

JÔNATAN HENRIQUE FERREIRA

**COMBINAÇÃO DE HEURÍSTICAS PARA O
SEQUENCIAMENTO DE PROJETOS MEDIANTE
INCERTEZA COM RESTRIÇÃO DE RECURSOS**

JOÃO MONLEVADE

2015

JÔNATAN HENRIQUE FERREIRA

**COMBINAÇÃO DE HEURÍSTICAS PARA O
SEQUENCIAMENTO E DE PROJETOS MEDIANTE
INCERTEZA COM RESTRIÇÃO DE RECURSOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção de Grau em Engenharia de Produção.

Orientador(a): Profa. Dra. Mônica do Amaral
Coorientador(a): Prof. Dr. Thiago Augusto de Oliveira Silva

JOÃO MONLEVADE

2015

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F383c Ferreira, Jonatan Henrique.
Combinação de heurísticas para o sequenciamento de projetos
mediante incerteza com restrição de recursos. [manuscrito] / Jonatan
Henrique Ferreira. - 2015.
37 f.

Orientadora: Profa. Dra. Mônica do Amaral.
Coorientador: Prof. Dr. Thiago Augusto de Oliveira Silva.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia de
Produção .

1. Administração de projetos. 2. GRASP (Sistema operacional de
computador). 3. Pesquisa operacional. 4. Programação heurística. 5.
Programação (Matemática). I. Amaral, Mônica do. II. Silva, Thiago
Augusto de Oliveira. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 519.8

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - ICEA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Jônatan Henrique Ferreira

Combinação de heurísticas para o sequenciamento de projetos mediante incerteza com restrição de recursos

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção

Aprovada em 23 de Junho de 2015.

Membros da banca

Dra. Mônica do Amaral - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Thiago Augusto de Oliveira Silva - Coorientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Alexandre Xavier Martins - Universidade Federal de Ouro Preto
MSc. Gabriela Braga Fonseca - Universidade Federal de Ouro Preto

Mônica do Amaral, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 25/08/2022.



Documento assinado eletronicamente por **Monica do Amaral, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/08/2022, às 22:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0388340** e o código CRC **FAEE834E**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.011806/2022-34

SEI nº 0388340

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: (31)3808-0817 - www.ufop.br

É impossível se conquistar algo sozinho. Diretamente ou indiretamente, nossas conquistas foram e são influenciadas por uma ou diversas pessoas. Assim, tenho o privilégio de agradecer quem certamente tem parte nessa conquista. À Deus, por ter me ajudado até aqui. Aos meus pais e irmãos pelo apoio constante. Aos professores Mônica do Amaral e Thiago Silva pelos anos de ensinamento e pela oportunidade de compartilhar de seus conhecimentos. Ao professor Alexandre Xavier pelo ensinamento nessa área. Aos professores do DEENP – UFOP pelo ensino de qualidade. Aos ex-alunos e alunos da república O CAOS pelo apoio emocional e diversos momentos de descontração.

Dedico a vocês essa vitória!

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	4
1.1	OBJETIVOS.....	5
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
1.3	JUSTIFICATIVA	6
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	7
2	REVISÃO DE LITERATURA	7
2.1	SEQUENCIAMENTO DE PROJETOS.....	7
2.2	OTIMIZAÇÃO BASEADA EM SIMULAÇÃO	8
2.3	GRASP.....	9
2.4	VND.....	10
2.5	ÍNDICES DE CRITICIDADE E CRUCIALIDADE	10
2.6	PATH-RELINKING	11
3	MÉTODO DE PESQUISA.....	13
4	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	13
4.1	ALGORITMO DESENVOLVIDO	17
5	RESULTADOS COMPUTACIONAIS	19
5.1	TESTES COM A INSTÂNCIA REAL	20
5.2	TESTES COM INSTÂNCIAS GERADAS ALEATORIAMENTE.....	28
6	CONCLUSÃO.....	31
	Referências Bibliográficas.....	32

RESUMO

Na gestão de projetos o tempo de desenvolvimento é um dos fatores mais importantes e que influenciam o sucesso de um projeto. As incertezas em um projeto, como a variação da duração das atividades e disponibilidade de recursos, vêm sendo desconsiderada em estudos deste tipo. Seguindo este contexto, o foco deste trabalho é o desenvolvimento de algoritmos de gestão de projetos mediante a incerteza no tempo de desenvolvimento. Neste trabalho desenvolvemos um algoritmo heurístico que considera o índice de criticidade das atividades, interpretado como a probabilidade da atividade pertencer ao caminho crítico, e a combinação dos índices de criticidade e crucialidade, sendo essa a correlação entre a duração da atividade e a duração total do projeto, podendo serem estimadas via simulação de Monte Carlo, utilizando o método GRASP para construção de uma solução inicial, o Path-relinking e o VND para refinamento da mesma.

Palavras-chaves: Gestão de projetos; sequenciamento; criticidade; crucialidade; VND.

ABSTRACT

In project management, development time is one of the most important factors that influence the success of a project. Uncertainties in a project, such as the variation in the duration of activities and availability of resources, have been disregarded in studies of this type. Following this context, the focus of this work is the development of project management algorithms through the uncertainty in the development time. In this work we developed a heuristic algorithm that considers the activity criticality index, interpreted as the probability of the activity belonging to the critical path, and the combination of the criticality and cruciality indices, which is the correlation between the activity duration and the total duration of the activity. project, and can be estimated via Monte Carlo simulation, using the GRASP method to build an initial solution, Path-relinking and VND for its refinement.

Keywords: Project management; sequencing; criticality; cruciality; VND

1 INTRODUÇÃO

Sabemos que o tempo de cada atividade é um dos fatores mais importantes e que mais influencia os projetos, processos ou tarefas. Alcançar os objetivos propostos de uma maneira eficiente e eficaz é o trabalho principal da gestão de projetos. Partindo desse pressuposto, a qualidade do sequenciamento de atividades afeta diretamente o projeto como um todo, visto que tais atividades utilizam um número específico de recursos, e esses recursos são limitados e possuem uma duração específica; assim, o Problema de Sequenciamento de Projeto com Restrição de Recursos, o RCPSP (*Resource Constrained Project Scheduling Problem*) surge, e ele consiste em sequenciar tais atividades de uma maneira eficiente. Solucioná-lo torna-se um apoio à tomada de decisão, e tem-se como objetivo a redução do tempo total do projeto, utilizando de maneira mais eficiente os recursos, diminuindo a ociosidade e/ou o desperdício dos mesmos.

Na prática de gestão de projetos, os parâmetros de um projeto, como a duração das atividades e a disponibilidade de recursos, raramente são precisamente conhecidos, e geralmente sujeitos a erros de estimativa (ARTIGUES; LEUS, NOBIBON, 2013).

Esta incerteza pode se originar a partir de muitas fontes potenciais. Como algumas das causas mais frequentes, podemos citar atividades que levam mais ou menos tempo do que o inicialmente estimado, quebra de máquinas, materiais que chegam atrasados, o absenteísmo dos trabalhadores e os atrasos devido ao mau tempo (ARTIGUES; LEUS, NOBIBON, 2013). Assim, entender a dinâmica das possíveis variações dos parâmetros que decorrem durante o projeto e alinhá-los a sua resolução do problema vem a ser mais viável que preestabelecer um valor determinístico para eles.

Herroelen (2005) ressalta que a maioria das pesquisas na programação de projetos assume informações completas sobre o problema de programação a ser resolvido, e assumem um ambiente determinístico estático. Basicamente, as pesquisas têm como objetivo a geração de uma sequência de atividades viáveis que “satisfaça” ou otimize as funções objetivo simples ou múltiplas. A literatura sobre a programação de projetos sob risco e incerteza é bastante escassa (HERROELEN, 2005).

Neste trabalho de conclusão de curso, foi tratado o problema de programação de projetos levando em conta a natureza estocástica dos eventos relacionados a esses recursos. Comparações dos resultados desse algoritmo desenvolvido com outros já desenvolvidos poderão ser feitas, mesmo que este sendo determinístico.

