

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS

MODELO PARA PROGRAMAR PROJETOS COM
RESTRIÇÕES DE RECURSOS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA

MARIA DA GRAÇA PEREIRA

FLORIANÓPOLIS
SANTA CATARINA - BRASIL
SETEMBRO DE 1980

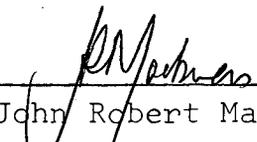
MODELO PARA PROGRAMAR PROJETOS
COM RESTRIÇÃO DE RECURSOS

MARIA DA GRAÇA PEREIRA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE

"MESTRE EM ENGENHARIA"

ESPECIALIDADE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E APROVADA EM SUA FORMA FI-
NAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

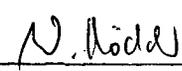


Prof. John Robert Mackness, Ph.D.
Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA:



Prof.^a. Vera Lucia D. do Valle Pereira, M.Sc.
Presidente



Prof. Wilhelm Rödder, Ph.D.



Prof. Raul Valentin da Silva, M.Sc.



0.249.256-3

UFSC-BU



Aos meus familiares

A G R A D E C I M E N T O S

Manifesto meus sinceros agradecimentos às seguintes pessoas e instituições:

- À Prof^a. Vera L.D. do Valle Pereira, M.Sc., pela orientação dada.
- Aos engenheiros Carlos José Bauer, Albeni Sponholz e Eugênio Cardoso Braz, pela colaboração prestada à autora durante a realização deste trabalho.
- Ao CNPq., pelo auxílio financeiro.
- A todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

R E S U M O

O uso de redes para a análise e programação de projetos é muito comum. Um dos maiores problemas desta área é a programação ótima de atividades quando os recursos são limitados.

O problema da programação de atividades, com o objetivo de minimizar a duração do projeto, sob restrição de recursos, é extremamente difícil, inclusive, para projetos pequenos. Contudo, este problema é comumente encontrado na prática.

O presente trabalho tem por objetivo desenvolver um modelo heurístico capaz de programar projetos com múltiplas restrições de recursos, visando formar uma programação que minimize a duração total do projeto, respeitando as restrições de recursos e precedência das atividades.

Na seqüência, é apresentada uma aplicação do modelo proposto, objetivando ressaltar sua aplicabilidade e identificar suas principais dificuldades e limitações.

Finalmente, são apresentadas as conclusões obtidas em decorrência do desenvolvimento e aplicação do modelo proposto.

A B S T R A C T

The use of networks for the analysis and scheduling of projects is very common. A major problem area is the optimal scheduling of activities when resources are limited.

The problem of scheduling activities so as to minimize project duration in the presence of resource constraints is an exceedingly difficult task for projects of even modest size and this problem is commonly encountered by the project scheduler.

The purpose of the present work is to develop a heuristic model capable of scheduling activities multiple resource restrictions so that project duration is minimized without violating resource restrictions or altering the sequence of activities.

Subsequently, an application of the model is presented in order to verify its uses and to identify its principal difficulties and limitations.

S U M Á R I O

	pag.
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
 CAPÍTULO 1	
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Origem e Objetivo do Trabalho	1
1.2. Importância do Trabalho	3
1.3. Limitação do Modelo	6
1.4. Organização dos Capítulos	7
 CAPÍTULO 2	
2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	9
2.1. Programação com Restrições de Recursos	9
2.2. Característica dos Projetos Programados	16
2.3. Limitações de Recursos	18
2.4. Custos Avaliados na Programação de Projetos	19
 CAPÍTULO 3	
3. MÉTODOS EXISTENTES PARA PROGRAMAR PROJETOS	21
3.1. Técnicas PERT/CPM	21
3.2. Técnicas para Administração de Recursos de Projetos	26
3.3. Métodos Heurísticos para Programar Projetos com Restrição de Recursos	31
3.4. Divisão dos Procedimentos Heurísticos em Classes	35
3.5. Teste e Avaliação de Procedimentos Heurísticos	39
3.6. Métodos Analíticos Utilizados para Programar Projetos com Restrição de Recursos	41

	pag.
CAPÍTULO 4	
4. MODELO PROPOSTO	43
4.1. Definições Básicas	44
4.2. Desenvolvimento do Modelo	46
4.3. Descrição Detalhada dos Procedimentos Adotados	50
4.4. Fluxograma do Modelo Proposto	66
 CAPÍTULO 5	
5. RESULTADOS OBTIDOS NA APLICAÇÃO DO MODELO	68
5.1. Projetos Utilizados nos Testes Iniciais	68
5.2. Aplicação Prática ao Projeto de Construção de uma Barragem	75
5.3. Especificações do Projeto	77
5.4. Determinação dos Parâmetros Necessários para a Aplicação do Modelo	80
5.5. Programação Encontrada com a Aplicação do Modelo	89
5.6. Avaliação dos Resultados Obtidos	91
 CAPÍTULO 6	
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	95
6.1. Conclusões	95
6.2. Recomendações	96
 BIBLIOGRAFIA	97
 ANEXO 1	
Programação Obtida pelo Modelo, para o Projeto de Construção de uma Barra gem	101

LISTA DE FIGURAS

		pag.
FIGURA	1. Atividade Original A com Duração de 8 dias	14
FIGURA	2. Atividades Representantes da Atividade Original A, com Duração Unitária	15
FIGURA	3. Atividade Original B com Duração de 3 dias Interrompida Após 2 dias	15
FIGURA	4. Atividade B ₁ e B ₂ Representantes da Atividade Original B com Durações de 2 e 1 dia Respectivamente	16
FIGURA	5. Rede PERT/CPM	23
FIGURA	6. Programação para Recursos Ilimitado	28
FIGURA	7. Programação para Recursos Nivelados	29
FIGURA	8. Programação para Recursos Ilimitados	33
FIGURA	9. Programação para Recursos Limitados	34
FIGURA	10. Programação para Recursos Ilimitados e Demanda Diária de Recursos A e B	52
FIGURA	11. Escala de Períodos de Programação	53
FIGURA	12. Programação Parcial no 3º Período	59
FIGURA	13. Programação Parcial no 5º Período	61

	pag.
FIGURA 14 . Programação Final do Projeto-Exemplo para Recursos Limitados	63
FIGURA 15 . Fluxograma do Modelo Proposto	67
FIGURA 16 . Programação para Recursos Ilimitados	69
FIGURA 17 . Programação Final para Recursos Limitados	70
FIGURA 18 . Rede do Multiprojeto a Ser Programado para Recursos Limitados	72
FIGURA 19 . Gráfico do Nível de Utilização dos Recursos nas Programações Formadas	75
FIGURA 20 . Cronograma Físico Financeiro para Programação Inicial	81
FIGURA 21 . Programação para Recursos Restritos do Projeto de Construção da Barragem	90
FIGURA 22 . Gráfico do Nível de Utilização dos Recursos Financeiros, para a Programação Elaborada pela Empresa Encarregada de Executar a Obra	92
FIGURA 23 . Gráfico do Nível de Utilização dos Recursos Financeiros, para a Programação Obtida pelo Método Proposto	93

LISTA DE TABELAS

	pag.
TABELA 1 . Programação Inicial para Recursos <u>ilimita</u> dos	53
TABELA 2 . Programação no 1º Período	58
TABELA 3 . Escala de Programação das Atividades e De- manda Diária de Recursos	63
TABELA 4 . Programação para o Multiprojeto Formada pe lo MAP	73
TABELA 5 . Programação para o Multiprojeto Formada pe lo Modelo Proposto	74
TABELA 6 . Especificações dos Itens do Projeto	78
TABELA 7 . Relação das Atividades do Projeto e suas Durações e Custos	83

1. INTRODUÇÃO

1.1. Origem e Objetivo do Trabalho

O problema da programação de projetos com restrição de recursos é relativamente comum e tem recebido atenção considerável na literatura. Surgiu com a necessidade de incorporar a limitação de recursos ao PERT/CPM.

PERT (Técnicas de Revisão e Avaliação de Programas) e CPM (Método do Caminho Crítico) são conjuntos de técnicas usadas para planejar, programar e controlar a execução de projetos. Ambas empregam um projeto gráfico que relaciona as atividades pela ordem de execução, determinada pelas restrições tecnológicas de precedência.

O PERT é empregado quando existem incertezas nas durações das atividades, neste caso, os tempos são determinados por estimativas.

Para o CPM, cada atividade é associada a um tempo normal e outro acelerado de execução, conjugados com custos normais e acelerados. A partir destes dados é estabelecida uma programação para as atividades, que corresponda ao menor custo total.

As técnicas PERT/CPM estão classificadas entre as mais importantes da linha de pesquisa operacional. Principalmente, porque permitem identificar imediatamente as relações de dependência entre atividades e determinar a seqüência das atividades que, se sofrer atraso, em alguma de suas componentes, o transmitirá ao término do projeto.

Contudo, as técnicas PERT/CPM consideram que existem disponíveis todos os recursos necessários para executar as atividades do projeto.

Na prática, frequentemente, estes recursos são limitados; e a programação encontrada pelas técnicas PERT/CPM, neste caso, não tem validade. Para resolver este problema e existem os modelos de programação de projetos com restrição de re cursos, que são considerados uma extensão das técnicas PERT/CPM. Normalmente, os modelos utilizados na prática são heurísticos que, através de critérios de prioridades, selecionam uma programação para a menor duração possível do projeto total, satisfazendo as limitações de recursos. Estes métodos não são infalíveis. Contudo, atualmente, se constituem no único meio prático para resolver os problemas complexos que ocorrem normalmente na indústria.

Infelizmente, até o momento, para a maioria dos projetos reais, a programação ótima não pode ser encontrada, embora, existam vários tipos de algoritmos que conseguem determinar soluções satisfatórias.

O objetivo deste trabalho é apresentar um modelo alternativo para encontrar programações satisfatórias para projetos, quando existem múltiplas restrições de recursos. Para alcançar esta finalidade, foi desenvolvido um modelo heurístico eficiente, de fácil utilização, que forma uma programação das da - tas de início das atividades através de uma série de programações parciais.

Os procedimentos heurísticos utilizados permitem encontrar uma programação que possibilite executar o projeto dentro do menor tempo possível ou próximo deste.

1.2. Importância do Trabalho

A administração pode ser definida como sendo: a função de selecionar os objetivos da empresa, alocar judiciosamente os recursos para alcançar estes objetivos e controlar todo o processo para obter o melhor retorno com o emprego dos recursos. Sendo assim, a administração de recursos é provavelmente o aspecto mais importante do processo administrativo.

As técnicas quantitativas são úteis para promover um processo objetivo de administração dos recursos, a alocação destes e o controle da sua utilização.

Os três passos básicos de um projeto são as operações, os recursos e as restrições para executá-lo. A administração dos recursos é de fundamental importância para obter uma programação que possibilite completar um projeto no melhor tempo, custo mínimo e com o menor grau de risco.

Normalmente, na prática, os recursos para executar as atividades de um projeto são escassos. Em decorrência desta escassez, torna-se fator de primordial importância uma alocação acertada destes recursos.

Para promover a melhor distribuição dos recursos necessários na execução de um projeto é necessário que, na fase do seu planejamento, seja elaborado um plano de utilização dos recursos.

Os programas de alocação de recursos, também chamados métodos de programação para recursos limitados, são de grande importância para obter a melhor distribuição de recursos para executar determinado projeto e uma programação das datas de i-

nício das atividades, que possibilite alcançar a data de término o mais rápido possível, diminuindo consideravelmente o custo total do projeto.

Estas técnicas englobam as vantagens das técnicas padrão de programação de projetos, tipo PERT/CPM, tais como:

a) O administrador do projeto será avisado com antecedência, dos problemas à frente, e assim ele poderá melhorar se equipar para os enfrentar à medida que apareçam, a um custo extra muito pequeno em comparação com as perdas que poderia, de outra maneira, estar arriscando.

b) Permitem a avaliação e determinação das operações que irão controlar o tempo de execução da obra.

c) Propiciam a confecção de um cronograma mais econômico para todas as operações envolvidas.

d) A representação visual do projeto por um diagrama permite estabelecer todos os elementos necessários à sua execução.

As técnicas utilizadas para programação de projetos com recursos limitados, além de englobarem as vantagens dos métodos PERT/CPM, que lhes deram origem, apresentam outras vantagens próprias; tais como:

a) Formam uma programação de acordo com as limitações dos recursos necessários para executar as atividades; sendo assim, tornam a programação encontrada, bastante real, coerente com os problemas práticos, onde normalmente, ocorrem escas

sez de recursos,

b) Promovem a avaliação quantitativa das sobras de tempo, ou folgas, e o seu aproveitamento na programação de tempo das atividades do projeto.

c) Permitem o melhor aproveitamento dos recursos disponíveis para executar os serviços.

No entanto, as técnicas de programação de projetos com restrição de recursos são relativamente recentes e estão numa fase de desenvolvimento. Muitos problemas, referentes a elas, aguardam solução e as pesquisas na área continuam.

Este trabalho apresenta um modelo, que se constitui num método alternativo, para programar projetos com múltiplas restrições de recursos.

O modelo proposto tem como ponto de partida os resultados obtidos pelas técnicas PERT/CPM, o que adiciona aos resultados obtidos, as mesmas vantagens da utilização dessas técnicas de programação de projetos.

Possui grande aplicabilidade aos problemas reais; uma vez que, considera as limitações de recursos na execução do projeto.

É bastante simples e emprega pouco esforço computacional, podendo fornecer programações para projetos grandes.

A manipulação de dados para resolver o problema citado, através do modelo, é simplificada, tornando fácil a sua utilização.

Quando, na fase de execução do projeto, ocorrer uma alteração na programação, causada por um motivo qualquer, é possível obter outra programação para as atividades que não foram executadas.

Concluindo, o modelo proposto, pelas características citadas, tem condições de fornecer rapidamente a programação para recursos limitados de um projeto.

1.3. Limitação do Modelo

O modelo para programar projetos com restrição de recursos, proposto neste trabalho, apresenta algumas limitações que é preciso assinalar e considerar quando o modelo for aplicado.

Inicialmente, é preciso ressaltar que o modelo proposto é heurístico e, neste caso, não oferece garantias que a programação formada seja exatamente a ótima, isto é, a programação para o melhor tempo e o menor custo do projeto.

O grau de eficiência dos modelos heurísticos é determinado através de testes a eles aplicados. Contudo, os resultados destes apresentam algumas limitações.

As regras heurísticas, utilizadas no modelo proposto, foram anteriormente testadas e consideradas eficientes, porque produzem uma percentagem alta de programações ótimas. No entanto, estes testes realizados apresentam uma limitação: os projetos utilizados são pequenos. Isto ocorre porque o conhecimento da solução ótima, necessário para promover o teste, atualmente, só é possível para projetos pequenos. Sendo assim, é suposto no

desenvolvimento do trabalho que o procedimento heurístico eficiente para programar projetos pequenos, deve ser eficiente também para programar projetos maiores.

As informações referentes ao projeto, e necessárias para promover a aplicação do modelo, são supostas como sendo conhecidas. No entanto, na prática, estas informações não estão disponíveis com frequência.

Normalmente, o levantamento de informações, para elaborar a programação das atividades de um projeto, é restrito. São determinadas apenas as informações necessárias à elaboração de uma programação simplificada.

A aplicação do modelo proposto requer informações precisas sobre os recursos limitados, necessitando uma determinação correta da distribuição da quantidade de recursos necessários para executar cada atividade e a sua disponibilidade; requer, ainda, informações detalhadas sobre o projeto que propiciem a determinação das atividades e a elaboração da rede PERT/CPM.

Concluindo, a eficiência da programação encontrada pelo modelo depende dos resultados de um estudo preliminar, onde são determinados os parâmetros de entrada do modelo.

1.4. Organização dos Capítulos

O presente trabalho foi dividido em seis capítulos.

Este primeiro capítulo define o objetivo do trabalho apresentado, assim como sua importância e limitações.

O capítulo seguinte tem por objetivo apresentar a formulação do problema de programação de projetos com restrições de recursos. Também, neste capítulo, são assinaladas as características dos projetos que podem ser programados para restrição de recursos e algumas considerações sobre os custos avaliados nos projetos.

O terceiro capítulo apresenta o estágio de desenvolvimento dos métodos de análise e programação de projetos, através de redes.

O quarto capítulo apresenta o modelo proposto para programar projetos com múltiplas restrições de recursos, objetivando aperfeiçoar e facilitar a obtenção de programação quando há restrições de recursos, através de um processo simples e rápido.

Posteriormente, é feita uma aplicação do modelo proposto a um projeto de construção de uma barragem, visando verificar a sua aplicabilidade e identificar suas principais limitações.

Finalmente, no sexto capítulo são apresentadas as conclusões e recomendações obtidas em decorrência do desenvolvimento e aplicação do modelo proposto.

2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

No capítulo anterior foi abordado como se apresenta o problema de restrição de recursos na programação de projetos. O capítulo 2 fornece uma formulação do problema, colocando-o numa disposição que facilitará a posterior aplicação do modelo de programação desenvolvido⁽¹⁾.

São apresentadas também as características dos projetos ou conjuntos de projetos que normalmente necessitam ser programados com recursos limitados, possibilitando ao leitor o conhecimento, a priori, das possíveis aplicações do modelo.

É importante ressaltar os tipos de recursos que normalmente são restritos e quais são os custos provenientes da execução do projeto, para propiciar o melhor entendimento do problema que será formulado. Objetivando este esclarecimento, são apresentadas, neste capítulo, algumas considerações sobre os tipos de recursos limitados e os custos avaliados no projeto.

2.1. Programação com Restrições de Recursos

O problema padrão de programação de projetos

(1) As variáveis definidas neste capítulo serão os parâmetros de entrada do modelo apresentado no capítulo 4.

com restrição de recursos, considerado neste trabalho, pode ser determinado a partir de um projeto ou conjunto de projetos que deve ser programado. Cada projeto contém um conjunto finito e parcialmente ordenado de atividades. É associada a cada atividade uma duração inteira e conhecida, e uma quantidade fixada de um ou mais tipos de recursos necessários a sua execução, para os períodos de tempo em que está em desenvolvimento.

Uma atividade não pode ser interrompida, após ser iniciada, estando sujeita a um conjunto de restrições tecnológicas que determinam sua ordenação. A data de início de uma atividade pode ser atingida somente quando todas as suas atividades antecessoras estiverem terminadas.

Existe um número pré-estabelecido de recursos limitados para executar o projeto e a quantidade diária disponível destes recursos é conhecida.

O objetivo do problema é minimizar a duração total do projeto, ou seja, o tempo requerido para completar todas as atividades, considerando as restrições citadas acima. Visando atingir este objetivo, é determinada uma programação das datas de início das atividades e a consequente distribuição dos recursos diários a serem utilizados na execução do projeto.

a) Definições das Variáveis:

k = período considerado da programação. Pode ser designado para qualquer unidade de tempo pré-estabelecida (dia, mês, etc...), $k = 1, 2, \dots, t$.

t = duração total do projeto.

j = código de seqüência da atividade j , onde $j = 1, 2, \dots, n$.

d_j = duração da atividade j .

D_j = período da programação em que a atividade j inicia.

b) Definições dos Conjuntos das Atividades :

S = conjunto de todas as atividades do projeto.

F_k = conjunto das atividades já iniciadas em períodos anteriores e que continuam em andamento no período k , onde $k = 1, 2, \dots, t$.

AP_k = conjunto das atividades que iniciam no período k .

B_k = conjunto de todas as atividades que se desenvolvem no período k .

