

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPIRITO SANTO
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

GRACILIANO ALVES DA COSTA FILHO

**OTIMIZAÇÃO DE MODELO DE SIMULAÇÃO DE UMA CADEIA
DE SUPRIMENTOS DE INSUMOS DE PELOTIZAÇÃO**

Vitória

2015

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPIRITO SANTO
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

GRACILIANO ALVES DA COSTA FILHO

**OTIMIZAÇÃO DE MODELO DE SIMULAÇÃO DE UMA CADEIA
DE SUPRIMENTOS DE INSUMOS DE PELOTIZAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à banca examinadora da
Universidade Federal do Espírito Santo
para obtenção do grau de bacharel em
Engenharia de Produção.
Orientação: Prof. Dr^a. Marta Monteiro da
Costa Cruz.

Vitória 2015

GRACILIANO ALVES DA COSTA FILHO

**OTIMIZAÇÃO DE MODELO DE SIMULAÇÃO DE UMA CADEIA
DE SUPRIMENTOS DE INSUMOS DE PELOTIZAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora da Universidade Federal do Espírito Santo para obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Produção, sob orientação da Prof^a. Dr^a. Marta Monteiro da Costa Cruz.

Aprovado em 11 de dezembro de 2015

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof^a Dr^a. Marta Monteiro da Costa Cruz
Departamento do Engenharia de Produção
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientadora

Prof^a Dr^a. Patrícia Alcântara Cardoso
Departamento do Engenharia de Produção
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinadora interna

Eng. Rowena Maria Teixeira Vieira, M. Eng.
Vale
Examinadora externa

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho primeiramente à minha família, que sempre me incentivou a fazer o meu melhor em todos os meus projetos. Aos mestres que compartilharam de seus conhecimentos e tiveram um papel fundamental na minha formação como engenheiro de produção. E aos amigos que sempre estiveram ao meu lado e me ajudaram a seguir adiante.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe Dulcinea, que me criou com muito amor e dedicação e me ensinou muitos valores importantes como honestidade, respeito e compaixão. Agradeço a meus irmãos Israel e Hérculis que junto à nossa mãe me apoiaram e me incentivaram em inúmeros momentos da minha vida e principalmente durante esse longo caminho que é a graduação. Agradeço também à Universidade Federal do Espírito Santo que me deu esta oportunidade de cursar um ensino superior gratuito e de qualidade em um ambiente de aprendizado que é referência para o estado do Espírito Santo. Finalmente agradeço a todos os professores que contribuíram para o meu desenvolvimento acadêmico e profissional, principalmente à Professora Marta Cruz que me apoiou e auxiliou em algumas das empreitadas mais importantes durante esses anos de graduação.

RESUMO

Neste trabalho foram propostos modelos de otimização dos modelos de simulação de uma cadeia de suprimentos de insumos para a fabricação de pelotas de minério de ferro. Os modelos de simulação foram desenvolvidos por Oliveira Junior (2011) por meio do software Arena, então utilizou-se o software Optquest para desenvolver os modelos otimização. Diversas rodadas foram realizadas e os resultados foram comparados com aqueles obtidos também por Oliveira Junior (2011) em suas propostas de melhoria do sistema. Observou-se que para este caso o Optquest não se mostrou eficaz obtendo resultados aquém do esperado.

ABSTRACT

In this research, some simulation optimization models were propose for a supply chain of materials for iron ore pellets manufacturing. The simulation models were developed by Oliveira Junior (2011) using the software Arena, then the software Optquest was used to develop and implement the optimization models. Many iterations were made and the results were compared with those obtained by Oliveira Junior (2011). In this case, it was observed that Optquest for Arena it's not as effective as expected.

Keywords: simulation optmization, Optquest, Arena, simulation model, optimization model

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Procedimento de otimização de modelos de simulação.....	14
Figura 2 - Fluxograma das cadeias de suprimento dos três insumos.....	19
Figura 3 - Tela inicial do Optquest for Arena.	21
Figura 4 - Evolução da função objetivo de cada modelo do insumo 1.....	35
Figura 5 - Evolução da função objetivo de cada modelo do insumo 2.....	37
Figura 6 - Evolução da função objetivo de cada modelo do insumo 3.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variáveis utilizadas em Oliveira Junior(2011) para otimizar o sistema.	23
Tabela 2 - Variáveis de controle utilizadas nos modelos de otimização.	24
Tabela 3 - Valores das restrições de cada variável e para cada insumo.	32
Tabela 4 - Limites inferiores e superiores de busca de soluções para cada variável.	33
Tabela 5 - Comparação das melhores soluções de cada modelo do insumo 1.	36
Tabela 6 - Comparação das melhores soluções de cada modelo do insumo 2.	38
Tabela 7 - Comparação das melhores soluções de cada modelo do insumo 3.	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	13
3	METODOLOGIA DE PESQUISA.....	16
4	O SOFTWARE DE SIMULAÇÃO E O SOFTWARE DE OTIMIZAÇÃO	17
4.1	ARENA.....	17
4.2	O MODELO DE SIMULAÇÃO.....	18
4.3	OPTQUEST.....	19
4.4	O MODELO DE OTIMIZAÇÃO	22
4.4.1	O MODELOS DE OTIMIZAÇÃO PARA O INSUMO 1.....	25
4.4.2	O MODELOS DE OTIMIZAÇÃO PARA O INSUMO 2.....	27
4.4.3	O MODELOS DE OTIMIZAÇÃO PARA O INSUMO 3.....	29
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	34
5.1	RESULTADOS DOS MODELOS DO INSUMO 1	34
5.2	RESULTADOS DOS MODELOS DO INSUMO 2.....	36
5.3	RESULTADOS DOS MODELOS DO INSUMO 3.....	38

1 INTRODUÇÃO

As cadeias de suprimento são, em geral, sistemas complexos e que devido a infinidade de variáveis aleatórias que os influenciam, o seu gerenciamento é uma tarefa difícil e desgastante. Assim, para manter o bom desempenho e a competitividade desses sistemas é necessário o estudo aprofundado das mesmas.

Nesse contexto, a simulação de eventos discretos torna-se uma poderosa ferramenta, pois com ela pode-se imitar e analisar o funcionamento desses sistemas incluindo uma abordagem probabilística, tornando possível conhecer o seu funcionamento e prever os efeitos de possíveis alterações no sistema real de forma mais precisa e confiável.

Entretanto à medida que a complexidade dos modelos de simulação aumenta, também se torna difícil lidar e analisar todas as variáveis incluídas nele, bem como propor melhorias. Visto isso, ao longo dos anos uma outra abordagem vem sendo incluída à simulação, esta é a otimização de modelos de simulação, conhecida também pelo termo *simulation optimization*. Esta nova abordagem faz uso de modelos de otimização oriundos da pesquisa operacional e conta inclusive com *softwares* próprios disponíveis como extensão de alguns *softwares* de otimização.

Neste estudo será proposto um modelo otimização para um modelo de simulação de uma cadeia de suprimentos de insumos de fabricação de pelotas de minério de ferro. Para isso serão utilizados os modelos de simulação desenvolvidos por Oliveira Junior (2011) para a mesma cadeia de suprimentos. Os referidos modelos foram desenvolvidos através do software ARENA e o modelo de otimização proposto será desenvolvido por meio do *software* otimizador Optquest que vem incluso como ferramenta do ARENA.

O que se busca neste trabalho é verificar se este recurso de otimização traz melhores resultados que a análise de cenários correntemente utilizada em estudos de simulação a eventos discretos.

2 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Devido ao desenvolvimento de softwares robustos de simulação e o aumento da complexidade dos modelos utilizados a otimização destes vem ganhando espaço dentre as aplicações teóricas e práticas. Assim a integração de softwares de simulação e de otimização apresenta um papel chave na busca de configurações ótimas para tais modelos.