Este trabalho utilizou simulação de Monte Carlo para avaliação de possíveis soluções apresentadas para o problema. A simulação de Monte Carlo utiliza o histórico estatístico de dados das atividades e recursos para comparar com as soluções iniciais com as do algoritmo criado. A comparação permite dar continuação a heurística, que segue com buscas locais, objetivando-se o refinamento da solução.

O objetivo desse trabalho é desenvolver e propor um algoritmo generalista para resolução de problemas de programação de projetos. Assim, utilizou-se dados reais para a avaliação do algoritmo, que é alimentado por esses dados de gestão de projetos em obras de construção civil. Deste modo, saberemos quão aplicável é a ferramenta para situações reais e como ela irá se comportar.

Uma abordagem consiste em estender o conceito convencional de caminho crítico para a rede estocástica, utilizando a probabilidade de uma determinada atividade encontra-se em um caminho crítico (BOWERS, 1996). Uma alternativa à criticidade é o conceito de crucialidade das atividades. A crucialidade é definida como a correlação entre a duração da atividade e a duração total do projeto (BOWERS, 1995) e pode ser estimada via simulação de Monte Carlo.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é a resolução do problema de gestão de projetos mediante a incerteza, com um desenvolvimento de uma heurística que, combinando métodos de geração, simulação e refinamento de solução, viesse a ser o mais generalista possível. Para isso, instâncias reais foram usadas no trabalho, objetivando uma análise da aplicabilidade da ferramenta mais próxima da realidade, relacionando os indicadores de criticidade e a combinação de criticidade e crucialidade das atividades.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver e propor um algoritmo heurístico generalista capaz de combinar os indicadores de criticidade e crucialidade das atividades para gerar uma solução para o RCPS em um tempo computacional compatível com o horizonte de tempo de tomada de decisão
- Aplicar os algoritmos desenvolvidos em uma instância de um problema real, objetivando uma análise da aplicabilidade das técnicas.

1.3 JUSTIFICATIVA

Desde sempre, planejar é um diferencial para o bom desempenho pessoal, de uma cadeia produtiva, de um projeto, de uma linha de produção etc. Basta se ter um objetivo final predefinido e o conhecimento das etapas da atividade, onde é analisado e fixado quais delas precisam acontecer em sequência, para que se esteja de frente com um problema de gestão de projeto, onde existe “ n ” possibilidades de sequências, e o que se procura é a resposta para executar o projeto de maneira mais eficiente possível. No decorrer dos dias, a excelência operacional torna-se mais importante para se manter e almejar estar estrategicamente posicionado no mercado. E por muitas vezes sabemos que, o que faz um empreendimento ser próspero e competitivo não é o quão grande ele é e sim o quão rápido é a tomada de decisões e execução de suas tarefas com eficiência de tempo e recursos.

O uso da tecnologia é essencial para todos os mercados, a sua inovação gera um diferencial competitivo, potencializando ainda mais em mercados de alta tecnologia. Nessa conjuntura, este trabalho se justifica pela grande dificuldade de sequenciar atividades de maneira eficiente, devido ao grau de complexidade do problema, que pode ser vista claramente nas etapas de um projeto de construção civil. Deste modo, o trabalho foi aplicado no sequenciamento das atividades de um projeto de construção civil. Na área da construção civil, a necessidade de um planejamento é ainda mais intrínseca do seu negócio, visto que esta vive de projetos. Projetos que, possuem inúmeras variáveis, um grau de complexidade altíssimo e compartilhamento de recursos que são escassos, e que fazem esse planejamento ser constituído

de incertezas do início ao fim do projeto. Com a gerência correta dos projetos é possível executá-los em um menor espaço de tempo e utilizando eficientemente os recursos, assim, dando um ganho estratégico, operacional e financeiro para o empreendimento, que terá ganhos de produtividade.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em 5 capítulos além da introdução. O capítulo 2 faz uma breve revisão de literatura falando da importância de um bom gerenciamento de projetos e técnicas como PERT e CPM além dos algoritmos utilizados como o Grasp e VND, Path-linking e os indicadores de criticidade e crucialidade utilizados para construir a solução do problema. O capítulo 3 refere-se ao tipo de pesquisa utilizada. O capítulo 4 engloba o problema para os casos determinístico e estocástico e os algoritmos propostos para construir a solução inicial para o problema assim como a busca por uma melhor solução. O capítulo 5 mostra os resultados dos algoritmos construídos (tempo de execução do programa e soluções encontradas) e uma aplicação em uma instância real. No capítulo 6 estão as referências bibliográficas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Esse capítulo irá apresentar uma breve revisão de literatura com alguns conceitos de gerenciamento e sequenciamento de projetos e dos algoritmos que foram utilizados neste trabalho.

2.1 SEQUENCIAMENTO DE PROJETOS

O Problema da Sequenciamento de Projetos com Restrição de Recursos (RCPSp) consiste em minimizar a duração de projetos sujeito à precedentes e restrições de recursos. O RCPSp é usado para resolver problemas determinísticos e estocásticos, sendo que sua versão determinística utiliza de uma forma íntegra todas as informações de recursos e duração de atividades e assim monta uma programação, ou solução viável, que mostra o tempo de se iniciar

cada atividade, visando minimizar o tempo de execução do projeto (BRUNI et al, 2011) e extensões do RCPSP, envolvendo a minimização do tempo de execução esperado de um projeto com durações das atividades estocástica, foram investigados na literatura de programação de projetos estocásticos.

A qualidade do gerenciamento de projetos pressupõe que as atividades não serão executadas como previstas. Desta maneira, é essencial criar um modelo que assuma as incertezas das atividades para que se melhore todo o gerenciamento que será realizado em conjunto com técnicas de otimização.

Assegurar que a sua evolução irá atingir o maior retorno possível é a meta da gestão de projetos. Esse empenho é voltado a minimizar custos, reduzir gasto de tempo, maximizar a produtividade dos recursos etc.

Um projeto consiste em uma série de eventos e atividades que devem ser realizadas de acordo com um conjunto de restrições de precedência. Cada evento refere-se a uma fase de realização de uma determinada atividade (em geral o seu tempo de início ou o seu tempo final). Todas as atividades (exceto aquelas fictícias) têm uma duração e geralmente exigem recursos para a sua execução (BIANCO, 2013).

É comum que se represente esse tipo de problema utilizando redes. A rede do projeto é um grafo $G = (N, A)$ consiste em um conjunto N de nodos e um conjunto de arcos A . Há duas possíveis representações de um projeto por meio de um gráfico G . Uma é por arcos (*Activity-On-Arc* - AOA), que utiliza o conjunto de arcos A para representar as atividades e o conjunto de nós N para representar a eventos; o outro é a representação (*Activity-On-Node* - AON), que utiliza o conjunto de nós N para designar as atividades e o conjunto de arcos para representar as relações de precedência, ou seja, um arco (i, j) em A significa que a atividade i constringe ou é limitado pela atividade j (BIANCO, 2013).

2.2 OTIMIZAÇÃO BASEADA EM SIMULAÇÃO

Simulação é um processo que visa modelar um sistema por meio de um método numérico que visa fazer dedução de tal sistema, que através desse método pode-se analisar e

avaliar seu procedimento, podendo-se ter melhor visão dos acontecimentos, chegando a ter um ganho precedente de tomada de decisão.

Segundo FU (2002), até o final do último milênio, otimização e simulação foram mantidos praticamente separadas, na prática, mesmo que houvesse um grande corpo de literatura de pesquisas relevantes para combiná-los. Na última década, no entanto, "otimização" de rotinas têm seus métodos trabalhados de forma proeminente em pacotes de simulação.

O objetivo dessas rotinas é buscar melhores ajustes de parâmetros do sistema selecionado pelo usuário em relação a(s) medida(s) de desempenho de interesse, mas contrário ao uso dos pacotes de software de programação matemáticas, o usuário não tem nenhuma maneira de saber se um ponto ótimo foi realmente atingido.

