



**NATHALIA DE PAIVA MENDONÇA**

**APLICAÇÃO DO MÉTODO *SIMULATED*  
*ANNEALING* EM UM PROBLEMA DE  
SEQUENCIAMENTO DAS ATIVIDADES  
SILVICULTURAIS**

**LAVRAS – MG**

**2016**

**NATHALIA DE PAIVA MENDONÇA**

**APLICAÇÃO DO MÉTODO *SIMULATED ANNEALING* EM UM  
PROBLEMA DE SEQUENCIAMENTO DAS ATIVIDADES  
SILVICULTURAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para a obtenção do título de Mestre.

Dr. Lucas Rezende Gomide  
Orientador

Dr. Lucas Amaral de Melo  
Coorientador

**LAVRAS- MG  
2016**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Mendonça, Nathalia de Paiva.

Aplicação do método *Simulated Annealing* em um problema de  
sequenciamento das atividades silviculturais / Nathalia de Paiva

Mendonça. – Lavras : UFLA, 2016.

75 p.

Dissertação (mestrado acadêmico)–Universidade Federal de  
Lavras, 2016.

Orientador(a): Lucas Rezende Gomide.

Bibliografia.

1. Programação Linear Inteira. 2. Metaheurística. 3.  
Silvicultura. 4. Pesquisa Operacional. I. Universidade Federal de  
Lavras. II. Título.

**NATHALIA DE PAIVA MENDONÇA**

**APLICAÇÃO DO MÉTODO *SIMULATED ANNEALING* EM UM  
PROBLEMA DE SEQUECIAMENTO DAS ATIVIDADES  
SILVICULTURAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 02 de março de 2016.

Dr. Mário Dobner Júnior UFSC

Dr. Mayron César de Oliveira Moreira UFLA

Dr. Lucas Rezende Gomide  
Orientador

Dr. Lucas Amaral de Melo  
Coorientador

**LAVRAS- MG**

**2016**

**DEDICO**

*Aos meus amados pais Cláudio (in memoriam) e Maria Cristina*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre iluminar o meu caminho, pela força, sabedoria e bênçãos em minha vida.

A minha mãe e meus irmãos pelo amor e incentivo aos meus estudos.

Ao Bruno pelo companheirismo, amor e paciência.

À Sânia e sua família por gentilmente terem me recepcionado. A assistência de vocês garantiu a finalização do meu trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Lucas Rezende Gomide, pelo apoio, disposição e ensinamentos. Sua presença foi fundamental para a conclusão dessa dissertação.

Ao meu Coorientador Prof. Lucas Amaral de Melo, pela grande disposição e ensinamentos.

Ao Renato pelas conversas e auxílio na temática do projeto.

À toda equipe do LEMAF pelo companheirismo, crescimento e aprendizado. Em especial agradeço aos amigos de laboratório, Thiza, Tairine, Mônica, Matheus, Rafaela, Ximena, Paula, Gabriela, Pedro, Aliny e Andressa (s) pelas conversas, desabafos, risadas e ensinamentos compartilhados.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos, bem como ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.

De maneira geral, agradeço a todos que contribuíram para a conclusão deste trabalho.

## LISTA DE FIGURAS

### PRIMEIRA PARTE

Figura 1	Estrutura geral da metaheurística Simulated Annealing .....	29
Figura 2	Classificação hierarquizada dos modelos metaheurísticos.....	32

### SEGUNDA PARTE

Figura 1	Mapa de localização da área simulada para a implantação do planejamento das atividades.....	48
Figura 2	Análise comparativa entre os métodos de resolução dos Cenários 1 e 2.....	58
Figura 3	Análise comparativa entre os métodos de resolução dos Cenários 3 e 4.....	61
Figura 4	Análise comparativa entre as funções custo (Cenários 1 e 2) e <i>makespan</i> (Cenários 3 e 4) via PLI .....	62
Figura 5	Análise comparativa entre os métodos de resolução dos Cenários 5 e 6.....	63
Figura 6	Análise comparativa entre as funções minimizar <i>makespan</i> e mão-de-obra via PLI e SA.....	63
Figura 7	Análise comparativa entre os métodos de resolução dos Cenários 7 e 8.....	65
Figura 8	Análise comparativa entre os Cenários 5 e 7 e os Cenários 6 e 8 via PLI e SA .....	66

## LISTA DE TABELAS

### SEGUNDA PARTE

Tabela 1	Relação das atividades silviculturais agendadas para serem executadas .....	49
Tabela 2	Descrição das equipes para cada atividade silvicultural .....	50
Tabela 3	Relação dos cenários propostos às funções de otimização .....	57
Tabela 4	Resultado do processamento via Programação Linear Inteira e Simulated Annealing .....	59



## LISTA DE SIGLAS

### SEGUNDA PARTE

CMCR	Comprimento Máximo do Caminho Restante
COM	<i>Critical Path Method</i> ou Método do Caminho Crítico
CROC	Convergência de Recursos na Otimização do Caminho
PERT	<i>Program Evaluation and Review Technique</i> ou Avaliação de Programa e Técnica de Revisão
PLI	Programação Linear Inteira
URM	<i>Unit Restriction Model</i>
SA	<i>Simulated Annealing</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

### SEGUNDA PARTE

$i$	número de talhões ( $i = 1, \dots, I$ )
$j$	número de atividades ( $j = 1, \dots, J$ )
$k$	número de equipes ( $k = 1, \dots, K_j$ )
$l$	duração da atividade $j$ sendo executada pela equipe $k$ no talhão $i$ , sendo essa duração definida por um tempo inicial TI e um tempo final TF
$s$	período técnico recomendado entre as atividades
$x_{ijkl}$	variável de decisão binária {0;1} identificando a ativação ou desativação do talhão $i$ a ser submetido à atividade $j$ através da utilização da equipe $k$ durante o período $l$
$R_{Cijkl}$	rendimento do recurso colaborador, em horas homem/hectare quando a atividade $j$ é executada pela equipe $k$ no talhão $i$ , durante o período $l$
$R_{MAQijkl}$	rendimento do recurso máquina em horas máquina, quando a atividade $j$ é executada pela equipe $k$ , no talhão $i$ , durante o período $l$
$d_{hC}$	disponibilidade diária em horas de colaboradores
$d_{hMAQ}$	disponibilidade diária em horas de máquinas
$C_{ijkl}$	corresponde ao valor do custo, em reais, da atividade $j$ quando realizada pela equipe $k$ em todo talhão $i$ durante o período $l$
$t_{ijkl}$	coeficiente do tempo final de execução da atividade $j$ quando realizada pela equipe $k$ em todo talhão $i$ durante o período $l$

## RESUMO GERAL

A alta produtividade florestal brasileira advém de inúmeros esforços relacionados às pesquisas e desenvolvimento da silvicultura. Contudo, seu planejamento ainda é um aspecto pouco explorado, apresentando-se, nos dias atuais, como um dos maiores desafios a serem solucionados pelos gestores florestais. A alta complexidade em se planejar a silvicultura está associada, entre outros fatores, à combinação de atividades a serem realizadas pelo recurso mão-de-obra ao longo de um horizonte de planejamento. Neste tipo de problema, a programação exata não produz soluções em um tempo de processamento viável. Assim, o uso de algoritmos aproximativos apresenta-se como uma boa alternativa de resolução. Nesse sentido, objetivou-se contribuir com o desenvolvimento de modelos de programação linear inteira (PLI) e uma adaptação da metaheurística *Simulated Annealing* (SA) para o problema de sequenciamento das atividades silviculturais com restrições de recursos e múltiplos modos de execução (PSSRME). O primeiro capítulo apresentou definições formais e um referencial bibliográfico sobre o problema em questão. Na sequência, o capítulo dois avaliou a eficiência da metaheurística *Simulated Annealing* comparada à solução da programação linear inteira para o problema PSSRME. Diferentes metas de planejamento foram abordadas através da minimização do custo, do tempo de execução, do uso do recurso mão-de-obra, bem como a oscilação do uso da mão-de-obra, em oito cenários distintos de um projeto silvicultural. No estudo, a metaheurística SA mostrou-se eficiente na resolução do problema proposto, apresentando baixos percentuais de desvios com relação às respostas via PLI. Os modelos apresentados podem ser utilizados como base para dar suporte à tomada de decisão operacional das atividades silviculturais. Não é possível estabelecer um único cenário como o ideal, pois os mesmos apresentaram focos de planejamento diferenciados. Contudo, um cenário modelo para cada planejamento apresentado pôde ser estabelecido.

Palavras-chave: Programação linear inteira. Metaheurística. Silvicultura. Pesquisa operacional.

## GENERAL ABSTRACT

Brazilian high forest productivity comes from numerous efforts related to research and development of silviculture. However, planning is usually not thinking before making decisions. This process is a huge and hard challenge for forest managers. The high complexity in a silviculture planning is associated with a set of activities to be performed by use the work-force over a planning horizon. In this type of problem, the exact programming does not produce an optimal solution in a viable run processing time. The heuristic algorithms are an alternative way to find excellent solutions against exact methods. In this sense, the aims of the study were to develop a mathematical programming models involving integer linear programming (ILP) and the simulated annealing metaheuristic (SA), to solve the sequence problem of silviculture activities with resource constraints and multiple modes of execution (SPSRME). The first chapter presented formal definitions and a bibliographical study about the problem at issue. In the following, chapter two, evaluated the efficiency of the SA metaheuristic compared with solutions obtained by integer linear programming formulation of the SPSRME. Different goals of planning were addressed by minimization of cost, makespan, and the workforce use oscillation in eight different scenarios of a silviculture project. The study results showed that the metaheuristic SA was efficient to solve the proposed problem, with low percentage of deviations from the ILP solutions. The presented models should be used to support the operational decision making of silviculture activities. It's not possible to establish a single ideal scenario, since they presented different planning focus. However, a model setting for each lodged planning could be established.

Keywords: Integer linear programming. Metaheuristic. Silviculture. Operacional research.

## SUMÁRIO

	<b>PRIMEIRA PARTE</b>	
1	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
2	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>19</b>
3	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>34</b>
4	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>35</b>
	<b>SEGUNDA PARTE</b>	
	<b>ARTIGO Análise da implementação do algoritmo Simulated Annealing para o problema PSSRME.....</b>	<b>43</b>
1	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>45</b>
2	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>48</b>
3	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>57</b>
4	<b>DISCUSSÃO.....</b>	<b>66</b>
5	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>69</b>
6	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>72</b>

## **PRIMEIRA PARTE**

### **1 INTRODUÇÃO**

No Brasil, grande parte da matéria-prima utilizada pelas indústrias do segmento florestal é obtida através de plantios homogêneos, realizados com as espécies dos gêneros *Pinus* ssp. e *Eucalyptus* ssp.. Esses plantios basicamente objetivam abastecer os mercados de madeira industrial (celulose e papel, serrados, painéis) e energética (lenha e carvão vegetal). Em função da atual vasta demanda por esta matéria-prima, o plantio de florestas para fins industriais tem recebido grande ênfase no direcionamento de investimentos florestais no Brasil. Segundo dados do Ministério da Agricultura (2014), existe a expectativa de que as áreas de reflorestamento passem dos atuais 7,7 milhões de hectares para mais de nove milhões de hectares até o ano de 2020.

A silvicultura é a ciência dedicada ao estudo e planejamento de métodos para promover a implantação e a condução dos povoamentos florestais. Segundo Valverde et al. (2014), a silvicultura brasileira possui a maior vantagem comparativa do mundo, em virtude de suas inúmeras condições favoráveis somadas à competência gerencial e à ciência florestal, resultando na maior produtividade por hectare por ano quando comparado aos maiores produtores de florestas plantadas do mundo. Seguindo a abordagem dos mesmos autores, o que aponta a caracterização de melhor silvicultura mundial é o fato de este setor ser concentrado e controlado pelas grandes indústrias florestais, uma vez que as mesmas mantêm investimentos significativos em pesquisas e desenvolvimento de novas tecnologias.

No entanto, percebe-se que os estudos estão mais intimamente voltados para as tecnologias de avanço do incremento das plantações florestais, buscando primordialmente melhorias genéticas e de manejo florestal para as principais

espécies de interesse, e pouco se tem estudado sobre o planejamento e otimização das atividades que compõem este setor. Estes novos estudos visam promover ainda mais competência gerencial de suas florestas, o que garantirá a elevação futura do quadro silvicultural brasileiro.

Para propiciar um melhor gerenciamento da silvicultura, inicialmente é necessário enxergá-la como uma manufatura em um sistema produtivo normal, pois a mesma apresenta dados de entrada como mão-de-obra, insumos e equipamentos, e que, após um período de tempo são transformados em uma saída: a madeira. Neste sentido, o planejamento e controle da produção (PCP) é uma das áreas de decisão da manufatura que apresenta uma das atividades mais desafiadoras: o *scheduling* (sequenciamento) das operações, (DOMINGOS et al., 2008).

O *scheduling* desempenha um importante papel nas manufaturas e sistemas de produção (PINEDO, 2008). Seu objetivo consiste na alocação de recursos e tarefas conforme prazos e metas previamente estabelecidos, otimizando uma ou mais medidas de desempenho, (PACHECO; SANTORO, 1999).

A silvicultura é caracterizada pela presença de atividades sequenciais, com demandas de insumos e recursos para sua implantação. A alta complexidade da silvicultura está associada à combinação entre as atividades a serem realizadas pelo recurso mão-de-obra (múltiplos modos de execução) ao longo de um horizonte de planejamento. Projetos denominados múltiplos modos de execução ampliam ainda mais os números de combinações, pois os mesmos permitem que as atividades sejam executadas de modos alternativos, ou seja, uma atividade pode ser realizada por uma equipe de quatro pessoas gastando 10 dias ou por meio de uma equipe de 10 pessoas despendendo quatro dias de serviço.

Para exemplificar a alta dificuldade do planejamento da silvicultura, imagine um pequeno exemplo, onde será planejada uma única atividade para cinco talhões durante um período de cinco dias. Existe a possibilidade de dois modos de execução, ou seja, duas equipes com rendimento de um dia para executar a atividade. As combinações de todos contra todos somam 50 conjuntos. Soa ser um número pequeno, no entanto, é apenas uma atividade, duas equipes e cinco talhões. Pensando nas grandes empresas que trabalham com um elevadíssimo conjunto de talhões, atividades e equipes, nota-se a existência de um grande número de combinações entre as variáveis, impossibilitando sua organização manualmente.

Nesse sentido, o uso de técnicas computacionais mostra-se como uma ferramenta promissora para solucionar o problema de sequenciamento das atividades silviculturais com restrições de recursos e múltiplos modos de execução (PSSRME), auxiliando a tomada de decisão dos gestores florestais, que em linhas gerais vêm realizando-as de forma empírica.

Assim, os modelos de programação matemática surgem com o propósito de assegurar a Regulação Silvicultural, descrito por Moura (2013). Este quadro resultará em demandas regulares de mão-de-obra, máquinas, equipamentos e insumos, de forma a otimizar um ou mais critérios de planejamento, seja a minimização do custo, do tempo de duração ou até mesmo do uso de mão-de-obra. Em suma, a sua aplicação concederá substancialmente a gestão silvicultural.

## **1.1 Motivação e Justificativa**

Os problemas de sequenciamento de atividades e tarefas são muito comuns e fazem parte do cotidiano de qualquer empresa ou empreendimento. Por outro lado, são problemas complexos, uma vez que há inúmeras opções de escolha sobre a ordem temporal de realização de várias tarefas.



Pode-se observar que estes problemas são recorrentes e existem nas mais diversas áreas de aplicação, tais como na telecomunicação, planejamentos operacionais na fabricação de semicondutores, desenhos de áreas escolares, localização de reservas energéticas estratégicas, roteamento de veículos, organização de tropas, planejamento de tripulação de aeronaves, alocação de salas de aula em escolas, entre outros (CHAVES et al., 2003).