Sendo: $B_k = F_k \cup AP_k$, e $F_k \cap AP_k = \emptyset$ (1)

C_j = conjunto de todas as atividades antecessoras de j .

c) Representação das Quantidades de Recursos :

Davis e Heidorn⁽²⁾ utilizam a representação vetorial para agrupar quantidades de recursos de tipos diferentes. As quantidades de recursos apresentadas a seguir, contêm esta repre

(2) DAVIS, Edward W. e HEIDORN, George E. An algorithm for optimal project scheduling under multiple resource constraints. pp. B. 804 - 05.

sentaçãõ.

A quantidade de recursos requerida pela atividade j , pode ser representada pelo vetor:

$$\bar{r}^*(j) = (r_{1j}, r_{2j}, \dots, r_{mj}) \quad (2)$$

onde: r_{ij} = unidades de recurso i requeridas pela atividade j , por período, sendo que $i = 1, 2, \dots, m$.

O total de recursos requerido, associado a cada conjunto B_k , pode ser representado pelo vetor:

$$\bar{R}_{B_k} = (r'_{1k}, r'_{2k}, \dots, r'_{mk}) \quad (3)$$

onde: r'_{ik} = unidades de recurso i requeridas para executar as atividades no período k .

A disponibilidade pré-estabelecida de recursos, pode ser representada pelo vetor:

$$\bar{R}^*_L = (R_1, R_2, \dots, R_m) \quad (4)$$

onde: R_i = unidades de recurso i disponíveis em cada período de duração do projeto.

2.1.1. Restrições do problema

Para atingir o objetivo do problema, as datas de início de todas as atividades devem ser determinadas, de modo a minimizar a duração total t do projeto, sujeito às seguintes restrições:

a) Precedência:

$$D_j \geq D_{j^*} + d_{j^*} \quad \text{para todo } j^* \in C_j \quad \text{ou}$$

se $j^* \in C_j$, $j \in AP_k$ e $j^* \in B_{k^*}$ então $k^* < k$.

b) Ininterrupção das Atividades:

A atividade não pode ser interrompida uma vez começada. Então, cada atividade j estará em desenvolvimento somente nos períodos $D_j, D_{j+1}, \dots, D_j + d_j - 1$.

c) Recursos Limitados:

A demanda de recursos em qualquer período k não pode exceder à disponibilidade. Então, $\sum_{j \in B_k} r_{ij} \leq R_i$ para $i = 1, 2, \dots, m$ e o somatório engloba a demanda de recursos de todo $j \in B_k$, ou seja, as atividades em desenvolvimento no período k . Esta restrição deve ser respeitada para todos os períodos k , onde $k = 1, 2, \dots, t$.

d) Complementação:

A programação somente estará concluída quando todas as atividades estiverem programadas, ou seja, quando a união dos subconjuntos das atividades já programadas for igual ao conjunto total de atividades do projeto.

$$\text{Assim, } \bigcup_{k=1}^t AP_k = S.$$

Além disso, todas as atividades devem estar concluídas. Então, $D_j + d_j - 1 \leq t$ para todo $j \in S$.

2.1.2. Particularidades do problema

A restrição (b) anteriormente apresentada, pode deixar de existir, em algum tipo específico de projeto, no qual as atividades podem ser interrompidas, após iniciadas. Neste caso a solução computacional do problema é facilitada pela representação de cada atividade original do projeto como uma série de atividades, com duração unitária, igual ao número de duração desta atividade, como mostram as figuras 1 e 2. A atividade A se subdivide em A_1 , A_2 e A_3 . A atividade A_1 passa a ser antecessora de A_2 e o mesmo acontece com A_1 e A_2 em relação a A_3 . Este tipo de representação foi utilizado por Davis e Heidorn⁽³⁾ para facilitar a resolução do problema apresentado neste trabalho, através de e numeração limitada.

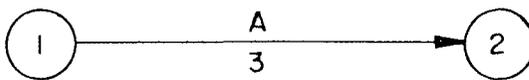


Figura 1

Atividade original A com duração de 3 dias

⁽³⁾ DAVIS, E. W. e HEIDORN, G. E. Op.cit., p. 11.

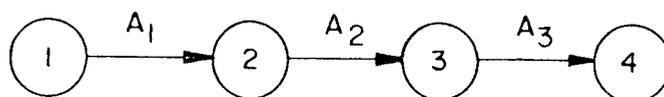


Figura 2

Atividades representantes da atividade original A, com duração unitária

Ainda pode acontecer que alguma atividade possa ser interrompida, após um período de tempo x depois de iniciada, como mostram as figuras 3 e 4. A atividade B subdivide-se em B_1 e B_2 . A atividade B_1 passa a ser antecessora de B_2 .

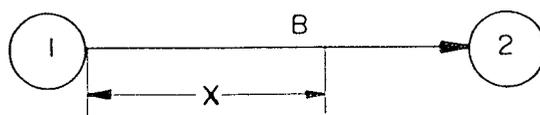


Figura 3

Atividade original B com duração de 3 dias interrompida após $x = 2$ dias

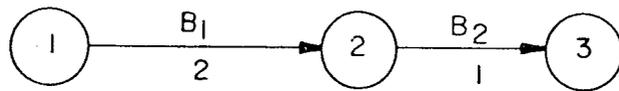


Figura 4

Atividades B_1 e B_2 representantes da atividade B com durações de 2 e 1 dia respectivamente

Existem outros casos em que a disponibilidade de recursos pode variar em determinados períodos do projeto. Os recursos requeridos por atividade também podem variar em determinados períodos durante a execução de uma atividade.

Outras situações particulares podem ocorrer na programação de algum projeto específico. Nestes casos são estabelecidas outras restrições, além das apresentadas acima, de acordo com o caso particular. Todavia, a formulação apresentada aqui engloba grande parte dos problemas, normalmente encontrados na prática.

2.2. Características dos Projetos Programados

Os problemas de programação de projetos com restrição de recursos são muito frequentes. Qualquer empreendimento que seja dirigido para um objetivo definido, no qual os itens relacionados para atingir esta finalidade sejam claramente

definidos com início e término, gastem tempo e recursos, sendo estes limitados, pode ser programado pelas técnicas de programação com restrição de recursos.

Estes projetos podem conter várias centenas ou até milhares de atividades separadas, que são realizadas numa determinada seqüência, respeitando as restrições.

Normalmente, as atividades necessitam para a sua execução dos seguintes recursos: Mão de obra, equipamento e dinheiro. O tempo necessário para a execução da atividade varia com a taxa de recursos aplicados.

Se para um projeto pequeno, for importante a redução do tempo de término, pode-se utilizar a programação com restrição de recursos, embora, normalmente, esta técnica seja utilizada para projetos maiores classificados como projetos grandes. Exemplos destes projetos são: a construção de uma barragem, implantação de uma fábrica, grandes projetos de manutenção, construção de prédios, etc...

Podem existir situações em que um conjunto de projetos utilizem os mesmos recursos na sua execução. São os chamados projetos múltiplos. Quando os recursos necessários para executar o conjunto de projetos forem limitados, podem ser utilizadas as técnicas de programação com restrição de recursos, sendo necessário fixar eventos iniciais e finais comuns a todos os projetos do conjunto. Os projetos múltiplos podem ocorrer num sistema de produção, quando o mesmo equipamento é necessário na confecção de vários produtos.

2.3. Limitação de Recursos

Os projetos são constituídos de três etapas: planejamento, execução e controle.

A existência de recursos limitados para terminar um projeto em um tempo fixado é constatada na fase preliminar do planejamento. Inicialmente, os diferentes tipos de recursos necessários à execução do projeto são especificados, entre estes poderão existir recursos limitados e ilimitados. Para efeitos de aplicação das técnicas de programação com recursos restritos são considerados, nos cálculos, apenas os recursos limitados.

Os casos mais frequentes de recursos limitados são os recursos humanos. Quando são necessários diferentes tipos de mão de obra especializada para executar as atividades de um projeto, cada tipo de especialidade é classificada como sendo um recurso diferente. Assim, se para executar uma atividade de um projeto de construção há necessidade de pedreiros e carpinteiros, cada especialidade destas representa um tipo de recurso.

A quantidade de cada tipo de recurso, necessária para executar uma atividade, é normalmente chamada tamanho de grupo.

A determinação do tamanho de grupo para cada tipo de recurso, na fase de planejamento da atividade, é realizada visando a maior eficiência do trabalho, evitando recursos ociosos.

Quando a taxa de recurso aplicada numa atividade for aumentada, a duração desta pode diminuir e o custo dos

recursos nela aplicados vai aumentar. Para efeitos de programação, em alguns projetos, as atividades podem apresentar opções nas quantidades de recursos aplicadas para diferentes durações. Estas atividades serão programadas recebendo um dos tamanhos de grupo e o tempo correspondente. A seleção deste tamanho de grupo é feita por critérios estabelecidos pelo método de programação utilizado.

2.4. Custos Avaliados na Programação de Projetos

A programação de projeto pode influenciar (dois) tipos de custos: os diretos e os indiretos. Os custos diretos são associados com as atividades, os quais aumentam se as atividades são aceleradas.

Os gastos dos recursos distribuidos para cada atividade são custos diretos, tais como: dispêndio com manutenção corretiva de equipamentos, gastos com energia, com salários e horas extras.

Os custos indiretos são associados com o projeto, os quais decrescem, se a duração total do projeto for reduzida. Exemplos de custos indiretos são os: gastos gerais dos serviços de administração, gastos fixos e de aluguel dos equipamentos.

O custo total do projeto é otimizado no método do caminho crítico. Para a programação de projetos com restrição de recursos, o custo total do projeto também é otimizado. Este processo de otimização é feito indiretamente. Conforme foi

mencionado anteriormente, o objetivo da programação com restrição de recursos é otimizar a duração do projeto, através da sua redução. Contudo, o custo total do projeto inclui todos os custos indiretos e gerais associados à execução completa dos serviços, e estes são proporcionais ao tempo do projeto. Em consequência, o custo total também é otimizado, quando se aplicam os métodos de programação com restrição de recursos.

3. MÉTODOS EXISTENTES PARA PROGRAMAR PROJETOS

Neste capítulo são apresentadas resumidamente as técnicas de programação de projetos existentes. Iniciando pelo método PERT/CPM⁽⁴⁾, que são de fundamental importância para este estudo, porque servem de base para os métodos de programação com restrição de recursos.

As definições relevantes para o estudo são a bordadas a seguir.

São apresentados ainda os métodos existentes para programar projetos com restrição de recursos. Sendo abordados com maiores detalhes os métodos heurísticos.

3.1. Técnicas PERT/CPM

A programação de projetos através das técnicas PERT/CPM apareceu nos fins da década de 50 e rapidamente, receberam uma grande aceitação. Ambas utilizam um projeto gráfico, denominado rede, ou diagrama de flechas, que ordena as atividades e se constitui na base destas técnicas. Também são comuns aos dois modelos o cálculo do caminho crítico e das folgas das atividades.

⁽⁴⁾ PERT - Técnica de Revisão e Avaliação de Programas
CPM - Método do Caminho Crítico

Por razões históricas, os modelos foram desenvolvidos independentemente, e aplicam um tratamento diferente ao problema. Contudo, cada um deles tem sua importância, sendo utilizados para resolução de problemas distintos.

Estes métodos, como foi citado, consideramos recursos distribuídos para as atividades como sendo suficientes para executá-las na primeira data de início.

3.1.1. Cálculo do caminho crítico

A duração de um projeto é determinada com base na sua rede. O tempo para executar o projeto é o somatório dos tempos necessários para executar todas as atividades. Então, sendo conhecida a rede do projeto e a duração das atividades, pode ser determinado o tempo mínimo requerido para o término deste projeto. A duração é indicada pelo trajeto que proporcionar o maior dos tempos. Este percurso é chamado caminho crítico e o tempo gasto para executá-lo corresponde a duração total do projeto.

As atividades do caminho crítico são operações do projeto que devem ter um tratamento especial, evitando-se atrasos, pois, a observância rigorosa de suas datas de início e término depende o cumprimento da data de conclusão do projeto.

O cálculo do caminho crítico é muito importante para a aplicação dos modelos de programação com restrição de recursos. Quando se utilizam modelos heurísticos para encontrar esta programação, normalmente as atividades do caminho crítico têm prioridades, ao serem programadas, sobre as outras atividades.

A figura 5 apresenta uma rede PERT/CPM indicando as atividades do caminho crítico, que são as atividades A e B. Os números sob as flechas representam as durações das atividades em dias. A duração do projeto é 8 dias.

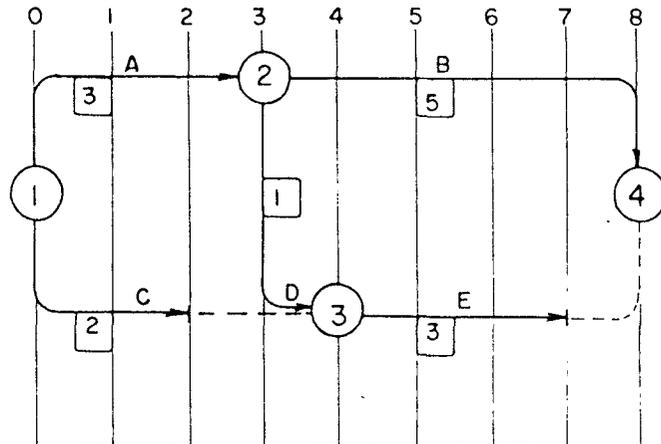


Figura 5

Rede PERT / CPM

3.1.2. Folgas das atividades

A distribuição das atividades numa rede PERT/CPM pode acarretar espaços de tempo entre o término de uma atividade e o início permitido para a atividade ou atividades sucessoras imediatas. Este tempo ocioso é denominado folga de uma atividade.

A folga total representa o atraso máximo que uma atividade pode ter, sem alterar a data de término do projeto.

Sendo: $FT_j = UDI_j - PDI_j$

onde: FT_j = folga total da atividade j

UDI_j = última data de início da atividade j , ou seja, a última data que uma atividade pode começar sem afetar a data de término do projeto.

PDI_j = primeira data de início da atividade j , ou seja, o menor tempo possível que uma atividade pode começar sem alterar as restrições de precedência.

A determinação de folga total da atividade é um fator importante na formulação do modelo apresentado neste trabalho.

3.1.3. Cálculos probabilísticos de tempo para o PERT

O modelo PERT foi desenvolvido para as indústrias aeroespaciais, em especial nos programas de pesquisa e desenvolvimento. Estas indústrias exigiam a utilização de tecnologia nova e a programação de atividades inéditas. Existia uma grande incerteza sobre o tempo necessário para executar cada atividade específica.

O modelo supõe que a relação entre as atividades e a rede são bem definidas, mas existem incertezas na duração das atividades. Neste caso, supõe-se conhecida a probabilidade para executar determinada atividade num certo tempo.

Quando a distribuição de probabilidades relacionada com os tempos de execução das atividades for conhecida, o valor esperado e a variância do tempo de execução da atividade

podem ser calculados. A partir destes cálculos é determinado o tempo total esperado do projeto.

A probabilidade do término do projeto ocorrer dentro de um tempo pré-estabelecido pode ser determinada quando se aplica o PERT.

3.1.4. Método do caminho crítico

O método do caminho crítico, desenvolvido originalmente para resolver problemas de programação industrial, é mais relacionado com os problemas de custos de programação do projeto e com a forma de reduzi-los ao mínimo. Trata-se de um modelo determinístico que permite introduzir variações nos tempos de duração das atividades, porém não como consequência de fatores aleatórios, e sim como causa de resultados planejados e previstos referentes à distribuição de recursos.

O modelo CPM, ao contrário do PERT, é aplicado frequentemente a projetos que utilizam materiais normalizados, cujas propriedades são bem conhecidas, baseados numa tecnologia aproximadamente estável. Os projetos de construção são bastante indicados para a utilização do método CPM, pois apresentam as características apropriadas para o emprego desta técnica.

O CPM supõe que a maioria das durações das atividades podem reduzir-se quando forem distribuídos recursos extraordinários para executá-las. Naturalmente, quando isto ocorre o custo direto da atividade aumentará. Pode-se obter um menor custo total, acelerando algumas atividades e mantendo outras no ritmo normal. Para que isto ocorra, as atividades que possuem

folga podem ser realizadas no ritmo normal, com menos recurso distribuído. Assim, não haverá necessidade de acelerar todas as atividades para diminuir a duração do projeto. São aceleradas apenas as atividades do caminho crítico. A solução para este problema é obtida por intermédio de métodos analíticos. Wiest e Levy ⁽⁵⁾ apresentam a formulação deste problema para Programação Linear.

3.2. Técnicas para Administração de Recursos de Projetos

A administração de recursos é considerada um dos aspectos mais importantes no processo administrativo. Na programação de projetos este aspecto é de vital importância.

Depois de selecionada a melhor seqüência de atividades e estabelecido o projeto, parte-se para a determinação dos recursos requeridos para executar cada atividade. Estas etapas produzem um plano operacional. Determina-se a seguir a disponibilidade dos recursos necessários para completar o projeto e então, é feita a distribuição destes recursos, sem exceder os limites. O resultado deste procedimento será a programação das datas de início de todas as atividades do projeto.

Retornando à parte de distribuição dos recursos para as atividades, constata-se que podem ocorrer diferentes tipos de problemas na escolha da melhor programação ,

(5) WIEST, Jerome D. e LEVY, Ferdinand K., A management guide to PERT/CPM. pp. 73 - 75.

dependendo da natureza do projeto, do planejamento organizacional e da disponibilidade dos recursos.

Quando os recursos são restritos, estes problemas usualmente tomam a forma do programa de nivelamento de recursos ou programa de alocação de recursos. Será visto a seguir detalhadamente cada um destes programas.

3.2.1. Programa de nivelamento de recursos

Para alguns projetos a data final é pré-estabelecida e inadiável, os recursos são suficientes para programá-las dentro deste intervalo de tempo, no entanto, são distribuídos em parcelas iguais ao longo do tempo de duração do projeto. Esta distribuição homogênea causa uma restrição de recursos.

Existem situações em que as restrições de precedência permitem que as atividades sejam programadas para iniciar num determinado período, mas os recursos disponíveis são insuficientes.

Esta situação é um problema típico de nivelamento de recursos. Um exemplo deste caso é apresentado na figura 6, onde aparece um projeto simples de 6 atividades, programadas para sua primeira data de início considerando a disponibilidade ilimitada de recursos para executá-las, e o gráfico referente as variações de recursos de mão de obra por período.

O tamanho de grupo, ou seja, a mão de obra requerida para executar cada atividade é de 1 operário.

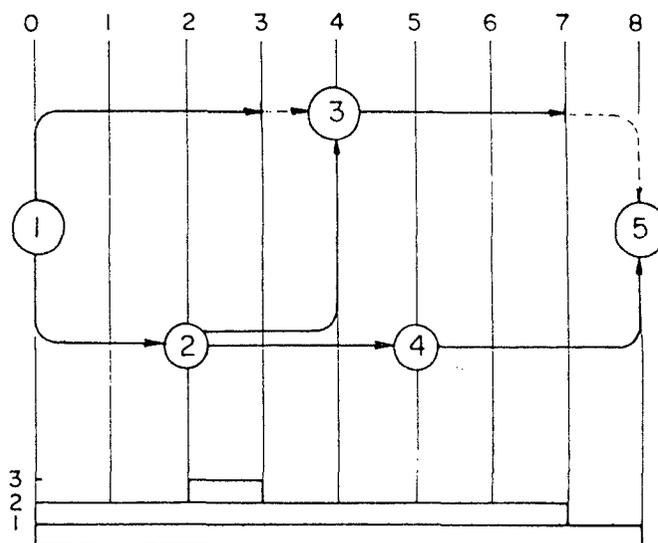


Figura 6

Programação para recursos ilimitados

Para programar o projeto da figura 6 aplica-se o programa de nivelamento de recursos. Este programa tenta reduzir os picos de recursos requeridos e igualar, período por período, estes recursos, dentro do tempo pré-estabelecido para a realização do projeto. As atividades que causam os picos na curva de demanda de recursos são adiadas para períodos além destes acúmulos. Neste caso as folgas das atividades diferem das folgas calculadas na programação para recursos ilimitados, contudo, a duração do caminho crítico permanece a mesma, mantendo a data final do projeto inalterada.