Antes de fazer um aprofundamento no assunto é necessário discutir o que é simulação e o que é otimização. Chiwif e Medina (2015) classificam o termo simulação em duas categorias distintas: a simulação computacional e a simulação não computacional. A primeira, que é um dos objetos de estudo deste trabalho. Segundo a definição de Kelton et al. (1998) *é uma gama variada de métodos e aplicações que o reproduzem comportamento de sistemas reais, usualmente utilizando-se de ferramentas computacionais*. Já a segunda categoria, que não é tratada nesse estudo, conforme Chwif e Medina (2015) não necessita de um computador para ser realizada, um exemplo é a utilização de protótipos para avaliar o desempenho de um produto em uma determinada condição.

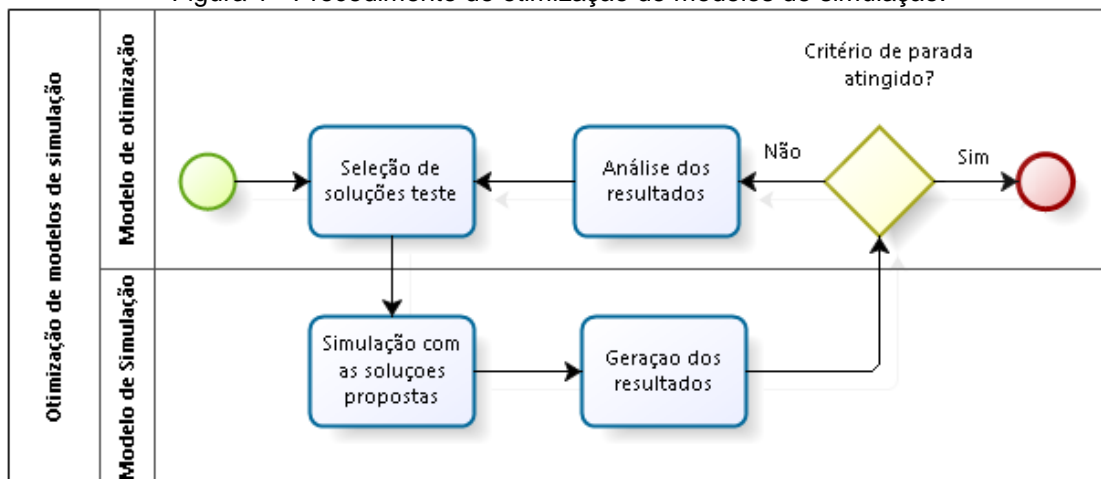
Definido essa diferença trataremos o termo simulação computacional somente como simulação. Dentre os diversos tipos de simulação, este estudo é focado na simulação de eventos discretos que basicamente é utilizada para modelar sistemas tem mudanças estado em intervalos de tempo discretos, a partir da ocorrência de eventos. Conforme Chiwif e Medina (2015), a simulação não é um modelo matemático e apesar da possibilidade de utilizar fórmulas ou um conjunto de equações em um modelo de simulação não existe uma solução analítica fechada para o modelo.

Os modelos de otimização por sua vez, são modelos matemáticos concebidos especialmente para esse propósito. Eles possuem uma ou mais funções objetivos que visam maximizar ou minimizar determinadas variáveis do problema. As variáveis utilizadas no problema estão sujeitas a equações que delimitam de alguma forma os seus valores, estas são conhecidas como

restrições. Os modelos menores, com poucas variáveis, podem ser resolvidos de forma analítica, porém modelos maiores necessitam do auxílio de heurísticas ou meta-heurísticas para serem resolvidos.

A otimização de modelos de simulação consiste na junção destas duas áreas da pesquisa operacional, o que pode fornecer melhor desempenho para o modelo de simulação. Este método é conhecido como *simulation optimization* e conforme o descrito em Melouk et al. (2013), o modelo de otimização fornece soluções de teste para o modelo de simulação para que sejam avaliadas. Essas soluções são valores para as variáveis de decisão. O modelo de simulação é executado e fornece os resultados que retornam para o modelo de otimização para avaliar o desempenho das soluções teste e ajudar na escolha de novas soluções. Esse procedimento se repete até que um determinado critério de parada seja alcançado. A figura 1, abaixo, descreve esse procedimento.

Figura 1 - Procedimento de otimização de modelos de simulação.



Fonte: o autor.

Nascimento e Cruz (2014), mostraram a evolução dos *softwares* de otimização de modelos de simulação e também a evolução de suas aplicações na cadeia de suprimentos. Isso foi feito através de uma revisão bibliográfica de alguns dos trabalhos desenvolvidos entre 2002 e 2014. Dentre os *softwares* otimizadores destacou-se a presença do Optquest como

ferramenta de diversos softwares de simulação de eventos discretos, tais como: ARENA, AnyLogic, ORACLE Crystal Ball, SIMUL8, ProModel e outros.

Melouk et al. (2013) construíram, por meio do software ARENA, um modelo de simulação de um processo de fabricação de aço. Eles o utilizaram para avaliar os níveis de estoque intermediário e possíveis alterações neste processo de manufatura. Para tal, eles aplicam a metodologia de *simulation optimization* com o objetivo de reduzir os níveis de estoque e consequentemente reduzir os custos referentes à eles. Eles fizeram uso do *software* Optquest, que é incluso como ferramenta do ARENA, para implementar o modelo de otimização.

Os resultados desta pesquisa mostraram que pequenas modificações no processo produtivo poderiam implicar em reduções significativas no custo diário de estocagem. A conclusão é que para este caso a *simulation optimization* se mostrou útil na ajuda à tomada de decisão e que o *software* obteve uma performance muito boa, com soluções de alta qualidade em um período de tempo curto.

Em outra pesquisa, realizada por Kleijnen e Wan (2007), o problema abordado foi a otimização de um modelo de simulação de um sistema de gestão de estoques. O objetivo também era a minimização dos custos de estoque. Eles também utilizaram o Arena e o Optquest para realizar a pesquisa. Os resultados obtidos com o experimento foram comparados com aqueles obtidos por outras duas equipes de pesquisadores. Além disso, a eficácia dos resultados foi verificada por meio do método das condições de Karush-Kuhn-Tucker (KKT).

Os resultados dos níveis de controle ótimo, usando o OptQuest, passaram em parte pelo teste chamado Karush-Kuhn-Tucker-(KKT) o que indicando que a sua eficiência depende do tamanho da área de busca (limites inferiores e superiores de cada variável), e também da escolha da soluções sugeridas.

3 METODOLOGIA DE PESQUISA

Inicialmente foi realizada uma análise do modelo desenvolvido por Oliveira Junior (2011) onde observou-se as variáveis do sistema e o seu comportamento dentro do mesmo. Em seguida analisou-se a forma de preparação e o funcionamento do Optquest.

Após a análise escolheu-se as variáveis do modelo de simulação que seriam utilizadas no modelo de otimização. Essas variáveis seriam as mesmas utilizadas nos cenários propostos por Oliveira Junior (2011) e uma delas seria a função objetivo à ser otimizada. Na sequência, desenvolveu-se os modelos de otimização para os modelos de simulação de cada insumo. Foram desenvolvidos 4 modelos diferentes para cada insumo, onde cada um desses modelos apresentava menor ou maior complexidade no que tange a quantidade de variáveis utilizadas.

Cada modelo foi rodado no Arena uma vez e contava com um número de simulações que é definido pelo próprio Optquest. Ou seja, o próprio software define o momento de parada com base em seu algoritmo de busca. Em sua pesquisa, Oliveira Junior (2011) realizou 80 replicações para cada rodada de simulação realizada afim de garantir a confiabilidade dos resultados, entretanto devido a quantidade de modelos e a quantidade simulações feitas em cada modelo, optar por 80 replicações para cada simulação implicaria em tempos de execução muito grandes, para uma média de 500 iterações por modelo e um tempo médio de execução de 126 segundos para iterações com 80 replicações, o tempo total de otimização de cada modelo seria de 17 horas e 30 minutos, o que tomaria muito tempo, pois existiam a todo 12 modelos de otimização.. Logo, optou-se por realizar 20 replicações para cada iteração o que tomaria 33 segundo por iteração e aproximadamente 5 horas por modelo.

