes métodos conhecidos, dentre eles, o utilizado na ferramenta de otimização OptQuest[®]. Os estudos mostraram que a eficiência do OptQuest[®] está relacionada principalmente ao tamanho da área de busca e às soluções sugeridas (inseridas pelo usuário na ferramenta, no início da otimização), indicando, assim, uma possível dificuldade de se avaliar sistemas mais complexos com essa ferramenta.

Guimarães *et al.* (2013) utilizaram simulação com otimização por Algoritmos Genéticos para avaliar o processo de produção de ferramentas diamantadas de uma



empresa em implantação. Os autores utilizaram o planejamento de experimentos (*Design of Experiments – DoE*) para direcionar os testes aos fatores que influenciam significativamente na variável de resposta. Os resultados obtidos mostraram a configuração mínima de operários e máquinas que a empresa precisa empregar para atingir sua meta de produção, permitindo, assim, a redução de custos adicionais da empresa.

Miranda *et al.* (2013) apresentam um novo procedimento para a condução de trabalhos envolvendo simulação com otimização, o qual utiliza os Arranjos ortogonais de Taguchi (TAGUCHI, 1987) para representar a região experimental, a DES para testar cada cenário, e a DEA-BCC (BANKER *et al.*, 1984) aliada ao conceito da Superficiência (ANDERSEN e PETERSEN, 1993). Esse novo procedimento visa definir os melhores intervalos de variação para cada variável de decisão, reduzindo o espaço de busca pela melhor solução. Os experimentos mostraram que a aplicação do procedimento proposto permite reduzir o espaço de busca em até 95% e o tempo de resposta em até 40% sem perda da qualidade das respostas.

Pinho e Morais (2010) também apresentam uma pesquisa integrando simulação à otimização para a análise de uma empresa de telecomunicações. Nesse trabalho, o processo analisado é o da célula de controle de qualidade de uma companhia do ramo de soluções de sistemas com fibra óptica, no qual é realizada uma série de testes por três tipos de operários diferentes. O modelo de simulação inicial criado no Promodel[®] mostrou a porcentagem de utilização dos operários na situação atual e com o aumento da demanda em 33% e 60%. Os resultados mostraram que a célula possui capacidade para suportar aumento na demanda, desde que obedçam esses níveis. Após esse processo, foi criado um modelo de otimização no SimRunner[®], a fim de identificar a configuração ótima para a célula em relação à quantidade de operários, maximizando o lucro. Os experimentos mostraram que, dependendo do aumento da demanda, é possível aumentar o lucro da empresa, contratando ou demitindo alguns funcionários. Nesse momento, cabe ressaltar que esse resultado possivelmente não seria atingido somente com o uso da simulação.

Barradas *et al.* (2010) criaram um modelo de simulação para a análise de uma rede de telecomunicações de serviço de acesso à internet banda larga. Primeiramente, o modelo de simulação foi submetido aos experimentos através do software Arena[®]. Por

meio dos resultados gerados, foi identificado um percentual de perda de pacote de dados nos recursos da rede de 1,03%, que é considerado alto para o cenário. Diante disso, foi desenvolvido um modelo de integração da simulação com otimização, a fim de identificar a menor capacidade que deve ser atribuída a um recurso da rede, de forma a manter a qualidade do serviço prestado. Esse modelo mostrou o investimento otimizado necessário para atender a demanda estimada em curto prazo, identificando o possível nível de qualidade da rede. Além do estudo de caso descrito, Barradas *et al.* (2010) apresentam uma revisão bibliográfica sobre diversas áreas de aplicações da simulação em conjunto com otimização.

3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A empresa escolhida como objeto de estudo foi a Coocafé, que atua na região montanhosa do Espírito Santo e na zona da mata de Minas Gerais. A Figura 1 mostra esquematicamente o sistema de recebimento de café proveniente das propriedades rurais da região. O referido sistema considerou cinco propriedades rurais; cada uma delas fornece café para a cooperativa, que conta com quatro caminhões.

