

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
UFSC**

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção

**OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO DA MANUTENÇÃO PREVENTIVA EM
SISTEMAS COMPLEXOS, COM FOCO NA CADEIA DE SUPRIMENTO**

Dissertação de Mestrado

DANILO XAVIER ROCHA

Florianópolis

2002

DANILO XAVIER ROCHA

OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO DA MANUTENÇÃO PREVENTIVA EM
SISTEMAS COMPLEXOS, COM FOCO NA CADEIA DE SUPRIMENTO

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do Título de "Mestre em Engenharia de Produção", área de concentração Logística e Transporte.

Orientador: Prof. Sérgio Fernando Mayerle, Dr.

Florianópolis

2002

DANILO XAVIER ROCHA

**OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO DA MANUTENÇÃO PREVENTIVA EM
SISTEMAS COMPLEXOS, COM FOCO NA CADEIA DE SUPRIMENTO**

Esta dissertação foi julgada adequada e aprovada para obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO no Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 29 de novembro de 2002

Prof. Edson Pacheco Paladini, Dr.
Coordenador do curso

BANCA EXAMINADORA

Prof. Sérgio Fernando Mayerle, Dr. - Orientador

Prof. Antônio Sérgio Coelho, Dr.

Prof. João Neiva de Figueiredo, Dr.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Sérgio Fernando Mayerle, pelo apoio e orientação, fundamentais no desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, pela estrutura que viabilizou o curso.

À Petrobras - Petróleo Brasileiro SA, pela oportunidade.

RESUMO

Sistemas de produção de grandes dimensões e complexos, compostos por múltiplos subsistemas de complexidade igualmente elevada, têm como uma de suas características a dificuldade em se determinar um plano ótimo de operações de longo prazo onde as intervenções para manutenção preventiva nos subsistemas sejam, do ponto de vista do resultado econômico geral, previstas para o momento realmente mais adequado. Neste trabalho é desenvolvida uma ferramenta de apoio às decisões relacionadas com a definição do planejamento das paradas de subsistemas produtivos para manutenção preventiva, considerando de forma central os aspectos relacionados com a produção e o mercado. A ferramenta desenvolvida emprega dois submodelos onde são solucionadas sequencialmente etapas distintas do problema. Na primeira, utilizando-se de um modelo de programação linear, desenvolve-se uma base de dados formada a partir de soluções para o plano de produção em cada possível configuração de paradas nos subsistemas. Na segunda etapa, a partir da base de dados gerada inicialmente, o plano de paradas é obtido por meio da aplicação da técnica de algoritmo genético. Posteriormente, utilizando-se o estudo de caso de uma refinaria de petróleo, a metodologia desenvolvida é testada. Através de análises de sensibilidade com a alteração de parâmetros, a consistência das soluções obtidas é verificada e as conclusões e possibilidades de desenvolvimento são apresentadas.

ABSTRACT

It is difficult to define an optimal long term operations plan which includes preventive maintenance intervention in large and complex production systems, composed of many subsystems with high complexity levels. In this dissertation a support tool for the definition of a preventive maintenance schedules in productive subsystems is developed, taking into consideration aspects related to the production and the market. The developed tool uses two sub models where different stages of the problem are sequentially solved. In the first one, a database formed from the solutions to the production plan in each possible configuration of the system maintenance schedule is developed using linear programming. In the second stage, from the database constructed in the first stage, the optimal maintenance schedule is obtained by means of the application of genetic algorithm techniques. The methodology and algorithm were tested on an oil refinery case. Through sensitivity analyses with parameter alterations, the consistency of the solutions obtained were verified.

ÍNDICE

Lista de figuras	ix
Lista de tabelas e quadros	ix
1. Introdução	1
1.1. Origem	1
1.2. Objetivo	4
1.3. Importância	6
1.3.1. A estrutura organizacional nas empresas modernas	6
1.3.2. Tomada de decisão nas grandes organizações	7
1.3.3. Relacionamento entre os planos de manutenção e de produção	9
1.4. Limitações.....	12
1.5. Estrutura do trabalho.....	13
2. Revisão bibliográfica	15
2.1. Considerações iniciais	15
2.2. Políticas de manutenção	16
2.3. Planejamento (<i>planning</i>) e Programação (<i>scheduling</i>)	19
2.4. Aplicação e classificação dos problemas de programação	21
2.5. Métodos de solução para os problemas de programação.....	24
2.6. Modelos de otimização da política de manutenção preventiva	25
3. Descrição conceitual do problema	29
3.1 Considerações iniciais.....	29
3.2 Características dos sistemas de produção de alta complexidade	29
3.3 Descrição do problema da otimização do Plano de Paradas de Manutenção	32
3.4 Condições de contorno.....	34