Finalmente, comparou-se os resultados obtidos pelo Optquest aos resultados obtidos por Oliveira Junior (2011), afim de avaliar a qualidade das soluções encontradas pelo software.

4 O SOFTWARE DE SIMULAÇÃO E O SOFTWARE DE OTIMIZAÇÃO

Esta pesquisa teve como base dois softwares o Arena Simulation Software, aqui denominado apenas Arena, e o Optquest que é uma extensão do primeiro. O Arena permite o estudo de sistemas complexos através da simulação de processos discretos e foi utilizado por Oliveira Junior (2011) para construir o modelo da cadeia de suprimentos que também é utilizado nesta pesquisa. Já o Optquest é um software otimizador e trabalha em conjunto com os modelos de simulação do Arena. No Optquest é possível construir modelos matemáticos de otimização que serão aplicados ao modelo de simulação do Arena. Essa combinação permite a resolução de problemas de otimização tanto de natureza determinística quanto de natureza estocástica.

4.1 ARENA

O Arena é um software de modelagem e simulação de eventos discretos e é produzido pela Rockwell Automation. De forma resumida, conforme Rockwell Automation (2012), ele permite a reprodução, simulação e análise de sistemas reais e complexos através da construção de fluxogramas e uso de funções de probabilidade para captar a aleatoriedade destes sistemas. Pode ser utilizado por exemplo em cadeias de suprimento, manufatura, processos, logística em geral, serviços, e outras áreas.

Considerando a diversidade de funcionalidades do Arena e também que o modelo de simulação utilizado foi construído previamente por Oliveira Junior (2011), não serão apresentadas aqui as formas de utilizá-lo. Pode-se consultar o manual do arena publicado pela Rockwell Automation (2012) onde informações detalhadas sobre o seu funcionamento são facilmente encontradas.

4.2 O MODELO DE SIMULAÇÃO

O modelo de simulação desenvolvido por Oliveira Junior (2011) é uma representação de uma cadeia de suprimentos de insumos de fabricação de pelotas de minério de ferro. Estes insumos foram classificados em 3 categorias de insumos: calcário, bentonita e carvão mineral.

O calcário, ou insumo 1, é produzido através da extração de rochas calcárias em jazidas. O transporte é realizado pelo modo rodoviário em carretas. Ao chegar no cliente as carretas são pesadas em uma balança rodoviária que tem capacidade de um veículo por vez. Logo após, as carretas são descarregadas em uma área que comporta até dois veículos por vez.

Feito isso as carretas retornam ao fornecedor e o calcário é transportado e armazenado em silos de calcário bruto. Quando os níveis de calcário nos silos diários diminuem, o calcário bruto é enviado para a moagem onde ele será processado até atingir a especificação desejada e então será estocado nos silos diários. As quantidades de insumos consumidas na planta de pelletização são definidas pelo tipo de campanha de produção.

A bentonita, ou insumo 2, é extraída de jazidas à céu aberto e também é transportada por meio de carretas. O processo de produção da bentonita é muito parecido com o do calcário com a exceção de que este insumo já é entregue nas especificações do cliente e não precisa de moagem. Mesmo assim seus modelos de simulação são os mesmos, com variações apenas nas quantidades e capacidades dos recursos e o processo de moagem é substituído pelo de bombeamento.

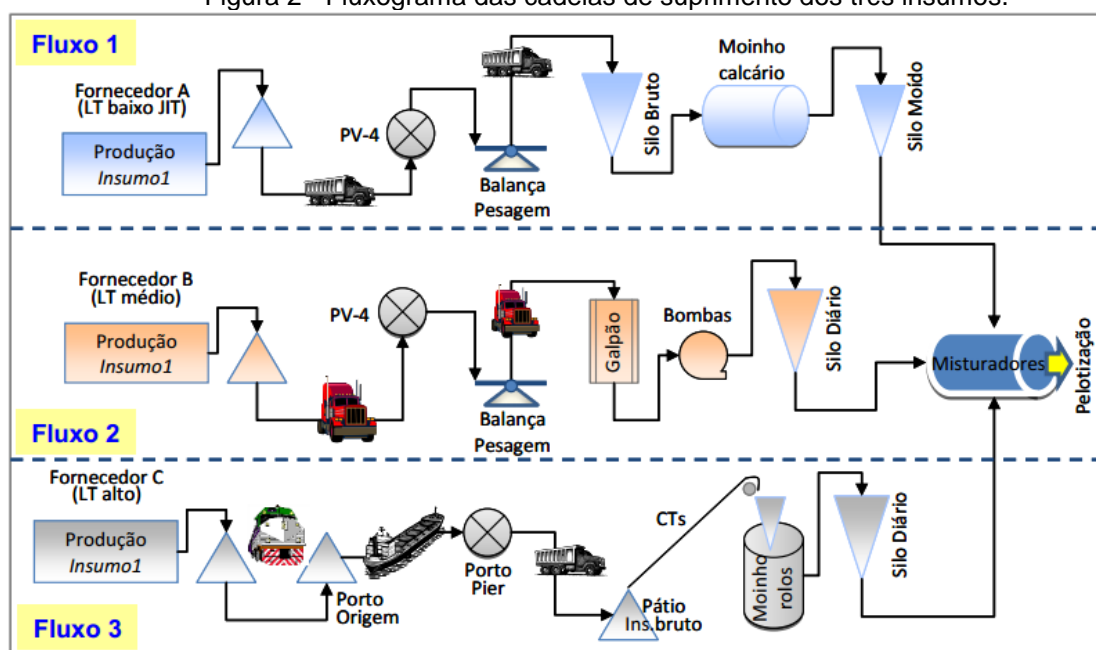
Já a cadeia do carvão é diferente. Ele é produzido em minas subterrâneas ou em céu aberto na África do Sul e em seguida é beneficiado em uma planta industrial. Então ele é transportado via modo ferroviário até

um porto, onde um navio é carregado e faz o transporte até o porto localizado na planta industrial do cliente.

Ao chegar no cliente, caminhões são designados para transportar o carvão do navio para dentro da planta onde ele será descarregado em pilhas. Não é feita a pesagem dos caminhões, a quantidade de carvão é calculada através da medida do calado do navio. Após o carvão é depositado em silos de insumo bruto até ser moído e então ser depositado nos silos diário. Diferente dos outros insumos, o carvão é consumido regularmente em todas campanhas de produção da usina.

Os modelos foram construídos de forma a representar o melhor possível os sistemas reais.

Figura 2 - Fluxograma das cadeias de suprimento dos três insumos.



Fonte: adaptado de Oliveira Junior (2011)