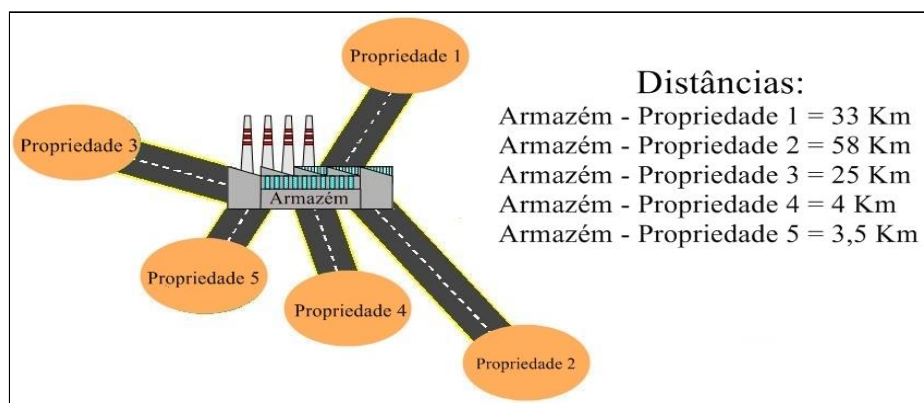


Figura 1: Representação esquemática do sistema de transporte de café.

O sistema de transporte de café analisado funciona da seguinte maneira: após a colheita e todo o processo de beneficiamento do café executado pelo produtor, este liga de sua propriedade para a Coocafé informando o desejo de venda do seu produto para a cooperativa, que, por sua vez, aloca aleatoriamente um dos quatro caminhões disponíveis para buscar o café naquela propriedade e levar para o armazém, situado em Barra Grande, distrito de Iúna, Espírito Santo. Chegando ao armazém, o café é analisado e



separado em função de seu padrão de qualidade, onde fica estocado, aguardando sua distribuição final.

Os modelos de caminhões disponíveis, juntamente com o ano de fabricação e do modelo, potência, capacidade, dada em sacas de café e coeficiente de emissão de CO₂, dada em gramas por quilowatt/hora (g/kW.h) (MANICON, 1993) estão listados na Tabela 1.

Tabela 1: Caminhões disponíveis para o transporte de café

Caminhão	Ano/Modelo	Capacidade (sacas de café)	Potência do caminhão (hp)	Coefficiente de emissão de CO (g/kW.h)
Mercedes 1513	1979/1980	200	130	14
Volks 9-160	2012/2012	170	160	1,5
Volks 8-150	2011/2011	140	150	1,5
Mercedes 710	2011/2012	110	110	1,5

O coeficiente de emissão de monóxido de carbono foi obtido com base nos dados do PROCONVE (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores), criado pelo CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) para regulamentar as emissões de poluentes no Brasil. Esse programa segue as Normas Euro de Poluição do Ar e tem como principal objetivo, de acordo com a Resolução 315/02 do CONAMA, reduzir os níveis de emissão de poluentes nos veículos automotores e promover o desenvolvimento tecnológico nacional, tanto na engenharia de projeto e fabricação, como em métodos e equipamentos para o controle da emissão de poluentes.

A Tabela 2 ilustra a situação do Brasil desde o início da implementação de tais normas (em 1989, com o Proconve P1). Atualmente, segue-se o P7, com níveis de emissões bem menores se comparados aos permitidos desde o início. Embora o nível de CO seja o mesmo nas normas Euro 4 e 5, vale ressaltar que os níveis de emissões de outros poluentes foram reduzidos de uma norma para outra.

Tabela 2: Fases do Proconve e suas respectivas regras.

PROCONVE	EURO	CO	VIGÊNCIA	NORMA (CONAMA)
Fase I (P1)	S/ Especificação	14	1989 a 1993	Res. 18/86



Fase II (P2)	Euro 0	11,2	1994 a 1995	Res. 08/93
Fase III (P3)	Euro 1	4,9	1995 a 1999	Res. 08/93
Fase IV (P4)	Euro 2	4	2000 a 2005	Res. 08/93
Fase V (P5)	Euro 3	2,1	2006 a 2008	Res. 315/02
Fase VI (P6)	Euro 4	1,5	2009 a 2012	Res. 315/02
Fase VII (P7)	Euro 5	1,5	A partir de 2012	Res. 403/08

4. DESCRIÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

O modelo de simulação elaborado neste trabalho foi desenvolvido com base na metodologia apresentada por Freitas Filho (2008), possuindo os seguintes passos: formulação e análise do problema; planejamento do projeto; formulação do modelo conceitual; coleta de macro informações e dados; tradução do modelo; verificação e validação; projeto experimental; experimentação; interpretação e análise dos resultados; comparação e identificação das melhores soluções; documentação e apresentação dos resultados. O modelo físico analisado foi traduzido para o software Arena[®] 14 em sua versão *student* (KELTON, 2007), possibilitando que as simulações computacionais sejam realizadas. O modelo foi ajustado para simular dois anos de trabalho (considerando somente os meses de safra), com o intuito de investigar emissão de CO resultante do transporte de café.