Visto que FU(2002) alerta sobre a dificuldade de se relacionar a simulação de eventos discretos à otimização de sistemas, pois ela avalia as soluções geradas, tem-se a dificuldade de se encontrar modelos de simulação generalistas, pois cada problema exige um estudo específico de modelagem.

Em contra partida, FU(2002) também nos mostra que é totalmente viável utilizar os resultados gerados pela simulação para se encontrar uma solução que tenha maior qualidade e utilizá-la também para procurar diminuir a variância das simulações.

2.3 GRASP

O GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) é um algoritmo utilizado para resolver problemas de otimização combinatória. Ele é um método construtivo onde se cria uma solução inicial e em seguida se aplica uma busca local objetivando se refinar essa solução. Como seu próprio nome já diz: (*Greedy*) gulosa e (*Randomized*) aleatória, ela se baseia na aleatoriedade para se construir a solução inicial, montando de forma randômica uma solução, que já obedece às restrições de atividades.

O GRASP não necessariamente retorna um ótimo local, por isso a busca local é essencial para melhoria da solução.

O critério de parada é predefinido, o mais comum a se utilizar é o por quantidade de interações. Porém, critérios como: quantidade de interações sem melhora da melhor solução encontrada ou uma solução específica também são utilizados.

Neste trabalho, propusemos a utilização, na fase construtiva do GRASP, índices de criticidade e crucialidade das atividades como critério guloso.

2.4 VND

O VND (*Variable Neighborhood Descent*) é um procedimento de refinamento de solução que, diferentemente de uma busca local comum, utiliza várias estruturas de vizinhança para melhoria de determinada solução, que ajuda a buscar soluções em novas vizinhanças, saindo de um possível ótimo local. Foi proposto por Nenad Mladenovic & Pierre Hansen em 1997. Nesse método as vizinhanças são exploradas sequencialmente e em cada uma delas procura-se o melhor vizinho. Quando o vizinho não melhorar a solução corrente o método passa para a próxima vizinhança. Em caso de melhora retorna-se novamente à primeira vizinhança da sequência. O critério de parada é quando não houver melhora em nenhuma das vizinhanças.

2.5 ÍNDICES DE CRITICIDADE E CRUCIALIDADE

Em uma rede de atividades determinísticas, cada atividade possui a sua duração, e uma sequência de atividades determinam a duração do projeto, essas atividades são chamadas de atividades críticas.

O conceito de caminho crítico foi, no entanto, aprimorado para considerar as restrições de recursos (BOWERS, 1995) quanto à incerteza do tempo de desenvolvimento (BOWERS, 1996) gerando o conceito de criticidade das tarefas.

Se tratando de uma rede estocástica, onde a duração das atividades é baseada na incerteza, a criticidade é a probabilidade de uma atividade ser uma atividade crítica ou pertencer ao caminho crítico.

Uma alternativa à criticidade é o conceito de crucialidade das atividades. A crucialidade é definida como a correlação entre a duração da atividade e a duração total do projeto e pode ser estimada via simulação de Monte Carlo.

Não existe uma forte correlação entre a crucialidade e criticidade das atividades. Além disto, o índice de crucialidade não é capaz de captar a importância de uma atividade com duração determinística, mesmo que esta pertença ao caminho crítico com probabilidade 1 (BOWERS, 1996). Como destacado por WILLIAMS (1999), o uso de nenhum dos índices de maneira isolada é suficiente e, por isso, devem ser utilizados em conjunto.

Os conceitos de criticidade e crucialidade das atividades foram utilizados como critérios de decisão em uma heurística construtiva proposta por RABBANI et al. (2007). Os indicadores foram estimados previamente considerando apenas as relações de precedência e em seguida foram utilizados como critério de decisão na construção de uma solução viável do ponto de vista de recursos.

2.6 PATH-RELINKING

O Path Relinking(*PR*) foi introduzido primeiramente por GLOVER (1996) e GLOVER et al. (1997). O princípio do PR é criar uma combinação entre soluções, assim se gera novas soluções.

Na Busca Tabu (GLOVER, 1996) cria soluções baseadas em 4 critérios: frequência, qualidade, influência e quão recente os “caminhos” aparecem, que eles chamaram de Estruturas de memória, e formam trajetórias, ou soluções intermediárias, onde se começa por uma solução inicial em direção a uma solução guia, como vemos, em contrapartida de outros métodos, ele opera com soluções ao invés de uma única solução. Em outras palavras, o PR foi inicialmente utilizado para identificar elementos que são frequentes em boas soluções.

LAGUNA (1999) mostra que, a abordagem pode ser vista como uma extrema (altamente focalizada) instância de uma estratégia que busca incorporar atributos de soluções de alta qualidade, através da criação de induções para favorecer esses atributos nos movimentos selecionados. No entanto, em vez de usar um incentivo que apenas estimula a inclusão de tais

atributos, a abordagem PR subordina todas as outras considerações para o objetivo de escolher movimentos que introduzem os atributos das soluções guia, a fim de criar uma "boa composição de atributo" na solução atual. A composição em cada passo é determinada pela escolha do melhor caminho, utilizando critérios de escolha habituais, a partir do conjunto restrito de movimentos que incorporam um número máximo (ou um valor máximo ponderado) dos atributos das soluções guia.

Diversas estratégias de combinação vêm sendo implementados recentemente ao Path-Relinking. RESENDE (2005) mostram essas estratégias:

- **ForwardRelinking:** o Path-relinking é aplicado usando a pior solução entre x_s (solução inicial) e x_t (solução guia) como solução inicial e a melhor solução como guia;
- **Backward Relinking:** o Path-relinking é aplicado usando a melhor solução entre x_s e x_t como solução inicial e a pior como a solução guia;
- **Back and Forward Relinking:** duas trajetórias são exploradas, primeiro usando o x_s como solução inicial e depois usando o x_t como solução inicial. A desvantagem é o aumento do tempo computacional.
- **Mixed Relinking:** dois caminhos são explorados simultaneamente: o primeiro proveniente de x_s e o segundo de x_t , até que eles se encontram em uma solução intermediária equidistante de x_s e de x_t ;
- **Greedy Randomized Adaptive Relinking:** no lugar de selecionar o melhor movimento ainda não selecionado na trajetória, seleciona-se aleatoriamente um elemento de uma lista dos candidatos mais promissores no caminho a ser investigado;
- **Truncated Relinking:** apenas uma parte da trajetória entre x_s e x_t é investigada.
- **Greedy Randomized Adaptive Relinking:** ao invés de selecionar o melhor movimento ainda não selecionado na trajetória, seleciona-se aleatoriamente um elemento de uma lista dos candidatos mais promissores no caminho a ser investigado;
- **Truncated Relinking:** apenas uma parte da trajetória entre x_s e x_t é investigada.

3 MÉTODO DE PESQUISA

De acordo com MIGUEL et al. (2009), a natureza da pesquisa pode ser classificada como uma pesquisa empírica (aplicada) normativa baseada em modelagem quantitativa.

Trata-se de uma pesquisa aplicada uma vez que objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos.

Dessa forma, o presente estudo é classificado como uma pesquisa aplicada, uma vez que seu objetivo é dirigido especificamente para o processo analisado e considera como verdade a realidade desse processo. Pode também ser classificada como normativa por traduzir o sistema em conjuntos de regras formais (modelo) e então analisá-lo.

A pesquisa é quantitativa uma vez que visa criar métricas para tudo pode ser mensurável, isto é, busca traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e analisá-las.

Na elaboração desse estudo, as etapas de conhecimento do sistema produtivo real, coleta dos dados e validação do modelo computacional contaram com a participação de profissionais que lidam com o problema e o sistema produtivo diariamente. Dessa forma, esse trabalho é classificado também, em termos de procedimento técnico como uma pesquisa participante.