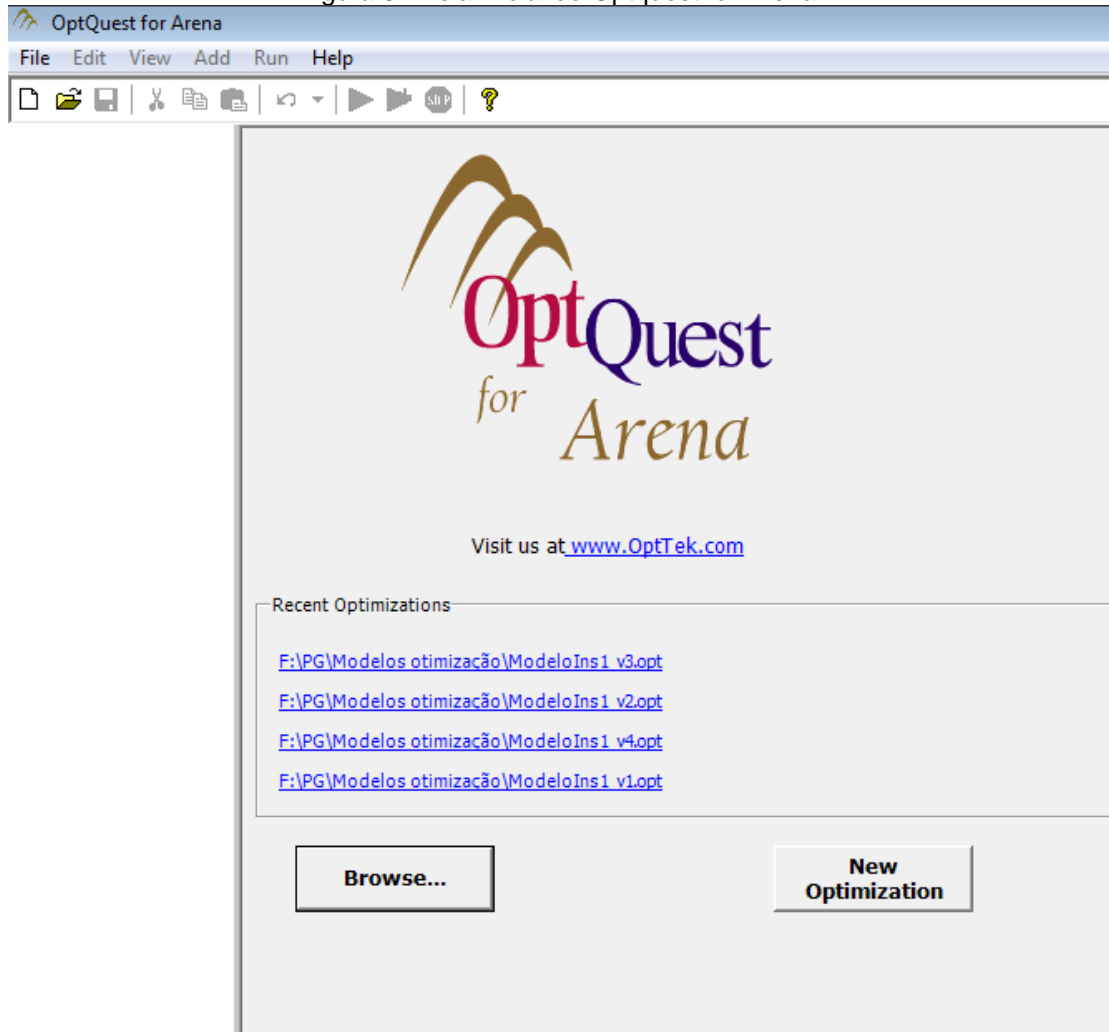
4.3 OPTQUEST

Como dito antes o Optquest é um otimizador de sistemas de simulação e é uma extensão que já vem inclusa ao adquirir o Arena. Ele também está

disponível para outros *softwares* como citado anteriormente. Segundo Kleijnen e Wan (2007), o Optquest combina as meta-heurísticas *Tabu Search*, *Neural Networks* e *Scatter Search* em um único algoritmo para buscar as soluções ótimas ou quase ótimas de um determinado modelo. Ainda segundo Kleijnen e Wan (2007) o *software* observa apenas os *Inputs* (valores iniciais do sistema) e os *Outputs* (resultados do sistema), ou seja, ele trata a simulação como uma caixa preta.

Para utilizar o Optquest, é necessário ter um modelo de simulação que funcione adequadamente no Arena. Conforme o manual escrito por Rockwell Automation (2012), para acessar o Optquest, clique em “Tools” na barra de funções do Arena e selecione a opção “Optquest for Arena”. Em seguida aparecerá o menu inicial do Optquest, onde há as opções *Browse* para buscar um modelo de otimização já existente; e a opção *New Optimization* para criar um novo modelo, como apresentado na figura 3.

Figura 3 - Tela inicial do Optquest for Arena.



Fonte: adaptado de Optquest for Arena.

Após esta etapa, clique em *New Optimization* e a tela principal do programa aparecerá. A interface do Optquest é parecida com a do Windows Explorer, onde existe um faixa à esquerda da tela com uma árvore de opções, denominadas nós, e do meio para a direita mostra o conteúdo de cada uma daquelas opções.

Na faixa de opções, temos os principais nós:

- “*Controls*”: aqui seleciona-se as variáveis de controle do modelo. Estão disponíveis todas as variáveis do modelo de simulação que são passíveis de alteração por meio o Optquest. O *software* atribuirá valores iniciais para estas variáveis a cada nova simulação.

- “*Responses*”: Assim como em *Controls*, aqui também pode-se definir variáveis de controle para o sistema. Entretanto, as variáveis escolhidas neste nó são respostas da simulação e o Optquest não afere valores para as mesmas. Muitas das variáveis disponíveis aqui são iguais às do nó *controls*.
- “*Constraints*”: neste nó são definidas as restrições do modelo. Clique em *Add* e na tela que aparece estarão as variáveis escolhidas nos dois nós anteriores, para que sejam definidas restrições para as mesmas. No lado direito, estão presentes todas as operações matemáticas disponíveis no Optquest.
- “*Objectives*”: neste nó define-se os objetivos do modelo. Clique em *Add* e uma tela semelhante à apresentada em *Constraints* aparecerá. Selecione as variáveis e insira a função no campo indicado. Então selecione o objetivo do modelo: *Maximize* ou *Minimize*.
- “*Suggested Solutions*”: nesta parte é possível inserir sugestões de soluções para o modelo. Quando o mesmo for rodado ele utilizará estas sugestões nas simulações iniciais.
- “*Options*”: em “*options*” é possível definir número de simulações, número de replicações de cada simulação, tolerância, local de armazenamento de resultados e outros.
- “*Optimization*”: neste nó acompanha-se a evolução das soluções ao longo da rodada de otimização. Ao final da otimização, pode-se gravar as melhores soluções e também adicioná-las ao *Suggested Solutions*.

4.4 O MODELO DE OTIMIZAÇÃO

Oliveira Junior (2011) inicialmente analisou o sistema em suas condições iniciais, modelo *As Is*, e em seguida testou duas situações de alterações no sistema. A primeira é um aumento nas capacidades de armazenagem, dos recursos em geral e também a capacidade de produção tanto do cliente como do fornecedor. A segunda consiste na alteração no modo de transporte rodoviário para o ferroviário. Neste trabalho considerou-

se apenas a primeira situação, pois a segunda necessitaria de diversas alterações no modelo de simulação, o que foge ao objetivo deste trabalho.

Oliveira Junior (2011) fez e testou uma série proposições para melhorar o desempenho do sistema. Ele utilizou em cada uma delas algumas variáveis onde as alterações foram realizadas manualmente no modelo de simulação. Também foi considerado um conjunto de resultados para avaliar o desempenho das proposições, dentre eles, o objetivo principal era reduzir a quantidade de horas de interrupção de produção do sistema, que é medido através da variável “interrupção_producao”.

Tabela 1 - Variáveis utilizadas em Oliveira Junior(2011) para otimizar o sistema.

Simulação	Proposição	Variáveis	Und
1	Manutenção das métricas dentro do novo cenário	-	-
2	Aumento da capacidade de estocagem do silo de insumo moído no cliente	est_atual_cliente	ton
3	Instalação de mais um moinho	qtd_transf_bruta_cliente	ton/h
4	Aumento da capacidade de estocagem do silo de insumo bruto no cliente	est_atual_bruto_cliente	ton
5	Aumento do número de recursos de recebimento - balança, car dumper e slots de descarga	balança, descarrega_caminhão	und
6	Aumento na capacidade média do mode de transporte	cap_caminhão, cap_naivo	ton/veículo
7	Aumento na capacidade de estocagem no fornecedor	est_atual_fornecedor	ton
8	Aumento da capacidade nominal de produção dos fornecedores	produção_hora	ton/h
9	Redução da disponibilidade dos moinhos e sistemas de bombas	qtd_transf_bruta_cliente	ton/h
10	Aumento ou redução no tempo de rota dos fornecedores ao cliente.	rota_fornecedor_cliente	km
11	Aumento no tempo entre gestões de estoque	gestao	h

Fonte: adaptado de Oliveira Junior (2011).