Visando melhorar a descrição e o entendimento dos processos, foi criado um modelo conceitual com base no padrão IDEF - SIM, proposto por Leal *et al.* (2010). Um modelo conceitual é uma descrição do sistema que se deseja simular, não dependendo da ferramenta de simulação a ser utilizada. Além de servir como uma aproximação do sistema real, esse modelo pode auxiliar a elaboração do modelo computacional, agilizando seu processo e definindo os pontos de coleta de informações (Brooks e Robinson, 2001). O modelo conceitual criado está apresentado na Figura 2.

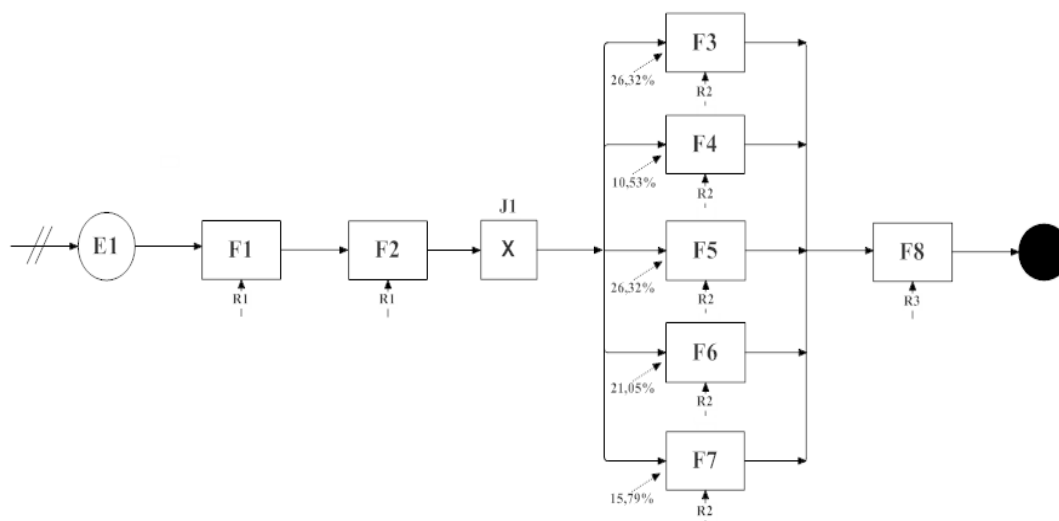


Figura 2: Modelo conceitual.

Para complementar o modelo conceitual, foi criada a Tabela 3, descrevendo todas as informações contidas no modelo. Essa tabela contém cada processo, juntamente com seus tempos estimados e quantidade de recursos necessários, além de descrever os devidos recursos, seus movimentos e as entidades apresentadas.

Tabela 3: Tabela com descrição de todas as informações contidas no modelo.

Código	Descrição	Parâmetros
E1	Solicitação de transporte de café.	WEIB (9.5, 0.92) dias
F1	Nessa etapa do processo, ocorre o recebimento de informações passadas pelos clientes, na qual se obtém a propriedade rural que requer o serviço e também a quantidade de sacas de café a serem transportadas.	Tempo do processo irrelevante para a análise realizada
F2	Nessa etapa, é feita a escolha do caminhão que faz o transporte das sacas; a escolha é feita de forma aleatória, de acordo com a disponibilidade e da capacidade dos caminhões.	Tempo do processo irrelevante para a análise realizada
F3	Etapa em que o caminhão vai à propriedade rural 1 (quando solicitado) para buscar as sacas de café.	Distância do Armazém para a Propriedade Rural 1: 33 Km



F4	Etapa em que o caminhão vai à propriedade rural 2 (quando solicitado) para buscar as sacas de café.	Distância do Armazém para a Propriedade Rural 2: 58 Km
F5	Etapa em que o caminhão vai à propriedade rural 3 (quando solicitado) para buscar as sacas de café.	Distância do Armazém para a Propriedade Rural 3: 25 Km
F6	Etapa em que o caminhão vai à propriedade rural 4 (quando solicitado) para buscar as sacas de café.	Distância do Armazém para a Propriedade Rural 4: 4 Km
F7	Etapa em que o caminhão vai à propriedade rural 5 (quando solicitado) para buscar as sacas de café.	Distância do Armazém para a Propriedade Rural 5: 3,5 Km
F8	Nessa etapa, é feito o armazenamento do café no depósito da empresa.	Processo não avaliado na pesquisa
J1	Movimentação do caminhão até as propriedades de acordo com a frequência de solicitações.	A frequência de solicitação é: propriedade 1: 26,32 %; propriedade 2: 10,53 %; propriedade 3: 26,32 %; propriedade 4: 21,05 %; propriedade 5: 15,78%.
R1	Funcionário responsável pelo atendimento.	Quantidade: 1
R2	Caminhão que fará o transporte do café.	Quantidade: 4
R3	Funcionários responsáveis pelo descarregamento dos caminhões.	Quantidade: 3