4 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O problema estudado neste projeto é o sequenciamento de projetos com restrição de recursos mediante a incerteza da duração das atividades (*Stochastic Resource Constrained Project Scheduling - SRCPS*).

O objetivo do problema é encontrar a ordem de execução das atividades que reduza ao mínimo o tempo total esperado do projeto. O que difere este problema do problema clássico de caminho crítico é a existência de recursos escassos que são compartilhados pelas atividades.

Inicialmente estudou-se o problema desconsiderando a suposição de incerteza na duração das atividades, desta forma, partimos da modelagem do problema baseado no proposto por Salewski; Schimer & Drexl (1997). Este modelo é um caso particular do modelo apresentado pelos autores, onde consideramos apenas um modo de execução para todas as

atividades e representamos o custo total do projeto como o seu tempo total de execução. Na sessão seguinte apresentaremos e descreveremos o modelo.

Modelo para o problema SRCPS

$$\text{Min } T_{total} \quad (1)$$

S.à.

$$T_{total} - \sum_{t=ES_j+d_j}^{LF_j} tx_{jt} \geq 0, \quad \forall j \quad (2)$$

$$\sum_{t=ES_j+d_j}^{LF_j} x_{jt} = 1, \quad \forall j \quad (3)$$

$$\sum_{t=ES_{j'}+d_{j'}}^{LF_{j'}} tx_{j't} - \sum_{t=ES_j+d_j}^{LF_j} (t-d_j)x_{jt} \leq 0, \quad \forall j \in \{1 \dots J\}, \forall j' \in P_j \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{\substack{q=t \\ q \in T_j}}^{t+d_j-1} K_r^j x_{jq} \leq Q_r, \quad \forall t \in \{1 \dots T_{max}\}, \forall r \in \{1 \dots R\} \quad (5)$$

$$T_{total} \geq 0, \quad (6)$$

$$x_{jt} \in \{0,1\}, \quad \forall j \in \{1 \dots J\}, \forall t \in \{1 \dots T_{max}\} \quad (7)$$

Fonte: Adaptado Oliveira (2012)

$J \equiv$ Número de atividades
 $R \equiv$ Número de recursos
 $T_{\max} \equiv$ Tempo máximo de execução do projeto
 $P_j \equiv$ conjunto de predecessoras da atividade j
 $ES_j \equiv$ Data mais cedo de início da atividade j
 $LF_j \equiv$ Data mais tarde de término da atividade j
 $d_j \equiv$ Duração da atividade j
 $T_j = \{ES_j + d_j \dots LF_j\}$
 $K_r^j \equiv$ Consumo por unidade de tempo do recurso r pela atividade j
 $Q_r \equiv$ Disponibilidade total do recurso r
 $T_{\text{total}} \equiv$ Variável que indica o tempo total de execução do projeto
 $x_{jt} \equiv$ Variável binária que indica o término da atividade j no tempo t

Fonte: Adaptado Oliveira (2012)

A equação (1) representa o objetivo a ser minimizado que é o tempo total de execução do projeto. A equação (2) garante que nenhuma atividade terminará após T_{total} , a restrição (3) é uma restrição de atribuição que exige que todas as atividades sejam concluídas, em (4) é garantida a realização anterior das atividades precedentes e a última restrição (5) limita a quantidade de recurso utilizada por unidade de tempo. As restrições (6) e (7) limitam o domínio das variáveis de decisão.

Modelo para o problema SRCPS – duração das variáveis aleatórias (Dj)

$$\text{Min } E[T_total] \quad (8)$$

S.à.

$$\left\{ \begin{array}{l} T_total - \sum_{t=ES_j+d_j}^{LF_j} tx_{jt} \geq 0, \quad \forall j \quad (9) \\ \sum_{t=ES_j+d_j}^{LF_j} x_{jt} = 1, \quad \forall j \quad (10) \\ \sum_{t=ES_{j'}+d_{j'}}^{LF_{j'}} tx_{j't} - \sum_{t=ES_j+d_j}^{LF_j} (t-d_j)x_{jt} \leq 0, \quad \forall j \in \{1\dots J\}, \forall j' \in P_j \quad (11) \\ \sum_{j=1}^J \sum_{q=t}^{t+d_j-1} K_r^j x_{jq} \leq Q_r, \quad \forall t \in \{1\dots T_{\max}\}, \forall r \in \{1\dots R\} \quad (12) \end{array} \right\} \Big|_{D_j = d_j}$$

$$T_total \geq 0, \quad (13)$$

$$x_{jt} \in \{0,1\}, \quad \forall j \in \{1\dots J\}, \forall t \in \{1\dots T_{\max}\} \quad (14)$$

$$D_j \sim f(\bullet) \quad (15)$$

Fonte: Adaptado Oliveira (2012)

As equações (08) à (15) apresentam o modelo de programação estocástica que utilizamos para descrever o SRCPS. A diferença deste modelo para o descrito pelas equações (01) à (07), são as durações das atividades que são representadas como variáveis aleatórias (Dj) que seguem distribuições discretas de probabilidade (f(.), equação (15)).

A função objetivo (equação (08)) passa a ser a minimização do tempo total esperado de execução do projeto. O conjunto de restrições (09) à (12) são estruturais do problema e seguem a mesma lógica do modelo determinístico e são apresentadas de forma condicionada a valores específicos da variável aleatória Dj. No entanto, estas restrições devem ser válidas para toda duração dj definidos no espaço de probabilidade Ωd.

4.1 ALGORITMO DESENVOLVIDO

A Figura 1 mostra o pseudocódigo implementado em linguagem C, utilizando o DevC++ 4.9.9.1 Foram utilizados dois critérios de construção da solução inicial, os indicadores de criticidade e a multiplicação da criticidade pela crucialidade. RABBANI *et al.* (2007) mostraram que a minimização da criticidade reduz o valor esperado do tempo de projeto e que a minimização da crucialidade reduz a variância deste. O critério de parada usado no GRASP foi de 100 interações. O VND implementado possui duas estruturas de vizinhanças, a *SWAP* (troca) e *SHIFT* (deslocamento) para frente. O Path-relinking é utilizado para encontrar novas soluções onde se escolhe aleatoriamente uma solução dentre uma lista de melhores soluções encontrada de cada interação do GRASP com a melhor solução global. As soluções foram avaliadas através da simulação de Monte Carlo.

Algoritmos Propostos para Solução do SRCPSP

Algoritmo 1- GRASP(max) + PR

```
1.  $f^* = \text{int\_MAX};$ 
2. para ( $k = 1, 2, 3 \dots \text{max}$ )faça
3. ConstroiSolucao();
4.  $s' = \text{solução corrente};$ 
5. VND();
6. se( $f(s') < f^*$ )então
7.  $s^* = s'; f^* = f(s');$ 
8. fim-se;
9. se ( $k > 3$ )então
10. PR();
11. fim-se;
12. fim-para;
13. Retorne  $s^*$ ;
14. fim GRASP
```

Figura 1. Algoritmo GRASP

Esse é o algoritmo para construção de uma solução inicial para o SRCPSP. Utilizamos o método GRASP com o número de iterações como critério de parada. Em cada iteração é construída uma solução e essa solução é comparada com a melhor solução encontrada até o momento. Após 100 iterações esse método retorna a melhor solução encontrada em todas as iterações.