Levy⁽⁶⁾ desenvolveu um método comumente chamado MS² (Multi-Ship, Multi-Shop) e Martino⁽⁷⁾ desenvolveu o MAP (Método de Alocação de Recursos), ambos heurísticos, para obter programações com recursos nivelados.

Na figura 7 está apresentada a programação final com recursos nivelados, como também o gráfico de nível de utilização de recursos do projeto proposto. No exemplo citado ocorreu um nivelamento ótimo de recursos, o que nem sempre ocorre na prática.

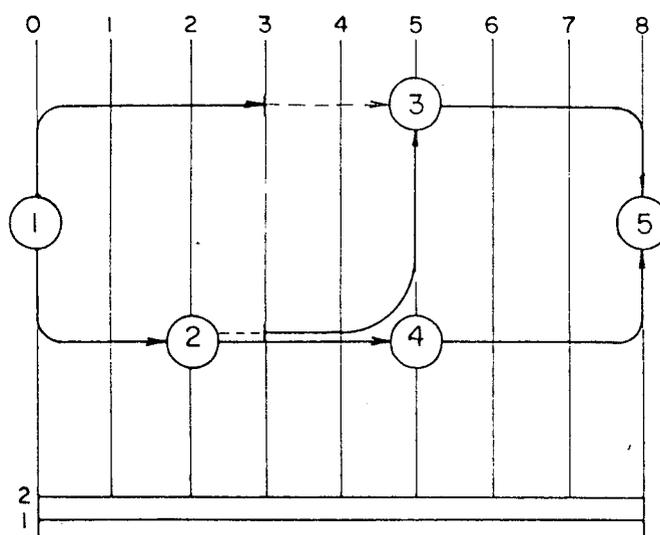


Figura 7

Programação para recursos nivelados

(6) LEVY, F. K., THOMPSON, G. L. e WIEST, J. D.- Multi-Ship, Multi-Shop, Workload Smoothing Program-Naval Research Logistics Quarterly.

(7) MARTINO, R. L., Resources Management. pp. 21 - 71.

O programa de nivelamento de recursos pode ser utilizado para qualquer tipo de projeto, mesmo que não haja escassez de recursos, pois, este método permite uma distribuição mais econômica dos recursos ao longo do período de execução do projeto. Racionalizando a distribuição dos recursos, evitam-se gastos extras que podem ocorrer no período de acúmulo da demanda de recursos.

3.2.2. Programa de alocação de recursos

Os programas de alocação de recursos, também chamados programação para recursos restritos, foram desenvolvidos para resolver o problema formulado no capítulo 2 deste trabalho.

Como foi mencionado o problema aparece quando a quantidade de recursos disponível por período é limitada; consequentemente as atividades só podem ser programadas nos períodos em que existir a quantidade de recursos suficientes, mesmo que o efeito seja o atraso da data de término do projeto.

Este caso é praticamente uma extensão do nivelamento de recursos.

O problema, em síntese, consiste em procurar uma programação para o projeto que minimize a sua duração, respeitando as restrições de recursos e precedência.

Programar as atividades sem exceder nenhuma das disponibilidades de recursos, nem violar nenhuma relação de precedência é um problema difícil, inclusive para projetos relativamente modestos, por que há um grande número de combinações para os tempos de início das atividades, cada uma delas representando

uma programação diferente. Martino⁽⁸⁾ ilustra esta dificuldade do problema, apresentando um projeto de 8 atividades, cada uma delas com necessidade de recurso diário unitário. A duração do projeto é de 9 dias e o recurso disponível diário é de 2 unidades. Este projeto apresentou 58 maneiras de ser programado.

Sendo assim, a solução ótima para um projeto é impossível de ser encontrada pela inspeção ou pela completa enumeração de possíveis programas.

A programação para recursos limitados é frequentemente empregada para recursos financeiros, quando a execução de um projeto, por imposição de financiamento, fica sujeita ao fornecimento dos recursos em prazos estabelecidos.

Além desta situação, esta técnica tem grande utilidade para problemas de escassez de mão de obra.

3.3. Métodos Heurísticos para Programar Projetos com Restrição de Recursos

A programação ótima para projetos com restrição de recursos pode ser encontrada somente para problemas pequenos e irreais com valores práticos irrelevantes. Para resolver problemas maiores, existe uma variedade de algoritmos heurísticos disponível. Neste caso, os procedimentos permitem encontrar solu-

(8) MARTINO, R. L. Op. cit., p. 29.

ções eficientes, mas não se tem garantias que a solução encontrada seja a ótima. Contudo, os procedimentos heurísticos são atualmente o único meio prático para obter soluções viáveis para os problemas complexos do tipo comumente encontrado nas grandes indústrias.

Os métodos heurísticos são constituídos de regras programadas que distribuem prioridades para as atividades que estão competindo pelos mesmos recursos num determinado período. As atividades com prioridades mais altas são programadas para o período, dentro da disponibilidade de recursos, as demais são adiadas para o período seguinte. Estes critérios variam de um método para outro. Os critérios mais utilizados consideram os seguintes fatores:

- a) Acréscimo na duração do projeto quando se atrasa uma atividade
- b) Última data de término (UDT) das atividades
- c) Demanda de recurso
- d) Número de atividades programadas em cada intervalo
- e) Folga das atividades
- f) Duração de cada atividade

Além destes, outros fatores são adotados para estabelecer prioridades, na tentativa de se encontrar melhores soluções.

A figura 8 apresenta um projeto simples com

restrição de recursos. Consta na referida figura a programação do projeto para recursos ilimitados com 7 dias de duração e o gráfico do nível de recursos. Para simplificar considera-se que o recurso de mão de obra necessário diariamente para cada atividade é de um operário, sendo disponíveis diariamente 2 operários.

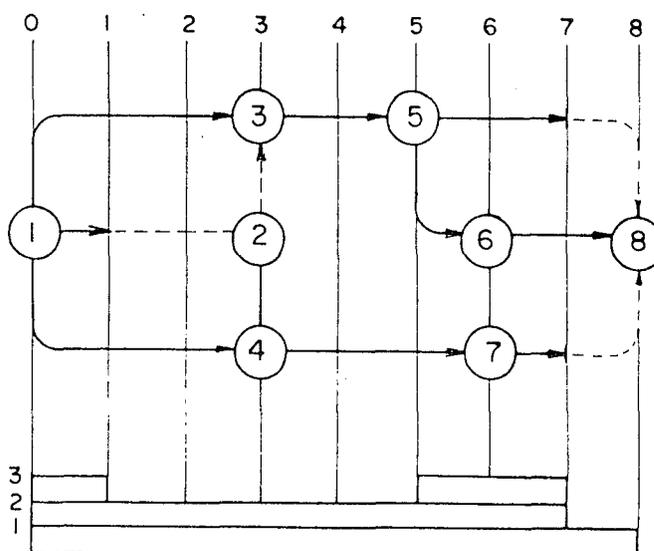


Figura 8

Programação para recursos ilimitados

O procedimento heurístico que emprega o valor das folgas das atividades, como fator para distribuir as prioridades para programá-las, foi utilizado em vários modelos e pode ser resumido da seguinte forma:

Os recursos são distribuídos em série, dia a dia. São programadas todas as atividades possíveis para o primeiro dia, ocorre o mesmo para o segundo dia e assim por diante.

Quando várias atividades competem pelos mesmos recursos, tem preferência as atividades com menores folgas.

Com a aplicação desta regra heurística para o exemplo simples apresentado na figura 8 pode ser obtida a programação final para recursos limitados e o gráfico de nível de recursos correspondente, vistos na figura 9.

Este exemplo pela sua simplicidade, esclarece totalmente quais são as características básicas do problema de programação com restrição de recursos e dos seus meios de solução. Os projetos reais são deste tipo, mas apresentam maior número de atividades e vários recursos restritos.

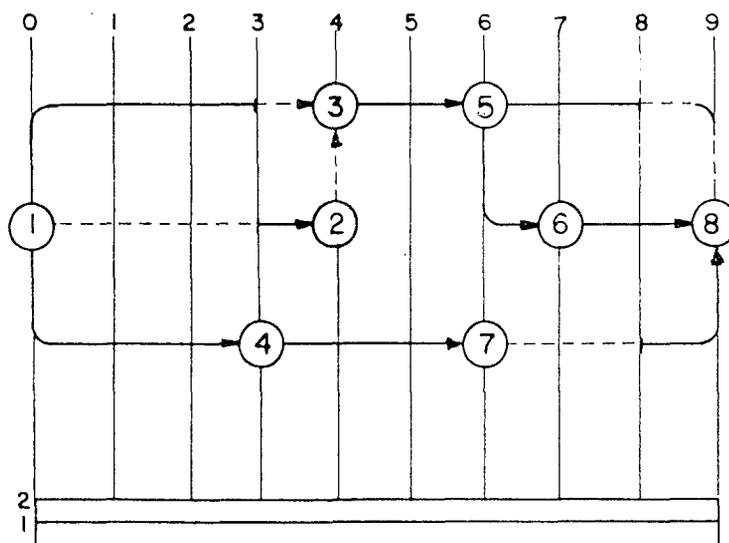


Figura 9

Programação para recursos limitados

Wiest⁽⁹⁾ desenvolveu o modelo heurístico SPAR-1 (Roteiro Programado para Alocação de Recursos) que se destina a programar projetos com restrição de recursos. O modelo possibilita distribuir os recursos entre as atividades, criando várias soluções para o mesmo projeto e selecionando entre elas a programação para o menor custo. Este modelo foi aplicado a grandes projetos, inclusive na indústria aero-espacial, com sucesso.

Thesen⁽¹⁰⁾ também desenvolveu um modelo heurístico para programar projetos com restrição de recursos, onde o desempenho das prioridades na programação foi expandido. Ao invés de determinar somente a ordem em que as atividades são consideradas para a programação num dado instante, determina também a combinação de atividades a serem programadas neste instante.

Thesen apresentou um processo para avaliar a eficiência dos modelos heurísticos levando em conta a eficiência computacional e analítica e os custos do programa.

3.4. Divisão dos Procedimentos Heurísticos em Classes

Os problemas com restrições múltiplas de recursos são resolvidos por duas classes de procedimentos heurísticos, ambas fazendo uso de regras de prioridade: O método paralelo, que forma um único programa, e o método de amostragem, que forma um conjunto de programas usando técnicas probabilísticas e seleciona o melhor programa desta amostra.

⁽⁹⁾ WIEST, Jerome D. A heuristic model for scheduling large projects with limited resources. Management Science. pp. B.359 - 76 .

⁽¹⁰⁾ THESEN, Arne. Heuristic scheduling of activities under resource and precedence restrictions. Management Science . pp. 412 - 22.

Cooper⁽¹¹⁾ constatou através de testes experimentais que a escolha da regra de prioridade é muito importante no método paralelo, sendo que para o método de amostragem a escolha das prioridades não é significativa, embora afete a distribuição da amostra.

Esta seção apresenta um resumo das duas classes heurísticas, tomando como base as formulações apresentadas por Cooper⁽¹²⁾ para os dois tipos de procedimentos.

Definições :

C_j representa o conjunto das atividades antecessoras da atividade j e D_j representa a sua data de início.

Uma programação parcial PR_X contém a especificação das datas de início das atividades do conjunto X . Onde X é o conjunto das atividades do projeto que já foram programadas. Se uma atividade j pertence a X , o conjunto das suas atividades antecessoras C_j também pertencem, respeitando assim as restrições de precedência.

Para aumentar o tamanho do PR_X , determina-se uma data de início D_j para uma atividade j , satisfazendo as restrições, a atividade j não pertence a X , mas todas as suas antecessoras devem pertencer a este conjunto.

(11) COOPER, Dale F., Heuristic for scheduling resource - constrained projects: An experimental investigation. Management Science. pp. 1186 - 94.

(12) Id.

As atividades que satisfazem estas restrições estão disponíveis para programação. AD_X , o conjunto destas atividades disponíveis, é definido como:

$$AD_X = \{ j / j \notin X, j^* \in X, \text{ para todo } j^* \in C_j \}$$

Para uma programação parcial PR_X , define-se I_j como sendo a data mais cedo para que a atividade j pertencente a AD_X possa começar sem transgredir as restrições. Quando uma atividade j de AD_X é iniciada, ela passa a integrar o conjunto X das atividades programadas com tempo de início $D_j = I_j$.

3.4.1. Método paralelo

Os métodos paralelos criam um programa por intermédio de uma série de programas parciais.

O processo geral é o seguinte:

1^a Etapa: Iniciar, com uma programação parcial vazia
($X = \emptyset$)

2^a Etapa: Formar AD_X .
Se $AD_X = \emptyset$, todas as atividades já foram programadas, parar.
Caso contrário, passar à 3^a etapa.

3^a Etapa: Escolher uma atividade j de AD_X .

4^a Etapa: Programar a atividade j escolhida
Achar D_j : $D_j := I_j$
Adicionar j ao conjunto das atividades programadas: $X := X \cup \{ j \}$, ir para 2^a etapa.

Na 3^a etapa, uma atividade é escolhida de acordo com uma regra de prioridade. Está associada a cada atividade $j \in AD_x$ uma prioridade $P(j)$. A atividade j com a máxima prioridade é selecionada para programação. Diferentes regras de prioridades são utilizadas para produção de programação pelos métodos heurísticos, baseando-se em fatores próprios para cada método.

3.4.2. Método de amostragem

Os métodos de amostragem formam um conjunto de possíveis programas usando técnicas aleatórias, e escolhem a melhor programação obtida. Utilizam uma amostra pré-fixada de tamanho V . Sendo que V representa o número de programas formados para promover a seleção final. O processo geral pode ser descrito sucintamente como segue:

- 1º Passo: Iniciar, com o $n=1$ (n estabelece a contagem dos programas formados)
- 2º Passo: Formar um possível programa IB_n .
- 3º Passo: Se n for menor do que V , fazer $n := n+1$
ir para o 2º passo.
Caso contrário, ir para o 4º passo.
- 4º Passo: Selecionar o melhor programa de IB_1, IB_2, \dots, IB_V .
Parar.

O 2º Passo, ou seja, formar um programa possível, é similar ao método paralelo e, como naquele método, a seleção da atividade de AD_x a ser programada é o passo fundamental. O

método usado aqui é baseado na seleção aleatória com as prioridades usando fatores como peso, a probabilidade da atividade j de AD_x ser escolhida para programação em qualquer estágio é dada por:

$$\text{Prob} \{ \text{da atividade } j \text{ ser selecionada} \} = P(j) / \sum_{a \in AD_x} P(a)$$

onde: $\sum_{a \in AD_x} P(a)$ = somatório dos valores das prioridades das atividades disponíveis para começar num determinado período.

3.5. Teste e Avaliação de Procedimentos Heurísticos

Os algoritmos heurísticos podem ser comparados e avaliados em muitos níveis diferentes, usando uma grande variedade de diferentes critérios de desempenho. Contudo, devido a escassez e diversidade de informações relacionadas com desempenho, uma comparação em profundidade de algoritmos heurísticos baseada nos dados de desempenho publicados, não é possível atualmente.

Normalmente estes modelos são avaliados por dois critérios fundamentais, que são eficiência computacional e analítica.

A eficiência computacional não oferece padrão para fazer as comparações, porque diferentes computadores são usados para testar os modelos. Algumas comparações são feitas com base na contagem das operações elementares, mas há dúvida sobre a validade deste teste, porque esta contagem não pode ser feita

com muita precisão.

A eficiência analítica é referente a habilidade dos algoritmos heurísticos para produzirem programações com resultados tão satisfatórios quanto aqueles produzidos por algoritmos exatos, resolvendo o mesmo problema. Estes testes apresentam uma limitação, porque o conhecimento da solução ótima, necessário para promover o teste, só é possível para projetos pequenos. Não sendo possível determinar a eficiência analítica de um modelo na resolução de projetos maiores.

São utilizadas as seguintes aproximações para promover estes testes:

a) Teste de laboratório:

São utilizados nos testes projetos pequenos que permitam a determinação prévia das soluções ótimas. O modelo que está sendo testado fornece programações para estes projetos e os resultados são comparados com as soluções ótimas.

b) Teste de campo:

O modelo é aplicado para uma variedade de problemas de programação do mundo real, possibilitando estudar o seu comportamento quando sujeito aos vários meios de programação e restrição.

c) Teste comparativo:

São comparadas as programações formadas por um determinado modelo com aquelas formadas por outros modelos para os mesmos projetos.

Davis e Petterson⁽¹³⁾ realizaram estudos comparativos com oito tipos de procedimentos heurísticos e concluíram através dos testes que o procedimento heurístico mais eficiente é aquele que considera a folga das atividades como base para a atribuição de prioridades para programação. Neste caso, foram consideradas mais eficientes os heurísticos que encontraram a solução ótima para o maior número de projetos testados.

3.6. Métodos Analíticos Utilizados para Programar Projetos com Restrição de Recursos

As técnicas analíticas podem ser úteis numa formulação mais rigorosa do problema de restrição de recursos. Contudo, são impraticáveis para resolver os problemas reais, porque os modelos se tornam muito complexos e extensos para a resolução de projetos maiores, ou porque o tempo de computação necessário para encontrar a solução é muito grande, ou ambos.

Os modelos analíticos podem ser classificados nos dois tipos seguintes:

a) Modelos que examinam todas as possíveis formas que um projeto pode assumir, pesquisando uma solução ótima sem necessariamente exibir a formulação matemática do modelo. Estes modelos fazem uma enumeração das possíveis programações, mas no momento só programam projetos relativamente pequenos. As pesquisas continuam na tentativa de tornar estes modelos viáveis para projetos maiores.

⁽¹³⁾ DAVIS, Edward W. e PATTERSON, James H., A comparason of heuristic and optimum solutions in resource - contrained project scheduling. Management Science. pp. 944 - 55.

Davis e Heidorn⁽¹⁴⁾ desenvolveram um algoritmo para solucionar o problema, apresentando entre as vantagens a possibilidade de variar os recursos requeridos durante a execução das atividades.

Esta aproximação é uma forma de enumeração limitada, empregando técnicas desenvolvidas originalmente para solucionar problemas de balanceamento da linha de montagem. A solução encontrada é a de mínima duração. Contudo a medida em que o número de atividades do projeto aumenta, a solução por enumeração torna-se impossível.

b) Modelos que consideram o projeto como uma coleção de variáveis e relações entre estas variáveis e tentam determinar a magnitude destas variáveis que otimize uma dada função. O resultado desta abordagem é uma variedade de modelos de programação matemática.

A solução destes problemas só é possível atualmente para projetos pequenos. Contudo, espera-se que, através das pesquisas que estão se realizando, no futuro estes métodos conduzam a soluções satisfatórias.

⁽¹⁴⁾ DAVIS, E. W. e HEIDORN, G. E. Op. cit., p. 11.

4. MODELO PROPOSTO

Este capítulo apresenta um modelo heurístico capaz de encontrar programações para projetos com restrição de recursos. Procurando determinar uma programação que proporcione a menor duração do projeto, ou seja próxima desta, respeitando as restrições de precedência e de recursos das atividades.

O modelo desenvolvido é simples e de fácil utilização, podendo ser útil como meio alternativo para formar programações de projetos. Forma uma programação por intermédio de uma série de programações parciais, pertencendo portanto a classe dos métodos paralelos de acordo com a classificação apresentada por Cooper⁽¹⁷⁾.