Os parâmetros de entrada do modelo (chegadas) são as solicitações de transporte de café que a Coocafé recebe por parte dos produtores. Ao solicitar o transporte, o produtor informa a propriedade que o está solicitando e a quantidade, em sacas de café, do carregamento. Nesse momento, os responsáveis pela cooperativa escolhem aleatoriamente o caminhão que será enviado para o transporte, consideradas a capacidade e disponibilidade de cada veículo. Ao ser requisitado, o caminhão segue para o sítio que



fez a solicitação, onde é carregado com as sacas de café, e, depois, para o armazém da cooperativa, onde é descarregado.

Os dados e tempos de processos utilizados no modelo são aqueles adquiridos na fase de coleta de macro informações e dados, realizada em uma reunião com um responsável pela cooperativa, que disponibilizou esses dados e informações sobre o funcionamento do sistema.

A variável de resposta do modelo é a quantidade total de monóxido de carbono emitida ao longo do processo de transporte. A quantidade de emissões geradas pela queima do combustível é uma função de diversos parâmetros, incluindo o tipo de combustível, a potência do motor do caminhão e o tempo que o motor está funcionando (MANICOM *et al.* 1993). A Equação 1 fornece a quantidade de CO emitida na unidade de gramas por quilowatt/hora (g/kW.h):

$$Ex(t) = Cco*Pot*t \quad (1)$$

Na Equação 1, as emissões produzidas “E” do veículo “x” ao longo do intervalo de tempo “t” é igual ao coeficiente de emissão Cco (do veículo x) vezes a potência do caminhão em quilowatts “Pot” vezes o período de tempo “t” (ZHOU; KUHL, 2010).

Antes de realizar a simulação do processo, fez-se necessário validar e verificar o modelo. Essas etapas foram efetuadas com base na metodologia apresentada por Sargent (2007). O modelo foi executado passo a passo, e os eventos foram analisados em relação ao tempo e demais componentes do sistema, tais como quantidade de café, destino final de cada caminhão, capacidade do caminhão e capacidade transportada, dentre outros que indicaram se havia ou não coerência entre o modelo real em análise, o modelo de simulação e o conceitual. Todavia, para aumentar a confiabilidade, a verificação foi refeita sempre que novas alterações no modelo eram executadas.

5. MODELO DE OTIMIZAÇÃO

Um problema de Simulação com Otimização pode ser representado na Equação 2 (CHEN, FU, SHI, 2008; CHEN *et al.*, 2007; CHEN *et al.*, 2010; FRAZIER, 2010):



$$\begin{aligned} \min J(\theta), \\ \theta \in \Theta \end{aligned} \quad (2)$$

Em que θ é um vetor de dimensão p que representa todas as variáveis de decisão do sistema e Θ é a região de soluções viáveis. Se $J(\theta)$ for uma função escalar, caracteriza um problema de objetivo único. Por outro lado, se $J(\theta)$ for um vetor, trata-se de um problema multiobjetivo. $J(\theta)$ é linear em θ e Θ e pode ser definido com um conjunto de equações lineares em θ que representam as restrições do problema conforme os conceitos de programação linear (BARRADAS, 2010).

Para a otimização do sistema foi utilizado o aplicativo OptQuest[®] for Arena[®]. Esse aplicativo permite criar modelos de otimização com base em modelos de simulação já desenvolvidos, sendo necessário definir uma função objetivo, para que as soluções possam ser avaliadas, e os controles, com suas respectivas restrições, para que as soluções possam ser geradas.

Os controles utilizados na otimização foram a chance de escolha de cada caminhão (em %) para o transporte do café. No modelo real, a escolha do caminhão é aleatória, ou seja, quando é solicitado o transporte de 80 sacas de café, cada um dos quatro caminhões tem 25% de chance de ser escolhido para o transporte, haja vista que todos eles possuem a capacidade necessária para tal. Caso seja solicitado um transporte de 190 sacas de café, o caminhão 1 tem 100% de chance de ser escolhido, pois somente ele possui essa capacidade. A otimização realizada visou fornecer uma configuração da chance de escolha de cada caminhão, de modo a minimizar a emissão de CO na atmosfera sem alterar a produtividade e sem aumentar o custo do sistema.