Devido à forma como algumas dessas variáveis foram concebidas no modelo de simulação, não é possível utiliza-las no Optquest, pois ele não trabalha com alguns tipos de variáveis. São elas “rota_fornecedor_cliente” e “gestao”, estas sequer aparecem como opções no Opqtuest. Além disso, não foi considerado a redução da disponibilidade dos moinhos.

A tabela 2, indica as variáveis que foram utilizadas em cada modelo de simulação.

Tabela 2 - Variáveis de controle utilizadas nos modelos de otimização.

Variáveis	Unidade	Modelo de otimização			
		M1	M2	M3	M4
cap_navio, cap_caminhão, cap_caminhao_carvao	ton/ veículo	X	X	X	X
balanca, descarrega_caminhao, car_dumper	und	X	X	X	X
produção_hora	ton/h		X	X	
qtd_transf_bruta_cliente	ton/h		X	X	
est_alvo_cliente, est_max_cliente	ton			X	X
est_alvo_bruto_cliente, est_max_bruto_cliente	ton			X	X
est_alvo_fornecedor, est_max_fornecedor	ton			X	X

Fonte: o autor

Selecionadas as variáveis, formulou-se os modelos de otimização. Os modelos foram elaborados de forma a aumentar a sua complexidade adicionando variáveis que poderiam melhorar o desempenho do sistema. Outro ponto importante é que a função objetivo definida é minimizar o total de horas de interrupção da produção, assim como Oliveira Junior (2011), entretanto esta função não depende diretamente das variáveis de restrição. O efeito produzido no sistema, alterando-se os valores das variáveis de restrição terá como consequência a redução ou não das horas de interrupção da produção.

Devido a semelhança dos modelos de simulação dos insumos 1 e 2 os modelos de otimização são os mesmos para estes insumos, com diferenças apenas nos valores das restrições.

4.4.1 O MODELOS DE OTIMIZAÇÃO PARA O INSUMO 1

Insumo 1 Modelo M1

\min *Interrupcao_producao*

Sujeito à:

$30 \leq cap_caminhao \leq 50$ onde $cap_caminhao = \{30,35,40,45,50\}$

$balanca \geq 1$

$descarrega_caminhao \geq 1$

$balanca, descarrega_caminhao \in N$

Insumo 1 Modelo M2

\min *Interrupcao_producao*

Sujeito à:

$30 \leq cap_caminhao \leq 50$ onde $cap_caminhao = \{30,35,40,45,50\}$

$balanca \geq 1$

$descarrega_caminhao \geq 3$

$producao_hora \geq 170$

$qtd_transf_bruta_cliente \geq 130$

$balanca, descarrega_caminhao \in N$

$producao_hora, qtd_transf_bruta_cliente \in R$

Insumo 1 Modelo M3

\min *Interrupcao_producao*

Sujeito à:

$30 \leq cap_caminhao \leq 50$ onde $cap_caminhao = \{30,35,40,45,50\}$

$balanca \geq 1$
 $descarrega_caminhao \geq 3$
 $producao_hora \geq 170$
 $qtd_transf_bruta_cliente \geq 130$
 $est_max_cliente \geq 3700$
 $est_alvo_bruto_cliente \geq 1800$
 $est_max_bruto_cliente \geq 2000$
 $est_alvo_fornecedor \geq 4500$
 $est_max_fornecedor \geq 9000$
 $est_alvo_bruto_cliente \leq est_max_bruto_cliente$
 $est_alvo_fornecedor \leq est_max_fornecedor$
 $balanca, descarrega_caminhao \in N$
 $producao_hora, qtd_transf_bruta_cliente \in R$
 $est_max_cliente, est_max_bruto_cliente, est_max_fornecedor \in I$
 $est_alvo_bruto_cliente, est_alvo_fornecedor \in I$

Insumo 1 Modelo M4

$\min Interrupcao_producao$

Sujeito à:

$30 \leq cap_caminhao \leq 50$ onde $cap_caminhao = \{30,35,40,45,50\}$

$balanca \geq 1$
 $descarrega_caminhao \geq 3$
 $est_max_cliente \geq 3700$
 $est_alvo_bruto_cliente \geq 1800$
 $est_max_bruto_cliente \geq 2000$
 $est_alvo_fornecedor \geq 4500$
 $est_max_fornecedor \geq 9000$
 $est_alvo_bruto_cliente \leq est_max_bruto_cliente$
 $est_alvo_fornecedor \leq est_max_fornecedor$
 $balanca, descarrega_caminhao \in N$

$est_max_cliente, est_max_bruto_cliente, est_max_fornecedor \in I$
 $est_alvo_bruto_cliente, est_alvo_fornecedor \in I$

4.4.2 O MODELOS DE OTIMIZAÇÃO PARA O INSUMO 2

Como dito anteriormente para o insumo 2 foram utilizados os mesmos modelos de otimização do insumo 1, com diferenças apenas nos valores das restrições.

Insumo 2 Modelo M1

$\min Interrupcao_producao$

Sujeito à:

$30 \leq cap_caminhao \leq 50$ onde $cap_caminhao = \{30,35,40,45,50\}$

$balanca \geq 1$

$descarrega_caminhao \geq 3$

$balanca, descarrega_caminhao \in I$

Insumo 2 Modelo M2

$\min Interrupcao_producao$

Sujeito à:

$30 \leq cap_caminhao \leq 50$ onde $cap_caminhao = \{30,35,40,45,50\}$

$balanca \geq 1$

$descarrega_caminhao \geq 3$

$producao_hora \geq 170$

$qtd_transf_bruta_cliente \geq 15$

$balanca, descarrega_caminhao \in I$

$producao_hora, qtd_transf_bruta_cliente \in R$

Insumo 2 Modelo M3

\min *Interrupcao_producao*

Sujeito à:

$30 \leq cap_caminhao \leq 50$ onde $cap_caminhao = \{30,35,40,45,50\}$

$balanca \geq 1$

$descarrega_caminhao \geq 1$

$producao_hora \geq 170$

$qtd_transf_bruta_cliente \geq 15$

$est_max_cliente \geq 1280$

$est_alvo_bruto_cliente \geq 3000$

$est_max_bruto_cliente \geq 3500$

$est_alvo_fornecedor \geq 4000$

$est_max_fornecedor \geq 5000$

$est_alvo_bruto_cliente \leq est_max_bruto_cliente$

$est_alvo_fornecedor \leq est_max_fornecedor$

$balanca, descarrega_caminhao \in I$

$producao_hora, qtd_transf_bruta_cliente \in R$

$est_max_cliente, est_max_bruto_cliente, est_max_fornecedor \in I$

$est_alvo_bruto_cliente, est_alvo_fornecedor \in I$

Insumo 2 Modelo M4

\min *Interrupcao_producao*

Sujeito à:

$30 \leq cap_caminhao \leq 50$ onde $cap_caminhao = \{30,35,40,45,50\}$

$balanca \geq 1$

$descarrega_caminhao \geq 1$

$est_max_cliente \geq 1280$

$est_alvo_bruto_cliente \geq 3000$
 $est_max_bruto_cliente \geq 3500$
 $est_alvo_fornecedor \geq 4000$
 $est_max_fornecedor \geq 5000$
 $est_alvo_bruto_cliente \leq est_max_bruto_cliente$
 $est_alvo_fornecedor \leq est_max_fornecedor$
 $balanca, descarrega_caminhao \in I$
 $est_max_cliente, est_max_bruto_cliente, est_max_fornecedor \in I$
 $est_alvo_bruto_cliente, est_alvo_fornecedor \in I$

4.4.3 O MODELOS DE OTIMIZAÇÃO PARA O INSUMO 3

Para o insumo 3 foi desenvolvido um modelo um pouco diferente devido as diferenças no modo de transporte.