Algoritmo 2- VND	
1.	$k = 1;$
2.	enquanto ($k < 3$)
3.	se ($k == 1$) então
4.	$SWAP(s^*);$
5.	$s' = \text{solução gerada por movimento de swap};$
6.	se ($f(s') < f^*$) então
7.	$s^* = s'; f^* = f(s'); k = 1;$
8.	senão $k = k + 1;$
9.	fim-se;
10.	fim-se;
11.	se ($k == 2$) então
12.	$SHIFT(s^*);$
13.	$s' = \text{solução gerada por movimento de shift};$
14.	se ($f(s') < f^*$) então
15.	$s^* = s'; f^* = f(s'); k = 1;$
16.	senão $k = k + 1;$
17.	fim-se;
18.	fim-se;
19.	fim-enquanto;
20.	Retorne $s^*;$
21.	fim VND

Figura 2. Algoritmo VND

A Figura 2 mostra o método para refinamento da solução, o VND. Já com a melhor solução gerada pelo GRASP o algoritmo entra na primeira estrutura de vizinhança, o SWAP. Se o movimento de SWAP melhorar a solução é feito um novo movimento de SWAP na nova solução encontrada, se não apresentar melhoria o algoritmo vai para a segunda estrutura de vizinhança, o SHIFT. No movimento de SHIFT é gerada uma nova solução, se ela apresentar melhoria o algoritmo volta na estrutura SWAP, repetindo o processo. O procedimento termina quando não houver melhoria em nenhuma das duas estruturas de vizinhança.

Algoritmo 3- PR

```
1.  $dif = 0$ ;  
2.  $k = 0$ ;  
3.  $i = 0$ ;  
4.  $s^{PR} =$  solução corrente;  
5.  $NAtv =$  número de atividades;  
6.  $f(s^{PR}) = f(s')$ ;  
7. enquanto( $NAtv > 0$ ) faça  
8.   verifica se as posições  $i$  são diferentes ( $f(s^{PR}), f(s^*)$ );  
9.   se( $f(s^{PR}) \neq f(s^*)$ )faça  
10.    guarda a posição diferente ( $f(s^{PR}), f(s^*)$ );  
11.     $k = 1$ ;  
12.   fim-se;  
13.   se( $k == 1$ ) faça  
14.    procura a posição  $f(s^{PR})$  igual a  $f(s^*)$ ;  
15.    igualar a posição diferente  $i$  de  $f(s^{PR})$  e  $f(s^*)$ ;  
16.    empurrar as demais atividades de  $f(s^{PR})$  para baixo;  
17.   fim-se;  
18.   se( $s^{PR} < s^*$ )faça  
19.     $f(s^*) = f(s^{PR})$ ;  
20.   fim-se;  
21.    $i++$ ;  
22.    $NAtv--$ ;  
23.    $k = 0$ ;  
24. fim-enquanto;  
25. Retorne  $s^*$ ;  
26. fim
```

Figura 3. Algoritmo Path-relinking

A Figura 3 demonstra como se alcança novas soluções, que depois de gerada a solução inicial pelo GRASP, refinada pelo VND e gerada lista com as melhores soluções, o método inicia a busca por sequencias diferentes, e individualmente troca as posições, uma a uma, avaliando se houve melhora e dando sequência utilizando a melhor solução dentre as que foram testadas pela troca.

5 RESULTADOS COMPUTACIONAIS

O algoritmo desenvolvido foi executado tanto para a instância real quanto para as instâncias geradas aleatoriamente no sistema operacional OS X Yosemite, Versão 10.10.3 – 64 bits, em

um computador pessoal com processador Intel ® Core i5 com dois núcleos de 1.3 GHz e 4 GB de RAM.

5.1 TESTES COM A INSTÂNCIA REAL

Para validarmos o algoritmo desenvolvido utilizamos dados da obra realizada no Bloco D, de salas de aula da UFOP - Campus João Monlevade. Foram identificadas 83 atividades e 05 recursos. A obra foi uma reforma realizada no Bloco D do ICEA como mostrado na Figura 4.

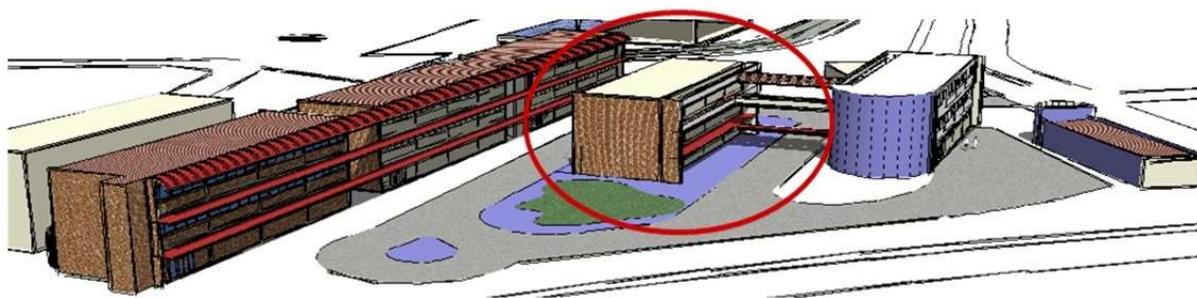


Figura 4. Bloco do ICEA.

A seguir serão apresentadas as atividades mapeadas para a entrada de dados do problema.

A planta representada pela Figura 5 é do andar térreo, que contém o Xerox, a Papelaria, os espaços que serão dedicados aos CA's e um pátio coberto que será uma área que servirá de espaço de convivência para alunos e professores.

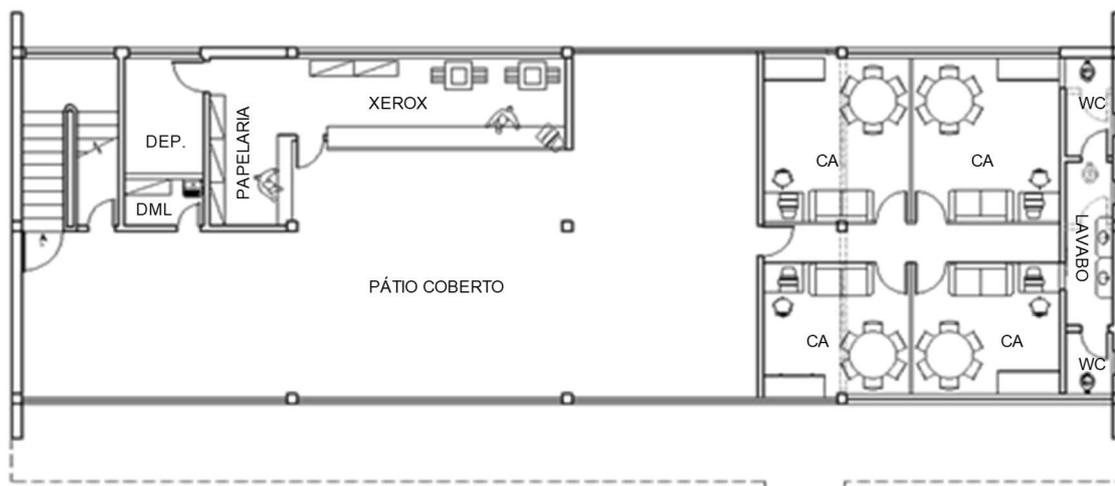


Figura 5. Planta baixa do andar térreo.

A Figura 6 apresenta as atividades a serem realizadas no Andar Térreo, como a estrutura pode ser reaproveitada, as atividades são apenas de reformas:

Térreo	
0	Finalizar a execução de esgoto dos banheiros bloco "D"
1	Finalizar a instalação sanitária
2	Instalação do piso na sala do DA (MARMORITE)
3	Serviço de elétrica da sala do DA
4	Finalizar a sala do DA - Execução de pintura
5	Instalação das grades (portão de proteção) da cantina
6	Instalação das esquadilhas metálicas da cantina
7	Instalação do piso na cantina (MARMORITE)
8	Pintura do corre mão de entrada do Bloco "D"

Figura 6. Atividades a serem realizadas no andar térreo.