As variáveis de decisão utilizadas foram a chance de escolha (em %) de cada caminhão em cada uma das seguintes situações:

1. Quando quantidade de sacas de café a ser transportada é de, no máximo, 110;
2. Quando quantidade de sacas de café a ser transportada está entre 111 e 140;
3. Quando quantidade de sacas de café a ser transportada está entre 141 e 170.



4. Quando quantidade de sacas de café a ser transportada está acima de 170.

Assim, as variáveis e seus respectivos limites inferiores e superiores estão apresentadas na Tabela 4. Os valores para o limite inferior e superior de cada variável vão de 0% (nenhuma chance de escolha para aquele transporte) a 100% (chance total de escolha). Valores fora dessa faixa não pertencem à região de soluções viáveis do sistema.

Tabela 4: Variáveis de decisão e seus limites.

Situação	Variável de decisão (chance de escolha de cada caminhão)	Limite inferior	Limite superior
Situação 1 Solicitações até 110 sacas	Caminhão 1 (capacidade 200 sacas)	0	100
	Caminhão 2 (capacidade 170 sacas)	0	100
	Caminhão 3 (capacidade 140 sacas)	0	100
	Caminhão 4 (capacidade 110 sacas)	0	100
Situação 2 Solicitações entre 111 e 140 sacas	Caminhão 1 (capacidade 200 sacas)	0	100
	Caminhão 2 (capacidade 170 sacas)	0	100
	Caminhão 3 (capacidade 140 sacas)	0	100
Situação 3 Solicitações entre 141 e 170 sacas	Caminhão 1 (capacidade 200 sacas)	0	100
	Caminhão 2 (capacidade 170 sacas)	0	100
Situação 4 Solicitações acima de 170 sacas	Caminhão 1 (capacidade 200 sacas)	100	100

Com base no objetivo e nos controles apresentados, chegou-se ao modelo de otimização apresentado na Equação 3, que foi implementado e submetido à ferramenta OptQuest®:

$$\text{Minimizar } Z = (Cco1 \times Pot1 \times t1) + (Cco2 \times Pot2 \times t2) + (Cco3 \times Pot3 \times t3) + (Cco4 \times Pot4 \times t4) \quad (3)$$

Sujeito a:



$$CE_C1_S1 + CE_C2_S1 + CE_C3_S1 + CE_C4_S1 = 100$$

$$CE_C1_S2 + CE_C2_S2 + CE_C3_S2 = 100$$

$$CE_C1_S3 + CE_C2_S3 = 100$$

$$CE_C1_S4 = 100$$

As variáveis Cco1, Cco2, Cco3 e Cco4 representam os coeficientes de emissão de CO dos caminhões 1, 2, 3 e 4 respectivamente. As variáveis Pot1, Pot2, Pot3 e Pot4 representam a potência dos caminhões 1, 2, 3 e 4 respectivamente. As variáveis t1, t2, t3 e t4 representam o tempo de trabalho dos caminhões 1, 2, 3 e 4 respectivamente.

As variáveis presentes nas restrições do modelo de otimização seguem um padrão único: CE (chance de escolha) _C1 (caminhão 1) _S1 (situação 1). Essas restrições servem para garantir que, em nenhuma situação, haja inconsistência na soma das chances de escolha de cada caminhão, a qual não pode ser maior nem menor que 100%.

6. PROJETO EXPERIMENTAL E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Segundo Montgomery (2009), um experimento é um teste ou uma série de testes, no qual alterações controladas são realizadas sobre as variáveis envolvidas em um sistema (fatores), possibilitando observar e identificar as razões das mudanças ocorridas sobre os resultados. Sempre que se lida com experimentos, é importante estar atento ao fato de que a repetição de determinado ensaio pode levar a diferentes respostas.

Diante disto, antes de executar a otimização, fez-se necessária uma experimentação inicial a fim de identificar a quantidade ideal de replicações. Nessa etapa, foi utilizada a configuração típica da empresa (a mesma utilizada na validação do modelo e apresentada no modelo conceitual, com a escolha aleatória dos caminhões). A variável de resposta foi a quantidade de CO emitida, que começou a apresentar convergência quando executado em 24 replicações. Devido a isso, esse valor foi adotado em todos os experimentos realizados neste trabalho.