Nota-se que nos últimos anos ocorreu um crescente número de publicações em problemas de *scheduling*, no entanto, no meio florestal essa abordagem ainda se mostra insipiente, pois existe um número reduzido de publicações abordando essa temática. Essa afirmação pode ser confirmada pelo trabalho de Rönnqvist et al. (2015), que descreveram 33 problemas da pesquisa operacional aplicada ao meio florestal que estão abertos. Dentre os problemas encontra-se o planejamento hierárquico ou sequencial de suas atividades.

Realizando uma busca no site Periódico Capes, no ano de 2015, em relação a trabalhos de *scheduling* no meio florestal, puderam ser encontrados 195 trabalhos. Contudo, estudos com ênfase na colheita/transporte e abordando a regulação florestal foram os mais recorrentes.

Este tipo de estudo apresenta algumas dificuldades para a implantação dos modelos, como: grande número de combinações entre atividades, recursos e tempo, elevando o tempo computacional para obtenção de uma solução do problema; número excessivo de restrições e regras operacionais resultantes de situações particulares de processamento; um elevado grau de inter-relacionamento de atividades devido às relações de sequência de execução e para finalizar as divergências entre as pessoas que desenvolvem o modelo e aquelas que efetivamente o aplicam (PINTO, 2000).

Tendo em vista as dificuldades acima citadas, nota-se que é de suma importância o desenvolvimento de um algoritmo que ofereça soluções satisfatórias de maneira automatizada e ágil. Nesse sentido, a metaheurística

*Simulated Annealing*, vem sendo amplamente aplicada em diversos estudos. (CITAR ESTUDOS- PRINCIPALMENTE NO SCHEDULLING).

Os trabalhos de Cruz (2015) e Moura (2013) são os primeiros a apresentarem um alto grau de detalhamento no sequenciamento das atividades silviculturais, mostrando-se pioneiros, no Brasil, nesta área de estudo. Moura (2013) trabalhou com a programação linear no sequenciamento das atividades silviculturais objetivando minimizar o custo do projeto. Cruz (2015) utilizou a programação linear inteira e ainda incorporou o uso da metaheurística *Simulated Annealing* para solucionar a minimização do custo, bem como a minimização do tempo de execução do projeto (*makespan*).

O avanço do presente estudo se dá em função da criação de novas funções a serem testadas, abordando diferentes metas de planejamento por parte de um gestor florestal.

Os pontos supracitados aliados à dificuldade em se trabalhar com o problema em questão e da escassez de estudos nesta área, serviram como motivação para o desenvolvimento dessa dissertação.

## **1.2 Descrição do problema**

O problema a ser retratado neste estudo está relacionado à otimização do planejamento silvicultural em empresas florestais. O setor silvicultural nessas empresas apresenta-se como a base estrutural de sua cadeia produtiva, pois é responsável pela promoção de estudos e planejamentos para a implantação e condução dos povoamentos florestais. Cabe ao gestor silvicultural estabelecer suas metas de planejamento com relação às atividades a serem realizadas em suas áreas produtivas. O planejamento de um projeto não somente facilitará sua execução como também fornecerá aos gestores da área um domínio sobre

quantidade, custos e tempos envolvidos na realização do mesmo. Nesse sentido, o primeiro passo é o estabelecimento de suas metas de planejamento.

O planejamento de curto prazo apresenta o cronograma das fazendas que são colhidas gradualmente ao longo do ano. Dessa forma, a implantação da nova floresta será realizada à medida que os talhões forem liberados.

As informações históricas dos talhões deverão ser obtidas por meio do acesso à base cadastral da empresa. A partir dessa base, será possível definir as operações silviculturais a serem implantadas nos talhões a partir da análise de suas características. Após o conhecimento da situação operacional de cada unidade física de trabalho (talhão), será necessário caracterizar quais as atividades silviculturais deverão realizadas nessas áreas.

Para executar as atividades silviculturais, são definidas equipes de campo. Essas equipes são formadas por um conjunto de trabalhadores que irão compor a mão-de-obra rural da empresa. Cada empresa apresenta sua forma peculiar em formar suas equipes. Assim, a partir do direcionamento das equipes a executarem as tarefas silviculturais, o objetivo será alocar da melhor maneira o recurso (mão-de-obra) nas unidades de trabalho ao longo do horizonte de planejamento, de forma a atender as metas de planejamento como a redução do custo ou antecipação do término de suas atividades.

### **1.3 Objetivo geral**

O presente estudo buscou contribuir no desenvolvimento de modelos de programação linear inteira e uma adaptação da metaheurística *Simulated Annealing* para problemas operacionais contendo restrições de recursos e múltiplos modos de execução das atividades silviculturais (PSSRME). Essas abordagens poderão ser utilizadas como base para dar suporte à tomada de decisão operacional das atividades silviculturais.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Planejamento e Controle da Produção Florestal**

Os empreendimentos florestais possuem princípios semelhantes de planejamento como qualquer outro investimento, diferenciando-se apenas no período de tempo no qual as decisões são tomadas, uma vez que este setor apresenta matéria-prima de longo período de maturação (ARAÚJO JÚNIOR, 2012). Seguindo a abordagem do mesmo autor, o planejamento engloba uma série de questionamentos que vêm desde sua origem: quanto, quando, como e onde plantar, colher, conduzir e/ou transportar, porém, sempre buscando a maximização das receitas geradas ou a minimização dos custos em determinado horizonte de produção.

O sistema de planejamento e controle da produção (PCP) deve ocorrer dentro de um horizonte de tempo, de forma que o plano seja dividido em períodos. Em geral, a divisão é realizada em longo, médio e curto prazo, sendo que a cada fase são relacionadas atividades de decisões estratégicas, táticas e operacionais, (GIACON, 2010).

Gomide (2009) afirma que essa estrutura organizacional apresenta objetivos pré-definidos em cada nível, e para o cumprimento das atividades florestais é necessário o estabelecimento de uma escala de tempo. O autor ainda reitera que esse sistema é dominado por um ambiente de riscos e incertezas, como existente em qualquer empreendimento não florestal.

Nesse sentido, o PCP mostra-se como o responsável por organizar os dados e tomar as decisões em relação às atividades escalonadas no tempo, coordenando e aplicando os recursos produtivos, de forma a atender da melhor maneira possível os planos estabelecidos nos níveis estratégicos, tático e operacional (TUBINO, 2008).

Stevenson, Endry e Kingsman (2005) relatam que as funções típicas do PCP são: planejar os materiais, realizar a gestão da demanda, planejar a capacidade e a programação e sequenciamento das operações. Dessa maneira, o sequenciamento pode ser visto como a interface do PCP, responsável pelo planejamento da ordem de produção a curto prazo, (PIMENTA, 2008). Nesta atividade, as operações precisam de um cronograma detalhado com a indicação do momento em que os trabalhos iniciam e finalizam (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2009).

Segundo Giaccon (2010), na busca de aprimoramento para atividade PCP, as empresas estão à procura de ferramentas de programação finita, conhecidas como *Advanced Planning and Scheduling* (APS). Neste sentido, seu trabalho buscou verificar as necessidades e dificuldades da programação detalhada da produção, as barreiras de implantação, bem como os benefícios gerados pelo uso dos APS.

Quezado, Cardoso e Tubino (1999), afirmam que nos casos de produção sob encomenda, a alocação dos recursos disponíveis é a principal questão a ser resolvida pelo PCP, e em particular pelo sequenciamento das atividades. Nesta lógica, o trabalho destes autores buscou a implementação do método PERT/CPM associado às heurísticas CMRC e CROC, para realizar o sequenciamento da produção sob encomenda.

Pimenta (2008) afirma que na manufatura, a atividade de PCP desempenha um papel de extrema importância, sobretudo no sequenciamento acerca da ordem em que os produtos devem ser fabricados. Neste interim, o autor aplicou um modelo de programação de sequenciamento de produção no setor de maior volume de produção de uma fábrica de materiais descartáveis, objetivando reduzir o custo unitário através da redução de tempos improdutivos.

Pode-se destacar que a atividade de sequenciamento (*scheduling*) dentro do planejamento e controle da produção tem sido alvo de muitos estudos. Suas

atividades estão vinculadas às decisões de âmbitos operacionais do menor horizonte de planejamento (curto prazo), operando dentro de uma tática planejada.

### **2.1.1 Problemas de programação de projetos**

O termo projeto pode ser designado como um empreendimento não repetitivo, definido por um conjunto de tarefas inter-relacionadas por uma sequência de execução, dirigido por pessoas com o propósito de cumprirem objetivos que são previamente estabelecidos dentro de parâmetros de custo, tempo e qualidade (BORBA, 2004).

Yamashita e Morabito (2007) afirmam que o objetivo da programação de projetos é realizar a programação (*scheduling*) das atividades de forma a otimizar um ou mais critérios, como minimizar custos ou data da entrega por exemplo, de forma que as relações de precedência entre as atividades e a disponibilidade de recursos sejam obedecidas.

Segundo Domingos et al. (2008), um problema pode ser classificado como *scheduling* quando os recursos são distinguidos pelo período de tempo em que estão disponíveis. Dessa forma, a programação é entendida como alocação dos recursos no tempo. Ela é aplicada quando se procura a melhor ordem em uma sequência de tarefas a fim de se aumentar as eficiências dos processos.

Cury et al. (1999) afirma que muitos fatores podem agir em ambientes de manufatura. No caso do setor silvicultural, máquinas podem falhar, trabalhadores podem não estar disponíveis, insumos podem faltar, ferramentas e outros recursos podem estar fora do alcance das áreas no dado momento. Nesse contexto, observa-se que o *scheduling* no ambiente manufatureiro é muito dinâmico e quase que imediatamente está sujeito a novas condições, demandas e ou restrições, o que torna praticamente mandatória a sua reprogramação. Dentre os fatores envolvidos para a reprogramação têm-se: quebra de máquinas, falta de

material, super ou subestimativas do tempo de processamento, fatores climáticos e mudança no prazo da entrega.

Os fatores acima citados causam incerteza ao planejamento de um projeto. Assim, para lidar com problemas de otimização dessa natureza, existem várias metodologias já consolidadas, dentre elas, as mais utilizadas são: análise de sensibilidade, programação estocástica e programação robusta, (ALEM; MORABITO, 2015).

As primeiras abordagens sobre problemas de programação de projetos (*project scheduling*) surgiram no fim da década de 50, com o desenvolvimento dos métodos clássicos do caminho crítico CPM (*critical path method*) e PERT (*project evaluation and review technique*) (MODER; PHILLIPS; DAVIS, 1983). Desde então, diversas áreas têm sido alvo para o desenvolvimento de estudos na programação de projetos, surgindo algoritmos cada vez mais eficazes, com o intuito de solucionar este tipo de problema. Nota-se que muitos pesquisadores têm buscado novas técnicas nos campos da inteligência artificial e na pesquisa operacional, produzindo resultados aproximados para uma classe geral de problemas ou soluções exatas em problemas específicos (ALMEIDA; HAMACHER; PACHECO, 2000).

Yamashita e Morabito (2007) afirmam que alguns problemas de programação de projetos são denominados como projetos de múltiplos modos de execução, pois permitem que as atividades sejam executadas de modos alternativos. Os autores citam, como exemplo, uma atividade que pode requerer dez unidades de tempo para ser executada por um trabalhador, ou alternativamente ser realizada em cinco unidades de tempo utilizando dois trabalhadores. Seguindo a abordagem dos mesmos autores, o problema de programação de projetos com recursos limitados e múltiplos modos de execução (PPRLMM – *multi-mode resource constrained project scheduling problem*) tem como objetivo a minimização do instante de término da última atividade do

projeto (*makespan*), de forma a considerar múltiplos modos de execução e respeitando as relações de precedência entre as atividades e a disponibilidade de recursos do projeto. A consideração de múltiplos modos de execução das atividades torna o problema de programação de projetos mais realista e abrangente. Entretanto, há um aumento de variáveis de decisão do problema, o que promove sua complexidade. Nos problemas de programação do tipo PCDRMM (*multi-mode resource availability cost problem*), os recursos disponíveis para o projeto são variáveis de decisão, existindo um custo associado à disponibilidade de cada recurso. O objetivo é definir a programação da execução das atividades de modo a minimizar o custo total de alocação dos recursos que estarão disponíveis durante o projeto. As restrições de precedência entre as atividades devem ser respeitadas, bem como o prazo de entrega pré-estabelecido do projeto (YAMASHITA; MORABITO, 2007). Os autores anteriormente citados, afirmam que tanto PPPRLMM como o PCDRMM são problemas difíceis de serem resolvidos otimamente e existem poucos trabalhos utilizando algoritmos exatos para sua resolução.

Nesse contexto, as condições acima citadas aliadas à combinação das variáveis que compõem esses problemas de *scheduling*, levam a classificá-los como problemas do tipo NP-hard ou NP-difícil. Blazewicz et al. (1983) demonstraram que problemas de sequenciamento com restrições de recursos são difíceis em NP. Além disso, quando o processo permite a escolha de modos de execução nesses problemas, mais complexidade é adicionada através do aumento do espaço de busca (KYRIAKIDIS et al., 2012 apud CHAKRABORTTY; SARKER; ESSAM, 2016).

Nesse sentido, sua alta complexidade faz com que métodos não exatos sejam utilizados para sua resolução, pois se apresentam mais eficientes. Metaheurística como o *simulated annealing*, busca tabu e os algoritmos genéticos mostram-se como alternativas para solucionar esse tipo de problema,



já que algoritmos exatos como *branch-and-bound* (programação linear inteira) apresentam grande esforço computacional.

Trabalhos envolvendo programação de projetos são amplamente encontrados na literatura. Ichiara (2002) trabalhou com um problema de programação de projetos com restrição de recursos utilizando heurísticas. Yamashita e Morabito (2007) propuseram um algoritmo exato, viável computacionalmente apenas para problemas de tamanho moderado, com a finalidade de gerar curvas de *tradeoff* entre o custo e o prazo de um projeto, para um problema com custo de disponibilidade de recursos e múltiplos modos de execução.

### **2.1.2 A silvicultura e a programação de projetos**

A silvicultura pode ser definida como a ciência destinada ao estudo dos métodos naturais e artificiais de regenerar e melhorar os povoamentos florestais, atendendo às necessidades de mercado e realizando o aproveitamento e uso racional das florestas nativas ou comerciais (BINKOWSKI, 2009).

Os fundamentos práticos relacionados às técnicas adotadas, bem como a compreensão das interações entre planta e ambiente físico e biológico, constituem o princípio básico da silvicultura. Os métodos e técnicas utilizados nesta área são variados e seus custos se divergem em função dos recursos utilizados, como equipamentos, mão-de-obra, insumos, rendimento, bem como os aspectos climáticos, edáficos e topográficos.

A classificação dos recursos como renováveis ou não renováveis nas programações de projetos não parte do princípio das questões ambientais sustentáveis. Dessa maneira, renováveis são os recursos que voltam a ser disponíveis para a utilização após o término da atividade a que foram alocados, como por exemplo, máquinas e mão-de-obra. Já os recursos não renováveis são aqueles exauridos durante a utilização dos mesmos, como os insumos,

fertilizantes, combustíveis (NUDTASOMBOOM; RANDHAWA, 1997). A água é recurso que na maioria das vezes é confundido como renovável. Ambientalmente é correto classificá-la como tal, entretanto, nas empresas florestais este recurso também é exaurido durante a execução das atividades, portanto, faz sentido classificá-la como não renovável.

A silvicultura apresenta por si só um caráter de interdependência, pois as atividades são executadas por etapas e de forma sequencial. A execução dessas atividades está associada à disponibilidade dos recursos, que são indispensáveis para as operações silviculturais (FERREIRA; SILVA, 2008). Dentre as principais atividades que constituem o setor silvicultural têm-se: controle de formigas, controle da mata competição, preparo e adubação de solo, plantio, adubação pós-plantio, replantio, irrigação e manutenção do controle de formiga.