As atividades que devem ser programadas para cada período são selecionadas a partir de critérios de prioridades a elas associados. Estes critérios são baseados em fatores que conduzem à programação de menor duração. Para atingir este objetivo são utilizados os procedimentos heurísticos conhecidos como regra da folga mínima e regra da mínima UDT (última data de término) como critério na distribuição das prioridades. Ambas foram testadas por Davis e Patterson⁽¹⁸⁾ juntamente com outros heu -

(17) COOPER, Dale F., Op. cit. p. 36.

(18) DAVIS, Edward W. e PATTERSON, Jamis H. Op. cit. p. 41.

rísticos considerados eficientes. Os resultados dos testes comparativos mostraram que a regra da mínima folga é o procedimento heurístico que permite encontrar no maior número de casos a programação ótima, seguida pela regra da mínima UDT.

Com base nos resultados destes testes comparativos, as duas regras heurísticas citadas foram incluídas no modelo proposto. A elas foram ainda associados os critérios da restrição tecnológica de precedência e da condição de ininterrupção das atividades, após serem iniciadas.

O modelo pode formar programação para projetos que possuam um ou vários recursos limitados.

4.1. Definições Básicas

As variáveis utilizadas no desenvolvimento do modelo são as seguintes:

a) Variáveis para descrever as atividades e os recursos atribuídos:

S = Conjunto de todas as atividades do projeto.

j = Código de seqüência de atividade.

d_j = Duração da atividade j .

r_{ij} = Unidades de recurso i necessários para executar a atividade j por período, $i = 1, 2, \dots, m$.

PDI_j = Primeira data de início da atividade j .

PDT_j = Primeira data de término da atividade j .

UDI_j = Última data de início da atividade j .

- UDT_j = Última data de término da atividade j .
- F_j = Folga total da atividade j , calculada num determinado período.
- C^*_j = Conjunto das atividades imediatamente antecessora de j .
- V^*_j = Conjunto das atividades imediatamente sucessoras de j .
- I_j = Data de início da atividade j na programação considerando as restrições de recursos.
- T_j = Data de término da atividade j na programação para as restrições de recursos.
- R_i = Limite máximo de recurso i disponível por período.
- P_j = Grau de prioridade para a atividade j ser programada num determinado período.
- z = Atividade que está sendo considerada para efeito de programação, ou seja, a primeira atividade da lista de prioridades.
- $z + 1$ = Atividade que segue a atividade z na lista de alocação de prioridades.

b) Variáveis relativas ao modelo:

- t = Duração total do projeto em períodos.
- k = Período considerado de programação, $k = 1, 2, \dots, t$.
- Q_i = Unidades de recurso i disponível no período considerado. Esta quantidade de recurso é atualizada toda vez que uma atividade é programada no período.

- Y = Conjunto das atividades que já foram programadas considerando as restrições de recursos.
- AD_k = Conjunto das atividades disponíveis para começar no período k, considerando apenas as restrições de precedência.
- AP_k = Conjunto de todas as atividades programadas para o período k.
- AV_k = Conjunto de atividades disponíveis para começarem no período k, para as quais já foram verificados se os recursos disponíveis são suficientes para programá-las ou não.
- CT = Custo total do projeto.
- C = Custo por período referente ao projeto (este custo é considerado constante).
- C_i = Custo unitário do recurso i por período.
- N_{ik} = Demanda total de recurso i no período k, após serem programadas todas as atividades do período k.

4.2. Desenvolvimento do Modelo

Para promover a apresentação das diversas partes do modelo, este foi dividido em fases. Cada fase representa um conjunto de cálculos ou procedimentos realizados.

Inicialmente é apresentado o algoritmo heurístico utilizado e a seguir é feita uma descrição detalhada dos procedimentos adotados.

4.2.1. Fases do algoritmo heurístico

1^a Fase: Montagem da programação inicial, considerando apenas a restrição de precedência.

Calcular para todo j :

$$PDI_j = 0 \quad \text{quando} \quad C^*_j = \emptyset$$

$$PDI_j = \text{máximo} (PDT_{j^*}) \text{ de todos } j^* \in C^*_j$$

$$PDT_j = PDI_j + d_j$$

$$UDT_j = \text{mínimo} (UDI_{j^*}) \text{ de todos } j^* \in V^*_j$$

$$UDI_j = UDT_j - d_j$$

$$UDT_j = t \quad \text{quando} \quad V^*_j = \emptyset$$

$$F_j = UDI_j - PDI_j$$

2^a Fase: Início da programação considerando os recursos limitados.

Fazer:

$$k := 1$$

$$Y := \emptyset$$

$$Q_i := R_i$$

3ª Fase: Relação das atividades que podem começar no período k.

Fazer:

$$AD_k = \{ j : j \in S \text{ e } PDI_j = k \}$$

4ª Fase: Distribuição de prioridades entre as atividades disponíveis para programação.

Para quaisquer $j \in AD_k$ e $j^* \in AD_k$,

fazer $z := j$ e $z + 1 := j^*$.

Pelo critério da folga mínima,

se $F_j < F_{j^*}$ então $P_j > P_{j^*}$.

Pelo critério da mínima UDT,

se $F_j = F_{j^*}$ e $UDT_j < UDT_{j^*}$ então $P_j > P_{j^*}$.

Pelo critério do código de seqüência,

se $F_j = F_{j^*}$ e $UDT_j = UDT_{j^*}$ e $j < j^*$ então $P_j > P_{j^*}$.

Se para algum dos critérios, $P_j > P_{j^*}$, permanece $z := j$ e $z + 1 := j^*$. Caso contrário, fazer $z := j^*$ e $z + 1 := j$.

5ª Fase: Verificar se existem recursos suficientes para programar as atividades disponíveis para começar:

Verificar para a atividade com o máximo P_j ou z

se $Q_i \geq r_{ij}$ para todo i . Em caso afirmativo, fazer:

$$Q_i := Q_i - r_{ij} \text{ e } AP_k := AP_k \cup \{ j \} \text{ e}$$

armazenar os tempos de início e término

$$I_j := k$$

$$T_j := k + d_j$$

Se $Q_i < r_{ij}$ para algum i , fazer

$$AD_{k+1} := AD_{k+1} \cup \{j\}$$

6^a Fase: Fazer $AV_k := AV_k \cup \{j\}$

Se $Q_i = 0$ ou $AV_k = AD_k$, prosseguir.

Caso contrário, fazer

$$z := z + 1 \quad e$$

voltar para a 5^a Fase.

7^a Fase: Atualização dos recursos e do conjunto de atividades programadas

$$Q_i := R_i - \sum_j r_{ij} \quad \text{para todo } j \text{ com } I_j \leq k < T_j$$

$$Y := Y \cup AP_k$$

8^a Fase: Passagem para o período seguinte

Se $Y \neq S$, fazer: $k := k + 1$ e

voltar para a 3ª Fase.

Caso contrário, prosseguir.

9ª Fase: Cálculo do custo do projeto

$$CT = C \times t + \sum_{k=1}^t \sum_{i=1}^m C_i \times N_{ik}$$

O programa está completo.

Além dos procedimentos vistos acima, o modelo pode apresentar outro procedimento opcional que será descrito na próxima seção.

4.3. Descrição Detalhada dos Procedimentos Heurísticos Adotados

Paralelamente a descrição dos procedimentos heurísticos do modelo, será apresentado também um exemplo de resolução do problema de restrição de recursos utilizando este modelo.

4.3.1. Parâmetros de entrada do programa

O modelo pode fornecer programações para um projeto ou para um conjunto de projetos que utilizem os mesmos recursos. Podendo ser aplicado a qualquer um destes dois casos, quando os recursos requeridos para executá-los forem limitados.

Os dados requisitados pelo modelo para achar a programação de um projeto com múltipla restrição de recursos são

os seguintes:

- a) Número de atividades do projeto.
- b) Distribuição de duração das atividades.
- c) Informações contendo a rede do projeto e as restrições tecnológicas de precedência.
- d) Número de recursos limitados.
- e) Disponibilidade por período de cada recurso.
- f) Distribuição de demanda de recurso individual.
- g) Custo por período referente ao projeto.
- h) Custo por período dos recursos que são avaliados em carga máxima.
- i) Custo unitário de utilização dos recursos que são avaliados pela demanda.⁽¹⁹⁾

4.3.2. Programa inicial

Os cálculos realizados inicialmente fornecem um plano PERT/CPM para o projeto a ser programado. Nesta fase as restrições de recursos são totalmente desconsideradas. Apenas as

⁽¹⁹⁾ Os itens (g), (h) e (i) referentes aos custos serão abordados detalhadamente na sub-seção 4.3.13.

restrições tecnológicas de precedência influenciam nestes cálculos.

Esta programação inicial é a base do modelo. A partir dela se realizam as modificações utilizando os procedimentos heurísticos com o intuito de englobar também as restrições de recursos na programação. Nesta fase são calculadas as datas de início e de término das atividades e as suas folgas totais.

A figura 10 mostra a rede de um projeto pequeno, representando a sua programação para recursos ilimitados. As atividades estão programadas para começar na sua primeira data de início. Os números sob as flechas representam as unidades de recursos A e B requeridas por período para executar a atividade correspondente. As unidades de recursos disponíveis diariamente são 5 de A e 2 de B.

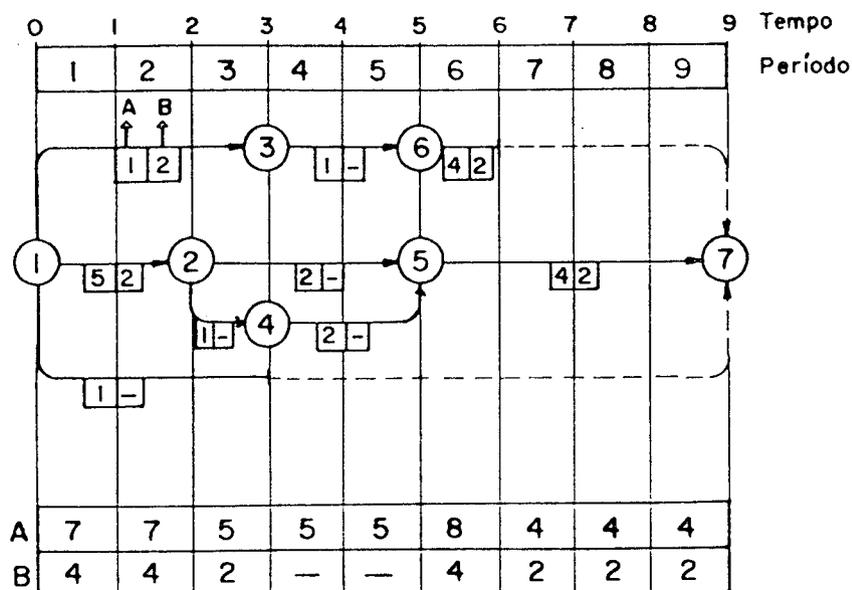


Figura 10

Programação para recursos ilimitados e demanda
diária de recursos A e B

A tabela 1 apresenta os resultados dos cálculos realizados nesta fase .

Atividade	d	Recursos necessários		PDI	PDT	UDI	UDT	Folga
		A	B					
1 . 2	2	5	2	0	2	0	2	0
1 . 3	3	1	2	0	3	3	6	3
1 . 7	3	1	-	0	3	6	9	6
2 . 5	3	2	-	2	5	2	5	0
2 . 4	1	1	-	2	3	2	3	0
3 . 6	2	1	-	3	5	6	8	3
4 . 5	2	2	-	3	5	3	5	0
5 . 7	4	4	2	5	9	5	9	0
6 . 7	1	4	2	5	6	8	9	3

Tabela 1 . Programação inicial para recursos ilimitados.

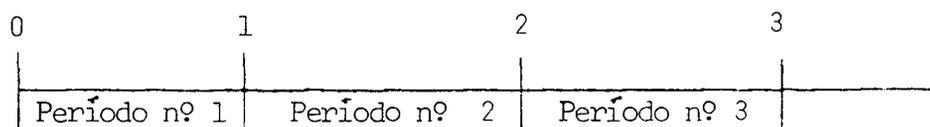


Figura 11. Escala de períodos de programação

4.3.3. Escala de períodos de programação

O tempo de programação é dividido em períodos, formando uma escala.

Para começar uma programação esta escala é zerada. O primeiro período inicia no tempo zero e termina em um, os demais períodos seguem a mesma orientação como mostra a figura 11. A partir do ponto inicial, são determinadas as atividades que po -

dem ser programadas para o primeiro período, ou seja, todas as atividades que possuem a primeira data de início igual a zero.

Cada período da escala pode representar um espaço de tempo pré-estabelecido, assim um período poderá ser um dia, uma semana, um mês ou qualquer outra medida de tempo. Para uma determinada programação a unidade de tempo dos períodos é pré estabelecida e deve ser mantida até o fim da programação.

Para prosseguir com a programação, soma-se uma unidade ao período considerado, passando-se ao período seguinte. Esta mudança ocorre quando todas as atividades disponíveis para programar, neste período, tiverem sido examinadas ou os recursos disponíveis tiverem terminado.

Para o projeto - exemplo dado, o período de programação é considerado em dias.

4.3.4. Seleção das atividades que podem iniciar em cada período

Estão disponíveis para começar num determinado período, as atividades cuja primeira data de início coincidam com o tempo inicial do período.

Sendo assim, para cada período são selecionadas as atividades que obedecem esta restrição, formando o conjunto de atividades disponíveis para iniciar.

Quando a primeira data de início de uma atividade coincidir com o tempo inicial do período examinado, todas as suas antecessoras já foram programadas. Isto ocorre, porque os cálculos preliminares do modelo fornecem a programação inicial respeitando as restrições de precedência, e os cálculos subsequentes,

realizados período a período, mantêm atualizada a seqüência das atividades formada pela restrição de precedência.

Retornando ao projeto - exemplo, no primeiro período, podem compor a lista de atividades disponíveis, para serem programadas, as atividades (1.2), (1.3) e (1.7).

O número de recursos A necessários para executar as três atividades é 7 unidades e de recursos B são necessárias 4 unidades. Existem disponíveis por período apenas 5 unidades de recursos A e 2 unidades de recursos B. As três atividades não podem ser programadas em conjunto. A partir deste ponto iniciam os cálculos heurísticos para determinar as atividades que devem ser programadas.

4.3.5. Critério da mínima folga

As atividades são classificadas pela ordem crescente de suas folgas totais.

Quanto menor é a folga da atividade, maior é a sua prioridade na lista de programação.

As atividades (1.2), (1.3) e (1.7) do projeto-exemplo possuem as folgas 0, 3 e 6 respectivamente. Sendo assim, a atividade (1.2) tem a maior prioridade para ser programada e é seguida pela (1.3) e por último vem a (1.7).

4.3.6. Verificação da disponibilidade de recursos

A alocação dos recursos é feita, através da distribuição dos recursos disponíveis no período, para as atividades selecionadas.

São consideradas as prioridades de cada atividade para a distribuição dos recursos. As atividades do período são examinadas, uma a uma, começando por aquela de mais alta prioridade. Se a necessidade não exceder a disponibilidade para nenhum tipo de recurso, a atividade pode ser programada para o período que está sendo examinado, caso contrário, ela é transferida para o período seguinte.

A atividade (1.2) do exemplo tem a prioridade mais alta no primeiro período. São necessários 5 unidades de recurso A e 2 unidades de B para programá-la. Como os recursos A e B disponíveis são 5 e 2 unidades respectivamente, a atividade (1.2) é programada neste período. Não sobram recursos disponíveis e as atividades (1.3) e (1.7) são transferidas para iniciar no segundo período.

Este cálculo de verificação da disponibilidade de recursos é repetido para todos os períodos da programação.

4.3.7. Programação de uma atividade

A atividade é programada com a data de início igual ao tempo inicial do período em que houve a sua programação. Esta data de início aparecerá associada à atividade no final do processo de programação, quando é obtida a programação total para recursos limitados.

O valor dos recursos disponíveis restantes são atualizados, quando uma atividade é programada. O ajuste é feito subtraindo dos recursos disponíveis a parcela de recursos utilizada para a atividade programada.

A atividade (1.2) do projeto - exemplo é programada para o primeiro período, recebendo portanto uma data de início igual a zero.

Os recursos disponíveis restantes são nulos para este caso, porque a atividade (1.2) utiliza na sua execução 5 unidades de recursos A e 2 unidades de B, que são as quantidades máximas de recurso disponíveis por dia.

4.3.8. Transferência de uma atividade

Quando não há mais recursos para programar as atividades disponíveis para começar num determinado período, estas são transferidas para iniciar no período seguinte, dependendo também da disponibilidade de recursos deste período. Neste caso, a primeira data de início da atividade passa a ser igual ao tempo correspondente ao início do próximo período.

A folga de uma atividade transferida, se existir, passa a ser menor e deve ser decrescida de uma unidade. Contudo, esta não é a única alteração que ocorre, pois a transferência de uma atividade dentro da rede do projeto, pode acarretar mudanças em todas as suas atividades sucessoras. Estas atividades podem ter suas datas de início alteradas e os valores de suas folgas também. Quando há transferências de atividades, as datas de início e término e os valores das folgas das atividades transferidas e das suas sucessoras são atualizados.

No projeto - exemplo, as atividades (1.3) e (1.7) devem ser transferidas do 1º para o 2º período. Esta transferência determina que as datas de início de ambas se tornem i-

guais a um, que corresponde ao início do 2º período, e as suas folgas são decrescidas para 2 e 5 respectivamente.

A atividade (1.7) não possui sucessora, portanto, sua transferência não acarreta outras alterações. No entanto, a atividade (1.3) ao ser transferida altera as datas de início e de término e as folgas das atividades (3.6) e (6.7), estas atividades têm suas datas de início mudadas para 4 e 6 respectivamente e as folgas de ambas assumem valor 2. As transferências criam uma nova programação parcial para o projeto, que está apresentada na tabela 2.

Atividade	PDI	PDT	UDI	UDT	Folga	Programada
1 . 2	0	2	0	2	0	*
1 . 3	1	4	3	6	2	
1 . 7	1	4	6	9	5	
2 . 5	2	5	2	5	0	
2 . 4	2	3	2	3	0	
3 . 6	4	6	6	8	2	
4 . 5	3	5	3	5	0	
5 . 7	5	9	5	9	0	
6 . 7	6	7	8	9	2	

Tabela 2 . Programação no 1º Período

4.3.9. Programação para os períodos seguintes

A programação continua no período seguinte, a partir dos valores apresentados na tabela 2.

A atividade (1.2) continua em andamento no 2º período e, conseqüentemente, as atividades (1.3) e (1.7) são transferidas para o período seguinte que inicia no tempo 2.

Para o 3º período a programação parcial do projeto está apresentada na figura 12. Neste período estão disponíveis para começar as atividades (1.3), (2.5), (2.4) e (1.7), e a soma dos recursos dos tipos A e B, necessários para iniciar as atividades juntas, são de 5 e 2 unidades, portanto, são equivalentes aos disponíveis. As quatro atividades podem ser programadas no 3º período.

O modelo programa as atividades (1.3), (2.5), (2.4) e (1.7) e promove os ajustes nos recursos da mesma forma como foram feitos para o primeiro período. Não existem mais atividades para programar neste período. Então, a programação para o 4º período é iniciada.