A Figura 7 apresenta a planta do Primeiro Andar, que depois da reforma terá três salas de aula, sendo duas com capacidade para 40 alunos e uma com capacidade para 60, além da seção de ensino:

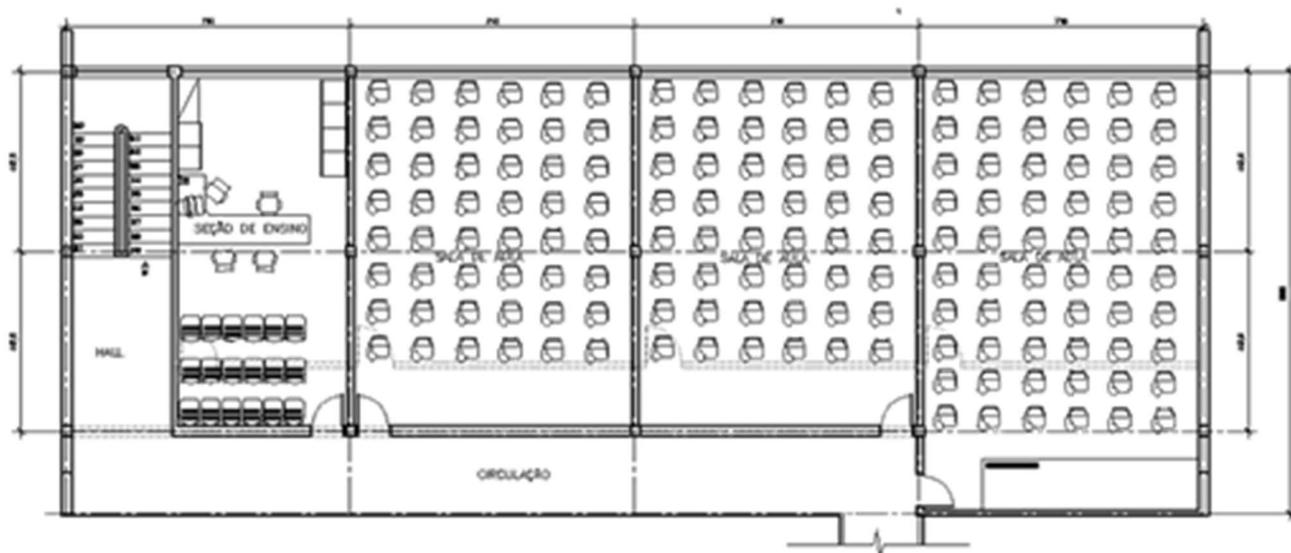


Figura 7. Planta do primeiro andar.

A Figura 8 apresenta as atividades a serem realizadas na Passarela do Primeiro Andar, a passarela liga o Bloco D ao E, e foi utilizada como alternativa para que não houvesse a necessidade de instalação de elevador nesse prédio:

Passarela	
9	Finalizar a instalação das esquadilhas metálicas
10	Finalizar a instalação de vidros na esquadilha metálica
11	Finalizar a execução de pintura nas paredes do corredor
12	Instalação do piso paviflex
13	Instalação elétrica

Figura 8. Passarela do primeiro andar.

As Figuras 9 e 10 representam, respectivamente, as atividades a serem realizadas nas reformas das Salas de Aula 1 e 2 do Primeiro Andar, ambas estão sendo adaptadas para receberem turmas de 40 alunos:

Sala de Aula 1	
14	Instalação de esquadilha metálica
15	Instalação de vidros na esquadilha metálica
16	Instalação do Brize
17	Execução de pintura nas paredes - ultima demão
18	Instalação de piso paviflex
19	Instalação de rodapé
20	Finalização de pintura no rodapé meio
21	Execução de pintura nas portas
22	Instalação elétrica

Figura 9. Atividades a serem realizadas na reforma da sala de aula 1.

Sala de Aula 2	
23	Instalação de esquadilha metálica
24	Instalação de vidros na esquadilha metálica
25	Instalação do Brize
26	Instalação de piso paviflex
27	Instalação de rodapé
28	Finalização de pintura no roda meio e rodapé
29	Execução de pintura nas portas
30	Execução de pintura nas paredes - ultima demão
31	Instalação elétrica

Figura 10. Atividades a serem realizadas na reforma da sala de aula 2.

A Figura 11 apresenta as atividades a serem realizadas na Sala de Aula 3 do Primeiro Andar, que terá capacidade de receber até 60 alunos:

Sala de Aula 3	
32	Instalação de esquadilha metálica
33	Instalação de vidros na esquadilha metálica
34	Instalação de piso paviflex
35	Instalação de rodapé
36	Finalização de pintura no roda meio e rodapé
37	Execução de pintura nas portas
38	Execução de pintura nas paredes - ultima demão
39	Instalação elétrica
40	Instalação do Brize

Figura 11. Atividades a serem realizadas na sala de aula 3.

A Figura 12 apresenta as atividades a serem realizadas na Sessão de Ensino do Primeiro Andar, que realizará, além de serviço interno, o atendimento aos alunos:

Sessão de Ensino	
41	Instalação de esquadilha metálica
42	Instalação de vidros na esquadilha metálica
43	Instalação de piso paviflex
44	Instalação de rodapé
45	Execução de pintura nas portas
46	Execução de pintura nas paredes - ultima demão
47	Instalação elétrica
48	Instalação do Brize

Figura 12. Atividades a serem realizadas na seção de ensino.

A Figura 13 representa a planta do Segundo Andar, que terá um Laboratório para as disciplinas da Área de Engenharia Ambiental, duas salas de aula com capacidade máxima de 40 alunos cada e um laboratório de Informática dedicado as disciplinas de Redes e Banco de Dados:

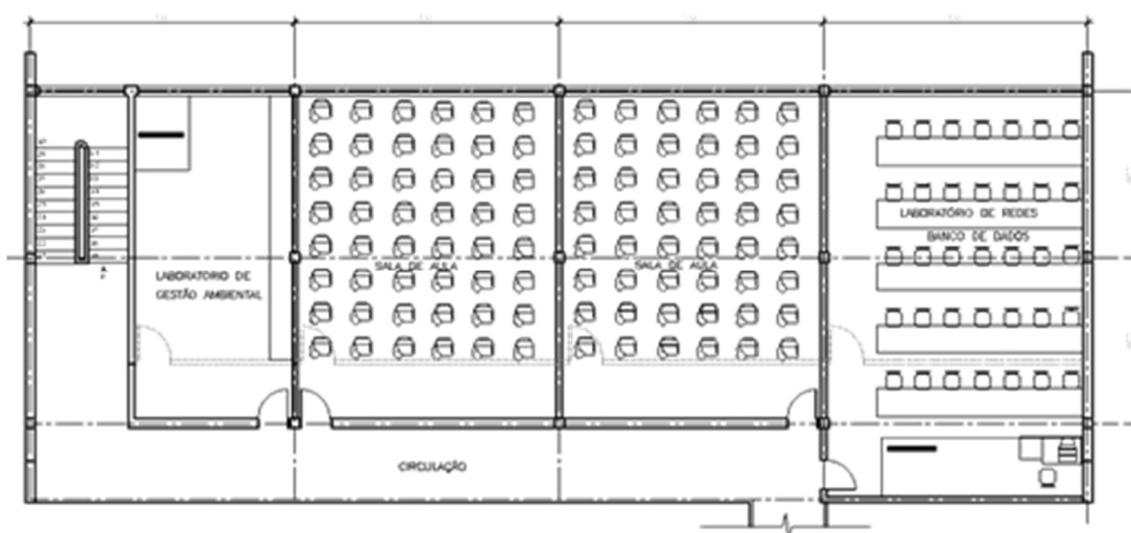


Figura 13. Planta do segundo andar.

A Figura 14 apresenta as atividades a serem realizadas na Passarela do Segundo Andar:

Passarela	
49	Finalizar a execução de pintura nas paredes do corredor
50	Instalação do piso paviflex
51	Instalação elétrica

Figura 14. Atividades a serem realizadas na passarela do segundo andar.

As Figuras 15 e 16 representam, respectivamente, as atividades de reforma a serem realizadas nas salas de aula 1 e 2 do Segundo andar, para que essas salas possam passar a comportar turmas de até 40 alunos:

Sala de Aula 1

52	Instalação de esquadilha metálica
53	Instalação de vidros na esquadilha metálica
54	Instalação de piso paviflex
55	Instalação de rodapé
56	Finalização de pintura no roda meio e rodapé
57	Execução de pintura nas portas
58	Execução de pintura nas paredes - ultima demão
59	Instalação elétrica
60	Instalação do Brise

Figura 15. Atividades a serem realizadas na sala de aula 1 do segundo andar.