Reklaitis (1992) considera que a alocação dos recursos através de sua seleção apropriada para uma atividade conhecida; o sequenciamento das atividades através da definição de sua ordem de execução, bem como a determinação do tempo de utilização dos recursos pelas respectivas atividades (tempo inicial e final de cada atividade) constituem os três elementos chaves das atividades de *scheduling*. Estes elementos podem ser facilmente enxergados no setor silvicultural. As atividades anteriormente citadas são executadas de forma sequencial e para a realização das mesmas, intervalos de tempo entre uma atividade e outra são pré-estabelecidos. Os colaboradores responsáveis pela execução das atividades constituem a mão-de-obra silvicultural rural da empresa. Esses colaboradores trabalham em grupos denominados equipes de campo. Geralmente, cada empresa apresenta uma forma peculiar para compor a formação de suas equipes.

Neste contexto, para atender o objetivo do *scheduling* ou sequenciamento silvicultural, com um ou mais critérios de otimização, as

abordagens aqui propostas deverão responder ao seguinte questionamento: Quando, onde e quem realizará a Atividade 1 programada?

## 2.2 Métodos de Resolução para o problema de *Scheduling*

### 2.2.1 Programação Linear Inteira

Problemas de otimização apresentam uma função objetivo e um conjunto de restrições que estão relacionados às variáveis de decisão do problema. As relações ou interações entre as variáveis de decisão são delimitadas pelas restrições impostas sobre as mesmas, constituindo um conjunto discreto (finito ou não) de soluções factíveis ao problema.

Os problemas de otimização podem ser tratados como de minimização ou maximização de sua função objetivo. O ótimo global será o menor (ou maior) valor possível para a função objetivo para o qual o valor atribuído às variáveis não viole nenhuma restrição.

A programação linear inteira (PLI) mostra-se como a forma mais comum para a formulação matemática de problemas relacionados ao sequenciamento. (MANNE, 1960). Segundo Figueiredo (2015), a formulação da PLI consiste na elaboração de um modelo matemático constituído por um conjunto de restrições lineares, uma função objetivo e restrições adicionais de algumas variáveis de decisão a serem inteiras.

Existem vários métodos para resolução dos problemas de programação linear inteira. Goldbarg e Luna (2000) apresentam como os principais métodos a técnica de enumeração explícita e implícita, tais como, *Branch and Bound*, e nas variantes (*Branch-and-cut*, *Branch-and-cut-and-price*), relações Lagrangeana e Surrogate, algoritmos de planos de corte, método de decomposição de Benders, geração de colunas.

Figueiredo (2015) destaca que a PLI não se mostra tão adequada para problemas de sequenciamento, uma vez que os resultados computacionais obtidos por este método são de elevado custo computacional. No entanto, sua aplicação tem um grande interesse teórico, pois permite obter diferentes abordagens de métodos e regras (SCHROEDER, 1989).

Com o intuito de melhorar o desempenho computacional são utilizadas estratégias durante a formulação do modelo ou nos métodos de resolução, através de algoritmos híbridos e relaxações, como por exemplo, a relaxação Lagrangeana (TOLENTINO, 2007).

O algoritmo *Branch and Bound* apresenta-se na base da maioria dos códigos de computadores relativos à programação linear inteira, sendo aplicável em problemas que assumem variáveis inteiras, reais ou binárias (TOLENTINO, 2007). Esse algoritmo foi apresentado por Land e Doing (1960) (SHERALI; DRISCOLL, 2000). Trata-se de um algoritmo exato de enumeração implícita, ou seja, não testa explicitamente todas as soluções possíveis, porém, garante a otimalidade da solução. Seu funcionamento decorre de duas operações. A primeira operação *branching* divide o problema principal em subproblemas menores, facilitando a análise, pois elimina soluções inviáveis. A segunda operação *bounding* elimina as soluções de baixa qualidade através de comparações entre as soluções, (KAWAMURA, 2006).

Na literatura podem ser encontrados diversos trabalhos aplicando o algoritmo *branch and bound* para solucionar problemas de sequenciamento. Cury (1999) trabalhou com o algoritmo difuso de *Branch-and-Bound* em um problema de *flow shop scheduling*, do qual a função objetivo foi maximizar o grau de satisfação da data de término em relação à data de entrega. Bustamante (2007) estudaram o problema de sequenciamento de uma máquina, objetivando minimizar o somatório dos custos de antecipação e atraso no atendimento de uma demanda e com tempo de preparação de máquina dependente da sequência

de produção. Vieira, Carvalho e Pinto (2011) propuseram uma formulação de Programação Linear Inteira Mista para o Problema de Sequenciamento em Projeto com Restrição de Recurso (PSPRR).

### **2.2.2 Metaheurísticas**

As metaheurísticas são amplamente utilizadas para solucionar importantes problemas práticos de otimização combinatória (CIRO et al., 2015; KRETER; RIECK; ZIMMERMANN, 2015; VANCROONENBURG; SMET; BERGHE 2015). No entanto, devido à variedade de técnicas e conceitos, ainda não existe uma definição consensual para as metaheurísticas. A melhor definição, utilizada pelo grupo Rede Metaheurísticas (2015), é de que uma metaheurística trata-se de conjunto de conceitos que podem ser utilizados para definir um método heurístico aplicável a um extenso conjunto de diferentes problemas. Em outras palavras, uma metaheurística pode ser vista como uma estrutura algorítmica geral que pode ser aplicada a diferentes problemas de otimização com relativamente reduzidas modificações que possam adaptá-la a um problema específico.

Reeves (1993) afirma que as metaheurísticas surgiram como um novo tipo de algoritmo não exato, objetivando combinar procedimentos heurísticos básicos nos mais diversos problemas, visando à eficiência e eficácia durante a exploração das possíveis soluções no espaço de busca. O autor reitera que as metaheurísticas apresentam, na maioria dos casos, alta qualidade das soluções em problemas de grandes dimensões.

Embora os procedimentos descritos acerca das metaheurísticas possam ser vistos como estratégias de busca, as características de seus algoritmos permitem classificá-las em vários tipos distintos de acordo com a abordagem utilizada (SUCUPIRA, 2007). Na Figura 1, Pacheco e Santoro em 1999 propuseram uma nova classificação da hierarquia dos modelos metaheurísticos.

Segundo estes autores, os métodos de busca em vizinhança utilizam mecanismos de diversificação chamados de métodos de busca estendida, pois permitem que a busca se estenda através da exploração alternativa vizinha da melhor solução atual. Nesta categoria, encontram-se os modelos denominados busca tabu, *simulated annealing* e algoritmos genéticos.

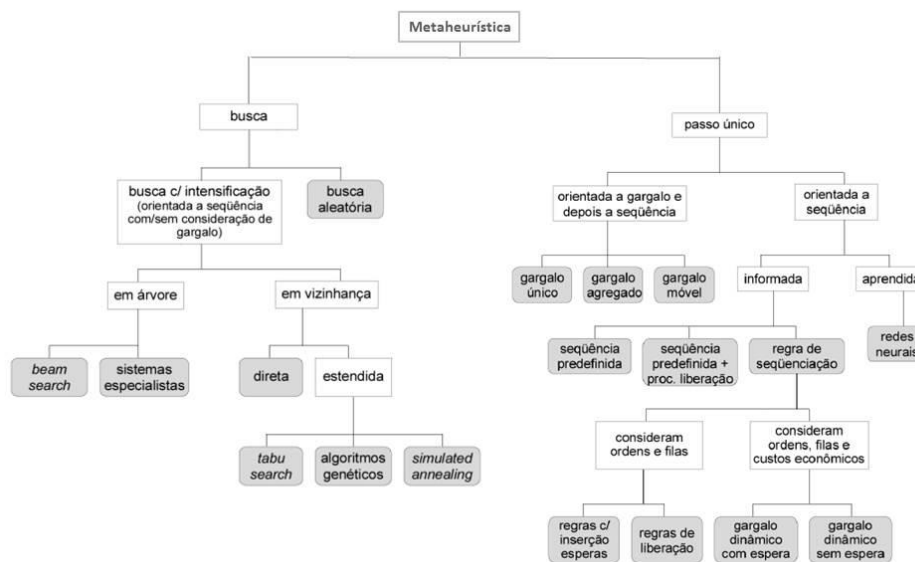


Figura 1 Classificação hierarquizada dos modelos metaheurísticos  
Fonte: Adaptado de Pacheco e Santoro (1999)

Souza (2007) classifica as metaheurísticas em duas categorias de acordo com o princípio usado para exploração do espaço de soluções: busca populacional e busca local. As metaheurísticas baseadas em busca populacional consistem em manter um conjunto de boas soluções e combiná-las de forma a tentar produzir soluções ainda melhores. Exemplos clássicos de procedimentos desta categoria são os Algoritmos Genéticos, os Algoritmos Meméticos e o Algoritmo Colônia de Formigas. Já os métodos de busca local exploram o espaço de soluções por meio de movimentos, os quais são aplicados a cada passo sobre a solução atual, gerando outra solução promissora em sua vizinhança.

Exemplos de métodos que se enquadram nessa categoria são: busca tabu, busca em vizinhança variável, busca local iterativa e *Simulated Annealing*.

### 2.2.2.1 *Simulated Annealing* (SA)

Segundo Laarhoven e Aarts (1987) a metaheurística SA pertence à classe de algoritmos de busca local, aplicáveis na resolução de problemas de otimização combinatória. Os mesmos autores afirmam que os fundamentos dessa metaheurística foram desenvolvidos por Metropolis e colaboradores em 1953, quando propuseram um algoritmo capaz de simular o desenvolvimento do equilíbrio térmico dos sólidos metálicos e que mais tarde, em 1983 Kirkpatrick, Gelatt e Vecchi generalizaram o seu algoritmo para gerar uma sequência de soluções, com o propósito de resolver problemas de otimização combinatorial.

O princípio de funcionamento do SA é reduzir a temperatura de um sistema, levando-o a um estado de mínima energia. Essa energia pode ser vista como uma função de custo a ser otimizada. Dessa forma, o processo tem início como um material fundido, que gradualmente tem sua temperatura reduzida, análogo a um processo que tem sua energia diminuída. Se a temperatura é reduzida bruscamente, o processo “congela” em um estado sub-ótimo, em que aparecerão defeitos na estrutura do material e o cristal resultante não corresponderá a um estado mínimo de energia. Esse comportamento é conhecido como congelamento em um mínimo local. Porém, se a redução de temperatura ocorre de forma gradual, o sistema leva a estados melhores em termos de decréscimo de energia (DIÓGENES et al., 2009).

Na forma tradicional, o método SA parte de uma temperatura inicial e realiza diversos movimentos locais em sua solução atual. Se a nova solução obtida for melhor que a solução atual, esta será substituída pela nova solução. No entanto, a propriedade fundamental do SA é sua capacidade em aceitar uma solução pior que a atual, propiciando uma maior pesquisa do espaço de soluções.

Esta propriedade faz com que o algoritmo evite mínimos locais (FIGUEIREDO, 2015).

Quanto maior a temperatura inicial, maior a chance de a solução atual ser substituída por uma solução pior. Essa probabilidade evita que a metaheurística sofra convergências prematuras (REEVES, 1993). O processo de busca continua e o problema se define em gerar uma solução vizinha a  $i$  e escolher aleatoriamente um estado  $j$  entre estes. O processo é aceito de acordo com o critério de Metropolis. Este critério é definido de forma que se o estado de perturbação  $j$  tenha uma energia inferior ao estado atual  $i$ , o processo de Metropolis segue a partir do estado de perturbação. Caso a energia de perturbação seja maior que a do estado atual, a probabilidade de a sequência mudar para o estado de perturbação é dada pela equação (1), em que  $\Delta E_{ij}$  é a diferença de energia entre o estado  $j$  e o estado  $i$ ,  $T_a$  a temperatura atual e  $T_{real}$  a temperatura real (DIÓGENES et al., 2009).

$$\text{Prob} = e^{\left(\frac{-\Delta E_{ij}}{T_{aTreal}}\right)} \quad (1)$$

O processo continua até que o equilíbrio seja encontrado para a temperatura atual. A cada número fixo de iterações do algoritmo, a temperatura é decrescida de acordo com uma regra decremental pré-definida. Espera-se que o equilíbrio aconteça novamente e assim, o processo se repete. Esse procedimento perdura até que a temperatura atinja um valor pequeno onde nenhuma nova solução seja aceita. Nesse ponto o sistema é considerado congelado e encerra-se o algoritmo (DIÓGENES et al., 2009). A Figura 2 apresenta um fluxograma de funcionamento desta técnica.

É notório que se tem tido boas utilizações da metaheurística SA para solucionar problemas de otimização combinatorial. Yamamoto, Arruda e Libert (2007) apresentou um estudo comparativo de algumas metaheurísticas aplicadas ao ordenamento de bateladas em uma rede de distribuição de derivados do



petróleo. O SA foi uma das metaheurísticas testadas, gerando um bom resultado final da programação (*scheduling*) das operações de uma malha dutoviária, otimizando as operações de transporte e armazenamento de produtos.

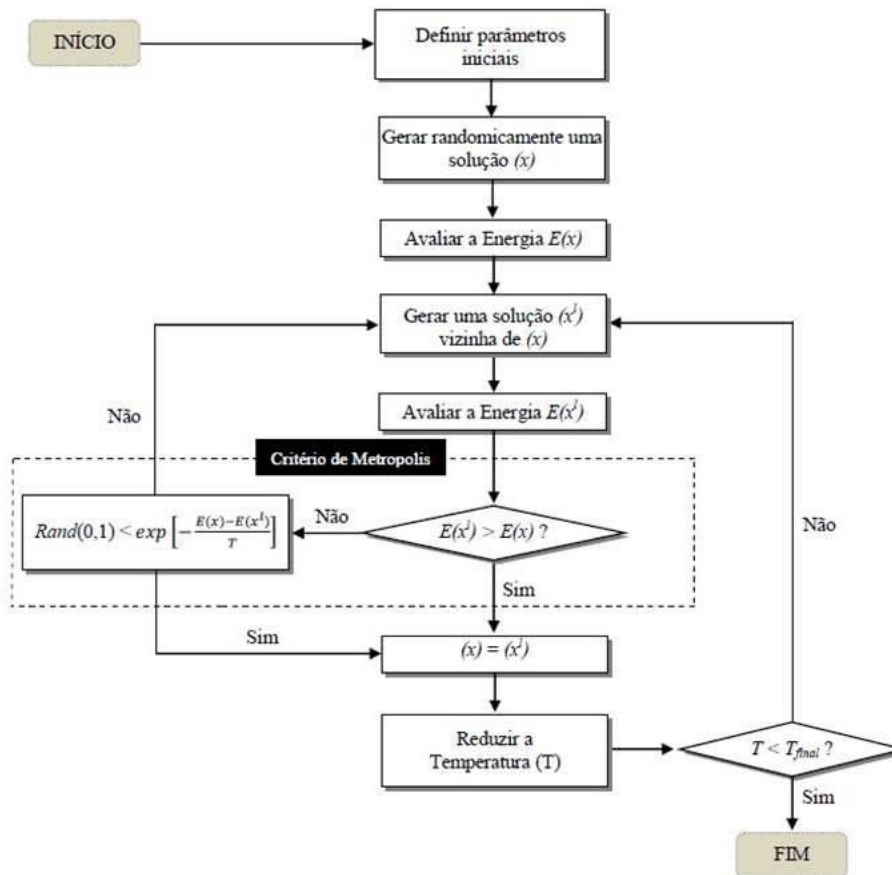


Figura 2 Estrutura geral da metaheurística *Simulated Annealing*  
 Fonte: Gomide (2009). Adaptado Buckham e Lambert (1999)

Viana (2010) propôs um modelo ao problema de sequenciamento de produção de seringas utilizando a metaheurística SA. O algoritmo desenvolvido para a aplicação em seu estudo mostrou-se versátil na resolução de todas as

condições de simulação, podendo considerá-lo eficiente e eficaz quanto à sua utilização.