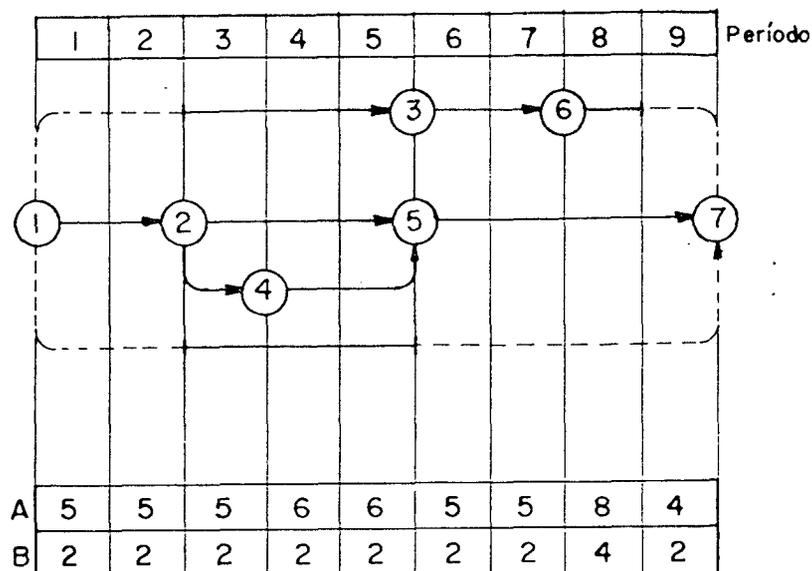


Figura 12

Programação parcial no 3º período

4.3.10. Procedimento de troca de atividades

Quando uma atividade crítica deve ser transferida por falta de recursos, é acionado um outro procedimento do modelo. Este procedimento faz uma pesquisa para determinar se existe alguma atividade não crítica, em andamento, que possa ser trocada pela atividade crítica. Esta troca só se realiza quando não acarretar acréscimo na duração total do projeto. Se existir uma atividade, em andamento, que obedeça estas condições, a atividade crítica é programada para o período considerado, e a outra atividade é transferida para começar no período seguinte.

No 4º período de programação do projeto, existem em andamento as atividades (1.3), (2.5) e (1.7), que consomem 4 unidades de recurso A e 2 unidades de recurso B, restando disponível apenas 1 unidade de recurso A. A atividade crítica (4.5) está disponível para iniciar neste período e necessita de 2 unidades de recurso A. Se esta atividade, que tem folga zero, for transferida, vai acarretar atraso de 1 dia na duração total do projeto.

Para solucionar este problema, a atividade (1.7), que está em andamento, é transferida para o 6º período. Como esta atividade possui folga igual a 4, a transferência não causa atraso no tempo de término do projeto. A atividade crítica (4.5) é programada no 4º período; e os ajustes, realizados nesta troca, resultam na programação apresentada na figura 13.

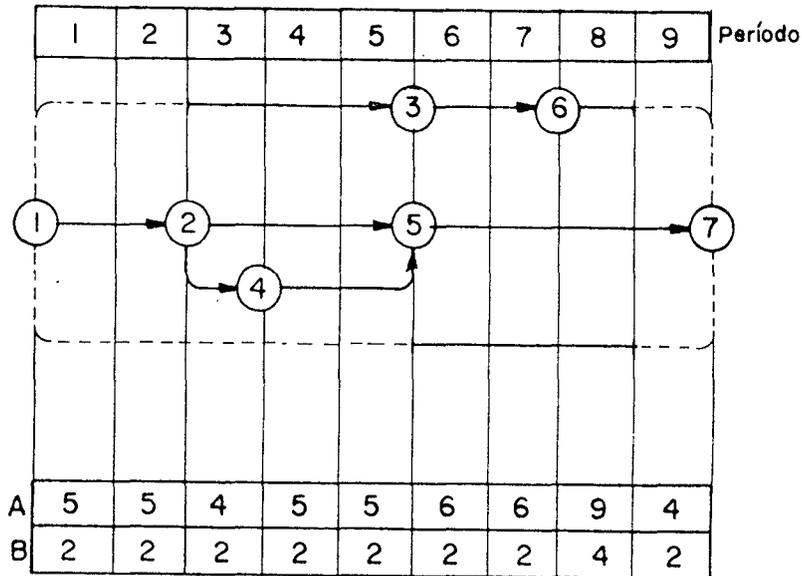


Figura 13

Programação parcial no 5º período

4.3.11. Programação para a mínima data de término da atividade

Quando existe empate no grau de prioridade, estabelecido pelas folgas de duas atividades que disputam os mesmos recursos num período, é utilizado um outro critério de prioridade para selecionar a atividade que deve ser programada. O critério utilizado é o da mínima UDT, no qual é dada maior prioridade para a atividade que apresenta o menor valor para a última data de término. Sendo assim, a atividade que deve terminar primeiro é programada para o período considerado, e a outra é transferida para o período seguinte.

A figura 13, referente ao 5º período de programação, mostra que ao começarem as atividades do 6º período, vai haver um empate no grau de prioridade entre as atividades (3.6) e (1.7) que possuem folgas iguais. Como ambas necessitam dos mesmos

recursos para serem programadas, uma delas deve ser transferida para o período seguinte.

Conforme o critério da menor UDT, o modelo programa a atividade (1.6), que possui a última data de término igual a 7, e transfere a atividade (1.7), que possui última data de término igual a 8, para o dia seguinte.

4.3.12. Obtenção da programação final

A programação final é obtida, quando todas as atividades tiverem sido programadas obedecendo as restrições de recursos.

Neste ponto, o modelo estará apto a fornecer uma relação das atividades programadas para cada período e a relação da demanda diária de recursos necessários para executar a programação.

A programação final do projeto para recursos limitados está apresentada na figura 14. A duração total é de 10 dias, houve um atraso de 1 dia, necessário para a complementação de todas as atividades do projeto.

A escala das atividades para os dias do projeto e a demanda de recursos diários está apresentada na tabela 3.

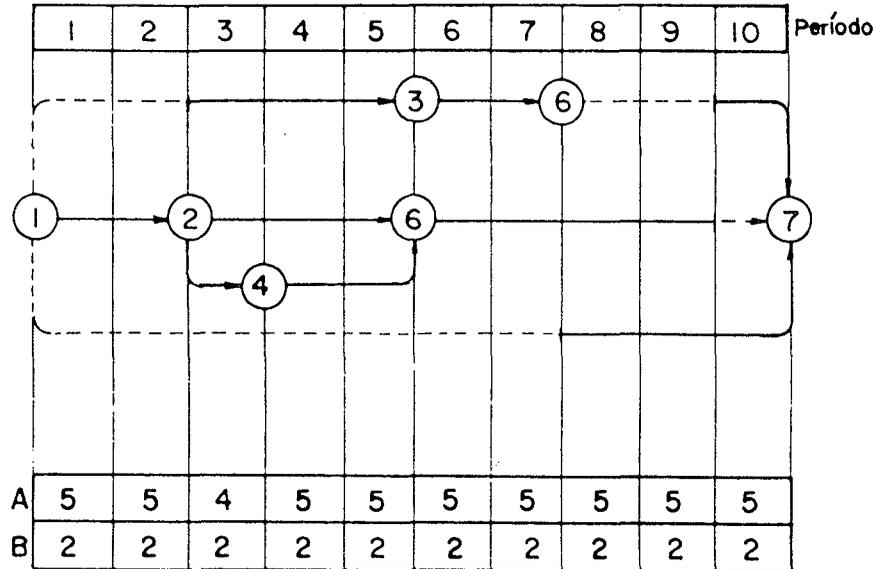


Figura 14

Programação final do projeto-exemplo para recursos limitados

Dia	Atividades programadas	Atividades em andamento	Demanda de recursos	
			A	B
1	(1.2)	-	5	2
2	-	(1.2)	5	2
3	(1.3), (2.5), (2.4)	-	4	2
4	(4.5)	(1.3), (2.5)	5	2
5	-	(1.3), (2.5), (4.5)	5	2
6	(5.7), (3.6)	-	5	2
7	-	(3.6), (5.7)	5	2
8	(1.7)	(5.7)	5	2
9	-	(5.7), (1.7)	5	2
10	(6.7)	(1.7)	5	2

Tabela 3 . Escala de programação das atividades e demanda diária de recursos.

4.3.13. Avaliação dos custos da programação

O modelo fornece também o custo relativo a programação, que é formado pelo custo dos recursos e um custo avaliado por período, relativo às despesas associadas à execução do projeto.

O custo relativo ao projeto é um parâmetro de entrada do modelo. É composto de despesas extras e outros gastos incluídos por falta de dados exatos. Sendo, portanto, uma parcela de custo constante por período.

Os custos dos recursos podem ser avaliados de duas formas distintas. No primeiro caso, o custo dos recursos gastos pode ser considerado constante por período. Este custo é igual ao do recurso disponível no período, sendo o recurso totalmente utilizado ou não. Isto ocorre quando os recursos, mesmo sendo ociosos, acarretam despesas como se tivessem sido utilizados. Um exemplo desta situação ocorre com a mão de obra, quando os operários devem ser pagos se ativos ou ociosos.

O custo dos recursos avaliados em carga máxima causa um acréscimo no custo total, quando a duração do projeto aumenta.

Existem casos em que os gastos com recursos ocorrem somente quando existe demanda destes recursos. Um exemplo desta situação é o custo do material empregado na execução das atividades. Este custo é avaliado somente quando ocorre a utilização do recurso, considerando a quantidade utilizada.

O cálculo de avaliação do custo total da programação é feito com base na seguinte função:

$$CT = C \times t + \sum_{k=1}^t \sum_{i=1}^m C_i \times N_{ik} + \sum_{i=m+1}^p C_i^* \times N_i^* \times t \quad (6)$$

Onde: CT = custo total

t = duração total do projeto.

C = custo constante por período.

C_i^* = custo do recurso i, avaliado em carga máxima, por período.

C_i = custo do recurso i, avaliado pela demanda, por período.

N_{ik} = demanda de recurso i por período.

N_i^* = demanda de recurso i avaliada em carga máxima.

i = tipo de recurso, para: i = 1, 2, ..., m : O recurso i é avaliado pela demanda.
 i = (m+1), (m+2) ... p : O recurso i é avaliado em carga máxima.

Esta função de custo fornece condições de se observar como o custo é otimizado indiretamente pelo modelo. Porque a expressão (6) mostra que o custo total é função crescente do tempo de duração do projeto.

O objetivo principal do modelo é obter uma programação que minimize a duração do projeto. A relação entre o custo e o tempo de duração proporciona a extensão desta finalidade a uma minimização do custo total do projeto.

Os custos relativos ao projeto podem ser influenciados por circunstâncias particulares. Quando isto ocorre há necessidade de outra função para avaliá-los.

4.4. Fluxograma do Modelo Proposto

As fases do modelo proposto, que foram descritas na seção anterior, estão reunidas no fluxograma apresentado na figura 15.

O modelo foi codificado em FORTRAN IV, e os testes com o programa computacional foram realizados num computador IBM-360. As programações obtidas e os resultados dos testes serão apresentados no próximo capítulo.

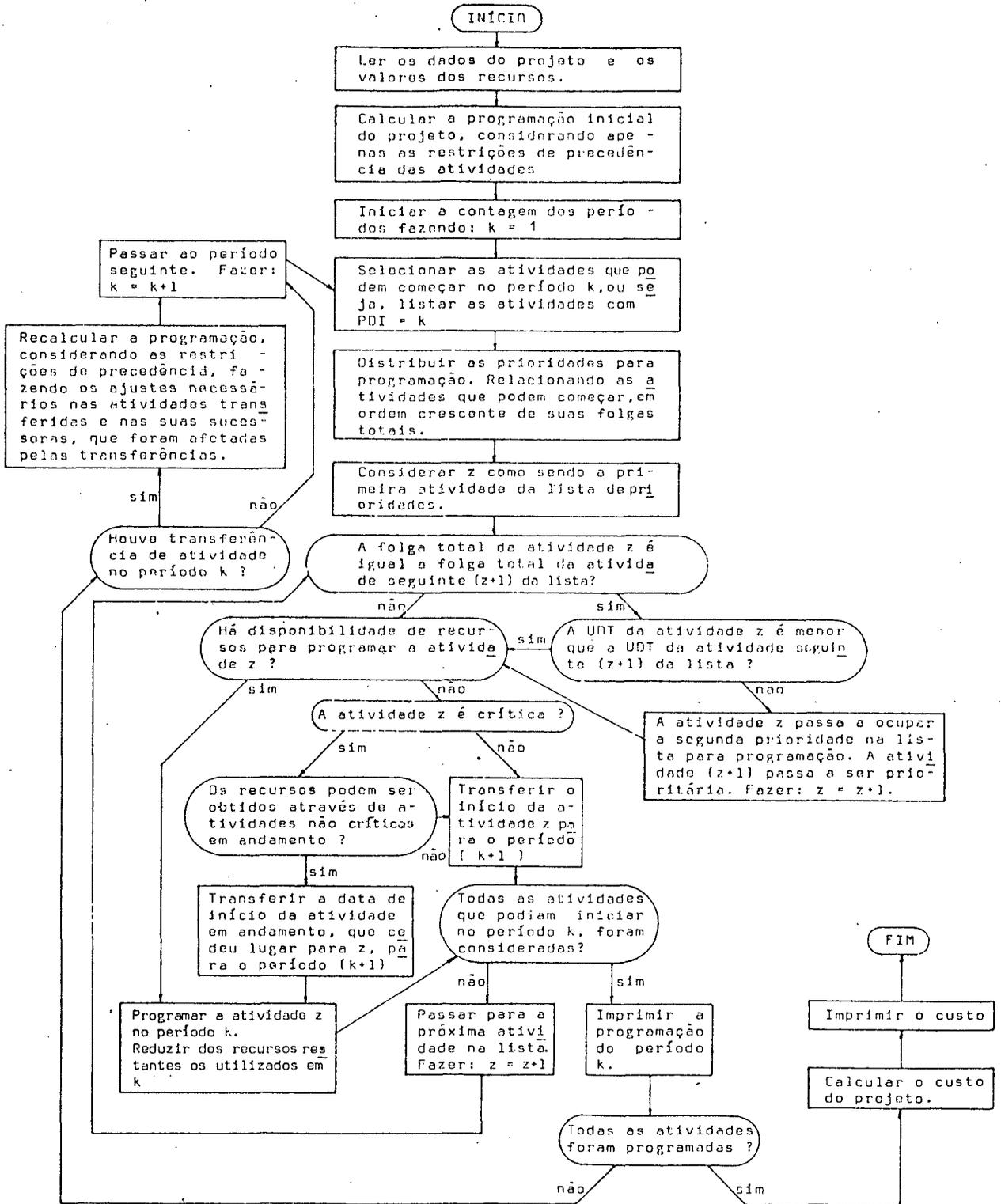


Figura 15. Fluxograma de Modelo Proposto.

5. RESULTADOS OBTIDOS NA APLICAÇÃO DO MODELO

Os testes realizados com modelos heurísticos próprios para programar projetos com restrição de recursos são usualmente baseados na sua utilidade, mais do que na sua habilidade de atingir uma solução ótima. Porque, pela sua natureza, os procedimentos heurísticos não fornecem garantias que a solução encontrada seja a ótima.

O modelo heurístico, desenvolvido neste trabalho, foi submetido a vários testes comparativos e aplicado a um problema real. Os resultados obtidos são apresentados neste capítulo.

5.1. Projetos Utilizados nos Testes Iniciais

O modelo foi elaborado por etapas e, na sua primeira aproximação, possibilitou formar programações para projetos que apresentavam um único tipo de recurso limitado. Nesta fase já foram iniciados os testes para formar programações.

Foram escolhidos, para os testes, projetos pequenos, cuja solução ótima era previamente conhecida, para promover a comparação com os resultados encontrados pelo modelo.

As programações obtidas pelo modelo para estes projetos simples na maioria dos casos coincidiram com a ótima.

Foram selecionados dois projetos significativos para ilustrar este teste.

O primeiro deles foi apresentado por Wiest⁽²⁰⁾ e consta da figura 16, onde aparece a programação do projeto para recursos ilimitados. Os números sobre as flechas representam as unidades de recursos diários necessários para executar a atividade correspondente e, na linha inferior, está apresentada a soma dos recursos diários necessários para executar o projeto. O recurso diário disponível para executar o projeto é de 10 unidades, e o problema recai na programação para recursos limitados.

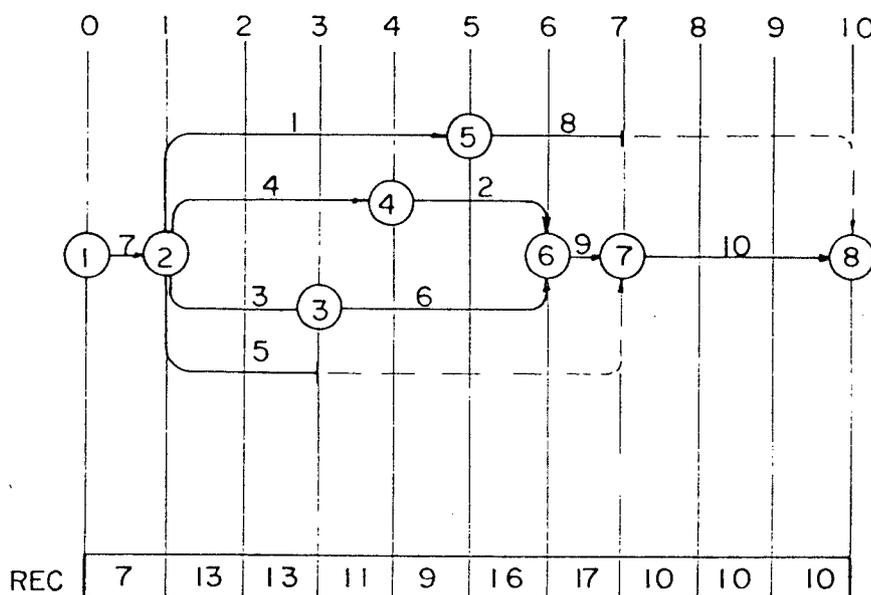


Figura 16

Programação para recursos ilimitados

Aplicando, ao projeto, o modelo desenvolvido neste trabalho, foi obtida a programação para 14 dias

⁽²⁰⁾ WIEST, J. D. Op.Cit., p. 26.

apresentada na figura 17; que coincide com a solução apresentada por Wiest⁽²¹⁾ e corresponde a solução ótima para o projeto.

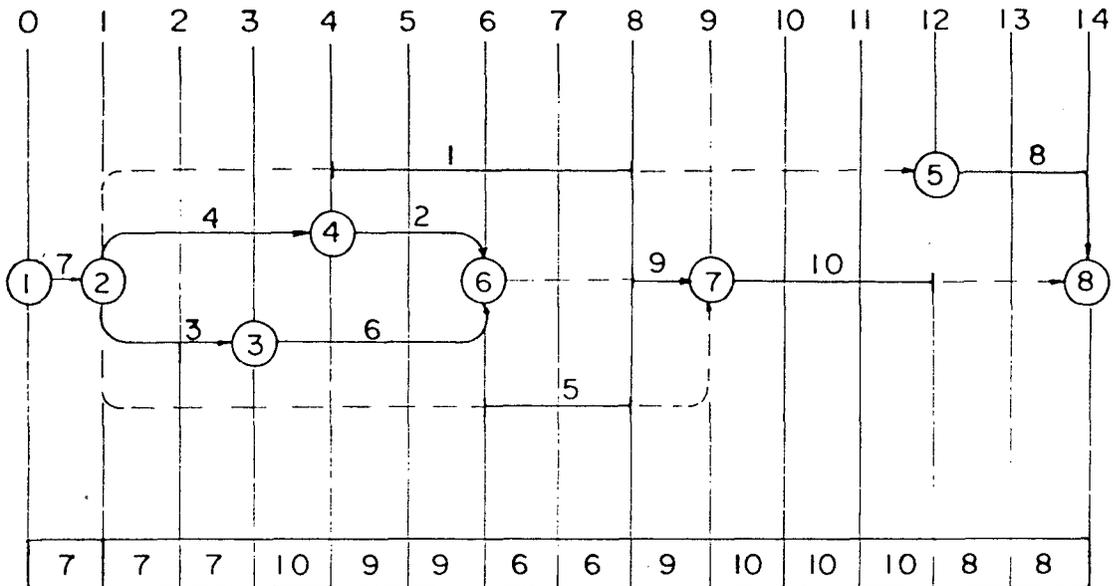


Figura 17

Programação final para recursos limitados

5.1.1. Aplicação do modelo a um multiprojecto

Os multiprojetos se constituem num outro tipo de problema importante que pode ser resolvido pelo modelo.