Após definir o número de replicações, o modelo foi submetido à otimização explanada na seção 5. A melhor configuração encontrada para cada uma das situações possíveis está apresentada na Figura 4. Cabe ressaltar que a situação 4 (quando a quantidade de café a ser transportada é acima de 170 sacas) não foi considerada, pois



essa situação não permite variação, visto que somente um caminhão tem capacidade para esse transporte.

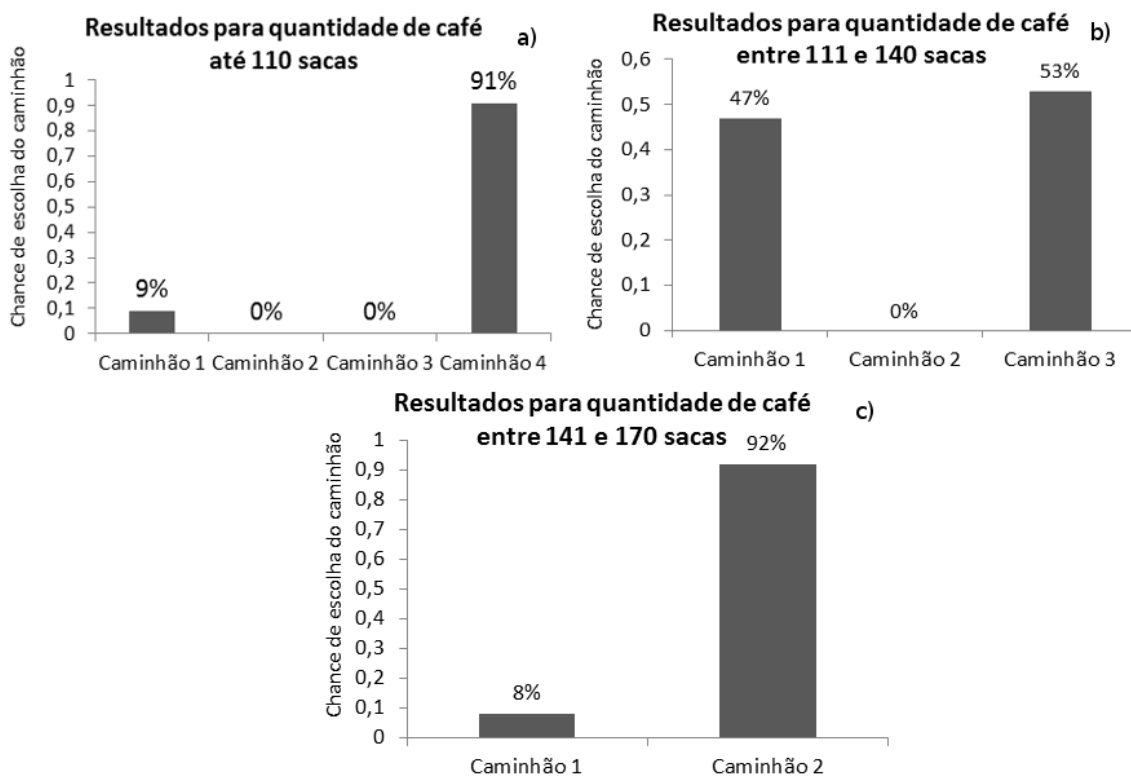


Figura 5: Resultados; a) resultados para transporte de até 110 sacas de café; b) resultados para transporte entre 111 e 140 sacas de café; c) resultados para transporte entre 141 e 170 sacas de café.

Ao observar a Figura 5, é possível notar que cada caminhão está mais adaptado a uma determinada situação. Na situação 1, a melhor configuração encontrada foi aumentar a chance de escolha do caminhão 4 para 91%, zerando os caminhões 2 e 3 e deixando o caminhão 1 com 9% de chances. Para a situação 2 (quantidade de café entre 111 e 140 sacas), o caminhão 2 continua com 0% de chance de escolha, enquanto os caminhões 1 e 3 ficam com 47% e 53% respectivamente. Na situação 3, a última avaliada, o caminhão 2 teve sua chance de escolha elevada a 92%, enquanto o caminhão 1 é escolhido em somente 8% dos transportes.