Castro, Martins e Souza (2008) tratou o problema do escalonamento de horários em escolas. Dada sua natureza combinatória, o problema foi resolvido por meio de das metaheurísticas SA e GRASP. Pôde-se concluir que o método SA foi mais eficiente, pois apresentou melhores soluções na maior parte das instâncias testadas. É interessante analisar este trabalho, pois o mesmo disponibilizou uma ferramenta computacional à universidade parceira, aumentando a qualidade das soluções e minimizando o tempo de execução quando comparado ao trabalho realizado manualmente pelos responsáveis do planejamento das aulas.

No setor florestal também é possível encontrar trabalhos envolvendo a aplicação da metaheurística *Simulated Annealing*. Mais especificamente abordando o scheduling da atividade silvicultural, tem-se apenas o trabalho de Cruz (2015) ao nosso conhecimento. O autor verificou eficiência no uso da metaheurística em cenários onde a PLI não foi capaz de solucionar. Além disso, seu resultado médio ficou apenas 0,38% acima do valor ótimo.

Nas demais áreas florestais encontram-se trabalhos como o de Gomide (2013), que buscou utilizar a técnica SA para estratificar espacialmente compartimentos em unidades de manejo florestal. O uso da metaheurística demonstrou-se eficiente, uma vez que apresentou um bom tempo de processamento e baixo desvio em relação ao resultado ótimo.

Gomide et al. (2014) utilizaram a técnica SA multicritério para selecionar árvores a serem removidas no desbaste seletivo de um povoamento, considerando sua estrutura diamétrica, altura, ocupação do dossel, área de copa e qualidade da árvore. Essa técnica foi capaz de selecionar os indivíduos com uma boa padronização de seleção, indicando-a como ferramenta muito interessante a ser utilizada como apoio à tomada de decisão.

Gomide, Arce e Silva (2013) avaliaram a capacidade da metaheurística SA para resolver o problema de agendamento da colheita com restrição espacial de adjacência do tipo URM. Também foi avaliada a eficiência do uso da metaheurística em cenários mais complexos para o problema. Na maioria dos testes, a técnica SA foi capaz de solucionar o problema florestal, porém, ao aumentar a complexidade, foi produzido um desvio maior em relação ao ótimo. No entanto, a complexidade não atrapalha a metaheurística em obter soluções viáveis, ou seja, sempre atendeu as metas impostas.

Rodrigues et al. (2004) desenvolveram e testaram a metaheurística SA para solucionar problemas de gerenciamento florestal com restrição de integridade. Os autores verificaram que esta técnica apresentou bom desempenho, uma vez que suas soluções ficaram próximas do valor ótimo matemático.

Pereira (2004) aplicou o SA em problemas de planejamento florestal multiobjetivo. Para tanto, uma adaptação ao algoritmo PSA (Pareto *Simulated Annealing*) foi aplicado para a resolução deste problema. O desempenho do PSA mostrou-se satisfatório e bem superior aos algoritmos evolucionários também testados no trabalho.

### **3 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Conclui-se que o planejamento do setor silvicultural por meio de técnicas computacionais mostra-se como excelente ferramenta para auxílio da tomada de decisão por parte dos gestores florestais. Nesse sentido, este capítulo proporcionou o estabelecimento de conceitos relacionados ao trabalho, abordando as temáticas de planejamento e controle da produção florestal, sistemas de apoio a tomadas de decisão, programação de projetos, bem como os métodos utilizados para realizar a otimização. O mesmo foi essencial para a

elaboração dessa base teórica, pois dará suporte para o entendimento do capítulo subsequente.

#### 4 REFERÊNCIAS

ALEM, D.; MORABITO, R. Production planning under uncertainty: stochastic programming versus robust optimization. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 22, n. 3, p. 539-551, jul./set. 2015.

ALMEIDA, M. R.; HAMACHER, S.; PACHECO, M. A. C. **Algoritmos genéticos para programação automática da produção em refinarias de petróleo**. Rio de Janeiro: Editora da PUCRJ, 2000. 15 p.

ARAÚJO JÚNIOR, C. A. **Simulação multiagentes aplicada ao planejamento da produção florestal sustentável**. 2012. 75 p. Dissertação (Mestrado Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

BELFIORE, P.; FÁVERO, L. P. **Pesquisa operacional para cursos de engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. 541 p.

BERGER, R. et al. Minimização de custos de transporte florestal com a utilização da programação linear. **Floresta**, Paraná, v. 33, n. 1, p. 53-62, 2003.

BINKOWSKI, P. **Conflitos ambientais e significados sociais em torno da expansão da silvicultura de eucalipto na "metade sul" do Rio Grande do Sul**. 2009. 212 p. Mestrado (Dissertação em Desenvolvimento Rural) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

BLAZEWICICZ, J. et al. Scheduling subject to resource constraints: classification and complexity. **Discrete Applied Mathematics**, Amsterdam, v. 5, n. 1, p. 11-24, Jan. 1983.

BORBA, D. B. **Gestão de projetos**. Rio de Janeiro: Editora da FGV Management, 2004. 216 p.

BUCKHAM, B. J.; LAMBERT, C. **Simulated annealing applications**. Victoria: Mechanical Engineering Department, 1999. 16 p. Disponível em: <[http://\\_www.me.uvic.ca/~zdong/courses/mech620/SA\\_App.PDF](http://_www.me.uvic.ca/~zdong/courses/mech620/SA_App.PDF)>. Acesso em: 07 abr. 2009.

BUSTAMANTE, L. M. **Minimização do custo de antecipação e atraso para o problema de sequenciamento de uma máquina com tempo de preparação dependente da sequência:** aplicação em uma usina siderúrgica. 2007. 86 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

CASTRO, R. R. M.; MARTINS, A. X.; SOUZA, M. J. F. Planejamento de aulas de um departamento via *Simulated Annealing* e GRASP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 40., 2008, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: SBPO, 2008. p. 1402-1412.

CHAKRABORTTY, R. K.; SARKER, R. A.; ESSAM, D. L. Multi-mode resource constrained project scheduling under resource disruptions. **Computers & Chemical Engineering**, New York, v. 88, p. 13-29, May 2016.

CHAVES, A. A. et al. **Modelagens exata e heurística para resolução do problema do caixeiro viajante com coleta de prêmios.** 2003. 49 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

CIRO, G. C. et al. A fuzzy ant colony optimization to solve an open shop scheduling problem with multi-skills resource constraints. In: IFAC SYMPOSIUM ON INFORMATION CONTROL PROBLEMS IN MANUFACTURING, 15., 2015, Ottawa. **Proceedings...** Ottawa: INCOM, 2015. p. 715-720.

CRUZ, B. R. **Regulação silvicultural das atividades operacionais na programação de projetos florestais via *Simulated Annealing*.** 2015. 84 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

CURY, R. M. et al. **Uma abordagem difusa para o problema de flow-shop scheduling.** 1999. 88 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

DIÓGENES, A. N. et al. **Reconstrução tridimensional de meios porosos utilizando técnicas de *simulated annealing*.** 2009. 147 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

DOMINGOS, J. C. et al. Um sistema de apoio à decisão para scheduling em Job Shop, utilizando lógica fuzzy. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 28., 2008, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABEPRO, 2008.

FERREIRA, C. A.; SILVA, H. D. **Formação de povoamentos florestais**. Colombo: Embrapa Florestas, 2008. 104 p.

FIGUEIREDO, J. F. M. S. **Implementação de um algoritmo genético híbrido com simulated annealing para o problema job shop**. 2015. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas) - Universidade do Minho, Lisboa, 2015.

GIACON, E. **Implantação de sistemas de programação detalhada da produção**: levantamento das práticas de programação da produção na indústria. 2010. 106 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. A. **Otimização combinatória e programação linear**. Rio de Janeiro: Campus, 2000. 536 p.

GOMIDE, L. R. Estratificação espacial de compartimentos via metaheurística simulated annealing em unidades de manejo florestal. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 45., 2013, Natal. **Anais...** Natal: SBPO, 2013. p. 642-651.

GOMIDE, L. R. et al. Automated selective thinning via multicriteria metaheuristic procedure. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 102, p. 299-306, 2014.

GOMIDE, L. R. **Planejamento florestal espacial**. 2009. 256 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

GOMIDE, L. R.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. Comparação entre a metaheurística *Simulated Annealing* e a programação linear inteira no agendamento da colheita florestal com restrição de adjacência. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 449-460, abr./jun. 2013.

ICHIHARA, J. de A. Problema de programação de projetos com restrição de recursos (resource-constrained project scheduling problem). In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 22., 2002, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Abepro, 2002. p. 01-08.

INGBER, L. Simulated annealing: practice versus theory. **Mathematical and Computer Modelling**, Oxford, v. 18, n. 11, p. 29-57, Dec. 1993.

KAWAMURA, M. S. **Aplicação do método branch-and-bound na programação de tarefas em uma única máquina com data de entrega comum sob penalidades de adiantamento e atraso**. 2006. 71 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by simulated annealing. **Science**, New York, v. 220, n. 4598, p. 671-680, May 1983.

KRETER, S.; RIECK, J.; ZIMMERMANN, J. Models and solution procedures for the resource-constrained project scheduling problem with general temporal constraints and calendars. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 251, n. 1, p. 387-403, June 2015.

LAARHOVEN, P. J. M.; AARTS, E. H. **Simulated annealing: theory and applications**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1987. 187 p.

LAND, A. H.; DOING, A. G. An automatic method for solving discrete programming problems. **Econometria**, Rio de Janeiro, v. 28, n. 3, p. 497-520, July 1960.

MANNE, A. S. On the job-shop scheduling problem. **Operations Research**, Baltimore, v. 8, n. 2, p. 219-223, Mar./Apr. 1960.

MARINS, F. A. S. **Introdução à pesquisa operacional**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2011. 176 p.

METAHEURISTICS NETWORK. **Project: description**. Disponível em: <<http://www.metaheuristics.net>>. Acesso em: 12 nov. 2015.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. **Desenvolvimento sustentável: florestas plantadas**. Brasília: Ministério da Agricultura, 2014. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br>>. Acesso em: 10 jun. 2014.

MODER, J. J.; PHILLIPS, C. R.; DAVIS, E. W. **Project management with CPM, PERT and precedence diagramming**. 3. ed. New York: Van Nostrand, 1983. 389 p.

MOURA, A. L. de M. **Planejamento anual otimizado de atividades silviculturais com restrição de recursos e múltiplos modos de execução.** 2013. 115 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

NUDTASOMBOON, N.; RANDHAWA, S. U. Resource-constrained project scheduling with renewable and non-renewable resources and time-resource tradeoffs. **Computers & Industrial Engineering**, New York, v. 32, n. 1, p. 227-242, Jan. 1997.

PACHECO, R. F.; SANTORO, M. C. Proposta de classificação hierarquizada dos modelos de solução para o problema de Job Shop Scheduling. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 6, n. 1, p. 1-15, abr. 1999.

PEREIRA, G. W. **Aplicação da técnica de recozimento simulado em problemas de planejamento florestal multiobjetivo.** 2004. 75 p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

PIMENTA, L. B. **Otimização no sequenciamento de produção em uma fábrica de materiais médico-hospitalares.** 2008. 48 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2008.

PINEDO, M. L. **Scheduling: theory, algorithms, and systems.** 3. ed. New York: Springer, 2008. 676 p.

PINTO, J. M. **Planejamento e programação de operações de produção e distribuição em refinarias de petróleo.** 2000. 160 p. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

QUEZADO, P. M.; CARDOSO, C. R. O.; TUBINO, D. F. **Programação e controle da produção sob encomenda utilizando PERT/CPM e heurísticas.** [S.l.: s.n.], 1999. Disponível em: <[http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:UnTv9C WlucEJ: www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP 1999\\_A0381.PDF+&cd=1&hl=en&ct =clnk&gl=br](http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:UnTv9C WlucEJ: www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP 1999_A0381.PDF+&cd=1&hl=en&ct =clnk&gl=br)>. Acesso em; 15 mar. 2015.

REDE METAHEURÍSTICA. Disponível em: <<http://www.metaheuristics.net/index.php%3Fmain=1.html>>. Acesso em: 15 out. 2015.



REEVES, C. R. **Modern heuristic techniques for combinatorial problems**. Oxford: Backwell Scientific, 1993. 320 p.

REKLAITIS, G. V. Overview of scheduling and planning of batch process operations. In: REKLAITIS, G. V. et al. (Ed.). **Batch processing systems engineering: fundamentals and applications for chemical engineering**. Antalya: Nato Advanced Study Institute, 1992. p. 660-705.

RODE, R. et al. Comparação da regulação florestal de projetos de fomento com áreas próprias de empresas florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 35, n. 81, p. 11-19, jan./mar. 2015.

RODRIGUES, F. L. et al. Metaheurística *simulated annealing* para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. **Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 233-245, mar./abr. 2004.

RODRIGUEZ, L. C. E. **Técnicas quantitativas para a gestão de florestas plantadas**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2006. 103 p. 1 Apostila do Programa de Reciclagem em Métodos Quantitativos.

RÖNNQVIST, M. et al. Operations research challenges in forestry: 33 open problems. **Annals of Operations Research**, Amsterdam, v. 232, n. 1, p. 11-40, Sept. 2015.

SCHROEDER, S. B. An instrument for measuring the critical factors of quality management. **Decision Sciences**, Atlanta, v. 20, n. 4, p. 810-829, Dec. 1989.

SHERALI, H. D.; DRISCOLL, P. J. Evolution and state-of-art in integer programming. **Journal of Computation and Applied Mathematics**, Amsterdam, v. 124, n. 1-2, p. 319-340, Dec. 2000.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2009. 278 p.

SOUZA, M. J. F. **Notas de aula da disciplina Intenligência Computacional para Otimização**. Ouro Preto: Departamento de Computação, 2007.

STEBEL, S. L. **Técnicas de otimização aplicadas em problemas de scheduling dos recursos de estocagem**. 2006. 142 p. Tese (Doutorado em Engenharia Biomédica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2006.

STEVENSON, M.; ENDRY, L. C.; KINGSMAN, B. G. A review of production planning and control: the applicability of key concepts to the make-to-order industry. **International Journal of Production Research**, London, v. 43, n. 5, p. 869-898, Mar. 2005.

SUCUPIRA, I. R. **Métodos heurísticos genéricos: meta-heurísticas e hiper-heurísticas**. São Paulo: IME/USP, 2007. 47 Slides.

TOLENTINO, G. **Programação linear inteira aplicada ao aproveitamento do palhão da cana de açúcar**. 2007. 70 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, 2007.

TUBINO, D. F. **Planejamento e controle da produção: teoria e prática**. São Paulo: Atlas, 2008. 190 p.

VALVERDE, S. R. et al. **Silvicultura brasileira: desafios e oportunidades para a economia verde**. Rio de Janeiro: Fundo Brasileiro de Desenvolvimento Sustentável, 2014. 40 p.

VANCROONENBURG, W.; SMET, P.; BERGHE, G. V. A two-phase heuristic approach to multi-day surgical case scheduling considering generalized resource constraints. **Operations Research for Health Care**, Amsterdam, v. 7, p. 27-39, Dec. 2015.

VIANA, C. J. **Aplicação do método *simulated annealing* em um problema real de sequenciamento da produção**. 2010. 128 p. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

VIEIRA, C. S.; CARVALHO, C. R. V.; PINTO, R. L. U. F. O método de benders aplicado ao problema de sequenciamento de atividades em projetos com restrições de recursos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 43., 2011, Ubatuba. **Anais...** Ubatuba: Sobrapo, 2011.

YAMAMOTO, L.; ARRUDA, L. V. R.; LIBERT, N. Estudo comparativo de várias metaheurísticas aplicadas ao seqüenciamento de bateladas em redes dutoviárias. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 39., 2007, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SBPO, 2007.

AMASHITA, D. S.; MORABITO, R. Um algoritmo exato para o problema de programação de projetos com custo de disponibilidade de recursos e múltiplos modos. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 1, p. 27-49, 2007.