Esta situação ocorre quando dois ou mais projetos dividem os mesmos recursos limitados na execução de suas atividades.

⁽²¹⁾ WIEST, J. D. Op.Cit., p. 26.

Martino⁽²²⁾ apresenta vários multiprojetos e as programações correspondentes para recursos limitados, obtidas através do modelo heurístico MAP (Procedimento de Alocação de Recursos Múltiplos) por ele desenvolvido.

Entre os multiprojetos apresentados foi selecionado um para ilustrar o comportamento do modelo heurístico, proposto neste trabalho, para este tipo de projeto.

A figura 18 apresenta um multiprojetos constituído de três projetos pequenos. O primeiro projeto é formado pela rede que inicia no evento representado pelo nó 11 e termina no 15. O segundo é formado pela rede que inicia no evento representado pelo nó 21 e termina no 25. O último projeto é formado pela rede que inicia no evento representado pelo nó 31 e termina no 35. Para transformar os três projetos em um único foram criados dois eventos comuns aos três projetos, o nó inicial 1 e o nó final 100. Os eventos inicial e final são ligados aos três projetos através de atividades fantasmas, ou seja, atividades que não gastam recurso e tempo. Para aplicação do MAP ao multiprojetos, duas atividades fantasmas receberam um tempo fictício de duração, para que os projetos não iniciassem na mesma data. Assim a atividade 1.31 recebeu uma duração fictícia de 5 semanas e a atividade 15.100 de 7 semanas. A partir deste ponto o multiprojetos se comporta como um projeto único. Os recursos semanais necessários para executar cada atividade estão apresentados na coluna correspondente da tabela 4. Os recursos disponíveis por semana para executar o multiprojetos são de 4 unidades.

(22) MARTINO, R.L. Op.Cit., p. 29.

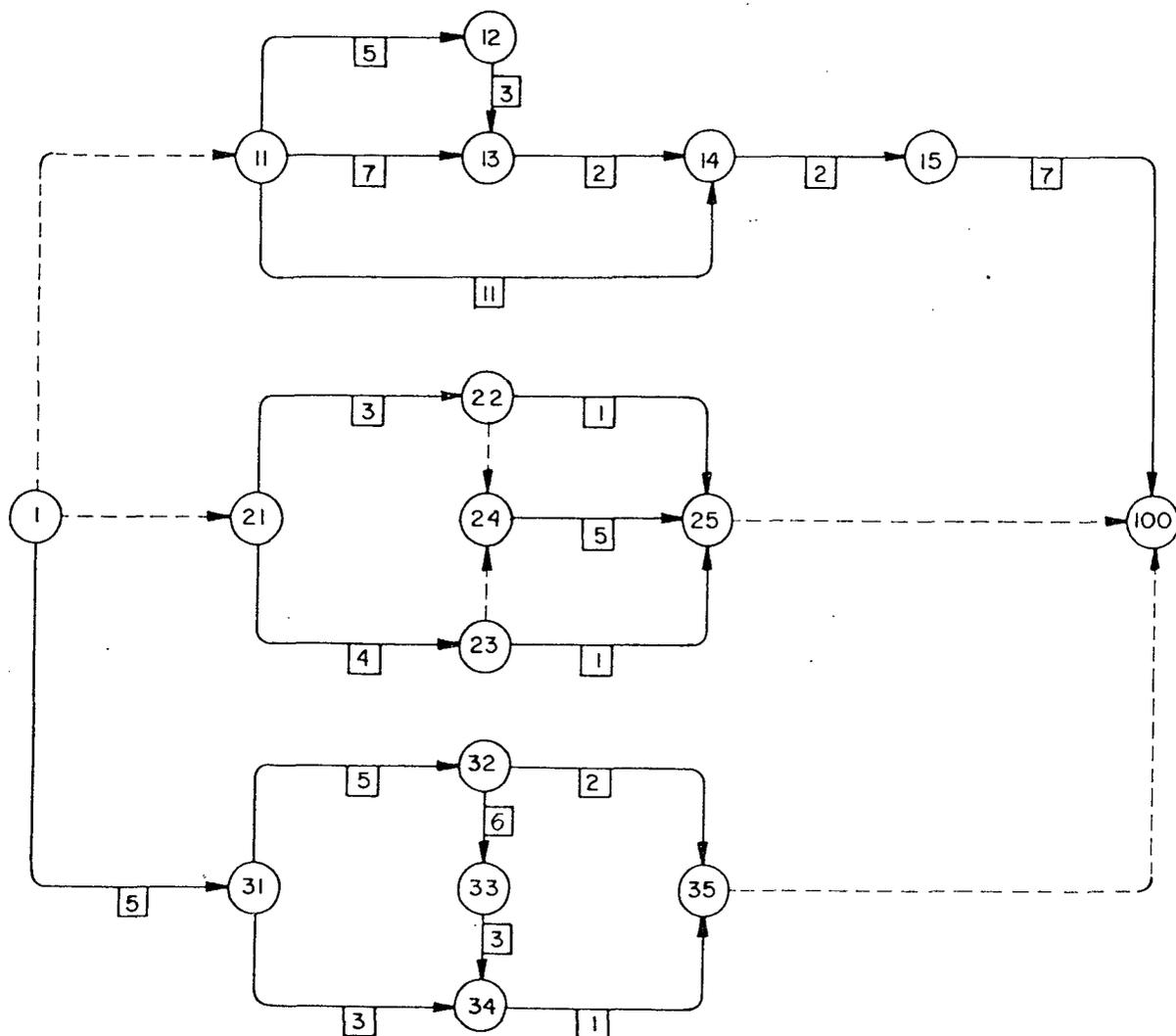


Figura 18

Rede do multiprojeto a ser programado
para recursos limitados

A tabela 4 apresenta a programação final, para o multiprojeto, formada pelo MAP⁽²³⁾. A duração do projeto é de 20 semanas.

⁽²³⁾ MARTINO, R.L. Op.Cit., p. 29.

Seqüência de Atividades	Duração em Semanas	Recursos necessários por semana	Data de Início	Data de Término
1.11	0	0	0	0
1.21	0	0	0	0
1.31	5	0	0	5
11.12	5	1	0	5
11.13	7	1	0	7
11.14	11	1	0	11
12.13	3	1	5	8
13.14	2	1	8	10
14.15	2	1	11	13
15.100	7	0	13	20
21.22	3	1	7	10
21.23	4	1	0	4
22.24	0	0	10	10
22.25	1	1	13	14
23.24	0	0	4	4
23.25	1	1	4	5
24.25	5	1	10	15
25.100	0	0	15	15
31.32	5	1	5	10
31.34	3	1	12	15
32.33	6	1	10	16
32.35	2	1	10	12
33.34	3	1	16	19
34.35	1	1	19	20
35.100	0	0	20	20

Tabela 4 . Programação para o multiprojeto formada pelo MAP

O modelo desenvolvido neste trabalho foi aplicado ao multiprojeto, sendo obtida a programação, com duração de

20 semanas, que está apresentada na tabela 5. Esta programação tem a mesma duração e o mesmo aproveitamento dos recursos, utilizados por semana, determinados pelo MAP.

Seqüência das Atividades	Número das Atividades	Data de Início	Data de Término
1.11	1	0	0
1.21	2	0	0
1.31	3	0	5
11.12	4	0	5
11.13	5	0	7
11.14	6	0	11
12.13	7	7	10
13.14	8	10	12
14.15	9	12	14
15.100	10	14	21
21.22	11	4	7
21.23	12	0	4
22.24	13	7	7
22.25	14	14	15
23.24	15	4	4
23.25	16	14	15
24.25	17	7	12
25.100	18	15	15
31.32	19	5	10
31.34	20	11	14
32.33	21	10	16
32.35	22	12	14
33.34	23	16	19
34.35	24	19	20
35.100	25	20	20

Tabela 5 . Programação para o multiprojeto formada pelo modelo proposto

A figura 19 mostra o gráfico do nível de utilização dos recursos nas programações obtido pelos dois modelos. O aproveitamento dos recursos é o mesmo para o MAP e o modelo proposto neste trabalho.

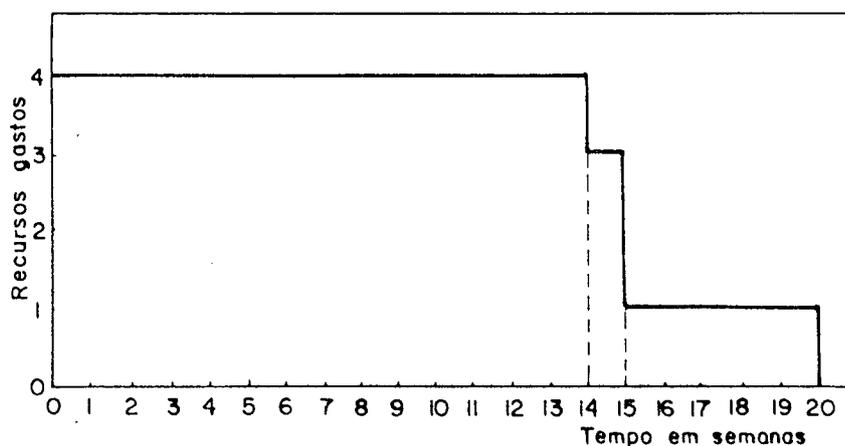


Figura 19

Gráfico do nível de utilização dos recursos nas programações formadas

5.2. Aplicação Prática ao Projeto de Construção de uma Barragem

Os métodos de programação de projetos com restrição de recursos são freqüentemente utilizados para grandes projetos tais como: construção e instalação de indústrias químicas e petrolíferas, fechamento mensal de registro de contas, instalação de fundições e construção de barragens.

Para aplicação prática do modelo, proposto neste trabalho, foi utilizado o projeto de construção de uma barragem.

A utilização deste projeto de construção civil, deve-se ao fato de que os métodos de programação de projetos são largamente empregados na engenharia civil. E os resultados, obtidos nesta aplicação, têm sido considerados excelentes.

O desenvolvimento dos métodos de controle de custos e de estimativas em engenharia civil permitem bastante confiabilidade nos dados previstos para este setor. De um modo geral, os custos de construção e o tempo de execução podem ser previstos com suficiente precisão para satisfazer às hipóteses fundamentais básicas das técnicas de programação de projetos com restrição de recursos.

Praticamente todos os serviços de engenharia civil justificam a confecção de uma rede de planejamento, cálculo das folgas e nivelamento de recursos.

Qualquer projeto de construção é facilmente dividido em várias operações, cada uma das quais será executada por diferentes combinações de métodos, equipamentos, tamanhos de equipes de trabalhadores e horas de trabalho.

Os fatores principais que determinam a melhor programação são o custo, o tempo ou ambos. A primeira vista pode-se pensar que o custo direto de cada atividade é predominante quando se pretende completar os trabalhos a um custo mais baixo. Contudo, o custo total do projeto inclui todos os custos indiretos e gerais associados à execução completa dos serviços, e estes são proporcionais ao tempo total do projeto. Além do mais, do ponto de vista do contratante, é desejável a liberação mais cedo do pessoal e maquinaria para outro serviço, além de diminuir as despesas. O planejamento ao mais baixo custo direto

pode não ser a melhor solução. O tempo total é, portanto, um fator muito importante na construção civil.

Estas vantagens obtidas com a diminuição do tempo total de um projeto de construção civil, justificam plenamente a aplicação do modelo proposto a um projeto neste campo. Porque, como foi visto anteriormente, este modelo tem como objetivo formar uma programação visando a menor duração total do projeto.

5.3. Especificações do Projeto

O projeto de construção da barragem utilizado para aplicação prática do modelo proposto, possui 50 itens especificados no cronograma físico-financeiro da obra.

A finalidade desta barragem é amortecer a onda de cheia, criando-se um lago artificial transitório, com capacidade de acumulação, na cota da crista do vertedouro, de 263 milhões de metros cúbicos.

A obra foi projetada em duas etapas. A primeira etapa, já concluída, constou da execução dos túneis para permitir o desvio do rio durante a construção da barragem. Ainda nesta etapa foram efetuadas as instalações do acampamento e o levantamento topográfico para desapropriação da bacia de acumulação. A segunda etapa, prevê a construção da barragem. No presente trabalho foi considerado, para programação, o projeto referente à segunda etapa.

A tabela 6 apresenta as especificações dos itens referentes ao projeto da barragem. Fornecendo as unidades de cada item, a quantidade a ser executada, que consta no contrato, e o seu preço unitário.

Nº	DISCRIMINAÇÃO	UNID.	QUANT. CONTRATO	PREÇO UNITÁRIO
1	Central de concreto	GB	-	1.666.425,00
2	Manutenção da estrada e do cantei ro	GB	-	2.221.900,00
3	Concreto do Sangradouro	GB	-	1.666.425,00
4	Montagem do equipamento hidrológi co	GB	-	350.000,00
5	Escavação em terra	m ³	610.600	24,00
6	Escavação em rocha	m ³	307.000	200,00
7	Perfuração em rocha	ml	3.750	566,00
8	Injeção de cimento	sc	12.000	102,00
9	Escavação e transporte de material sílico - argiloso	m ³	858.500	24,00
10	Enrocamento, inclusive transporte e colocação	m ³	706.000	90,00
11	Transporte de material sílico - ar giloso	m ³ x dam	80x10 ⁶	0,04
12	Transporte de enrocamento	m ³ x dam	20x10 ⁶	0,09
13	Compactação de material sílico ar giloso	m ³	920.500	6,00
14	Compactação de material sílico argi loso ou permeável	m ³	5.000	50,00
15	Fornecimento de areia para filtros	m ³	20.400	69,20
16	Colocação de areia nos filtros		20.400	103,80
17	Fornecimento de pedra britada	m ³	53.900	138,40
18	Aplicação da pedra britada nos fil tros		53.900	207,60
19	Concreto tipo A	m ³	8.200	876,00
20	Concreto tipo B	m ³	5.700	876,00
21	Ferro estrutural, corte, dobra e colocação	kg	80.000	4,00
22	Fornecimento e transporte de ferro estrutural	kg	65.000	1,25
23	Montagem do ferro estrutural	kg	65.000	3,75
24	Fornecimento de ferro estrutural CA 50 ou CA 24	kg	140.000	11,90
25	Montagem do ferros - CA 50 e CA 24	kg	140.000	5,10
26	Fornecimento de cimento	sc	82.000	73,00
27	Instalação de ancoragem	ml	7.130	117,00
28	Junta Fugenband	ml	665	210,00
29	Sistema de drenagem do sangradouro	GB	-	130.000,00

Tabela 6 . Especificações dos itens do projeto

Nº	DISCRIMINAÇÃO	UNID.	QUANT. CONTRATO	PREÇO UNITÁRIO
30	Meio fio	ml	730	260,00
31	Revestimento de asfalto e pedrisco	m ²	4.400	50,00
32	Construção da casa de manobra	GB	-	80.000,00
33	Grades, comprovação da encomenda	GB	-	1.211.178,60
34	Grades, fornecimento e aprovação	GB	-	2.018.631,00
35	Grades, montagem e aceitação	GB	-	807.452,40
36	Comportas, comprovação da encomenda	GB	-	2.025.000,00
37	Comportas, fornecimento e aprovação	GB	-	3.375.000,00
38	Comportas, montagem e aceitação	GB	-	1.350.000,00
39	Pontes rolantes, comprovação da encomenda	GB	-	54.000,00
40	Pontes rolantes, fornecimento e aprovação	GB	-	90.000,00
41	Pontes rolantes, montagem e aceitação	GB	-	36.000,00
42	Stop - logs, fornecimento e instalação	GB	-	15.000,00
43	Escada de marinheiro	GB	-	30.000,00
44	Serviços eventuais	GB:	-	5.600.000,00
45	Documentário cinematográfico	min	25	28.000,00
46	Elaboração do copião das filmagens	min	25	3.500,00
47	Aceitação das cópias das filmagens	min	25	3.500,00
48	Deslocamento e hospedagem	GB	-	100.000,00
49	Escavação em rocha do vertedouro	m ³	30.000	70,00
50	Bombeamento e esgotamento da cava e fundação	HP.h	35.000	24,00

Tabela 6 . Continuação das especificações dos itens do projeto.

A empresa encarregada de construir a barra - gem elaborou um cronograma, para execução da obra, que está apre - sentado na figura 20. O prazo previsto de complementação da obra foi de 31 meses, com os serviços sendo realizados seguindo a pro - gramação que consta do cronograma apresentado. O orçamento elabo - rado determinou que seriam necessários Cr\$ 264.609.572,00 para exe - ção total da obra. Esta importância seria alterada mensalmente de acordo com a taxa de reajuste correspondente.

5.4. Determinação dos Parâmetros Necessários para a Aplicação do Modelo

O primeiro passo para a aplicação do modelo é a elaboração da rede das atividades, contendo as relações de dependência entre elas.

A rede foi elaborada a partir de um estudo inicial para determinar as atividades do projeto, suas durações e relações de dependência.

Alguns itens apresentados na tabela 6 foram agrupados formando uma única atividade e outros itens foram subdivididos em várias atividades, para facilitar e tornar possível a determinação das restrições de precedência. Esta modificação foi necessária, porque alguns itens, apresentados na programação inicial, podem iniciar somente quando uma determinada percentagem de outro item já estiver concluída. Neste caso, o último í - tem deve ser subdividido em duas atividades. A primeira ativida - de conteria o percentual de serviço que deveria estar concluído para possibilitar o início da atividade sucessora.

Quando havia necessidade de executar dois ou mais itens simultaneamente, estes foram agrupados, formando uma única atividade.

A tabela 7 mostra as especificações das atividades, seus custos, durações e códigos de seqüência para aplicação do modelo. Foram formadas 51 atividades para compor a rede de programação do projeto. Os custos apresentados nesta tabela desconsideram a parcela de custo indireto do projeto.