Insumo 3 Modelo M1

$\min Interrupcao_producao$

Sujeito à:

$25 \leq cap_caminhao_carvao \leq 50$ onde $cap_caminhao = \{25,30,35,40,45,50\}$

$cap_navio \geq 50000$

$carregador_vagao \geq 1$

$car_dumper \geq 1$

$cap_navio, carregador_vagao, car_dumper \in I$

Insumo 3 Modelo M2

$\min Interrupcao_producao$

Sujeito à:

$25 \leq \text{cap_caminhao_carvao} \leq 50$ onde $\text{cap_caminhao} = \{25,30,35,40,45,50\}$
 $\text{cap_navio} \geq 50000$
 $\text{carregador_vagao} \geq 1$
 $\text{car_dumper} \geq 1$
 $\text{producao_hora} \geq 400$
 $\text{qtd_transf_bruta_cliente} \geq 62$
 $\text{producao_hora}, \text{qtd_transf_bruta_cliente} \in R$
 $\text{cap_navio}, \text{carregador_vagao}, \text{car_dumper} \in I$

Insumo 3 Modelo M3

min Interrupcao_producao

Sujeito à:

$25 \leq \text{cap_caminhao_carvao} \leq 50$ onde $\text{cap_caminhao} = \{25,30,35,40,45,50\}$
 $\text{cap_navio} \geq 50000$
 $\text{carregador_vagao} \geq 1$
 $\text{car_dumper} \geq 1$
 $\text{producao_hora} \geq 400$
 $\text{qtd_transf_bruta_cliente} \geq 62$
 $\text{est_max_cliente} \geq 900$
 $\text{est_alvo_bruto_cliente} \geq 60000$
 $\text{est_max_bruto_cliente} \geq 90000$
 $\text{est_alvo_bruto_porto} \geq 60000$
 $\text{est_max_bruto_porto} \geq 90000$
 $\text{est_alvo_fornecedor} \geq 30000$
 $\text{est_max_fornecedor} \geq 40000$
 $\text{est_alvo_bruto_cliente} \leq \text{est_max_bruto_cliente}$
 $\text{est_alvo_fornecedor} \leq \text{est_max_fornecedor}$
 $\text{est_alvo_bruto_porto} \leq \text{est_max_bruto_porto}$
 $\text{producao_hora}, \text{qtd_transf_bruta_cliente} \in R$
 $\text{cap_navio}, \text{carregador_vagao}, \text{car_dumper} \in I$

$est_max_cliente, est_max_bruto_cliente, est_max_fornecedor, est_max_bruto_porto$
 $\in I$

$est_alvo_bruto_cliente, est_alvo_fornecedor, est_alvo_bruto_porto \in I$

Insumo 3 Modelo M4

$min Interrupcao_producao$

Sujeito à:

$25 \leq cap_caminhao_carvao \leq 50$ onde $cap_caminhao = \{25,30,35,40,45,50\}$

$cap_navio \geq 50000$

$carregador_vagao \geq 1$

$car_dumper \geq 1$

$est_max_cliente \geq 900$

$est_alvo_bruto_cliente \geq 60000$

$est_max_bruto_cliente \geq 90000$

$est_alvo_bruto_porto \geq 60000$

$est_max_bruto_porto \geq 90000$

$est_alvo_fornecedor \geq 30000$

$est_max_fornecedor \geq 40000$

$est_alvo_bruto_cliente \leq est_max_bruto_cliente$

$est_alvo_fornecedor \leq est_max_fornecedor$

$est_alvo_bruto_porto \leq est_max_bruto_porto$

$cap_navio, carregador_vagao, car_dumper \in I$

$est_max_cliente, est_max_bruto_cliente, est_max_fornecedor, est_max_bruto_porto$
 $\in I$

$est_alvo_bruto_cliente, est_alvo_fornecedor, est_alvo_bruto_porto \in I$

Os valores das restrições de cada insumo são os mesmos do modelo de simulação no cenário atual e estão resumidos abaixo. Considerou-se que para melhorar o desempenho do sistema é necessário aumentar a capacidade ou a quantidade dos recursos disponíveis nele.

Tabela 3 - Valores das restrições de cada variável e para cada insumo.

Variáveis	Unidade	Valor da restrição por insumo		
		Insumo 1	Insumo 2	Insumo 3
balança	Und	1	1	Não há
cap_caminhão	Ton	30	30	Não há
cap_caminhao_carvao	Ton	Não há	Não há	25
cap_navio	Ton	Não há	Não há	50000
car_dumper	Und	Não há	Não há	3
carregador_vagão	Und	Não há	Não há	1
descarrega_caminhão	Und	3	3	Não há
est_alvo_bruto_cliente	Ton	1800	3000	60000
est_alvo_fornecedor	Ton	4500	4000	30000
est_alvo_porto	Ton	Não há	Não há	60000
est_max_bruto_cliente	Ton	2000	3500	90000
est_max_cliente	Ton	3700	1280	900
est_max_fornecedor	Ton	9000	5000	60000
est_max_porto	Ton	Não há	Não há	90000
produção_hora	Ton/h	170	170	400
qtd_transf_bruta_cliente	Ton/h	120	15	62

Fonte: o autor.

Além disso, foram definidos limites superiores e inferiores aonde o Optquest realizará a busca pelas soluções. Ou seja, as soluções propostas por ele estarão dentro dos intervalos definidos na tabela abaixo.

Tabela 4 - Limites inferiores e superiores de busca de soluções para cada variável.

Variáveis	Unidade	Limite Inferior	Limite Superior
balança	Und	0	5
cap_caminhão	Ton	30	50
cap_caminhao_carvao	Ton	25	50
cap_navio	Ton	50000	300000
car_dumper	Und	0	10
carregador_vagão	Und	0	10
descarrega_caminhão	Und	0	10
est_alvo_bruto_cliente	Ton	0	99999
est_alvo_fornecedor	Ton	0	99999
est_alvo_porto	Ton	0	99999
est_max_bruto_cliente	Ton	0	99999
est_max_cliente	Ton	0	99999
est_max_fornecedor	Ton	0	99999
est_max_porto	Ton	0	99999
produção_hora	Ton/h	0	1000
qtd_transf_bruta_cliente	Ton/h	0	500

Fonte: o autor.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

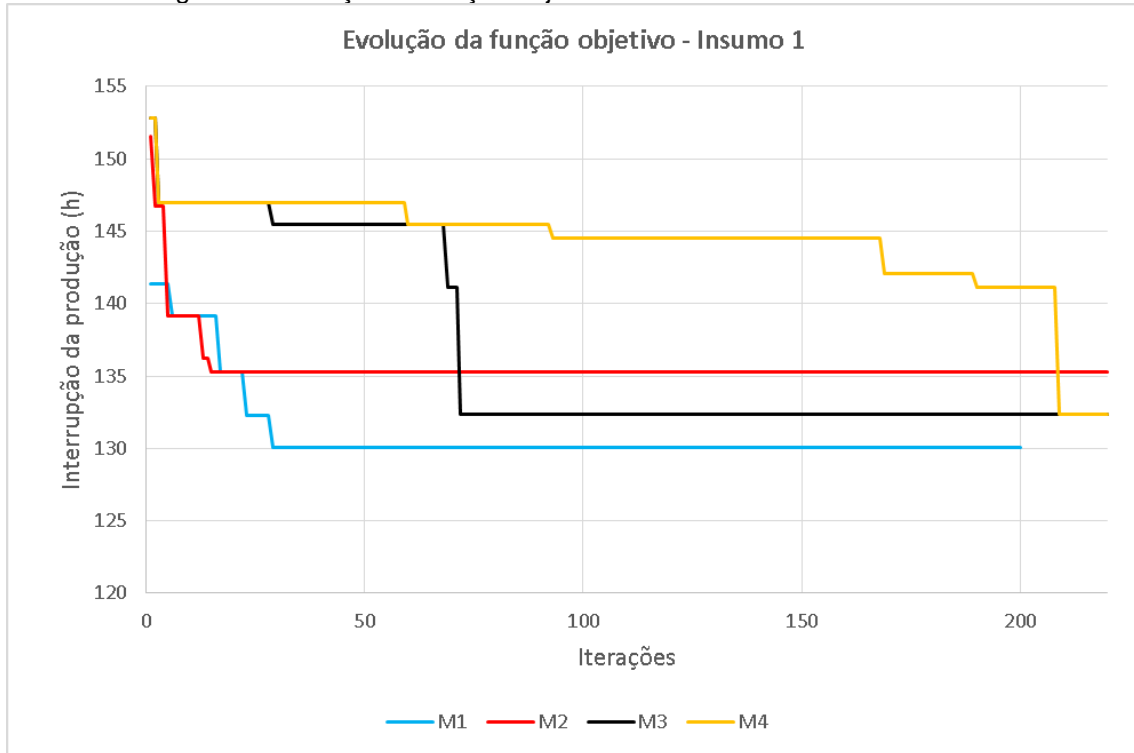
Os resultados e as análises são apresentados a seguir e estão separados conforme o tipo de insumo. Além disso eles foram resumidos em gráficos de evolução da função objetivo e em tabelas aonde foram selecionadas as melhores soluções da cada modelo e comparadas com os melhores cenários propostos por Oliveira Junior (2011).