**SEGUNDA PARTE**

**ARTIGO**      **Análise da implementação do algoritmo *Simulated Annealing* para o problema PSSRME**

Nathalia de Paiva Mendonça<sup>1</sup>

Lucas Rezende Gomide<sup>2</sup>

Lucas Amaral de Melo<sup>3</sup>

Antônio Carlos Ferraz Filho<sup>4</sup>

José Márcio de Melo<sup>5</sup>

**Artigo formatado de acordo com a NBR 6022 (ABNT, 2003), conforme exigido pela UFLA.**

---

<sup>1</sup>(Engenheira Florestal, Mestranda em Engenharia Florestal, UFLA)

<sup>2</sup>(Engenheiro Florestal, Doutor em Engenharia Florestal, Professor – UFLA)

<sup>3</sup>(Engenheiro Florestal, Doutor em Engenharia Florestal, Professor – UFLA)

<sup>4</sup>(Engenheiro Florestal, Doutor em Engenharia Florestal, Professor – UFLA)

<sup>5</sup>(Engenheiro Florestal, Doutor em Engenharia Florestal, Professor – UFLA)

## RESUMO

Sabe-se que a silvicultura brasileira possui uma das maiores vantagens produtivas, em virtude das condições edafo-climáticas favoráveis, detenção de tecnologia avançada e mão-de-obra especializada disponível. No entanto, estes aspectos não estão contemplados ao planejamento operacional das atividades silviculturais, que ainda se mostra como um ponto pouco explorado. Percebe-se que empresas têm adotado gestões empíricas ao planejamento das atividades silviculturais por falta de conhecimento em ferramentas automatizadas. Nesse sentido, o presente estudo pretendeu contribuir com o desenvolvimento de modelos de programação matemática contemplando a programação linear inteira (PLI), bem como uma adaptação da metaheurística *Simulated Annealing* (SA) para o problema de sequenciamento das atividades silviculturais envolvendo restrições de recursos e múltiplos modos de execução (PSSRME). A área de estudo abrangeu um conjunto de 32 talhões, cinco atividades silviculturais e um total de 11 equipes de campo. O planejamento foi realizado em um horizonte de planejamento (HP) de 40 dias. Todas as combinações possíveis entre atividades a serem realizadas pelas equipes ao longo do HP somaram 4772 variáveis de decisões. Foram criadas três funções objetivo e nove restrições. As funções criadas testaram a minimização do custo, tempo de execução e uso da mão-de-obra no projeto silvicultural. As combinações entre as funções desenvolvidas e as restrições geradas possibilitaram o estabelecimento de diferentes modelos, que foram agrupados em oito cenários ( $C_1$  a  $C_8$ ). Todos os cenários foram processados via PLI e SA. A comparação entre os mesmos foi realizada a partir do cálculo do desvio em relação ao valor ótimo de cada cenário. O SA foi eficiente para solucionar os cenários propostos. O  $C_1$  foi o único que alcançou a resposta ótima via SA. De maneira geral, todos os cenários apresentaram baixos valores de desvios, oscilando entre 0 a 14 % em relação ao PLI. Os  $C_3$  e  $C_4$  foram os que apresentaram desvios superiores a 10 %, contudo, em termos absolutos, seus resultados foram muito satisfatórios. Embora os  $C_7$  e  $C_8$  não tenham apresentado soluções factíveis via metaheurística, seus resultados foram próximos a uma resposta ideal. Além disso, estes apresentaram-se como os mais importantes a serem comentados com relação ao uso da metaheurística, pois sua resolução por PLI mostrou-se inviável. Puderam-se classificar como cenários ideais o  $C_1$  para a função minimizar custo; o  $C_3$  para a função minimizar *makespan* e o  $C_8$  para o uso de mão-de-obra equilibrada.

Palavras-chave: Metaheurística. Silvicultura. Programação.

## ARTIGO

### 1 INTRODUÇÃO

A atividade florestal no Brasil, em seu primeiro momento, foi marcada por uma extração exploratória do recurso madeireiro, resultando em um grande déficit de material lenhoso no território. Já nas primeiras décadas do século XVIII, ocorreu um primeiro e grande avanço no setor silvicultural, através da introdução do eucalipto por Navarro de Andrade. Todavia, somente na década de 60, com a política dos incentivos fiscais concedidos ao reflorestamento, a silvicultura passou a ser tratada com maior atenção (ANTONANGELO; BACHA, 1998).

A partir de então, a silvicultura brasileira tem se repaginado ano após ano. O país saiu de uma silvicultura de baixa produtividade, com cerca de 10 a 15 m<sup>3</sup>/ha.ano nas décadas de 50 e 60, para mais de 40 m<sup>3</sup>/ha.ano nos dias atuais. Há de se destacar que tal avanço foi promovido graças a grandes esforços de instituições de pesquisas e empresas (LEITE, 2015).

Percebe-se que para garantir essa alta produtividade, tem-se praticado o uso de clones melhorados, mecanização no campo, boas práticas de manejo e técnicas de silvicultura de precisão. No entanto, ainda existem outros aspectos dentro do setor silvicultural que merecem ser alvo de maiores estudos. O gerenciamento e planejamento, por exemplo, é um deles. Tais estudos visam promover ainda mais competência gerencial, o que permitirá uma elevação do quadro silvicultural no país.

Sabe-se que a silvicultura dentro das empresas do segmento florestal é um dos pilares essenciais do seu processo produtivo. Seu planejamento, contudo, mostra-se complexo por diversos motivos, dentre os quais, pode ser destacado o elevado conjunto de atividades a serem executadas, aliadas à disponibilidade de

recursos (renováveis ou não), à falta de mão de obra treinada, à indefinição de procedimentos silviculturais, às dificuldades no planejamento das operações em função do clima e à manutenção de máquinas e equipamentos.

Analisando o aspecto relacionado ao planejamento das atividades silviculturais, o mesmo tende a ser empírico em diversas empresas pela falta de métodos e ferramentas automatizadas. O horizonte de trabalho, nestes casos, é o de curto prazo e por isso torna-se complexo e mais estruturado. Logo, ao se tomar decisões empíricas, possivelmente não são adotadas as melhores soluções. (DYKSTRA, 1984). Por esse motivo, o uso de técnicas computacionais que auxiliem o planejamento mostra-se como uma ferramenta promissora aos gestores da área.

Os problemas de otimização mais recorrentes no setor florestal abordam os temas relacionados ao agendamento da colheita e regulação florestal, como observado em Borgesa e Eriksson (2000), Dong et al. (2015), Gomide (2013), Gomide et al. (2014), Gomide, Arce e Silva (2013), Öhman e Eriksson (2002), Rodrigues et al. (2004). Contudo, a temática envolvendo o planejamento e sequenciamento da atividade silvicultural é encontrada em reduzidos trabalhos, como observado em Cruz (2015) e Moura (2013).

O planejamento sequencial das atividades silviculturais com restrições de recursos e múltiplos modos de execução (PSSRME) é classificado como um problema de otimização combinatória do tipo *scheduling* na programação de projetos. Neste caso, os recursos são distinguidos pelo período de tempo em que estão disponíveis, sendo a programação entendida como alocação dos recursos no tempo, buscando a melhor ordem em uma sequência de tarefas a fim de se otimizar um ou mais critérios (DOMINGOS et al., 2008).

As variações das demandas são os principais fatores que provocam as mudanças no planejamento. Por consequência, os critérios a serem otimizados em um planejamento podem ser vistos sob os mais diversos enfoques. Para a

representação simplificada desta realidade, modelos matemáticos são formulados. Contudo, como os problemas de sequenciamento são problemas matemáticos de alto nível de complexidade, nem sempre a determinação da melhor solução possível é passível de ocorrer (BODINGTON; SHOBRY, 1995).

À vista disso, as metaheurísticas são técnicas que vêm sendo amplamente utilizadas em problemas de otimização combinatória. Nas últimas duas décadas, tem-se percebido sua vasta aplicação em problemas práticos de otimização ao manejo florestal (DONG et al., 2015). A técnica *Simulated Annealing* pode ser considerada consolidada neste meio, pois se verifica sua aplicação em diversos trabalhos envolvendo o planejamento da colheita (BASKENT; JORDAN, 2002; BORGES; EID; BERGSENG, 2014; GOMIDE, 2013; ÖHMAN; ERIKSSON, 2002); a otimização espacial considerando o risco de incêndio florestal (GONZÁLES-OLABARRIA; PUKKALA, 2011; KIM; BETTINGER; FINNEY, 2009), bem como na otimização de áreas a serem plantadas (JORGENSEN; THOMSEN; VIDAL, 1992).

A metaheurística *Simulated Annealing* (SA) baseia-se em uma analogia à termodinâmica, inspirada pelo processo de resfriamento dos metais. Trata-se de um algoritmo probabilístico de busca local e que exige um baixo consumo de memória computacional (VILLAGRAN; LEGUIZAMÓN; ALBA, 2015). Devido a estas características e à facilidade em sua implementação, este método pode ser desenvolvido para a resolução de problemas envolvendo programação de projetos, que no caso do presente trabalho envolveu a silvicultura.

Nesse sentido, este estudo teve como objetivo contribuir com o desenvolvimento de métodos voltados à otimização e à tomada de decisão, baseados em programação linear inteira e *Simulated Annealing* em um problema de sequenciamento das atividades silviculturais com restrições de recursos e múltiplos modos de execução (PSSRME). De forma complementar, aplicaram-



se funções objetivo de diferentes naturezas, no sentido de minimizar o custo, tempo de execução (*makespan*), uso do recurso mão-de-obra, bem como a oscilação do uso da mão-de-obra em um projeto silvicultural. A proposta foi em auxiliar o suporte à tomada de decisão operacional das atividades silviculturais.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Projeto Florestal

A área de estudo compreendeu um projeto florestal contendo 32 talhões, com áreas variando entre 8 a 48 hectares cada (Figura 1). Foram simuladas cinco atividades silviculturais: combate à formiga localizado (A1); combate à formiga sistemático (A2); preparo mecanizado do solo (A3); plantio (A4) e adubação pós-plantio (A5).

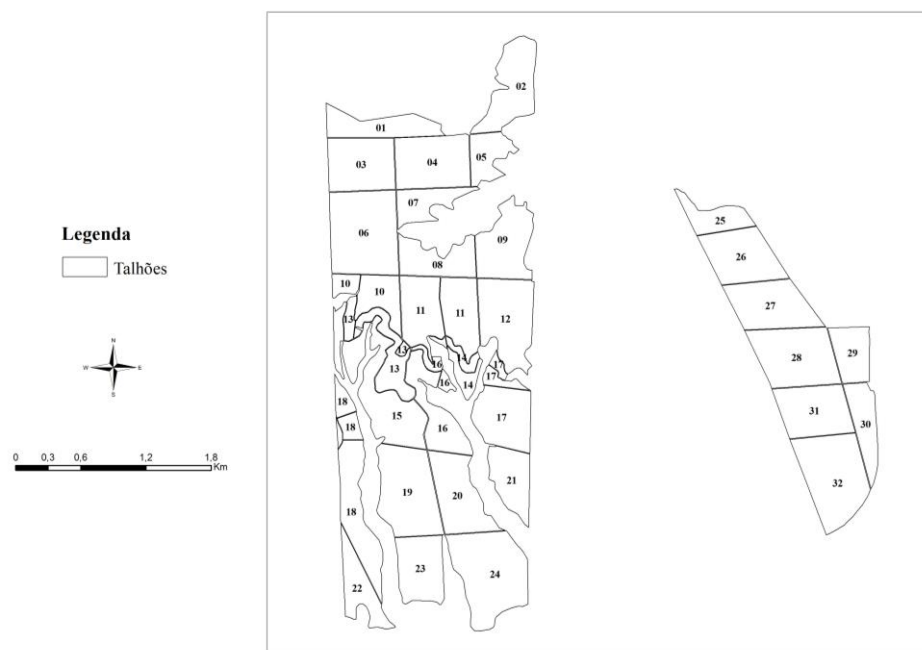


Figura 1 Mapa de localização da área simulada para a implantação do planejamento das atividades

O projeto foi trabalhado em nível operacional, simulando o foco das atividades silviculturais rotineiras de uma empresa, onde os planos foram desenvolvidos para um período curto de planejamento de 40 dias. Consideraram-se cinco dias úteis por semana, sem existência de feriado e 6 horas efetivas de trabalho por dia. As atividades foram passíveis de ocorrer em qualquer período do horizonte de planejamento (HP), desde que todas fossem concluídas até o último dia proposto. Entre as atividades programadas, existia uma relação de interdependência, ou seja, se a atividade A1 fosse realizada em um talhão qualquer, todas as subsequentes deveriam ser realizadas segundo a sua ordem hierárquica predefinida. Dessa maneira, ficou definido que a atividade A2 dependia do término da A1; a atividade A3 do término da A2 e da A1, e assim sucessivamente até a quinta e última atividade. Além disso, se fez necessário respeitar um tempo de intervalo entre o término de uma atividade e o início da atividade subsequente, (Tabela 1).

Tabela 1 Relação das atividades silviculturais agendadas para serem executadas

Número de talhões	Área média (ha)	Atividades				
		A1	A2	A3	A4	A5
4	28,77	X	X	X	X	X
7	27,6		X	X	X	X
5	26,54			X	X	X
8	25,84				X	X
8	31,48					X

Em que: A1-A2: 0d / A2-A3: 3d / A3-A4: 0d / A4-A5: 1d / d: período do tempo em dias entre as atividades

O projeto abordou o problema de sequenciamento das atividades silviculturais (A1 a A5) com restrições de recurso, ou seja, a disponibilidade de horas diárias referentes ao recurso mão-de-obra e máquina foi finita.

Estabeleceu-se um conjunto de diferentes equipes responsáveis pela execução das atividades programadas. As equipes não foram fixas, assim, na Tabela 2 são apresentadas as possibilidades de suas formações. A presença de diferentes equipes permitiu a execução das atividades em modos alternativos, ou seja, para uma mesma tarefa três possibilidades de equipes por exemplo. Essas possibilidades retratam os múltiplos modos de execução do projeto.

Tabela 2 Descrição das equipes para cada atividade silvicultural

Atividade	Equipe	Quantidade (Unidade)		Rendimento (ha/h)	Custo (R\$/ha)
		MDO	MAQ		
A1	1	13	0	2,36	64,00
	2	15	0	2,73	65,00
	3	18	0	3,27	66,00
A2	1	13	0	4,73	32,00
	2	15	0	5,45	33,00
	3	18	0	6,54	34,00
A3	1	3	1	1,52	82,50
	2	4	1	2,02	102,30
A4	1	11	0	1,43	89,00
	2	12	0	1,56	90,00
A5	1	19	0	4,32	51,34

Em que: MDO = mão-de-obra e MAQ = máquina

As composições variaram em função do número de colaboradores por equipe, e conseqüentemente os valores de custos e rendimentos foram maiores para aquelas que demandavam maior quantidade de mão-de-obra. O custo foi definido apenas pelo preço da mão-de-obra executada, desconsiderando-se os custos relacionados aos insumos e utensílios necessários para a execução das atividades.

A partir das características acima apresentadas, o projeto foi classificado como um problema de sequenciamento das atividades silviculturais com restrições de recursos e múltiplos modos de execução (PSSRME).