Nº DE ATIV.	DISCRIMINAÇÃO	DURAÇÃO EM MESES	CUSTO POR MES
1	Central de concreto (1ª etapa)	1	541.588,00
2	Central de concreto (2ª etapa)	1	3.323.978,00
	Estrada e canteiro de obra (1ª etapa)		
	Escavação em terra e rocha (1ª etapa)		
3	Estrada e canteiro de obra (2ª etapa)	7	180.529,00
4	Concreto do sangradouro	1	1.083.177,00
5	Escavação em terra e rocha (2ª etapa)	6	2.601.861,00
6	Escavação em terra e rocha (3ª etapa)	5	2.601.861,00
7	Escavação em terra e rocha (4ª etapa)	7	2.601.861,00
8	Perfuração em rocha (1ª etapa)	4	153.291,00
9	Perfuração em rocha (2ª etapa)	5	312.411,00
	Injeção de cimento		
10	Escavação em rocha do vertedouro	3	4.732.000,00
	Bombeamento e esgotamento da cava de fundação		
11	Instalação de ancoragem	2	297.118,00
	Construção da casa de manobra		
12	Escavação e compactação do material sílico argiloso	20	857.253,00
13	Fornecimento de areia para filtros (1ª etapa)	1	305.864,00
14	Fornecimento e colocação da areia para filtros	2	411.740,00
15	Colocação da areia nos filtros (2ª etapa)	11	105.877,00
16	Fornecimento da pedra britada para filtros (1ª etapa)	1	1.616.282,00
17	Fornecimento e aplicação de pedra britada nos filtros	2	2.175.763,00

Tabela 7 . Relação das atividades do projeto e suas durações e custos

Nº DE ATIV.	DISCRIMINAÇÃO	DURAÇÃO EM MESES	CUSTO POR MES
18	Aplicação da pedra britada para filtros (2ª etapa)	11	559.482,00
19	Enrocamento, inclusive transporte e colo_ cação (1ª etapa)	1	1.424.173,00
20	Enrocamento, inclusive transporte e colo_ cação (2ª etapa)	25	1.424.173,00
21	Enrocamento (3ª etapa) Meio fio Revestimento de asfalto e pedrisco	3	1.512.962,00
22	Transporte de material sílico-argiloso	27	77.037,00
23	Comprovação da encomenda das grades	2	393.634,00
24	Fornecimento das grades	1	1.312.110,00
25	Montagem das grades	1	524.844,00
26	Transporte de enrocamento	27	43.333,00
27	Concreto tipo A (1ª etapa) Fornecimento de cimento (1ª etapa)	2	310.282,00
28	Fornecimento e transporte do ferro estru- tural (1ª etapa)	1	17.605,00
29	Fornecimento e montagem do ferro estrutu- ral	2	44.010,00
30	Montagem do ferro estrutural (2ª etapa)	4	26.407,00
31	Escada de marinho	1	19.500,00
32	Concreto dos tipos A e B Fornecimento de cimento (2ª etapa)	7	532.619,00
33	Concreto dos tipos A e B Fornecimento de cimento (3ª etapa)	4	532.619,00

Tabela 7 . Continuação da relação das atividades

Nº DE ATIV.	DISCRIMINAÇÃO	DURAÇÃO EM MESES	CUSTO POR MES
34	Concreto dos tipos A e B Fornecimento de cimento (4ª etapa)	10	532.619,00
35	Pontes rolantes, comprovação da encomenda	1	35.100,00
36	Fornecimento das pontes rolantes	1	58.500,00
37	Montagem das pontes rolantes	2	11.700,00
38	Junta Fugenband Sistema de drenagem do sangradouro	3	43.295,00
39	Junta Fugenband	3	15.129,00
40	Comprovação da encomenda das comportas	1	1.316.250,00
41	Fornecimento das comportas	1	2.193.750,00
42	Fornecimento e instalação do Stop-logs	1	9.750,00
43	Montagem das comportas	4	219.375,00
44	Corte, dobra e colocação de ferro estrutural	7	29.715,00
45	Fornecimento de ferro estrutural	1	360.966,00
46	Fornecimento e montagem de ferro estrutural	2	428.317,00
47	Montagem de ferro estrutural	4	77.350,00
48	Serviços eventuais	29	125.518,00
49	Fornecimento e montagem do equipamento hidrológico	27	8.425,00
50	Documentário cinematográfico	28	22.634,00
51	Atividade fictícia	-	-

Tabela 7. Continuação da relação das atividades

5.4.1. Tipos de Recursos Utilizados no Projeto

Na aplicação do modelo proposto foram considerados os recursos utilizados na execução do projeto, que podiam causar restrições nas programações das atividades, isto é, aqueles recursos que apresentavam limitações e cuja escassez poderia atrasar o início de alguma atividade.

Foram considerados os cinco tipos de recursos seguintes, por apresentarem as características citadas: recurso financeiro, mão de obra, quantidade de concreto e dois equipamentos, que são pá mecânica e escavadeira.

O recurso financeiro para executar a obra é fornecido em parcelas mensais iguais de aproximadamente Cr\$ 12.000.000,00⁽²⁴⁾. Esta distribuição mensal da verba causa uma restrição dos recursos financeiros, na execução da obra, que é considerada para a aplicação do modelo.

A mão de obra necessária para execução do projeto tem influência na programação das atividades, porque se determinadas atividades forem executadas ao mesmo tempo, poderá haver necessidade de um número de operários acima do normal.

O número é de aproximadamente 330 operários. Um acúmulo de utilização de mão de obra poderia trazer vários problemas. Inicialmente, haveriam maiores gastos com mão de obra, que representa 30% do orçamento. A necessidade de gastos extras com mão de obra refletiria consideravelmente nos custos mensais, sendo estes limitados. Outro problema, são as instalações próprias

⁽²⁴⁾ Todos os valores em cruzeiro apresentados no decorrer deste trabalho, são referentes ao orçamento inicial. Durante a execução da obra, estes valores são reajustados de acordo com as taxas correspondentes.

que já estão estruturadas para aproximadamente 330 operários. A quantidade de pessoal técnico especializado é limitado em aproximadamente 30 pessoas. Estes técnicos têm sob sua orientação todos os operários. Sendo assim, a eficiência dos trabalhos poderá ser prejudicada com o acúmulo de utilização de mão de obra.

As instalações da central de concreto têm capacidade de $20 \text{ m}^3/\text{hora}$. Estas instalações proporcionam condições para que sejam executados todos os serviços de concretagem. Contudo, deve haver uma distribuição quantitativa destes serviços evitando atrasos no seu início e complementação. O consumo de concreto é restrito a aproximadamente $2.400 \text{ m}^3/\text{mês}$.

Finalmente, na programação das atividades, como normalmente acontece para projetos deste tipo, há restrição de recursos de equipamento. A consideração destes limites de utilização de equipamentos, na fase de planejamento, evita atrasos e diminuição de eficiência dos trabalhos, o que normalmente ocorre, quando são omitidas estas limitações.

Existe um número relativamente grande de equipamentos necessários para executar este projeto. Foram analisadas as necessidades de recursos de cada atividade e verificou-se que os equipamentos disponíveis eram suficientes para executar as atividades. Contudo, algumas destas atividades se executadas ao mesmo tempo, acarretariam falta de recursos. Na obra existem disponíveis 6 pás mecânicas e 3 escavadeiras. A necessidade e a limitação destes dois tipos de recursos, também foram considerados na aplicação do modelo proposto.

Os outros recursos, utilizados no projeto,

apresentavam disponibilidades suficiente para executar a obra sem causar restrições na programação das atividades.

5.4.2. Custos avaliados no projeto

Os custos, avaliados neste projeto, são os inerentes a cada atividade individualmente e uma parcela de custo mensal que se mantém praticamente constante durante a execução do projeto.

O primeiro tipo de custo avaliado pode ser considerado como sendo o custo direto da atividade, ou seja, os gastos com os recursos distribuídos para as atividades.

O segundo tipo de custo avaliado corresponde aos gastos fixos de administração, e outros gastos que não podem ser estimados com precisão. Esta parcela de custo é de aproximadamente Cr\$ 2.987.000,00 por mês, para o projeto da barra - gem.

Os custos correspondentes às 51 atividades do projeto estão apresentados na tabela 7.

Os custos de programação, avaliados pelo modelo, para este projeto, foram calculados com base no custo de cada atividade e na parcela de custo mensal constante. Não foram considerados, neste caso, os custos de cada recurso aplicado na atividade. Contudo, o modelo está apto a fornecer o custo total de um projeto, calculado através do custo dos recursos aplicados em cada atividade.

A falta de informações detalhadas sobre o custo dos recursos, para este projeto, motivou a utilização do ti

po de cálculo citado para avaliar o custo da programação formada.

5.5. Programação Encontrada com a Aplicação do Modelo

O modelo desenvolvido neste trabalho, quando aplicado ao projeto de construção da barragem, forneceu a programação das datas de início das atividades apresentadas na rede da figura 21.

Os números sobre as flechas representam o código correspondente a cada atividade. A programação encontrada tem uma duração de 29 meses e o custo total da programação avaliado para o modelo é de Cr\$ 258.589.240,00.

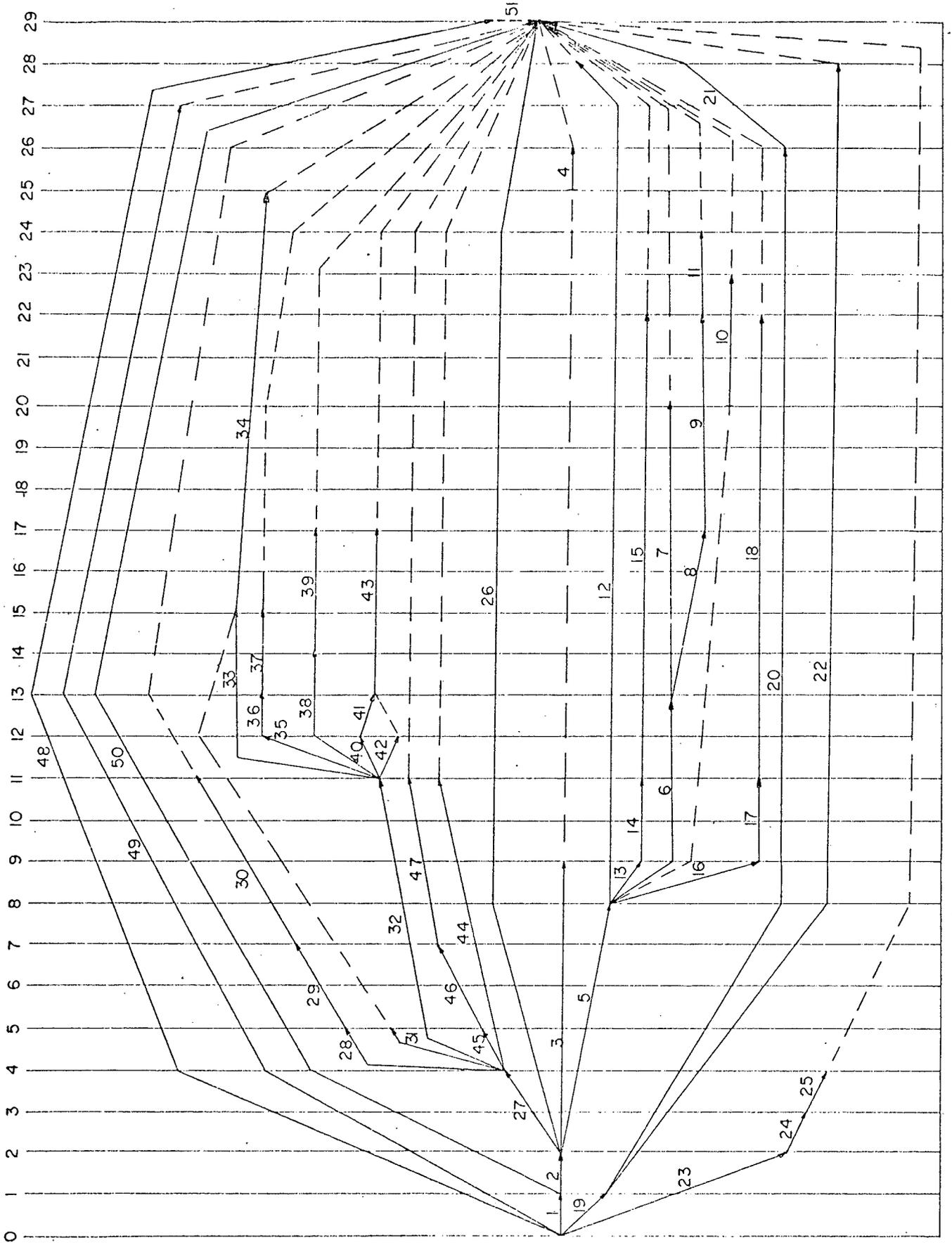


Figura 21. Programação para Recursos Restritos do Projeto de Construção da Barragem

5.6. Avaliação dos Resultados Obtidos

No início deste capítulo, foram apresentados alguns resultados dos testes iniciais realizados com o modelo, e que mostraram a sua eficiência para encontrar programações ótimas para projetos pequenos.

O multiprojeto com 25 atividades consumiu 2 segundos de CPU (Unidade Central de Processamento) para formar a programação de 20 períodos. Para o projeto da barragem, que incluiu os cálculos de custo, foram gastos 4 segundos de CPU para formar a programação de 29 períodos. Esta demanda computacional, considerando a complexidade do problema, é satisfatória.

A aplicação do modelo, proposto neste trabalho, possibilitou encontrar uma programação mais econômica para o projeto de construção da barragem, permitindo executá-la num período de tempo menor. A redução de custo obtida foi de aproximadamente Cr\$ 6.000.000,00 e o tempo foi reduzido em 2 meses. Foram eliminados os problemas de acúmulo de utilização dos recursos financeiros, permitindo-se uma melhor distribuição destes recursos durante a execução da obra. Estes resultados podem ser constatados nos gráficos do nível de utilização de recursos financeiros, apresentados nas figuras 22 e 23, onde são mostrados os dispêndios mensais referentes à programação feita pela empresa encarregada de executar a obra e os dispêndios mensais referentes à programação fornecida pelo modelo proposto.

A programação obtida permite uma utilização homogênea de todos os recursos restritos, além de garantir, para cada atividade, recursos suficientes para programá-la na data prevista para o seu início.

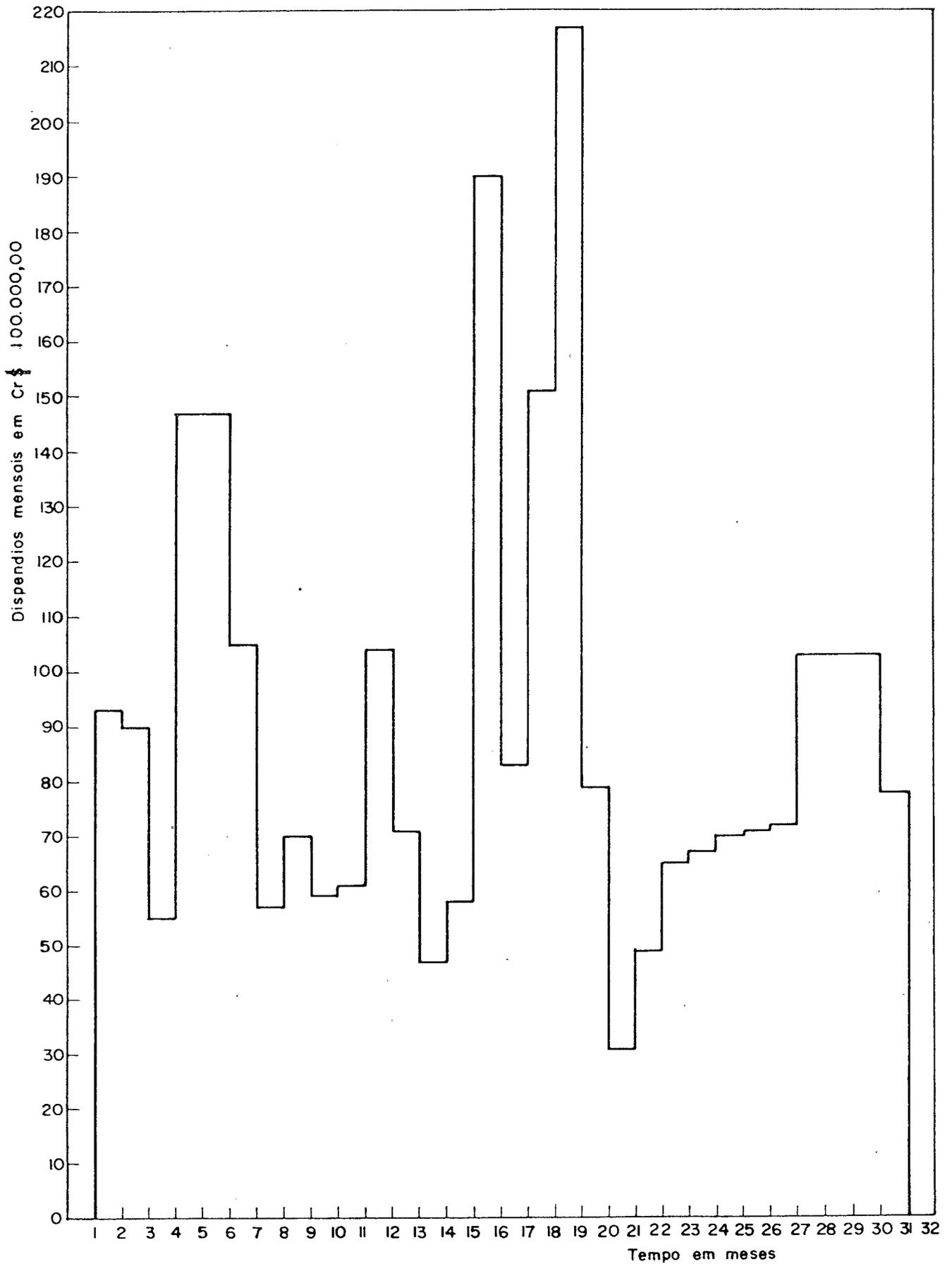


Figura 22. Gráfico do nível de utilização dos recursos financeiros, para a programação elaborada pela empresa encarregada de executar a obra.

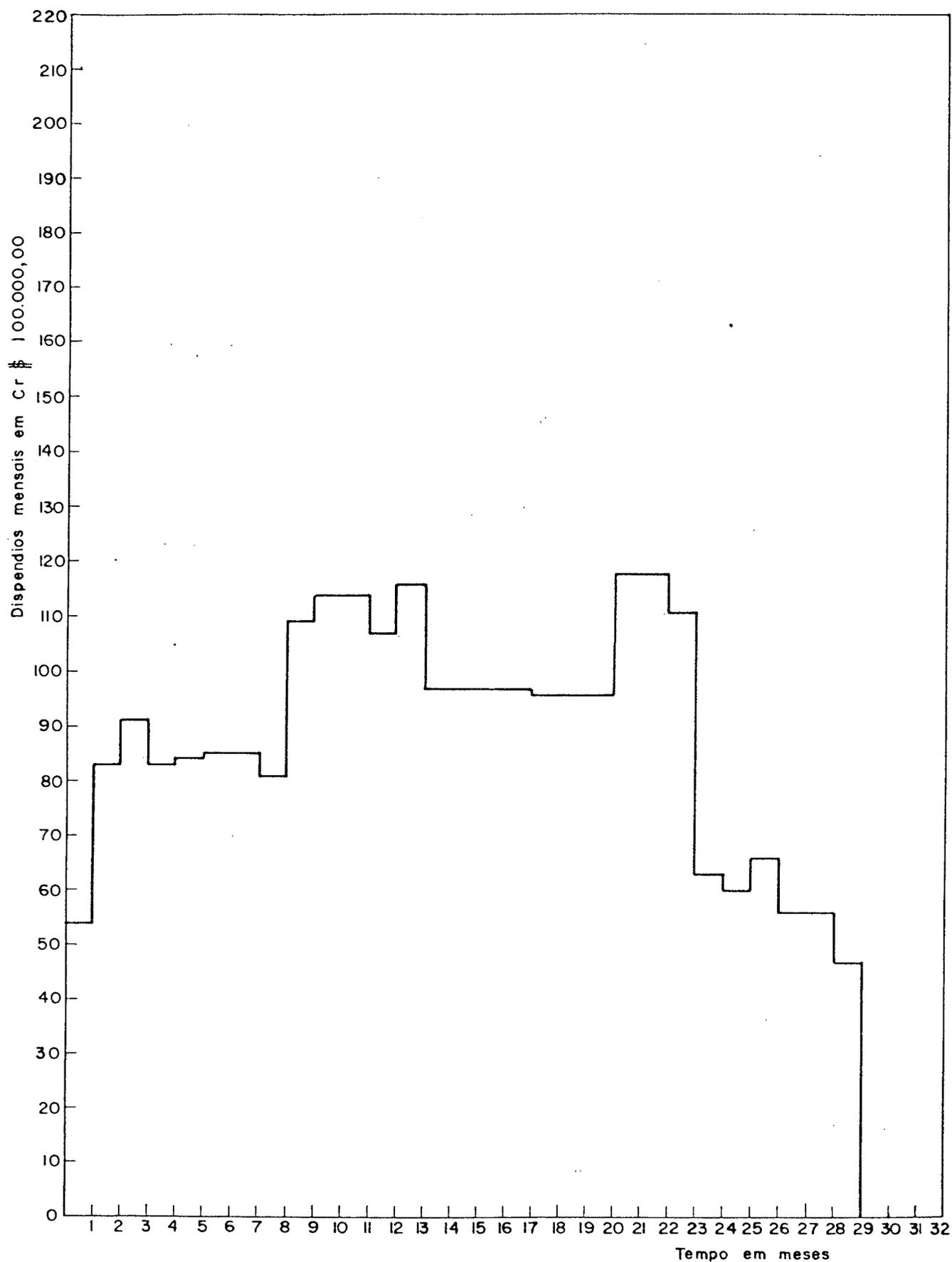


Figura 23. Gráfico do nível de utilização dos recursos financeiros, para programação obtida pelo modelo proposto.