Sala de Aula 2

61	Instalação de esquadilha metálica
62	Instalação de vidros na esquadilha metálica
63	Instalação de piso paviflex
64	Instalação de rodapé
65	Finalização de pintura no roda meio e rodapé
66	Execução de pintura nas portas
67	Execução de pintura nas paredes - ultima demão
68	Instalação elétrica
69	Instalação do Brise

Figura 16. Atividades a serem realizadas na sala de aula 2 do segundo andar.

A Figura 17 apresenta as atividades a serem realizadas no Laboratório de Informática que será dedicado as disciplinas de Redes e Banco de Dados no Segundo Andar:

Laboratório	
70	Instalação de esquadilha metálica
71	Instalação de vidros na esquadilha metálica
72	Instalação de piso paviflex
73	Instalação de rodapé
74	Finalização de pintura no roda meio e rodapé
75	Execução de pintura nas portas
76	Execução de pintura nas paredes - ultima demão
77	Instalação elétrica
78	Instalação do Brise

Figura 17. Atividades a serem realizadas no laboratório de informática.

A Figura 18 apresenta as atividades a serem realizadas na primeira sala do Segundo Andar, que será adaptada para se tornar uma sala de pesquisa.

Sala de Pesquisa	
79	Instalação Elétrica
80	Instalação Esquadilha metálica
81	Instalação dos vidros na esquadilhas metálicas
82	Instalação das torneiras

Figura 18. Atividades a serem realizadas na sala de pesquisa.

Além do mapeamento das atividades referentes a obra, havia a necessidade de conhecer os recursos disponíveis para serem utilizados. A empresa executora do projeto contava com o seguinte efetivo que consta na Figura 19.

Efetivo	
02	Bombeiro
24	Pedreiro
03	Eletricista
08	Pintor
02	Vidraceiro

Figura 19. Recursos disponíveis para realização das atividades.

Outros dados também relevantes ao problema foram mapeados, as relações de precedência entre as atividades e a quantidade de cada recurso consumida na realização de cada uma das atividades, esses dados foram omitidos deste trabalho para melhor apresentação do texto.

OLIVEIRA (2012) desenvolveu algoritmo para criação de soluções desse problema, que participou da primeira parte desse projeto. Na ocasião, ela obteve uma solução final de 220,7 horas de projeto com desvio padrão de 30,17.

Utilizando para essa mesma instância variações do algoritmo desenvolvido neste trabalho, alcançamos uma solução final de 193,45 h e um desvio padrão de 33,8 utilizando apenas o critério de criticidade (CRI) e uma solução de 207,7h com desvio padrão de 31,4 utilizando a multiplicação da criticidade pela crucialidade (CRI_CRU). Constatou-se também um menor tempo de execução computacional com as novas técnicas de refinamento da solução inicial. Os resultados obtidos foram melhores para a instância real do problema, mas para se generalizar essa informação são necessários mais testes com instancias reais.

5.2 TESTES COM INSTÂNCIAS GERADAS ALEATORIAMENTE

Considerando o tempo de duração de uma atividade como uma variável aleatória exponencialmente distribuída, foram geradas 24 instâncias aleatoriamente para se testar a eficiência do algoritmo desenvolvido. A Tabela 1 mostra os resultados obtidos para essas instâncias.

Instância	N° de Atividades	N° de Recursos	Soluções Encontradas		Soluções Encontradas		Coef. de Variação		Coef. de Variação	
			GRASP+VND		GRASP+VND+PR		GRASP+VND		GRASP+VND+PR	
			CRI	CRI_CRU	CRI	CRI_CRU	CRI	CRI_CRU	CRI	CRI_CRU
1	25	4	284,70	281,48	259,77	273,36	0,109756	0,105923	0,060363	0,063291
2	25	8	294,94	317,30	291,40	302,56	0,126436	0,099111	0,054859	0,055760
3	25	12	398,36	419,59	382,17	413,19	0,067482	0,062332	0,051289	0,048978
4	25	16	380,64	383,70	359,39	363,41	0,071434	0,070256	0,056767	0,056820
5	50	4	476,58	483,46	439,36	449,91	0,043990	0,044818	0,032607	0,033865
6	50	8	648,13	616,83	603,20	616,18	0,026440	0,025839	0,025558	0,023846
7	50	12	623,14	632,74	601,66	604,39	0,030478	0,033689	0,025383	0,026581
8	50	16	615,94	600,23	591,32	573,96	0,033870	0,041895	0,024320	0,025753
9	75	4	683,38	685,97	627,30	636,63	0,025085	0,030556	0,018183	0,019279
10	75	8	787,97	792,54	753,40	731,27	0,022531	0,024035	0,015493	0,015619
11	75	12	802,02	834,18	783,46	802,44	0,021677	0,021802	0,017153	0,017685
12	75	16	837,94	872,87	817,90	840,63	0,027016	0,022915	0,016866	0,018115
13	100	4	893,90	930,40	855,62	866,04	0,006683	0,006686	0,012354	0,014306
14	100	8	1014,48	1006,48	938,94	982,88	0,005413	0,005811	0,012426	0,012688
15	100	12	1058,14	1068,14	994,87	1002,37	0,008223	0,008582	0,011884	0,012304
16	100	16	1162,99	1129,73	1110,72	1073,70	0,006667	0,007256	0,013362	0,012688
17	125	4	1168,38	1135,66	1053,03	1097,10	0,013508	0,011242	0,010973	0,010492
18	125	8	1204,08	1162,89	1113,19	1118,08	0,010693	0,009345	0,009140	0,008638
19	125	12	1312,98	1276,45	1258,86	1230,18	0,010392	0,010588	0,009653	0,009295
20	125	16	1439,63	1398,19	1348,86	1311,63	0,010637	0,010637	0,009361	0,009361
21	150	4	1347,77	1314,70	1283,49	1294,17	0,008963	0,008904	0,008128	0,008628
22	150	8	1370,62	1370,29	1286,45	1317,42	0,009219	0,010165	0,008121	0,009396
23	150	12	1580,28	1551,92	1546,20	1515,61	0,007945	0,007499	0,007606	0,007153
24	150	16	1543,90	1552,99	1468,66	1448,71	0,008438	0,008766	0,007636	0,007628

Tabela 1. Testes com instâncias geradas aleatoriamente.

Por esses resultados se percebe que o a diversidade de critérios de solução, via simulação, tais como criticidade (CRI) e a combinação da criticidade e da crucialidade (CRI_CRU), ou multiplicação delas, geraram resultados distintos em relação ao valor esperado e do coeficiente de variação da duração do projeto.

Por esses resultados é possível perceber que o uso dos diferentes critérios de solução, tais como criticidade (CRI) ou multiplicação da criticidade pela crucialidade (CRI_CRU) geraram diferentes resultados em termos de valor esperado e do coeficiente de variação da duração total do projeto. No geral, a construção por meio da criticidade gerou soluções com valores esperados mais baixos, usando a heurística sem o PR e nas instâncias com atividades menores e iguais a 75 utilizando PR, nas instâncias iguais e maiores que 100 atividades, mas, o modelo que utiliza o PR, mostrou um melhor desempenho quanto ao valor esperado. A

construção a partir do critério criticidade multiplicada pela crucialidade, não cumpriu seu papel em termos de redução do coeficiente de variação das soluções geradas. Isso se deu ao fato de que o procedimento de refinamento não segue as mesmas métricas da criação da solução inicial.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos em relação ao tempo de execução do programa para as mesmas 24 instâncias geradas. Os resultados foram obtidos em um tempo computacional compatível com o horizonte de planejamento para esse tipo de problema.