4. Modelo proposto e técnica de solução	41
4.1 Considerações iniciais.....	41
4.2 Técnica de solução empregada	41
4.3 Etapa 1: Determinação das configurações (Modelo de Programação Linear)	42
4.3.1 Visão geral do modelo	43
4.3.2 Parâmetros do modelo.....	43
4.3.3 Variáveis de decisão.....	45
4.3.4 Descrição do modelo.....	45
4.4 Etapa Intermediária: preparo da base de dados para a etapa 2	49
4.5 Etapa 2: Planejamento de Paradas (modelo de Algoritmo Genético)	53
4.5.1 Visão geral do modelo	53
4.5.2 Parâmetros do modelo.....	55
4.5.3 Descrição do modelo.....	56
5. Estudo de caso.....	61
5.1. Considerações iniciais	61
5.2. Estudo piloto.....	61
5.2.1. Descrição do processo produtivo e dos subsistemas componentes	61
5.2.2. Descrição da refinaria escolhida para o estudo de caso.....	63
5.2.3. Apresentação dos dados.....	66
5.2.3.1. Dados utilizados na primeira etapa.....	66
5.2.3.2. Dados utilizados na fase intermediária e na etapa final.....	68
5.2.4. Análise dos resultados.....	69
6. Conclusões, recomendações e possibilidades de desenvolvimento.....	74
6.1. Conclusões e recomendações	74
6.2. Oportunidades de desenvolvimento.....	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78
APÊNDICE I - MODELO DE GA - DIAGRAMA DESCRITIVO.....	81

APÊNDICE II - FLUXOGRAMA PROD. DE UMA REFINARIA COMPLEXA.....	82
APÊNDICE III - TESTES DO MODELO - ALTERAÇÃO DE PARÂMETROS	83
APÊNDICE IV - TESTES DO MODELO – CRONOGRAMAS	84

Lista de Figuras

Figura 1.1	Processos de decisão	7
Figura 2.1	Modelo genérico de planta complexa.....	16
Figura 3.1	<i>Road map</i> para problemas de <i>scheduling</i>	34
Figura 4.1	Fluxograma geral de solução.....	42
Figura 4.2	Sistema de produção representado através de fluxo em rede.....	43
Figura 4.3	Tabela de configurações.....	48
Figura 4.4	Retorno econômico de um período	50
Figura 4.5	Exemplo de um plano (indivíduo).....	53
Figura 5.1	Fluxograma de produção da refinaria.....	64

Lista de tabelas

Tabela 5.1	Dados utilizados na etapa 1	66
Tabela 5.2	Rendimentos de produtos nas unidades	67
Tabela 5.3	Dados sobre as paradas das unidades.....	68

1 Introdução

1.1 Origem (motivação)

No atual nível mundial de competição entre as empresas, a utilização eficiente de todos os fatores de produção e, particularmente, do capital é uma exigência constante. Por outro lado, em que pese o desenvolvimento dos estudos voltados para o aumento da confiabilidade de máquinas e equipamentos em geral, a indisponibilidade periódica dos mesmos para fins de inspeções, revisões e reparos é uma necessidade praticamente incontestável.

Planejar o momento mais propício para que a intervenção de manutenção ou, em outras palavras, a redução da capacidade produtiva seja realizada, considerando os vários aspectos internos e externos às empresas, é uma tarefa que, por vezes, tem sido ignorada e, quando enfrentada, sua complexidade tem dificultado a implantação de avaliações sistematizadas de políticas de longo prazo que possam orientar ações estratégicas visando a otimização dos resultados para o conjunto.

Externamente, por exemplo, as empresas têm que lidar com aspectos relacionados às tendências e sazonalidades dos mercados, intimamente associadas com as variações nas demandas de matéria prima e produtos. Internamente, a indisponibilidade de máquinas, equipamentos e até mesmo de processos e sistemas de produção são decisões de peso e que podem impactar fortemente seus resultados.

Em algumas situações vividas em determinadas empresas a questão é particularmente complexa.