## 2.2 Métodos de resolução para o PSSRME

### 2.2.1 Programação Linear Inteira (PLI)

Nesta seção foi desenvolvido um modelo de programação linear inteira para o PSSRME. Três tipos de funções objetivo foram elaboradas. A primeira função objetivo (FO<sub>1</sub>) (1) foi formulada para minimizar o custo total do projeto silvicultural dentro do horizonte de planejamento. Em que  $x_{ijkl}$  – variável de decisão binária {0;1} identificava ativação ou desativação do talhão  $i$  a ser submetido à atividade  $j$  através da utilização da equipe  $k$  durante o período  $l$  e  $c_{ijkl}$  corresponde ao valor do custo, em reais, da atividade  $j$  quando realizada pela equipe  $k$  em todo talhão  $i$  durante o período  $l$ .

$$\text{Minimizar Custo} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{K \in j} \sum_{l=1}^{TF} c_{ijkl} x_{ijkl} ; l \in i, l \in j, 1 \in k \quad (1)$$

Considerando que possam existir situações em que o decisor florestal deseja conhecer o menor prazo para a conclusão do projeto, gerou-se uma nova função objetivo (FO<sub>2</sub>) (2), que visou minimizar o *makespan*. Em que sendo  $t_{ijkl}$  – coeficiente do tempo de execução da atividade  $j$  quando realizada pela equipe  $k$  em todo talhão  $i$  durante o período  $l$  e associada à variável de decisão  $x_{ijkl}$ .

$$\text{Minimizar Makespan} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{K \in j} \sum_{l=1}^{TF} t_{ijkl} x_{ijkl} ; l \in i, l \in j, 1 \in k \quad (2)$$

A terceira função objetivo (FO<sub>3</sub>) (3) testada modela a situação em que o gestor florestal apresenta como objetivo minimizar o uso da mão-de-obra

necessária na execução das atividades dentro do HP. Uma demanda equilibrada deste recurso acarreta em reduzidos impactos sociais quanto à contratação e demissão de colaboradores, proporcionando um bom funcionamento quanto aos processos administrativos de uma empresa. Neste sentido, visando à equalização pela demanda do recurso mão-de-obra, esta terceira função foi elaborada, em que *hmdo* - trata-se da variável de decisão contínua que expressa as horas de mão-de-obra a serem minimizadas.

$$\text{Minimizar} = \text{hmdo} \quad (3)$$

As funções acima elaboradas foram sujeitas a algumas restrições. Devido à natureza booleana da variável de decisão empregada ao problema, a restrição (4) garante que os talhões nunca sejam trabalhados de forma parcial, ou seja, fracionada. Dessa maneira, caso um talhão fosse selecionado, toda sua área sempre seria realizada por somente uma equipe.

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{K \in j} x_{ijkl} = 1 \quad \forall i \in I, l \in TI, l \in TF \quad (4)$$

A equação (5) representa a restrição de dependência entre as atividades. Assim, para cada área (ha) executada considerando a atividade *j* no período *l* de ocorrência, o mesmo valor em área (ha) foi realizado, pela próxima atividade *j*, no período *TF+s* para o talhão *i* avaliado, sendo *TF* o dia do término de uma atividade e *s* o período técnico de tempo recomendado entre as duas atividades relacionadas.

$$\sum_{k=1}^{K \in j} x_{ijkTF} = \sum_{k=1}^{K \in j} x_{i(TF+s)kTI}; \quad \forall i; \forall j; \forall l \quad (5)$$

As limitações de recurso mão-de-obra e máquina, por sua vez, foram controladas pelas equações (6) e (7), respectivamente. Estas restrições garantiram que quantidade de horas do recurso alocado, diariamente, não ultrapassasse a quantidade de horas disponível. Em que  $R_{Cijkl}$  representa o rendimento do recurso colaborador, em horas homem/hectare e  $R_{MAQijkl}$  o

rendimento do recurso máquina em horas máquina quando a atividade  $j$  é executada pela equipe  $k$  no talhão  $i$  durante o período  $l$ . Os  $d_{hc}$  e  $d_{hMAQ}$  representam a disponibilidade diária em horas de colaboradores e máquinas respectivamente.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{K \in j} R_{Cijkl} X_{ijkl} \leq dh_c \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{K \in j} R_{ijkMAQ} X_{ijkl} \leq dh_{MAQ} \quad (7)$$

Cabe ressaltar que nesta simulação, o recurso mão-de-obra, ficou livre para definir o número de equipes a serem habilitadas para executar o projeto, ocorrendo dessa maneira duas situações: 1) em um mesmo dia pôde-se formar mais de uma vez a composição de uma mesma equipe; 2) em um mesmo dia puderam ser formadas todas as equipes (quantas vezes fossem necessárias) para executar a mesma atividade.

Dependendo do modelo a ser utilizado, as situações 1 e 2 puderam ocorrer em um maior ou menor grau. Assim, não era um erro, por exemplo, a utilização de três equipes 1 executando a atividade 1 em um mesmo dia, pois a restrição proposta é flexível para formar equipes.

No caso específico da FO<sub>3</sub> o valor do RHS (*right hand side*, ou seja, o lado direito da inequação) desta restrição não apresentou um limite numérico relativo à disponibilidade em horas diárias de mão-de-obra, mas sim, uma nova variável de decisão que está contida na equação (3) para compor a função objetivo (8). Em que  $h_{cijkl}$  representa as horas de mão-de-obra executadas por dia ( $d$ ) que compõem o horizonte de planejamento (HP) formado por quarenta dias. Já a restrição nove garante que o recurso mão-de-obra seja maior ou igual a zero.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{K \in j} h_{Cijkl} X_{ijkl} \leq hmdo \quad d \in \text{HP} \quad d = \{1, 2, 3, \dots, 40\} \quad (8)$$

$$hmdo \geq 0 \quad (9)$$

Na restrição de mão-de-obra (equação 10), foi acrescentada uma variável desvio, que pode assumir valores variando entre 0,8 e 1,2. Esses desvios (equações 11 e 12) multiplicam um valor médio de disponibilidade de horas diárias do recurso mão-de-obra. Essa restrição busca o efeito de uma equalização da distribuição da mão-de-obra ao longo do HP.

$$d_2 \cdot \overline{dhc} \geq \sum_{l=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{K \in j} \sum_{l=II}^{TF} h_{ijkl} x_{ijkl} \geq d_1 \cdot \overline{dhc} \quad (10)$$

$$d_1 \geq 0,8 \quad (11)$$

$$d_2 \leq 1,2 \quad (12)$$

Por fim, restrições de não negatividade e binária (equação 13) foram introduzidas para que as características do problema formulado fossem atendidas.

$$x_{ijkl} \in \{0,1\} \quad (13)$$

### 2.2.2 Metaheurística *Simulated Annealing*

O PSSRME é um problema altamente complexo em virtude do elevado número de combinações entre as atividades a serem realizadas pelo recurso mão-de-obra (múltiplos modos de execução) ao longo de um horizonte de planejamento. Para problemas dessa natureza, muitas metaheurísticas vêm sendo utilizadas (CIRO et al., 2015; KRETER; RIECK; ZIMMERMANN, 2015; VANCROONENBURG; SMET; BERGHE, 2015). Nesse sentido, o presente estudo abordou o método clássico *Simulated Annealing* adaptado por Kirkpatrick, Gelatt e Vecchi (1983).

A chave para a pesquisa do SA é que esta técnica pode aceitar soluções inferiores em função dos parâmetros de controle. Essa aceitação ocasional de uma solução inferior impede que a função convirja para um ótimo local de forma precoce. Isso faz com que esse algoritmo explore outras áreas no espaço de simulação, aumentando a possibilidade de escolha de uma boa solução (DONG et al., 2015). Para selecionar a melhor parametrização, foram realizados testes preliminares com a base de dados. Assim, utilizou-se temperatura inicial de igual 1.000.000; percentual de busca 10%; número de iterações 50.000 e função de redução de temperatura ( $\alpha=0,999$ ), dada pela equação 14.:

$$T_i = \alpha T_{i-1} \quad (14)$$

Devido à natureza dos modelos matemáticos, empregou-se a estratégia de penalizar as funções de avaliação para adequarem as funções objetivo (1) e (2). Assim, soluções que violassem as restrições impostas ao problema sofriam um acréscimo no valor de sua função dada pela variável “w”, na ordem de 1000 vezes o desvio para a Função 1 e de 100 vezes para a Função 2. O desvio foi em relação à violação da utilização do recurso (dR) mão-de-obra e máquina ao longo do horizonte de planejamento. Dessa maneira, a penalidade imposta desencorajava a escolha dessas soluções. Os valores dos desvios foram escolhidos através de análises preliminares de processamento. Portanto, novas funções foram geradas a partir de modificações, conforme podem ser vistas pelas equações (15), (16) e (17), porém, sempre respeitando a proposta final via PLI.

Função1

$$\text{Minimizar Custo} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{K \in i} \sum_{l=1}^{TF} c_{ijkl} X_{ijkl} + w \sum_{d=1}^{HP} dR \quad d \in HP \quad d = \{1, 2, 3, \dots, 40\} \quad (15)$$



Função2

$$\text{Min Makespan} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{K \in j} \sum_{l=1}^{\text{TF}} t_{ijkl} x_{ijkl} + w \sum_{d=1}^{\text{HP}} dR \quad d \in \text{HP} \quad d = \{1, 2, 3, \dots, 40\} \quad (16)$$

Função3

$$\text{Minimizar} = \text{Máximo} \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{K \in j} h_{cijkd} x_{ijkl} \right] \quad d \in \text{HP} \quad d = \{1, 2, 3, \dots, 40\} \quad (17)$$

Um dos fatores mais importantes dos métodos heurísticos é a sua aleatoriedade na geração de soluções, ou seja, por ser um processo estocástico, há variações nas soluções geradas ao final. Nesse sentido, para cada cenário processado foram geradas 30 diferentes soluções. A partir dessas soluções, foi possível selecionar aquela de melhor desempenho para compará-la com os resultados obtidos via PLI.

### 2.3 Cenários Testados e Processamento dos Dados

As combinações de cada uma das três funções objetivo desenvolvidas e as restrições geradas possibilitaram o estabelecimento de diferentes modelos, que foram agrupados em oito cenários, conforme Tabela 3. Todos os cenários foram processados via Programação Linear Inteira e Metaheurística *Simulated Annealing*.

A formulação e solução dos problemas de programação linear inteira foram realizados no software LINGO® (LINDO SystemsInc), versão 15.0 de licença acadêmica. Devido à complexidade do problema, adotou-se um limite de tempo de processamento de 24 horas. A programação da metaheurística *Simulated Anealing* foi realizada no software Microsoft® Visual Basic.

Tabela 3 Relação dos cenários propostos às funções de otimização

Cenário	Disponibilidade de recurso			Modelo
	MDO	MAQ	FO	Restrições
C <sub>1</sub>	480	30	1	4,5,6,7,12
C <sub>2</sub>	360	18		4,5,6,7,12
C <sub>3</sub>	480	30	2	4,5,6,7,12
C <sub>4</sub>	360	18		4,5,6,7,12
C <sub>5</sub>	<i>hmdo</i>	30	3	4,5,7,8,12
C <sub>6</sub>	<i>hmdo</i>	18		4,5,7,8,12
C <sub>7</sub>	>=d1·300 e <=d2·300	30	1	4,5,7,9,10,11,12
C <sub>8</sub>	>=d1·300 e <=d2·300	18		4,5,7,9,10,11,12

A partir dos resultados obtidos pelos dois métodos de resolução, foi possível compará-los através da equação (18), sendo D(%) o desvio em porcentagem em relação ao ótimo,  $F_{PLI}$  o resultado obtido da função via PLI e  $F_{SA}$  o resultado obtido da função via *Simulated Annealing*.

$$D\% = \frac{F_{PLI} - F_{SA}}{F_{PLI}} \times 100 \quad (18)$$

O cálculo do desvio foi realizado utilizando variáveis diferentes para cada cenário. Sendo assim, calculou-se o desvio dos C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>7</sub> e C<sub>8</sub>, a partir dos seus resultados de custos. Já para o C<sub>3</sub> e C<sub>4</sub>, o cálculo foi realizado com os valores da duração total, em dias, do projeto. E para os cenários C<sub>5</sub> e C<sub>6</sub> através dos valores totais planejados de mão-de-obra.

### 3 RESULTADOS

As combinações realizadas entre as possibilidades de execução das atividades, pelas diferentes equipes ao longo do tempo, somaram um valor de 4.722 variáveis de decisões. Após o processamento de todos os cenários pelos dois métodos de resolução, foi possível sumarizar os resultados na Tabela 4. As

soluções ótimas via PLI foram obtidas de maneira eficiente para os cenários  $C_1$  e  $C_2$ , assim como o ocorrido no trabalho de Cruz (2015). Como esperado, ambos os cenários obtiveram o mesmo custo total de execução no valor R\$157.190,65, independentemente da disponibilidade de recursos (mão-de-obra e máquina) oferecida. A diferença entre as respostas destes cenários se deu em relação aos valores diários de mão-de-obra e máquina, pois equipes variadas foram habilitadas ao longo do HP, (Figura 2).

Notou-se que o Cenário 2 apresentou uma menor oscilação com relação ao uso do recurso mão-de-obra em função do limite imposto (RHS) como disponibilidade de recurso. Considerando o método heurístico de resolução, foi verificado que o SA apresentou ótimos resultados, uma vez que os  $C_1$  e  $C_2$  obtiveram, respectivamente, 0 e 0,40 % de desvio em relação à resposta ótima. Mesmo não havendo necessidade do uso da metaheurística nestes cenários, pois o tempo de processamento via PLI foi reduzido, os resultados via SA foram excelentes e atestam a eficácia do método. O bom desempenho deste algoritmo para a função minimizar custo também foi encontrado no trabalho de Cruz (2015), em que sua metaheurística apresentou um desvio de apenas 0,38% em relação ao resultado ótimo obtido pela PLI.

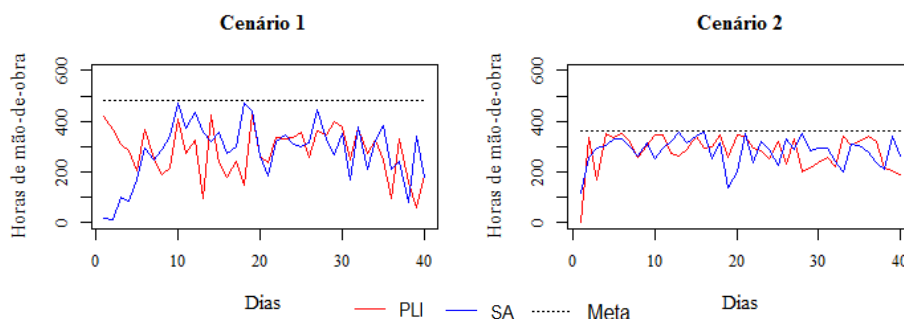


Figura 2 Análise comparativa entre os métodos de resolução dos Cenários 1 e 2

Tabela 4 Resultado do processamento via Programação Linear Inteira e Simulated Annealing

Cenários	Método	Tempo (s)	Desvio (%)**	Custo do Projeto (R\$)	Duração (dias)	Total de horas planejadas		Horas MDO planejadas	
						MDO	MAQ	Máxima	Mínima
1	PLI	2	0,00	157.190,65	40	11.242	290	432	60
	SA	35		157.190,66	40	11.286	290	474	11
2	PLI	4	0,40	157.190,65	40	11.241	290	353	0
	SA	33		157.817,20	40	11.286	287	356	114
3	PLI*	87.342	7,14	163.743,70	28	11.009	241	480	0
	SA	33		160.538,55	30	11.286	268	464	159
4	PLI*	87.522	14,29	162.551,56	35	11.009	251	360	49
	SA	33		158.362,62	40	11.286	285	360	0
5	PLI*	107.775	2,52	164.917,67	40	11.009	231	306	187
	SA	16		161.570,56	40	11.286	257	354	180
6	PLI*	258.600	2,32	162.345,73	40	11.030	255	300	186
	SA	16		160.745,48	40	11.286	266	347	179
7	PLI*	1.616.507	3,46	157.835,35	40	11.219	285	348	240
	SA	17		161.228,40	40	11.286	261	366	237
8	PLI*	457.200	2,17	163.428,42	40	11.030	255	358	240
	SA	16		159.201,25	40	11.286	278	355	224

\*O valor representa uma solução factível, que pode ou não ser o valor da melhor solução. \*\*Desvio em relação à solução ótima/ melhor *bound* obtido no tempo de processamento.