É importante lembrar que nas tabelas de comparação dos modelos, as células que contém o símbolo “-“ indicam que aquela variável não foi utilizada no respectivo modelo.

5.1 RESULTADOS DOS MODELOS DO INSUMO 1

A figura 4 mostra a evolução da função objetivo para cada modelo do insumo 1. Percebe-se que a inserção de variáveis nos modelos não surtiu efeito significativo na qualidade das soluções, pois a maior diferença máxima entre os resultados finais das funções objetivo é de apenas 5 horas. Nota-se também que ao inserir variáveis relacionadas à estoque houve um aumento significativo no tempo necessário para minimizar a função objetivo.

Figura 4 - Evolução da função objetivo de cada modelo do insumo 1.



Fonte: o autor.

A seguir temos a comparação dos melhores resultados de cada modelo. Percebe-se que nenhum dos modelos utilizados no Optquest alcançou os resultados obtidos por Oliveira Junior (2011). Observa-se também que a maioria dos resultados foi pior do que o tempo de interrupção da produção da situação inicial. Além disso, as alterações propostas por ele são muito mais simples e em quantidades bem menores do que as sugeridas pelo Optquest.

Tabela 5 - Comparação das melhores soluções de cada modelo do insumo 1.

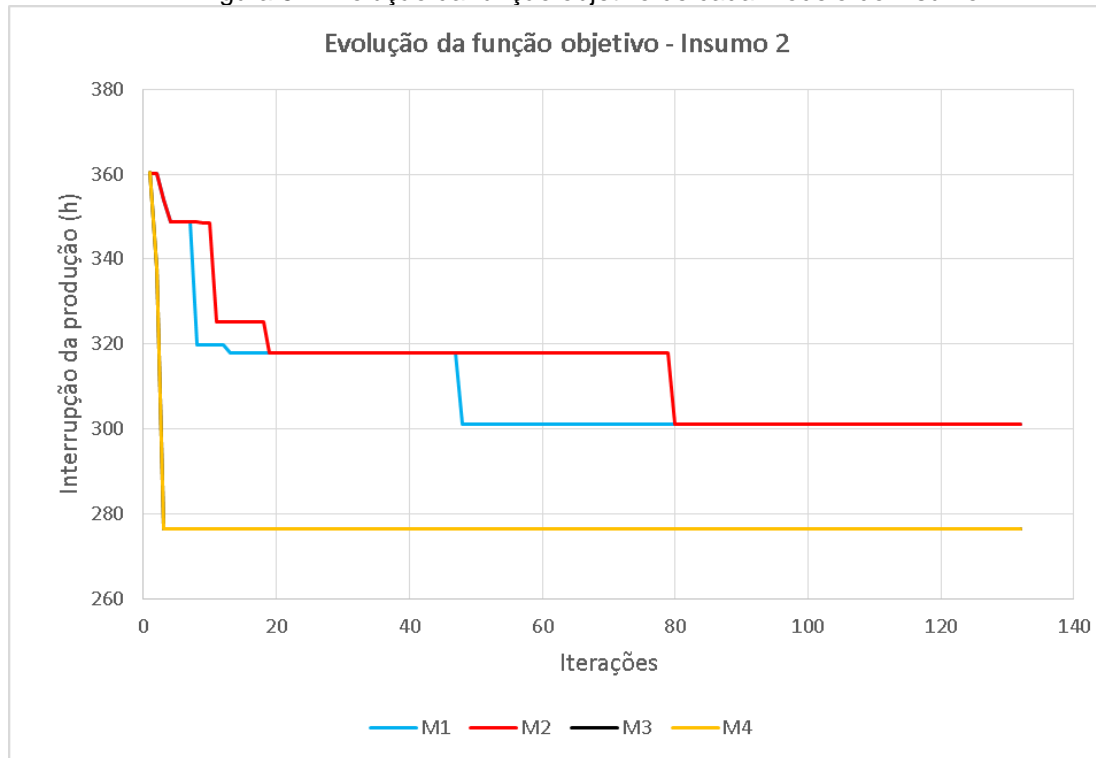
Variáveis	Situação Inicial	Soluções por modelo				
		M1	M2	M3	M4	Oliveira
balança	1	3	2	4	4	-
cap_caminhão	30	30	45	50	50	-
descarrega_caminhão	3	9	3	3	3	-
est_alvo_bruto_cliente	1800	-	-	2000	2225	-
est_alvo_fornecedor	4500	-	-	5406	6936	-
est_max_bruto_cliente	2000	-	-	2000	2469	-
est_max_cliente	3700	-	-	8764	3700	4070
est_max_fornecedor	9000	-	-	9000	14674	-
produção_hora	170	-	183	170	-	-
qtd_transf_bruta_cliente	120	-	192	151	-	140
Resultado Função Objetivo						
interrupção_produção	125	130	135	132	132	0

Fonte: o autor. "-" indica que a variável não sofreu alteração.

5.2 RESULTADOS DOS MODELOS DO INSUMO 2

Ao contrário do que acontece para os modelos do Insumo 1, o modelo M2 do Insumo 2, que possui as variáveis produção_hora e qtd_transf_bruta_cliente, necessita de mais iterações para atingir o mesmo resultado de M1. Já para os modelos M3 e M4, a retirada dessas variáveis, não influencia nos resultados e nem no número de iterações necessárias para atingi-los. As duas curvas simplesmente se confundem no gráfico.

Figura 5 - Evolução da função objetivo de cada modelo do insumo 2.



Fonte: o autor.

Apesar de obterem um desempenho melhor do que a situação inicial do problema, os modelos de otimização propostos para o Insumo 2 também não atingiram o resultado de Oliveira Junior (2011). Assim como no Insumo 1, as alterações propostas por ele foram muito mais simples do que as propostas pelo Optquest.

Tabela 6 - Comparação das melhores soluções de cada modelo do insumo 2.