Grandes conglomerados industriais com múltiplas unidades produtivas territorialmente dispersas atuando, porém, de maneira integrada, dependem ainda mais da eficiência destas políticas. Sua principal vantagem competitiva, a integração, por vezes pode não se consubstanciar em planos de operação sobre os quais se tenha a segurança de que são

capazes de maximizar os resultados corporativos no longo prazo.

Esta situação pode ser verificada particularmente na indústria petrolífera, principalmente no setor de refino, e se torna mais crítica e complexa ao considerar-se de forma integrada as atividades de transporte e de exploração e produção de petróleo. Nestas empresas, a interação existente entre as atividades de produção, transporte e refino do petróleo permite maior flexibilidade e amplia as possibilidades de ganhos advindos da integração, porém exige que a mesma se dê de forma bastante articulada e sincronizada.

Neste contexto, a necessidade de parar uma unidade de processamento dentro de uma refinaria, representa a possibilidade de impactos dentro da própria empresa em várias frentes, sendo as principais, a interrupção do processamento de matéria prima, a interrupção da produção de determinados derivados finais e o desbalanceamento interno de derivados intermediários.

Este é um dos momentos em que fica evidente a importância do gerenciamento integrado da cadeia de suprimento da empresa, normalmente coordenado pela atividade de Logística. Várias ações associadas a planos de contingência especialmente elaborados devem ser implementadas no sentido de solucionar ou amenizar os problemas verificados e, para tal, deverão estar disponíveis alternativas para fontes supridoras e recursos de armazenagem e transporte, previamente definidos durante a fase de planejamento.

Vale lembrar ainda, por exemplo, a importância de que outras unidades similares existentes em diferentes refinarias do sistema, dentro da mesma área de influência da cadeia de suprimento, não estejam parando simultaneamente visando impedir o agravamento da situação de desbalanceamento, sobrecarregando os sistemas de transferência e de suprimento dos pontos de consumo que necessitam ser atendidos.

Este pode ser considerado como um breve resumo da realidade vivenciada pela indústria de refino do petróleo no Brasil, representada pela Petrobras. A atividade de Logística desta empresa vem, ao longo do tempo, desenvolvendo uma série de trabalhos voltados para a

otimização do planejamento de paradas de manutenção das unidades de processamento da empresa, com foco na maximização dos resultados de toda a cadeia de suprimento, que resultaram em uma série de práticas, procedimentos e sistemas de informações.

Em geral, entretanto, todos os processos de avaliação e consolidação dos planos de paradas já desenvolvidos partem de uma proposta básica inicial encaminhada pelas refinarias e pela área de transporte, que também elabora um planejamento de paradas de manutenção nos dutos e terminais, seguindo diretrizes e regras gerais para a programação das paradas. Particularmente para as unidades de processamento das refinarias, estas diretrizes se traduzem em recomendações de períodos menos críticos para a realização de paradas, considerando os produtos que serão mais impactados com a parada e principalmente a sazonalidade de mercado.

De posse dos planos de paradas das refinarias, a Logística desenvolve um trabalho de análise e coordena o ajuste dos mesmos considerando a visão integral da empresa. Este trabalho desenvolvido pela atividade de Logística tem como principais objetivos:

- evitar que ocorra a sobreposição de paradas de unidades do mesmo tipo (com mesmo perfil de produção de derivados), em uma mesma região, dentro de um determinado período;
- evitar concentração excessiva de paradas, mesmo que não sobrepostas, em um determinado período;
- prevenir-se contra a indisponibilidade dos recursos de transporte que serão necessários para solucionar problemas de suprimento do mercado e de desbalanceamento de produtos intermediários;
- quando necessário, propor melhores alternativas de paradas para as unidades operacionais das refinarias. Para desenvolvimento destas propostas, a atividade de Logística elabora cenários alternativos e, quando necessário, os testa através de um modelo corporativo de otimização do suprimento.

Observa-se, portanto, que do ponto de vista do planejamento integrado de paradas da

empresa, a partir de um conjunto de regras e diretrizes básicas, parte-se do pressuposto que o plano inicialmente proposto por cada refinaria é o melhor em termos de distribuição e vinculação interna das paradas das unidades, restando, então, ajustá-los e tornar todos os planos das várias refinarias existentes no sistema compatíveis entre si.