Após identificar a configuração da chance de escolha dos caminhões, a qual possui menor índice de emissão de monóxido de carbono, o modelo foi executado mais duas vezes: uma delas, usando a melhor configuração encontrada pelo modelo de otimização; a outra, utilizando sua configuração inicial, que considera a escolha totalmente aleatória dos caminhões. Essas simulações foram feitas a fim de comparar o resultado obtido pela otimização com o resultado do sistema real, no qual a escolha dos caminhões é aleatória. Os resultados dessas simulações estão apresentados na Figura 6.

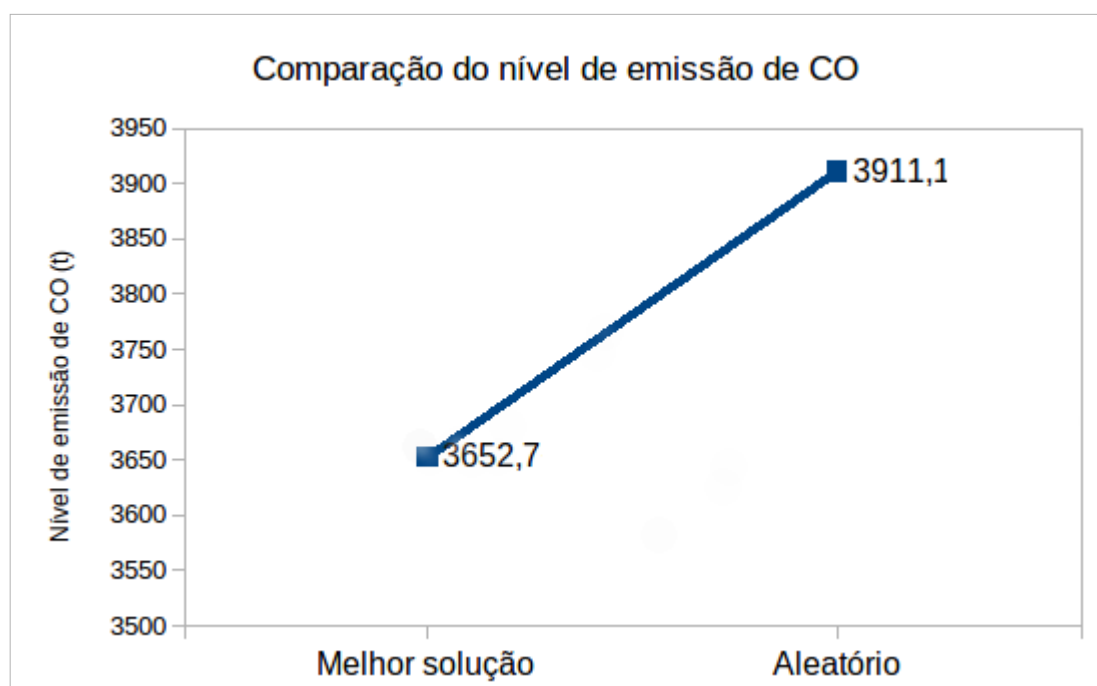


Figura 6: Comparação entre o melhor resultado encontrado e o utilizado pela cooperativa.

A Figura 6 mostra uma redução de aproximadamente 7% (258,6t) entre a configuração utilizada pela cooperativa (considerando a escolha aleatória dos caminhões) e o melhor resultado encontrado pelo modelo de otimização. Acredita-se que a redução da emissão de gases pode ser consideravelmente mais acentuada ao se trocar os caminhões mais velhos por modelos mais novos, pois estes pertencem às últimas fases do PROCONVE e, conseqüentemente, emitem menos gases nocivos ao meio ambiente. Contudo, os resultados deste trabalho são considerados satisfatórios, diante da possibilidade de reduzir a emissão de gases nocivos somente ao se direcionar a escolha



do caminhão que mais se adapta a uma determinada situação, sem sugerirem troca ou desuso de nenhum recurso, mantendo, assim, a meta de não gerar custos excedentes.

7. CONCLUSÕES

O estudo feito na Coocafé teve como objetivo analisar a emissão de monóxido de carbono resultante do transporte de café entre as propriedades rurais da região para o armazém da cooperativa, sem alterar a produtividade da empresa ou gerar custos excedentes.

Os resultados mostraram que a escolha do caminhão de acordo com cada situação específica é um fator determinante para que haja essa diminuição nos índices de emissão de gases nocivos ao meio ambiente, podendo chegar a 7% de redução no melhor cenário encontrado.