Os Cenários 3 e 4 não atingiram uma solução ótima via PLI, percebendo-se que o *makespan* é um problema mais complexo, já que o processo de busca pela melhor solução continuou após 24 horas de processamento. Como o processamento foi interrompido, a solução obtida via PLI não garantiu ser a melhor solução. Nestes cenários, é fácil observar a importância da utilização de um procedimento heurístico. Cruz (2015) também apresentou um elevado tempo computacional para o processamento da função *makespan* via PLI. O autor também não encontrou soluções ótimas para o problema em um tempo de processamento viável. O algoritmo SA, em seu trabalho, apresentou para esta função um desvio de 2,7% em relação ao resultado obtido via PLI.

No presente estudo, o desvio do SA em relação ao PLI não foi tão baixo como o apresentado no trabalho de Cruz (2015). Logo, foi possível verificar que o SA se mostrou mais eficiente para o  $C_3$ , pois em poucos segundos, ele foi capaz de gerar uma boa solução, apresentando um desvio de 7%. Contudo, para o  $C_4$  o algoritmo não demonstrou bom desempenho. De forma geral, esse mau comportamento pode ser explicado pela maior complexidade da função *makespan*, e ainda no caso do  $C_4$ , por apresentar uma disponibilidade de recurso (mão-de-obra e máquina) mais reduzida. Na Figura 3 é possível observar que o SA não foi muito aderente ao resultado do PLI. Conquanto, seus resultados dão suporte para boas tomadas de decisões.

No presente estudo, o desvio do SA em relação ao PLI não foi tão baixo como o apresentado no trabalho de Cruz (2015). Logo, foi possível verificar que o SA se mostrou mais eficiente para o  $C_3$ , pois em poucos segundos, ele foi capaz de gerar uma boa solução, apresentando um desvio de 7%. Contudo, para o  $C_4$  o algoritmo não demonstrou bom desempenho. De forma geral, esse mau comportamento pode ser explicado pela maior complexidade da função *makespan*, e ainda no caso do  $C_4$ , por apresentar uma disponibilidade de recurso

(mão-de-obra e máquina) mais reduzida. Na Figura 3 é possível observar que o SA não foi muito aderente ao resultado do PLI. Conquanto, seus resultados dão suporte para boas tomadas de decisões.

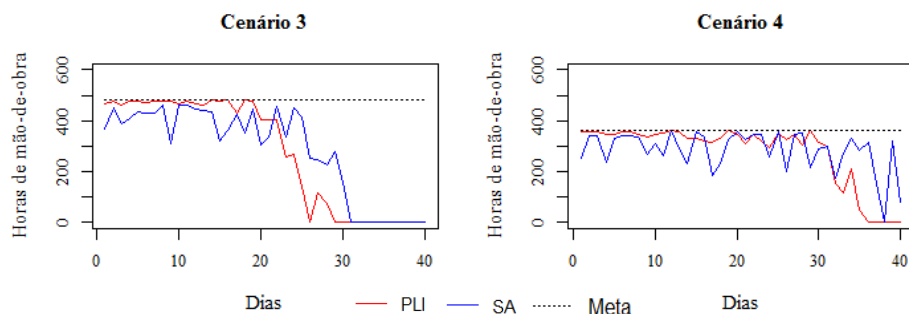


Figura 3 Análise comparativa entre os métodos de resolução dos Cenários 3 e 4

Realizando uma abordagem comparativa entre os cenários das funções custo e *makespan*, percebeu-se que a primeira habilitou em suas respostas somente as equipes mais baratas. Como essas equipes apresentavam menor rendimento, o projeto necessitou utilizar os 40 dias. Em contrapartida, para atender o objetivo da função *makespan*, o modelo não se privou em selecionar equipes de maiores rendimentos (mais caras). Esse feito pode ser observado no resultado orçamentário dos projetos. A comparação dos resultados via PLI entre  $C_1$  e  $C_3$  mostrou que a antecipação em 12 dias acarretou um acréscimo em R\$6.553,04 no projeto. Já nos cenários  $C_2$  e  $C_4$ , a antecipação de apenas cinco dias resultou em um acréscimo de R\$ 5.360,91.

Considerando os resultados obtidos via SA nestes mesmos cenários, verificou-se que a antecipação de 10 dias no  $C_3$  em relação ao  $C_1$ , produziu um acréscimo de R\$ 3.347,89 no custo total do projeto. Como o  $C_4$  não conseguiu antecipar a finalização do projeto, seu custo foi relativamente próximo ao  $C_2$ . No entanto, nota-se que este apresentou um acréscimo de R\$ 545,42, pois este modelo selecionou em alguns momentos do HP com equipes de maiores rendimentos (Figura 4).

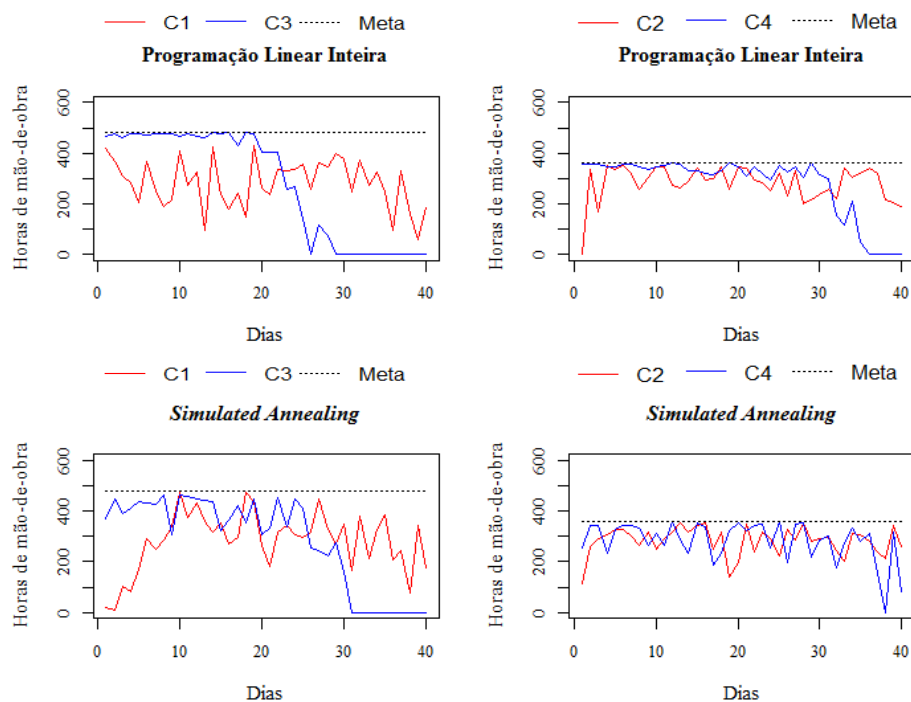


Figura 4 Análise comparativa entre as funções custo (Cenários 1 e 2) e *makespan* (Cenários 3 e 4) via PLI

Abordando a redução do uso da mão-de-obra, os cenários 5 e 6 processados via PLI também não garantiram a resposta ótima. A metaheurística SA, por sua vez, mostrou-se mais uma vez muito eficiente, necessitando de apenas 16 segundos para alcançar boas soluções e com um desvio médio de 2,5%. Estes cenários procuraram utilizar o mínimo do recurso mão-de-obra ao longo dos dias. O modelo encontrou o valor máximo, ou seja, um pico de mão-de-obra em um dia. A partir deste pico, os dias restantes do HP apresentaram um uso inferior deste recurso. Estes cenários proporcionaram uma equalização do uso da mão-de-obra, como pode ser visualizado na Figura 5.

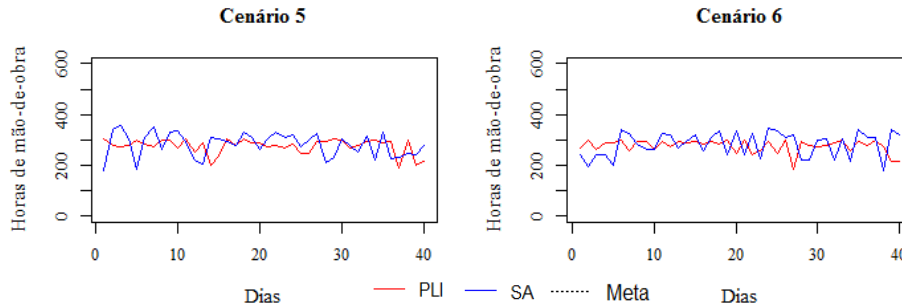


Figura 5 Análise comparativa entre os métodos de resolução dos Cenários 5 e 6

Conforme esperado, o uso total de horas de mão-de-obra para os cenários supracitados foi inferior aos dos Cenários 1 e 2, porém, próximos aos Cenários 3 e 4. Apesar de iguais, os contextos desses resultados são totalmente diferentes. Essa afirmação pode ser melhor interpretada pela observação da Figura 6.

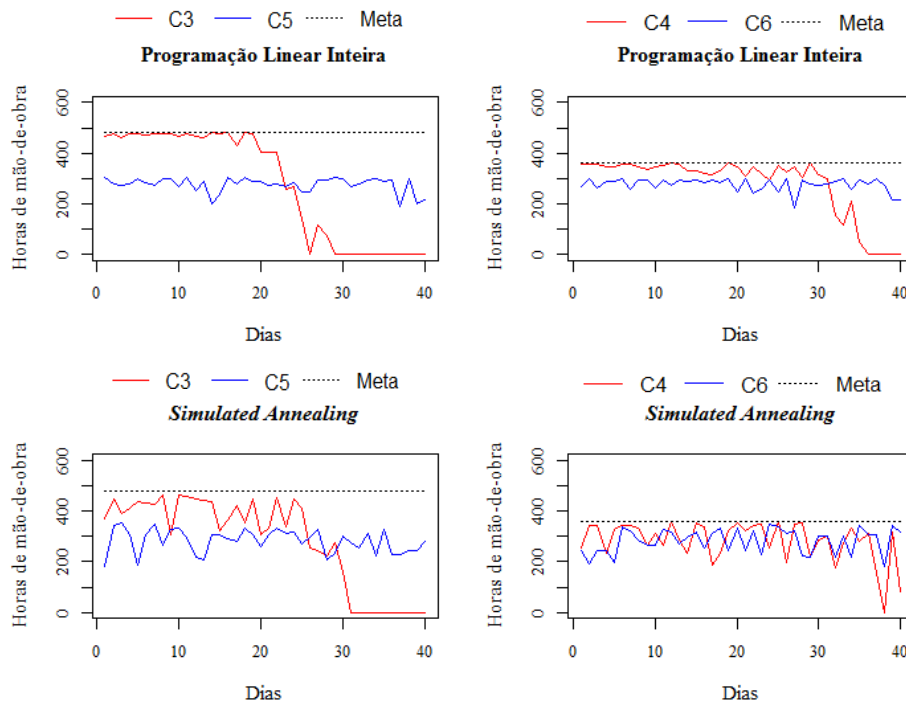


Figura 6 Análise comparativa entre as funções minimizar *makespan* e mão-de-obra via PLI e SA



Analisando o comportamento gráfico, observou-se que o modelo de *makespan* visou antecipar o projeto, naturalmente, o uso do recurso horas de mão-de-obra foi menor em termos totais. No entanto, percebeu-se que para antecipar, foi necessário habilitar mais equipes nos primeiros dias, chegando muitas vezes a atingir as metas de 480 e 360 horas disponibilizadas. Nesse sentido, para o modelo de *makespan*, ocorreu uma concentração de mão-de-obra inicial e posteriormente uma brusca redução. Em contrapartida, os cenários da minimização da mão-de-obra procuraram utilizar o mínimo deste recurso diariamente, tornando o processo mais equilibrado.

Os Cenários 5 e 6 reduziram a grande oscilação no uso do recurso mão-de-obra encontrada nos Cenários 1 e 2. No entanto, para sua aplicação, seria necessário um investimento de no mínimo R\$162.345,73 ( $C_6$  - PLI), ou seja, R\$ de 5.155,08 a mais em relação aos cenários 1 e 2.

Reduzir o custo é a principal meta de uma empresa. No entanto, é interessante que o resultado da demanda pelo recurso mão-de-obra seja equilibrado. É inviável para uma empresa, por exemplo, em um dia, necessitar da mão-de-obra de 150 colaboradores e no dia seguinte não ter mão-de-obra ou necessitar de apenas 10 funcionários. Neste sentido, os Cenários 7 e 8 vieram com a propósito de reduzir a oscilação do uso do recurso mão-de-obra, sem deixar de garantir a redução do custo da empresa.

Os  $C_7$  e  $C_8$  também não apresentaram solução ótima via programação linear inteira. Além disso, 24 horas de processamento não foram suficientes para encontrar alguma solução factível. O  $C_7$ , por exemplo, necessitou de 1.616.507 segundos, o que equivale a 19 dias de processamento e o  $C_8$  cinco dias. Dessa maneira, reitera-se a suma importância no uso de uma metaheurística para solucionar problemas de otimização dessa natureza, pois no dia-a-dia de uma empresa é totalmente inviável um período de processamento de semanas ou até mesmo dias.

O desvio imposto na restrição de mão-de-obra dos  $C_7$  e  $C_8$  permitiu o estabelecimento de uma demanda máxima e mínima com relação ao uso deste recurso. Os valores de desvios obtidos para ambos os cenários foram de 0,8 e 1,2, ou seja, o modelo permitiu variar 20% (para cima e para baixo) sobre uma média diária de 300 horas de mão-de-obra.

O resultado do  $C_7$  foi extremamente interessante, apesar do longo período de processamento. Além de proporcionar o equilíbrio da mão-de-obra durante o HP, este cenário apresentou um orçamento no valor de R\$ 157.835,35, ou seja, com um custo superior de apenas R\$ 644,70 em relação aos  $C_1$  e  $C_2$ , que visaram minimizar o custo. Já o  $C_8$  não proporcionou um custo tão reduzido, contudo, equalizou o uso da mão-de-obra.

A metaheurística aplicada nos  $C_7$  e  $C_8$  apresentou excelentes resultados. As soluções, em média, foram obtidas em apenas 16,5 segundos e apresentaram um uso equilibrado do recurso horas mão-de-obra. Além disso, os valores de seus custos distanciaram em 3,46 % e 2,17 % com relação aos custos obtidos pela programação via PLI, para estes cenários respectivamente. Contudo, uma falha ocorreu na aplicação da SA, uma vez que o resultado do uso da mão-de-obra infringiu os limites impostos ao problema. Apesar de o resultado poder ser caracterizado como inviável ao problema proposto, ele mostra-se aplicável, pois a infração ocorrida foi pequena e sua resposta foi muito interessante no aspecto de redução da oscilação de mão-de-obra (Figura 7).

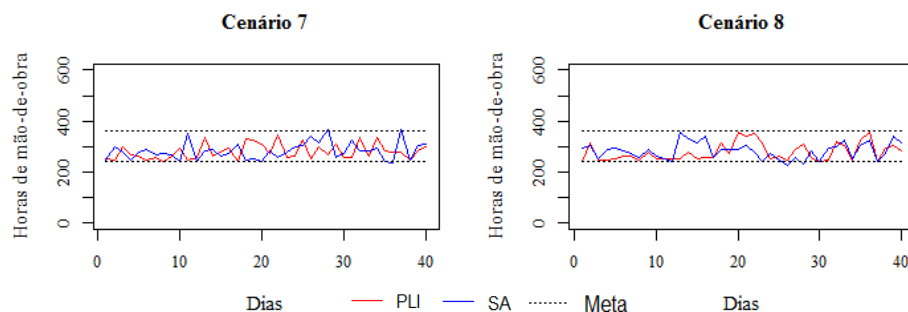


Figura 7 Análise comparativa entre os métodos de resolução dos Cenários 7 e 8

Tanto os  $C_5$  e  $C_6$  como o  $C_7$  e  $C_8$  proporcionaram a equalização da mão-de-obra. Contudo, nota-se que os  $C_5$  e  $C_6$  apresentaram uma maior amplitude quanto ao uso da mão-de-obra, bem como um custo de projeto superior quando comparado com os  $C_7$  e  $C_8$ , Figura 8. Nesse sentido, os últimos cenários propostos foram eficientes para solucionar duas demandas diferenciadas em uma empresa, custo e mão-de-obra.