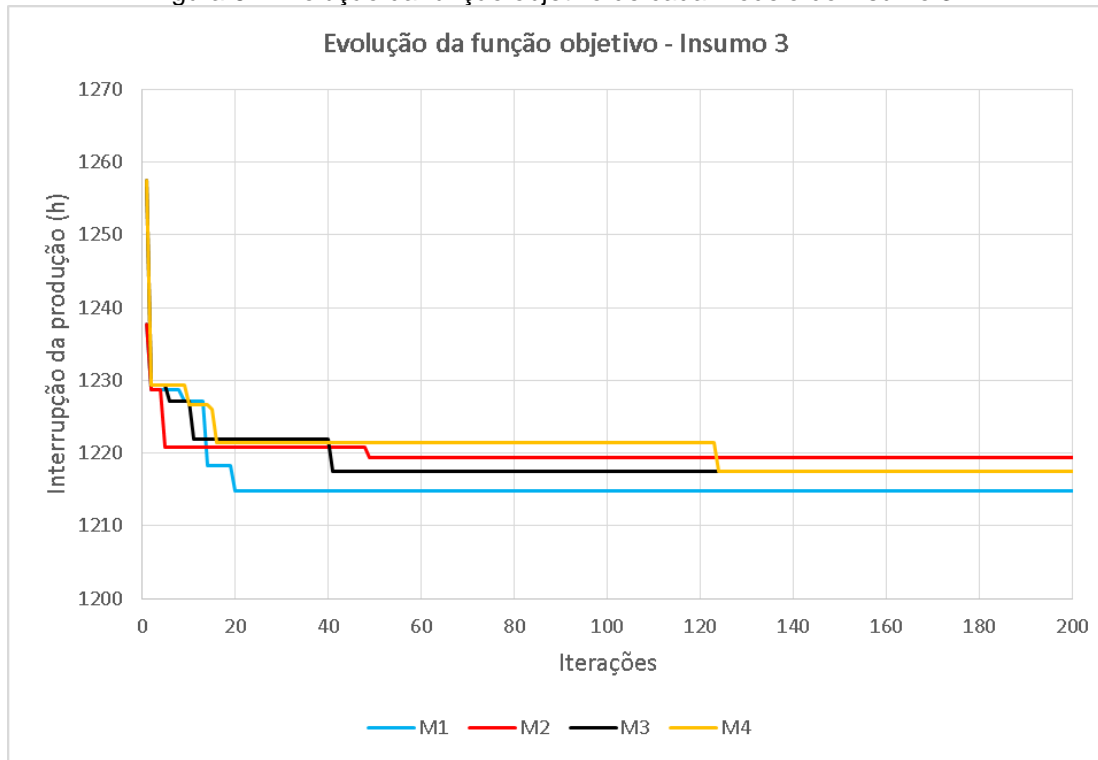
Variáveis	Situação	Soluções por modelo				
	Inicial	M1	M2	M3	M4	Oliveira
balança	1	1	1	4	4	-
cap_caminhão	30	30	35	50	50	-
descarrega_caminhão	3	5	5	8	8	-
est_alvo_bruto_cliente	3000	-	-	53758	58213	-
est_alvo_fornecedor	4000	-	-	27618	9120	-
est_max_bruto_cliente	3500	-	-	66465	58213	4550
est_max_cliente	1280	-	-	9347	2560	-
est_max_fornecedor	5000	-	-	49469	9120	-
produção_hora	170	-	215	385	-	-
qtd_transf_bruta_cliente	15	-	20	96	-	25
Resultado Função Objetivo						
interrupção_produção	404	300,95	300,95	276,3	276,3	0

Fonte: o autor. "-" indica que a variável não sofreu alteração.

5.3 RESULTADOS DOS MODELOS DO INSUMO 3

Para os modelos do insumo 3, os modelos propostos tiveram um desempenho parecido e com uma diferença pequena, e a evolução delas foi parecida. Apesar da pouca diferença, o modelo M1 teve o melhor desempenho. Ao inserir outras variáveis, os modelos perdem um pouco de desempenho mas não muito, mostrando quem as interrupções na produção são pouco sensíveis as variáveis selecionadas.

Figura 6 - Evolução da função objetivo de cada modelo do insumo 3.



Fonte: o autor.

Ao olhar a tabela 5, percebe-se que os modelos de otimização propostos reduziram pouco o tempo de interrupção de produção. Isso reforça a ideia de que para a cadeia do insumo 3, a função objetivo é pouco sensível as alterações nas variáveis de controle. O melhor resultado das proposições feitas aqui foi apenas 2% inferior ao valor da situação inicial.

Tabela 7 - Comparação das melhores soluções de cada modelo do insumo 3.

Variáveis	Situação	Resultados por modelo				
	Inicial	M1	M2	M3	M4	Oliveira
cap_caminhao_carvao	25	30	50	50	50	-
cap_navio	50000	76000	230000	300000	300000	-
car_dumper	3	10	9	6	6	-
carregador_vagão	1	3	10	4	4	-
est_alvo_bruto_cliente	60000	-	-	86204,999	60000	-
est_alvo_fornecedor	30000	-	-	55974	30000	-
est_alvo_porto	60000	-	-	60122	88282	-
est_max_bruto_cliente	90000	-	-	203521	115042	-
est_max_cliente	900	-	-	900	900	1170
est_max_fornecedor	60000	-	-	88224	199999	-
est_max_porto	90000	-	-	287448	90000	-
produção_hora	400	-	1000	871	-	-
qtd_transf_bruta_cliente	62	-	64	217	-	72
Resultado Função Objetivo						
interrupcao_producao	1240	1215	1219	1217	1217	0

Fonte: o autor. "-" indica que a variável não sofreu alteração.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo foram aquém dos resultados obtidos por Oliveira Junior (2011), nenhum dos modelos obteve desempenho equivalente às propostas em Oliveira Junior (2002). Isto indica que o Optquest não é efetivo para este modelo de simulação em específico. Isso pode ser associado a incapacidade do Optquest em trabalhar diretamente com funções de probabilidade. Segundo o manual do Optquest, Rockwell Automation (2012), o Optquest é desenvolvido para resolver modelos estocásticos usando o Arena. Os fatos abaixo embasam esta ideia:

- No modelo de simulação as variáveis `qtd_trans_bruta_cliente` e `produção_hora` são definidas como funções de probabilidade do tipo normal. E no Optquest, elas foram definidas como constantes, pois não é possível definir restrições que utilizem funções de probabilidades.
- Em todas as propostas de Oliveira Junior (2011), onde houve a redução das horas de interrupção de produção à zero, houve o aumento da capacidade dos recursos moinho ou bombeamento, representados por `qtd_trans_bruta_cliente`. Vale frisar que elas foram alteradas manualmente como funções de probabilidade.

Isso mostra que os modelos de simulação são muito sensíveis a alterações nessas variáveis, entretanto a deficiência do Optquest impossibilita que o modelo seja otimizado adequadamente. Sugere-se, que em trabalhos futuros sejam feitas alterações no modelo de simulação afim de garantir que o Optquest trabalhe adequadamente com essas variáveis.

Apesar de tudo, este trabalho contribui para compreender a dinâmica do método *simulation optimization* e em específico o funcionamento dos softwares Arena e Optquest e como eles se relacionam. Além disso, foi possível entender as dificuldades associadas a otimização modelos de simulação de complexidade mais alta.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

CHWIF, LEONARDO., MEDINA, AFONSO C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos Teorio & Aplicações**. 4° ed. Rio de Janeiro. Elsevier, 2015.

KELTON, W. D.; SADOWSKI, R. P.; SADOWSKI, D. A. **Simulation with Arena**. New York: McGraw-Hill, 1998.

FU, MICHAEL C. **Optimization for simulation: Theory vs. Practice**. Journal on Computing, 2002, v.14, p. 192-215

KLEIJNEN, Jack P.C. WAN, Jie. **Optimization of simulated systems: OptQuest and alternatives**. Simulation Modelling Practice and Theory, 2007, v.15, p. 354-362.

MELOUK, Sharif H.; FREEMAN, Nickolas K.; MILLER, David ; DUNNING, Michelle. **Simulation Optimization-Based Decision Support Tool For Steel Manufacturing**. International Journal of Production Economics, 2013, v.141, p. 269-276.

NASCIMENTO, RODRIGO M., CRUZ, MARTA M. C. **A Evolução Do Uso De Aplicativos Otimizadores Em Simulação De Cadeias De Suprimentos**. ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. 2014.

OLIVEIRA JÚNIOR, ROBERTO. Desenvolvimento De Um Modelo De Simulação Para Identificação De Gargalos Na Cadeia De Suprimentos De Uma Empresa De Mineração. Mestrado em Transportes. Universidade Federal do Espírito Santo. 2011.

ROCKWELL AUTOMATION. **Getting Started With Arena**. 2012

ROCKWELL AUTOMATION. **Optquest for Arena User's Guide**. 2012