A experimentação foi conduzida alinhando a simulação computacional com a otimização realizada em um software comercial, mostrando a eficácia da combinação desses dois métodos de análise de sistemas complexos.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq e ao Instituto Federal do Espírito Santo - IFES pelo suporte financeiro para essa pesquisa. Gostariam de agradecer ainda à direção da Coocafé pelos dados e sugestões.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSEN, P. E PETERSEN, N. C. (1993). *A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis*. MANAGEMENT SCIENCE, 39, 1261-1264.

BARRADAS, S.; PESSOA, T.; LIMA, L.; TABET, B.; MARUJO, L. *Simulação com otimização de uma rede de telecomunicações de acesso a internet banda larga*. XLII SBPO, 09/2010, BENTO GONÇALVES – RS.

BROOKS, R.J.; ROBINSON, S. (2001) *Simulation, with inventory control, operational research series*. BASINGSTOKE: PALGRAVE, 2001.



BANKER, R. D.; CHARNES, A. E COOPER, W. W. (1984) *Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis*. MANAGEMENT SCIENCE, 30, 1078-1092.

R. F. S. COSTA; J. A.B. Montevechi; A.F. Pinho; “Abordagem sistemática para avaliação econômica de cenários para modelos de simulação discreta em manufatura”, XLISBPO data 30/08 a 03/09.

CARDOSO, L. D.; RANGEL, J. J. A.; GUIMARÃES, E. R. S.; VIANNA, D. S. (2012) *Simulation optimization model for analysis of inventory of carbon monoxide emissions*. In: International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 2012, Guimarães - Portugal. XVIII ICIEOM.

DELLINO, G., J. P. C. KLEIJNEN, AND C. MELONI. (2009). *Robust optimization in simulation: taguchi and krige combined*. Working paper, Tilburg University.

E. R. S. GUIMARÃES; J. J. A. RANGEL; E. SHIMODA; D. S. VIANNA; A. L. D. SKURY; A. C. A. SÁ (2013) “*Simulação com otimização para a análise do processo de fabricação de sapatas diamantadas*”, Revista eletrônica “Sistema & Gestão”.

A.C.A. Sá; A. R. S Guimarães; J.J.A. Rangel; A.L.D Skury; E.C.G. Moreira; “*Simulação discreta com projeto de experimentos para análise do sistema de fabricação de serras diamantadas*”, Revista eletrônica “Sistema & Gestão”.

KELTON, W. D.; SADOWSKI, R. P. E STURROCK, D.T. (2007). *Simulation with arena*, Forth Edition, New York: McGraw- Hill.

KLEIJNEN, J.P.C. & WAN, J. (2007). "*Optimization of simulated systems: optquest and alternatives ou “simulation for the optimization of (s, s) inventory system with random lead times and a service level constraint by using areN*", "Open Access publications from Tilburg University 12-194271, Tilburg University.

MIRANDA, R. C.; MONTEVECHI, J. A. B.; SILVA, A. F. (2013) *Redução do espaço de busca em problemas de otimização via simulação*. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2013, Natal - RN. XLV SBPO.



MONTEVECHI, J. A. B.; LEAL, A.; PINHO, A.; COSTA, R. F.; OLIVEIRA, M. L.; SILVA, A. L. (2010). *Conceptual modeling in simulation projects by mean adapted ideo: an application in a brazilian company*. In: proceedings of the winter simulation conference, baltimore, md – usa. P. 1624 – 1635.

OLIVEIRA, M. L. M, MIRANDA, R. C., MONTEVECHI, J. A. B. LEAL, F. (2010), *Desenvolvimento de um projeto de simulação a eventos discretos em uma célula de controle de qualidade de uma empresa de alta tecnologia*. In XLII SBPO 2010, Bento Gonçalves.

PINHO, A.F., MORAIS, N.S. (2010) *Utilização da simulação computacional combinada à técnica de otimização em um processo produtivo*. Revista P&D em Engenharia de Produção V. 08 N. 02, 2010 p. 88-101.

TAGUCHI, G. (1987) *System of experimental design: engineering methods to optimize quality and minimize costs*, UNIPUB/KRAUS international publications, Dearborn, 1987.

ZHOU, X.; KUHL, M. E. (2009). *Sustainability toolkit for simulation-based logistics decisions*. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, Austin, TX – USA. P. 1466 – 1473.

ZHOU, X.; KUHL, M. E. (2010). *Design and development of a sustainability toolkit for simulation*. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, Baltimore, MD – USA. P. 1601 – 1612.

ZHOU, X.; KUHL, M. E. (2011). *A sustainability toolkit for simulation: recent developments and future capabilities*. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, Phoenix, AZ – USA. P. 850 – 858.