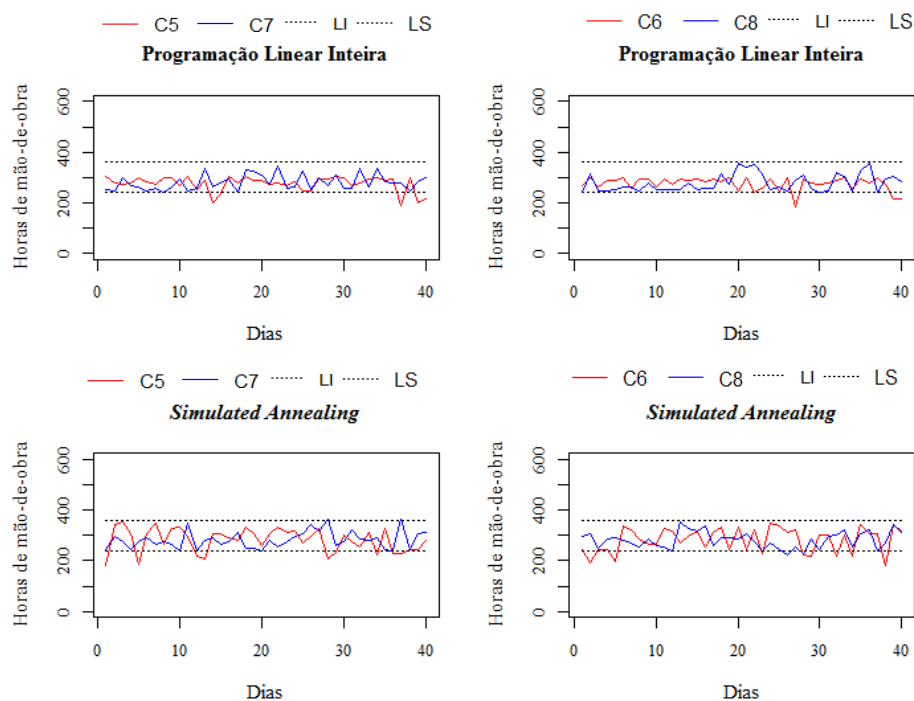


Figura 8 Análise comparativa entre os Cenários 5 e 7 e os Cenários 6 e 8 via PLI e SA

## 4 DISCUSSÃO

De forma geral, a metaheurística *Simulated Annealing* se mostrou muito eficiente em todos os modelos estudados. Sabe-se que a avaliação do tempo de processamento confere uma das principais medidas de referência para determinar o nível do esforço computacional, sendo que quanto maior o tempo

consumido, menor será a eficiência geral do método (VIANA, 2010). No presente trabalho, a média geral do tempo de processamento via PLI foi de 326.869 segundos contra aproximadamente 25 segundos do SA. Esse resultado retrata a grande eficiência no uso da metaheurística SA para solucionar o PSSRME. A eficiência dessa heurística também foi presenciada nos trabalhos de Borges, Eid e Bergseng (2014), Gomide (2013), Gomide, Arce e Silva (2013), Öhman e Eriksson (2002), Viana (2010), que apresentaram soluções próximas à solução ótima e com reduzidos tempos de processamento.

Todos os cenários processados via SA apresentaram valores de desvios entre 0 e 14% com relação às respostas obtidas via PLI. Estes valores percentuais exprimem uma boa avaliação com relação aos resultados heurísticos encontrados nos trabalhos de Borges, Eid e Bergseng (2014), Gomide (2013), Gomide, Arce e Silva (2013), Gomide et al. (2014), Öhman e Eriksson (2002).

Apesar de os  $C_3$  e  $C_4$  terem apresentado os maiores percentuais de desvios, a diferença foi muito pequena entre as respostas quanto à antecipação dos projetos em valores absolutos pelos dois métodos de resolução. Assim, a aplicação da metaheurística nesses cenários mostrou-se muito eficiente, justificando o seu uso.

A antecipação de atividades ocorre, em geral, devido a situações futuras não esperadas. No meio silvicultural, esse evento pode ocorrer em razão de questões ambientais; prazos finais de contratos de arrendamentos de terras; expansão de áreas produtivas ou até mesmo por questões operacionais. Nota-se que o orçamento se eleva ao acelerar o término das atividades, contudo, há situações em que se torna mais interessante investir na antecipação do que perder área produtiva arrendada pelo não cumprimento do prazo do contrato, por exemplo. Ou ainda, investir na antecipação, do que enfrentar uma geada futura e interferir na produção.

Os cenários de 5 a 8 priorizaram a redução da oscilação do uso da mão-de-obra das empresas. Notou-se que os últimos cenários foram os mais interessantes, pois apresentaram baixos custos e uma menor oscilação do uso do recurso. Apesar de os  $C_7$  e  $C_8$  não terem apresentado soluções viáveis via SA, estes se mostram como os mais importantes a serem comentados com relação ao uso dessa metaheurística, pois, mesmo não obtendo soluções factíveis, as respostas foram oferecidas em um rápido tempo de processamento e muito próximas a uma resposta ideal. A restrição elaborada à demanda de mão-de-obra nestes cenários pode ter proporcionado uma elevação com relação ao número de possibilidades de respostas a serem testadas para o problema. Segundo Öhman e Eriksson (2002), quando o número de restrições se torna grande, o procedimento SA fica mais inclinado a ficar preso em ótimos locais. Portanto, a ocorrência desta situação poderia ser atribuída à dificuldade em resolver a penalidade dos problemas sem um esquema elaborado para ajustar os parâmetros da penalidade (BERTSEKAS, 1982).

Em suma, todos os resultados obtidos através da metaheurística tornaram-se muito desejáveis, uma vez que as empresas necessitam de respostas rápidas para a tomada de decisão, nos assuntos que envolvem recursos financeiros limitados para a execução da atividade (OLIVETO; HE; YAO, 2007). No caso da silvicultura, esta tendência é totalmente aplicável e por isso carece do emprego de métodos de otimização em seu planejamento, já que além de imobilizar um elevado recurso financeiro, o setor apresenta um alto grau de complexidade na designação das atividades e equipes na sua execução.

## 5 CONCLUSÕES

A metaheurística *Simulated Annealing* mostrou-se como um excelente método de resolução para o problema de sequenciamento das atividades silviculturais com restrições de recursos e múltiplos modos de execução (PSSRME). Os modelos apresentados podem ser utilizados como base para dar suporte à tomada de decisão operacional das atividades silviculturais. Contudo, não é possível estabelecer um único cenário como o ideal.

A escolha de um cenário modelo dependerá do objetivo de um gestor florestal. Caso o propósito seja a redução do custo, não há dúvidas de que o primeiro e o segundo cenário são os melhores. Mais especificamente o primeiro, pois a solução via metaheurística conseguiu atingir a resposta ótima. Todavia, para este problema em questão, o gestor deverá ter em mente que para executar o projeto de forma mais barata, ele não deverá se importar com a flutuação da mão-de-obra ao longo do HP.

Caso um gestor esteja disposto a adiantar o projeto, será necessário um maior investimento financeiro. O Cenário 3 mostrou-se o melhor, pois foi o que mais conseguiu antecipar o término de suas atividades. No entanto, um grande empecilho em se adotar este cenário reflete novamente no número de colaboradores, pois o mesmo oscilou durante o HP. Contudo, muitas vezes, por um motivo e outro, os gestores necessitam de finalização antes do planejado, dessa maneira, o  $C_3$  apresenta-se como o mais interessante.

Partindo do pressuposto de que um gestor precise manter um equilíbrio de funcionários diariamente, o  $C_8$ , no ponto de vista do SA, mostrou-se como o mais interessante, pois permitiu uma mão-de-obra equilibrada e com o menor custo quando comparado com os demais cenários de mesma linha de raciocínio.

Em linhas gerais, os modelos propostos atenderam às metas de planejamento testadas. Contudo, os resultados com relação à demanda de mão-

de-obra apresentaram oscilações que levam ao questionamento da aplicabilidade prática desses resultados, em função das dificuldades dos processos administrativos. No entanto, planejar as atividades silviculturais é uma tarefa árdua e provavelmente as decisões empíricas nem sempre são as melhores. Assim, a aplicação dos modelos elaborados no presente estudo pode oferecer um suporte técnico, direcionando as táticas de planejamento de um gestor florestal.

**Analysis of implementation of simulated annealing algorithm for problem  
PSSRME**

**ABSTRACT**

It is known that the Brazilian forestry has one of the largest production advantages, because of soil and climatic conditions favorable, advanced technology of detention and labor-skilled labor available. However, these aspects are not covered by the operational planning of forestry activities, which still shows up as an unexplored point. It is noticed that companies have adopted empirical efforts to the planning of forestry activities for lack of knowledge on automated tools. In this sense, the present study intended to contribute to the development of mathematical programming models contemplating the integer linear programming (ILP) as well as the simulated annealing technique (SA) as resolution methods the sequencing problem of forestry activities involving resource constraints and multiple modes of execution (PSSRME). The study area included a set of 32 plots, five forestry activities and a total of 11 field teams. The planning was carried out in a horizon of 40 days. All possible combinations of activities to be carried out by teams throughout the HP 4772 totaled variables decisions. Three objectives functions and nine restrictions were created. The functions tested designed to minimize the cost, makespan and use of hand labor in silvicultural project. Combinations of the developed functions and constraints generated enabled the establishment of different models, which were grouped into eight scenarios. All scenarios were processed via PLI and SA. The comparison between them was carried from the deviation calculation between the approximate results obtained to great. The Simulated Annealing was efficient to address the proposed scenarios. The  $C_1$  was the one which reached the optimal response by SA. In general, all scenarios show low values of deviations, ranging from 0 to 14% over the PLI. The  $C_3$  and  $C_4$  were which showed deviations greater than 10%, however, in absolute terms, the results were very satisfactory. Although the  $C_7$  and  $C_8$  have not provided workable solutions via metaheuristic, its result were close to an ideal response. In addition, they presented themselves as the most important to be discussed regarding the use of metaheuristic because their resolution by PLI proved was unfeasible. They could be classified as ideal scenarios  $C_2$  to minimize cost function;  $C_3$  to function minimize makespan and  $C_8$  to the use of hand-to-work balance.

Keywords: Metaheuristic. Forestry. Programming.



## 6 REFERÊNCIAS

ANTONANGELO, A.; BACHA, C. J. C. As fases da silvicultura no Brasil. **Revista Brasileira de Economia**, Rio de Janeiro, v. 52, n. 1, p. 207-238, 1998.

BASKENT, E. Z.; JORDAN, G. A. Forest landscape management modeling using simulated annealing. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 165, n. 1-3, p. 29-45, July 2002.

BERTSEKAS, D. P. **Constrained optimization and Lagrange multiplier methods**. New York: Academic Press, 1982. 410 p.

BODINGTON, E. C.; SHOBRYNS, D. E. **Planning, scheduling and control integration in the process industries**. New York: McGraw-Hill, 1995. 414 p.

BORGES, P.; EID, T.; BERGSENG, E. Applying simulated annealing using different methods for the neighborhood search in forest planning problems. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 233, n. 3, p. 700-710, Mar. 2014.

BORGESA, J. G.; HOGANSON, H. M. Structuring a landscape by forestland classification and harvest scheduling spatial constraints. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 130, n. 1-3, p. 269-275, May 2000.

CIRO, G. C. et al. A fuzzy ant colony optimization to solve an open shop scheduling problem with multi-skills resource constraints. In: IFAC SYMPOSIUM ON INFORMATION CONTROL PROBLEMS IN MANUFACTURING, 15., 2015, Ottawa. **Proceedings...** Ottawa: INCOM, 2015. p. 715-720.

CRUZ, B. R. **Regulação silvicultural das atividades operacionais na programação de projetos florestais via *Simulated Annealing***. 2015. 84 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

DOMINGOS, J. C. et al. Um sistema de apoio à decisão para scheduling em Job Shop, utilizando lógica fuzzy. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 28., 2008, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2008.

DONG, L. et al. A comparison of a neighborhood search technique for forest spatial harvest scheduling problems: a case study of the simulated annealing algorithm. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 356, p. 124-135, Nov. 2015.

DYKSTRA, D. P. **Mathematical programming for natural resource management**. New York: McGraw Hill Book, 1984. 318 p.

GOMIDE, L. R. Estratificação espacial de compartimentos via metaheurística simulated annealing em unidades de manejo florestal. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 45., 2013, Natal. **Anais...** Natal: SBPO, 2013. p. 642-651.

GOMIDE, L. R. et al. Automated selective thinning via multicriteria metaheuristic procedure. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 102, p. 299-306, 2014.

GOMIDE, L. R.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. Comparação entre a metaheurística *Simulated Annealing* e a programação linear inteira no agendamento da colheita florestal com restrição de adjacência. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 449-460, abr./jun. 2013.

GONZÁLEZ-OLABARRIA, J. R.; PUKKALA, T. Integrating fire risk considerations in landscape-level forest planning. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 261, n. 2, p. 278-287, Jan. 2011.

JORGENSEN, R. M.; THOMSEN, H.; VIDAL, R. V. V. The afforestation problem: a heuristic method based on simulated annealing. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 56, n. 2, p. 184-191, Jan. 1992.

KIM, Y.-H.; BETTINGER, P.; FINNEY, M. Spatial optimization of the pattern of fuel management activities and subsequent effects on simulated wildfires. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 197, n. 1, p. 253-265, Aug. 2009.

KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by simulated annealing. **Science**, New York, v. 220, n. 4598, p. 671-680, May 1983.

KRETER, S.; RIECK, J.; ZIMMERMANN, J. Models and solution procedures for the resource-constrained project scheduling problem with general temporal constraints and calendars. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 251, n. 1, p. 387-403, June 2015.

LEITE, N. B. A silvicultura e as boas novidades. **Painel Florestal**, Botucatu, jul. 2015. Disponível em: <<http://www.painelflorestal.com.br/blogs/nelson-barboza-leite/a-silvicultura-e-as-boas-novidades>>. 2015. Acesso em: 15 jan. 2016.

MOURA, A. L. de M. **Planejamento anual otimizado de atividades silviculturais com restrição de recursos e múltiplos modos de execução**. 2013. 115 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

OLIVETO, P. S.; HE, J.; YAO, X. Time complexity of evolutionary algorithms for combinatorial optimization: a decade of results. **International Journal of Automation and Computing**, Oxford, v. 4, n. 3, p. 281-293, July 2007.

ÖHMAN, K.; ERIKSSON, L. O. Allowing for spatial consideration in long-term forest planning by linking linear programming with simulated annealing. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 161, n. 1-3, p. 221-230, May 2002.

RODRIGUES, F. L. et al. Metaheurística *simulated annealing* para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. **Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 233-245, mar./abr. 2004.

VANCROONENBURG, W.; SMET, P.; BERGHE, G. V. A two-phase heuristic approach to multi-day surgical case scheduling considering generalized resource constraints. **Operations Research for Health Care**, Amsterdam, v. 7, p. 27-39, Dec. 2015.

VIANA, C. J. **Aplicação do método *simulated annealing* em um problema real de sequenciamento da produção**. 2010. 128 p. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

VILLAGRAN, A.; LEGUIZAMÓN, G.; ALBA, E. Active components of metaheuristics in cellular genetic algorithms. **Software Computer**, Oxford, Amsterdam, v. 19, p. 1295-1309, May 2015.

YAMAMOTO, L.; ARRUDA, L. V. R.; LIBERT, N. Estudo comparativo de várias metaheurísticas aplicadas ao seqüenciamento de bateladas em redes dutoviárias. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 39., 2007, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SBPO, 2007.