Instância	Nº de Atividades	Nº de Recursos	Tempo(s) de Execução do Programa		Tempo(s) de Execução do Programa	
			GRASP+VND		GRASP+VND+PR	
			CRI	CRI_CRU	CRI	CRI_CRU
1	25	4	144,00	141,00	80,00	148,00
2	25	8	96,00	98,00	112,00	152,00
3	25	12	88,00	23,00	81,00	52,00
4	25	16	81,00	89,00	87,00	82,00
5	50	4	1091,00	1336,00	930,00	1047,00
6	50	8	696,00	383,00	554,00	534,00
7	50	12	643,00	905,00	657,00	1171,00
8	50	16	458,00	932,00	611,00	1150,00
9	75	4	1925,00	2768,00	1807,00	1763,00
10	75	8	1644,00	1504,00	1135,00	1356,00
11	75	12	1938,00	734,00	1957,00	908,00
12	75	16	1600,00	1612,00	1434,00	1937,00
13	100	4	2406,00	3867,00	1430,00	1358,00
14	100	8	5296,00	1758,00	4195,00	3439,00
15	100	12	3011,00	2465,00	1374,00	2794,00
16	100	16	1978,00	6109,00	1534,00	5057,00
17	125	4	8829,00	3140,00	4616,00	2164,00
18	125	8	4037,00	5164,00	1263,00	6750,00
19	125	12	1492,00	4332,00	2429,00	5743,00
20	125	16	3108,00	7726,00	1374,00	3483,00
21	150	4	5502,00	2960,00	6201,00	7542,00
22	150	8	7135,00	4708,00	5098,00	5570,00
23	150	12	1795,00	4265,00	5045,00	5457,00
24	150	16	2243,00	14332,00	2783,00	6306,00

Tabela 2. Tempo de execução do programa para as instâncias geradas aleatoriamente.

Para todas as instâncias geradas analisando os resultados é notória a diferença do tempo de execução do programa com e sem a utilização do PR para ajuda do refinamento das soluções. Assim, o Path-relinking cumpriu seu papel na redução do tempo de execução do problema, tanto para criticidade quanto para a combinação de criticidade e crucialidade.

A Tabela 2 também nos mostra que quanto mais atividades, maior será o tempo de processamento do programa.

A versão determinística do problema estudado é um problema NP-Difícil (ARTIGUES et. al., 2008) sendo muito explorado no meio científico. Algoritmos eficientes para encontrar boas soluções para este problema são ferramentas importantes para o apoio a tomada de decisão em projetos de engenharia. Assim, esse estudo é de grande interesse à Engenharia de Produção. O algoritmo desenvolvido apresentou um comportamento satisfatório em termos de geração de soluções e tempo de execução. Cabe, no entanto, uma melhor exploração dos critérios de criticidade e crucialidade nos procedimentos de refinamento das soluções. Como perspectiva tem-se a comparação deste com outros métodos desenvolvidos para o mesmo problema, principalmente metodologias de aproximação que converjam para a solução exata, como por exemplo, o método SAA (*sampling average approximation*); a utilização de outras métricas conhecidas na literatura para avaliar a qualidade de soluções e a adaptação deste procedimento para trabalhar em um ambiente dinâmico de sequenciamento e re-sequenciamento de projetos.

6 CONCLUSÃO

A duração do projeto de desenvolvimento de projetos está fortemente relacionada ao sucesso técnico e comercial do projeto. Para realizar esta análise, foi criado um modelo heurístico capaz de analisar a criticidade e combinação da criticidade de crucialidade das atividades.

Devido à complexidade computacional desse tipo problema, ele se torna de grande interesse científico, e ainda possui a característica da aplicabilidade prática e real direta nos mais diversos problemas de engenharia e gerenciamento, assim, o tema estudado e os resultados obtidos, são importantes para toda a Engenharia.

O algoritmo desenvolvido, para trabalhar o problema determinístico, se demonstrou eficiente do ponto de vista de geração de boas soluções e em relação ao tempo de execução.

O algoritmo proposto para a solução do problema estocástico gerou resultados satisfatórios, alcançando boas soluções e que foram executadas em um espaço de tempo

computacional coerente com natureza do problema. No entanto, é necessário que os resultados obtidos sejam comparados com a execução exata do problema de programação estocástica e que sejam utilizadas técnicas como a Otimização Ordinal para comparar os resultados obtidos.

A utilização da simulação na otimização se deu apenas à avaliação de cenários e os resultados alcançados não influenciaram para o direcionamento da busca no espaço de solução, além disto, o caminho de busca também não ajudou para a melhoria do desempenho computacional da simulação.

Assim, deixa-se para trabalhos futuros a modelagem e solução deste problema considerando a sua natureza dinâmica, isto é, levando-se em conta a incerteza nos parâmetros iniciais e a possibilidade de se realizar um gerenciamento ativo do projeto.

O gerenciamento ativo considera a possibilidade do gestor do projeto tomar decisão frente a mudanças no cenário inicial. Para agregar esta possibilidade no modelo, deve-se desenvolver um modelo de programação dinâmica estocástica e construir um algoritmo eficiente para resolvê-lo.

Referências Bibliográficas

ARTIGUES, C.; LEUS, R & NOBIBON, F.T. (2013). **Robust optimization for resource-constrained project scheduling with uncertain activity durations.** Flexible Services and Manufacturing Journal, v.25, p. 175-205.

BIANCO, L. CARAMIA, M. (2013). **A new formulation for the project scheduling problem under limited resource.** Flexible Services and Manufacturing Journal. v.25, p. 6-24.

BOWERS, J. (1995). **Criticality in resource constrained network.** Journal of Operational Research Society, v.46, p. 80-91.

BOWERS, J. (1996). **Identifying critical activities in stochastic resource constrained network.** International Journal of Management Science, v.24, p. 37-46.

BRUNI, M.E. BERALDI, P. GUERREIRO, F. PINTO, E. (2011). **A heuristic approach for resource constrained project scheduling with uncertain activity durations.** Computers&OperationsResearch. v.38 p. 1305–1318.

FU, M. **Optimization for Simulation: Theory vs. Practice.** Journal on Computing, v.14, p. 192-25. 2002.

GLOVER. F. (1996) **Tabu search and adaptive memory programming.** Advances, applications and challenges. In R.S. Barr, R.V. Helgason, and J.L. Kennington, editors, Interfaces in Computer Science and Operations Research, 1–75. Kluwer Academic Publishers.

GLOVER, F. LAGUNA, M. (1997). **Tabu Search.**Kluwer Academic Publishers, Boton.

HERROELEN, W. LEUS, R. (2005). **Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials.**European Journal of Operational Research, v. 165, p. 289–306.

LAGUNA, M. MARTI, R (1999). **GRASP and path relinking for 2-layer straight line crossing minimization**. INFOMRS Journal on Computing. v. 11, p. 44-52.

OLIVEIRA, Maritha Gomes Silva de. (2012). **Aplicação de GRASP para o problema de sequenciamento de projetos mediante a incerteza**. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Ouro Preto. Orientador: Thiago Augusto de Oliveira Silva.

MIGUEL, P. A. C. ET AL. (2009). *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações*. Editora Campus.

RABBANI, M.; FATEMI GHOMI, S.M.T.; JOLAI, F. & LAHIJI, N.S. (2007). **A new heuristic for resource-constrained project scheduling in stochastic networks using critical chain concept**. European Journal of Operational Research. v. 176, p. 794–808.

RESENDE, M. G. C. RIBEIRO, C. C. (2005). **GRASP with path-relinking: Recent advances and applications**. Metaheuristics: Progress as real problem solvers. v. 32, p. 29-63.

SALEWSKI, F.; SCHIRMER, A. E DREXL, A. **Project scheduling under resource and mode identity constraints: Model, complexity, methods, and application**. European Journal of Operational Research, 102 (1997) 88-110.

WILLIAMS, T. (1999). **Towards realism in network simulation**. International Journal of Management Science. v. 27, p. 305–314.