O acúmulo de utilização dos recursos e a sua desconsideração durante a programação do projeto, fatalmente causam atrasos na execução de uma obra, ocasionam prejuízos e muitos problemas. No entanto, este fato ocorre com freqüência. O modelo é útil também para eliminar este tipo de atraso.

É preciso assinalar que as programações formadas pelo modelo podem apresentar resultados melhores, se as informações para elaboração da rede das atividades e a necessidade e disponibilidade de recursos forem mais detalhadas do que as utilizadas nesta aplicação prática.

Finalmente, é preciso ressaltar que os resultados obtidos pelo modelo e apresentados neste capítulo, foram bons e reafirmaram a eficiência da aplicação dos métodos de programação de projetos com restrição de recursos a grandes projetos de construção civil.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1. Conclusões

A base para uma administração eficiente de recursos recai no planejamento e na programação lógica, nas estimativas feitas e nas decisões tomadas pelos administradores, quando há mudanças na programação prévia.

Uma programação lógica deve ser obtida através de métodos que considerem, principalmente, as limitações de recursos. Tornando possível a concretização do empreendimento.

Contudo, freqüentemente, a escassez dos recursos necessários para executar um determinado projeto é desconsiderada na fase de programação. Esta ocorrência deve-se ao fato de que a utilização dos métodos de programação de projetos com recursos limitados, atualmente empregados, é restrita a grandes empresas e organizações.

O problema da programação com recursos limitados, pela sua complexidade e importância, tem merecido a atenção de muitos pesquisadores e de administradores de grandes empresas e muitos dos trabalhos desenvolvidos na área têm seus empregos restritos às empresas onde foram desenvolvidos.

O modelo heurístico alternativo proposto neste trabalho, sendo simples e de fácil utilização, poderá ser utilizado para programar projetos que apresentem as características citadas, e que freqüentemente ocorrem na prática.

Finalmente, é preciso ressaltar que o modelo heurístico proposto, pelas suas características, permite um aprimoramento nos resultados obtidos, com o desenvolvimento e utilização de subrotinas otimizadoras.

6.2. Recomendações

Para futuros estudos relacionados com a determinação de programação para projetos com recursos limitados. Sugere-se:

- Desenvolvimento de subrotinas otimizadoras para serem utilizadas em conjuntos com este modelo e que possibilitem melhorar as programações em termos de duração do projeto.

- A adaptação deste algoritmo, utilizando-o de forma a permitir variações na quantidade de recursos aplicados às atividades e variações nas quantidades de recursos disponíveis.

BIBLIOGRAFIA

01. ACKOFF, Russell L. & SASIENI, Maurice W. Pesquisa operacional. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos, 1977.
02. AGIN, Norman. Optimum seeking with branch and bound. Management Science, Providence, 13 (4): B. 176 - 84, Dec. 1966.
03. COOPER, Dale F. Heuristic for scheduling resource - constrained project: an experimental investigation. Management Science, Providence, 22 (11): 1186 - 94, Jul. 1976.
04. DAVIES, E.M. An experimental investigation of resource allocation in multiactivity project. Operation Research Quaterly, Oxford, 24, p. 587 - 95, 1973.
05. DAVIS, Edward W. Resource allocation in project network - Models - a survey. The Journal of Industrial Engineering, New York, p. 177 - 88, Apr. 1966.
06. DAVIS, Edward W. & PATTERSON, James H. A comparison of heuristic and optimum solution in resource - constrained project scheduling. Management Science, Providence, 21 (8): 944 - 55, Apr. 1975.
07. DAVIS, Edward W. & HEIDORN, George E. An algorithm for optimal project scheduling under multiple resource constraints. Management Science, Providence, 17 (12): B. 803 - 16, Aug. 1971.
08. ELMAGHRABY, Salah Eldin. Activity network: project planning and control by network models. New York, John Wiley & Sons, 1977.
09. HASTINGS, N.A.J. On resource allocation in project network, Operational Research Quaterly, Oxford, 23, 217 - 66, 1972.
10. HERROELEN, Willy S. Resource - constrained project scheduling - The state of the art. Operational Research Quaterly, Oxford, 23, 261 - 72, 1972.

11. HILLIER, Frederick S. & LIEBERMAN, Gerald J. Operations re-
search, San Francisco, Holden-Day, 1974.
12. HIRSCHFELD, Henrique. Planejamento com PERT/CPM e análise do
desempenho. São Paulo, Ed. Atlas, 1977.
13. HOLANDA, Nilson. Planejamento e projetos. Rio de Janeiro ,
APEC Editora, 1975.
14. IBM World Trade Corporation - IBM System/370 - Project Analy -
sis and Control System (PROJACS). New York, 1973.
15. LEITE, José Alfredo A. Metodologia de elaboração de teses. São
Paulo, Mc Graw - Hill do Brasil, 1978.
16. MARTIN, William R. Aplicación de las técnicas PERT/CPM a la
planificación y control de la construcción. Barcelona, Ed.
Blume, 1972
17. MARTINO, R.L. Resources management. Wayne, MDI Publications,
1968.
18. MASON, A. Thomas & MOODIE, Colin L. A branch and bound algo -
rithm for minimizing cost in project scheduling. Management
Science, Providence, 18 (4): B. 158 - 62, Dec. 1971.
19. PACITTI, Tércio & ATKINSON, Cyril P. Programação e métodos com
putacionais. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos ,
2.v., 1975.
20. PENNINGTON, Ralph H. Introductory computer methods and numeri
cal analysis. London, Collier - Macmillan Student Editions.
1965.
21. STANGER, Luiz B. PERT/CPM Técnica de planejamento e controle.
Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora. 1975.

22. THESEN, Arne. Heuristic scheduling of activities under resource and precedence restrictions. Management Science, Providence, 23 (4): 1104 - 08, Dec. 1976.
23. WIEST, Jerome D. A heuristic model for scheduling large project with limited resources. Management Science, Providence, 13 (6), 458 - 89, Feb. 1967.
24. WIEST, Jerome D. & LEVY, Ferdinand K. A management guide to PERT/CPM. New Jersey, Prentice - Hall, 1969.
25. WILLIS, R.J. & HASTINGS, N.A.J. Project scheduling with resource constraints using branch and bound methods. Operational Research Quaterly, Oxford, 27 (2): 341 - 49, 1976.
26. WOODHEAD, Ronald W. & ANTILL, James. CPM aplicado às construções. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora, 1971.

A N E X O S

A N E X O 1

Programação Obtida, pelo Modelo,
para o Projeto de Construção de uma Barragem

Este anexo mostra o relatório da programação obtida, pelo programa computacional, referente ao modelo desenvolvido para o projeto de construção da barragem apresentado no capítulo 5. Inicialmente, são apresentados os parâmetros de entrada do projeto, posteriormente, a programação para recursos limitados e, finalmente, a programação para recursos limitados.

As variáveis utilizadas na programação foram as seguintes:

TEMPO = Duração total do projeto para os recursos ilimitados.

N·ATIV = Número de atividades do projeto.

NUM = Código da atividade.

INÍCIO = Número do nó inicial.

FIM = Número do nó final

RECURSOS DISPONÍVEIS = Quantidade disponível, por período, dos recursos limitados.

RECURSOS NECESSÁRIOS = Quantidade necessária, por período, dos recursos para executar cada atividade.

ATI DO DIA = Código das atividades disponíveis para iniciar no período considerado.

ATIV PROGR = Códigos das atividades programadas para começar no período.

ATIV TRANS = Código das atividades transferidas, quando há troca de uma atividade já programada por outra do caminho crítico.

ATIV ANDAM = Código das atividades em andamento no período considerado.

REC GASTO = Quantidade de recursos utilizados nas atividades em execução no período.

PDI = Primeira data de início da atividade.

PDT = Primeira data de término da atividade.

UDI = Última data de início da atividade.

UDT = Última data de término da atividade.
FL = Folga livre.
FT = Folga total.

No final do relatório aparecem os valores do custo total da programação obtida para os recursos limitados e a duração desta programação.

Os recursos limitados são apresentados no relatório na seguinte ordem:

- a) Recurso financeiro, em cruzeiros.
- b) Mão de obra, em número de operários.
- c) Volume de concreto, em m^3 por mês.
- d) Número de pás mecânicas.
- e) Número de escavadeiras.

REDE CONSIDERADA

TEMPO = 29 N ATIV = 51

RECURSOS DISPONIVEIS = 9000000 330 2400 6 3

ATIVIDADES

NUM	INICIO	FIM	TEMPO
1	1	2	1
2	2	3	1
3	3	5	7
4	5	30	1
5	3	6	6
6	6	13	5
7	13	30	7
8	13	14	4
9	14	15	5
10	6	30	3
11	15	30	2
12	6	30	20
13	6	16	1
14	16	17	2
15	17	30	11
16	6	10	1
17	10	11	2
18	11	30	11
19	1	7	1
20	7	12	25
21	12	30	3
22	7	30	27
23	1	8	2
24	8	9	1
25	9	30	1
26	3	30	27
27	3	4	2
28	4	27	1
29	27	28	2
30	28	30	4

31	4	26	1
32	4	19	7
33	19	26	4
34	26	30	10
35	19	20	1
36	20	25	1
37	25	30	2
38	19	24	3
39	24	30	3
40	19	22	1
41	22	23	1
42	19	23	1
43	23	30	4
44	4	30	7
45	4	18	1
46	18	21	2
47	21	30	4
48	1	29	29
49	1	30	27
50	2	30	28
51	29	30	0

NUM	RECURSOS	NECESSARIOS			
-----	----------	-------------	--	--	--

1	541588	15	0	0	0
2	3323978	50	0	0	0
3	180529	15	0	0	0
4	1083177	10	1902	0	0
5	2601861	20	0	2	1
6	2601861	20	0	2	1
7	2601861	20	0	2	1
8	153291	10	0	2	1
9	312411	20	0	2	1
10	4732000	20	0	2	1
11	297118	18	0	0	0
12	857253	30	0	1	1
13	305864	0	0	0	0
14	411740	8	0	0	0
15	105877	8	0	0	0

16	1616282	0	0	0	0
17	2175763	10	0	0	0
18	559482	10	0	0	0
19	1424173	10	0	0	0
20	1424173	10	0	0	0
21	1512962	26	0	0	0
22	77037	6	0	0	0
23	393634	0	0	0	0
24	1312110	0	0	0	0
25	524844	12	0	0	0
26	43333	6	0	0	0
27	310282	10	315	0	0
28	17605	0	0	0	0
29	44010	8	0	0	0
30	26407	8	0	0	0
31	19500	3	0	0	0
32	532619	20	630	0	0
33	532619	20	630	0	0
34	532619	20	630	0	0
35	35100	0	0	0	0
36	28500	0	0	0	0
37	11700	14	0	0	0
38	43295	23	0	0	0
39	15129	8	0	0	0
40	1316250	0	0	0	0
41	2193750	0	0	0	0
42	9750	10	0	0	0
43	219375	15	0	0	0
44	29715	8	0	0	0
45	360966	0	0	0	0
46	438317	8	0	0	0
47	77350	8	0	0	0
48	125518	10	0	0	0
49	8425	15	0	0	0
50	22634	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0

PROGRAMA PARA RECURSOS ILIMITADOS

PDI	PDT	UDI	UDT	FT	FL
0	1	0	1	0	0
1	2	1	2	0	0
2	9	21	28	19	0
9	10	28	29	19	19
2	8	3	9	1	0
8	13	13	18	5	0
13	20	22	29	9	9
13	17	18	22	5	0
17	22	22	27	5	0
8	11	26	29	18	18
22	24	27	29	5	5
8	28	9	29	1	1
8	9	15	16	7	0
9	11	16	18	7	0
11	22	18	29	7	7
8	9	15	16	7	0
9	11	16	18	7	0
11	22	18	29	7	7
0	1	0	1	0	0
1	26	1	26	0	0
26	29	26	29	0	0
1	28	2	29	1	1
0	2	25	27	25	0
2	3	27	28	25	0
3	4	28	29	25	25
2	29	2	29	0	0
2	4	6	8	4	0
4	5	22	23	18	0
5	7	23	25	18	0
7	11	25	29	18	18
4	5	18	19	14	10
4	11	8	15	4	0

11	15	15	19	4	0
15	25	19	29	4	4
11	12	25	26	14	0
12	13	26	27	14	0
13	15	27	29	14	14
11	14	23	26	12	0
14	17	26	29	12	12
11	12	23	24	12	0
12	13	24	25	12	0
11	12	24	25	13	1
13	17	25	29	12	12
4	11	22	29	18	18
4	5	22	23	18	0
5	7	23	25	18	0
7	11	25	29	18	18
0	29	0	29	0	0
0	27	2	29	2	2
1	29	1	29	0	0
29	29	29	29	0	0

PROGRAMA PARA RECURSOS LIMITADOS

PERIODO = 1

ATI DO DIA =	1	19	48	49	23				
ATIV PROGR =	1	19	48	49	23				
REC GASTO =	2493338			50		0		0	0

PERIODO = 2

ATI DO DIA =	2	20	50	22					
ATIV PROGR =	2	20	50	22					
ATIV ANDAM =	48	49	23						
REC GASTO =	5375399			91		0		0	0

PERIODO = 3

ATI DO DIA =	26	5	27	3	24				
ATIV PROGR =	26	5	27	3	24				
ATIV ANDAM =	48	49	20	50	22				
REC GASTO =	6105902			92		315		2	1

PERIODO = 4

ATI DO DIA =	25								
ATIV PROGR =	25								
ATIV ANDAM =	48	49	20	50	22	26	5	27	3
REC GASTO =	5318636			104		315		2	1

PERIODO = 5

ATI DO DIA =	32	31	28	44	45				
	44	44							
ATIV PROGR =	32	31	28	45	44				
ATIV ANDAM =	48	49	20	50	22	26	5	3	
REC GASTO =	5443915			113		630		2	1

PERIODO = 6

ATI DO DIA = 29 46
 ATIV PROGR = 29 46
 ATIV ANDAM = 48 49 20 50 22 26 5 3 32 44
 REC GASTO = 5528171 126 630 2 1

PERIODO = 7

ATIV ANDAM = 48 49 20 50 22 26 5 3 32 44 29 46
 REC GASTO = 5528171 126 630 2 1

PERIODO = 8

ATI DO DIA = 30 47
 ATIV PROGR = 30 47
 ATIV ANDAM = 48 49 20 50 22 26 5 3 32 44
 REC GASTO = 5145601 126 630 2 1

PERIODO = 9

ATI DO DIA = 12 6 13 16 10
 ATIV PROGR = 12 6 13 16
 ATIV ANDAM = 48 49 20 50 22 26 3 32 44 30 47
 REC GASTO = 7929000 156 630 3 2

PERIODO = 10

ATI DO DIA = 14 17 10 4
 ATIV PROGR = 14 17
 ATIV ANDAM = 48 49 20 50 22 26 32 44 30 47 12 6
 REC GASTO = 8413828 159 630 3 2

PERIODO = 11

ATI DO DIA = 10 4
 ATIV ANDAM = 48 49 20 50 22 26 32 44 30 47 12 6
 ATIV ANDAM = 14 17
 REC GASTO = 8413828 159 630 3 2

PERIODO = 12

ATI DO DIA = 33 15 18 38 40 42 35 10 4
38 38

ATIV PROGR = 33 15 18 40 38 42 35

ATIV ANDAM = 48 49 20 50 22 26 12 0

REC GASTO = 7762607 168 630 3 2

PERIODO = 13

ATI DO DIA = 41 10 36 4
10 10

ATIV PROGR = 41 36

ATIV ANDAM = 48 49 20 50 22 26 12 6 33 15 18 38

REC GASTO = 8623757 158 630 3 2

PERIODO = 14

ATI DO DIA = 8 7 43 10 37 4

ATIV PROGR = 8 7 43 37

ATIV ANDAM = 48 49 20 50 22 26 12 33 15 18 38

REC GASTO = 6785873 197 630 5 3

PERIODO = 15

ATI DO DIA = 10 39 4

ATIV PROGR = 39

ATIV ANDAM = 48 49 20 50 22 26 12 33 15 18 8 7

ATIV ANDAM = 43 37

REC GASTO = 6757707 182 630 5 3

PERIODO = 16

ATI DO DIA = 34 10 4

ATIV PROGR = 34

ATIV ANDAM = 48 49 20 50 22 26 12 15 18 8 7 43

ATIV ANDAM = 39

REC GASTO = 6746007 168 630 5 3

PERIODO = 17

ATI DO DIA = 10 4
 ATIV ANDAM = 48 49 20 50 22 26 12 15 18 8 7 43
 ATIV ANDAM = 39 34
 REC GASTO = 6746007 158 630 5 3

PERIODO = 18

ATI DO DIA = 9 10 4
 ATIV PROGR = 9
 ATIV ANDAM = 48 49 20 50 22 26 12 15 18 7 34
 REC GASTO = 6670623 155 630 5 3

PERIODO = 19

ATI DO DIA = 10 4
 ATIV ANDAM = 48 49 20 50 22 26 12 15 18 7 34 9
 REC GASTO = 6670623 155 630 5 3

PERIODO = 20

ATI DO DIA = 10 4
 ATIV ANDAM = 48 49 20 50 22 26 12 15 18 7 34 9
 REC GASTO = 6670623 155 630 5 3

PERIODO = 21

ATI DO DIA = 10 4
 ATIV PROGR = 10
 ATIV ANDAM = 48 49 20 50 22 26 12 15 18 34 9
 REC GASTO = 8800762 155 630 5 3

PERIODO = 22

ATI DO DIA = 4
 ATIV ANDAM = 48 49 20 50 22 26 12 15 18 34 9 10
 REC GASTO = 8800762 155 630 5 3

PERIODO = 23

ATI DO DIA = 11 4

ATIV PROGR = 11

ATIV ANDAM = 48 49 20 50 22 26 12 34 10

REC GASTO = 8120110 135 630 3 2

PERIODO = 24

ATI DO DIA = 4

ATIV ANDAM = 48 49 20 50 22 26 12 34 11

REC GASTO = 3388110 115 630 1 1

PERIODO = 25

ATI DO DIA = 4

ATIV ANDAM = 48 49 20 50 22 26 12 34

REC GASTO = 3090992 97 630 1 1

PERIODO = 26

ATI DO DIA = 4

ATIV PROGR = 4

ATIV ANDAM = 48 49 20 50 22 26 12

REC GASTO = 3641550 87 1902 1 1

PERIODO = 27

ATI DO DIA = 21

ATIV PROGR = 21

ATIV ANDAM = 48 49 50 22 26 12

REC GASTO = 2647162 93 0 1 1

PERIODO = 28

ATIV ANDAM = 48 50 22 26 12 21

REC GASTO = 2638737 78 0 1 1

PERIODO = 29

ATIV ANDAM = 48 50 26 21

REC GASTO = 1704447 42 0 0 0

PERIODO = 30

ATI DO DIA = 51

ATIV PROGR = 51

REC GASTO = 0 0 0 0 0

CUSTO = 258589248 TEMPO = 29