Acredita-se que o presente trabalho possibilite fornecer, inicialmente, um plano de paradas da refinaria com uma visão otimizada que eventualmente poderá servir como um embrião de modelo otimizador do planejamento de paradas da empresa como um todo, considerando mais fortemente nesta segunda etapa de desenvolvimento, os aspectos logísticos relacionados com a problemática tais como estoques, sazonalidade de mercado, custos e disponibilidade de recursos de transporte, etc. Neste aspecto poderá, inclusive, ser explorada a alocação mais adequada de paradas de manutenção dos próprios recursos de transporte (oleodutos).

1.2 Objetivo

O objetivo específico deste estudo é disponibilizar uma ferramenta para apoiar a elaboração de cronogramas de paradas para manutenção em unidades inseridas em sistemas produtivos complexos, com foco na otimização do resultado econômico do plano de operações destes sistemas no longo prazo, considerando as principais variáveis e restrições relacionadas com os diversos aspectos envolvidos no problema.

Por outro lado, ao tornar o processo de definição do planejamento de longo prazo mais direto e transparente, outros objetivos estratégicos poderão ser alcançados.

O primeiro deles relaciona-se com o gerenciamento de custos e recursos em geral para manutenção e a problemática da distribuição de capacidade de produção ao longo do tempo. Pretende-se que este processo de planejamento crie condições mais favoráveis ao direcionamento correto das ações gerenciais nos planos operacional, tático e estratégico, por meio de uma atuação em custos mais consistente e coerente com os ganhos advindos de uma adequada distribuição da capacidade disponível para produção pois, esta adequação é

condição necessária para a obtenção de um bom nível de atendimento às demandas do mercado e, conseqüentemente, para o aumento da capacidade de geração de receitas.

Outro aspecto que poderá ser impactado positivamente com a implantação deste processo é o relacionamento entre as diferentes atividades envolvidas nas decisões. A crescente demanda por competitividade, por exemplo, vem exigindo cada vez mais esforços na redução de custos e, na busca deste objetivo, por diversos motivos, não é raro observar-se situações de conflito entre atividades, ou até mesmo pessoas, no interior das empresas modernas, interferindo sobre o clima de cooperação que deve estar sempre presente para o sucesso do negócio. Sem pretender substituir as atribuições dos decisores, a utilização de uma ferramenta de apoio às tomadas de decisão no planejamento permite que o balanceamento das limitações e demandas das diversas atividades envolvidas no problema seja tratado de forma objetiva, viabilizando um caminho a mais para auxiliar na solução das situações de conflito.

Por último, como objetivo estratégico fundamental, encontra-se a busca dos melhores resultados possíveis no longo prazo. Muito tem sido dito sobre a maximização da agregação de valor para o acionista, mantendo-se um balanceamento adequado das decisões que interferem sobre os resultados de curto, médio e longo prazos para a empresa. Ou seja, a necessidade de se manter um comportamento responsável em relação ao futuro, buscando sempre, como função objetivo predominante, a maximização do valor da empresa e evitando posturas imediatistas que aumentam os lucros no curto prazo, mas que podem comprometer gravemente o sucesso da empresa no futuro.

Entretanto, alguns aspectos operacionais relacionados com o dia a dia das indústrias por vezes não são adequadamente considerados nos planos de longo prazo, como se não houvesse ligação entre os diferentes horizontes de planejamento. Atividades como as paradas de manutenção preventiva que se repetem com baixa frequência (a cada 3 ou 5 anos, por exemplo), mas que podem apresentar alto impacto em custos, receitas, eficiência e capacidade de atendimento aos compromissos com clientes e fornecedores, não devem ser tratadas como acontecimentos isolados e dissociados dos resultados globais, principalmente

em sistemas produtivos complexos e com altos níveis de integração e dependência entre os subsistemas que os compõem. .

1.3 Importância

1.3.1 A estrutura organizacional nas empresas modernas

O desenvolvimento das técnicas de produção que possibilitou o nascimento das grandes empresas modernas e deu origem às suas atuais estruturas organizacionais tem como origem histórica a Revolução Industrial.

Na verdade, são vários os trabalhos de análise da organização sócio econômica capitalista que consideram a Revolução Industrial como um processo ainda em curso, no qual observa-se, até o momento, quatro fases relativamente distintas.

A primeira corresponde ao início do processo em fins do século XVIII e está relacionada ao uso do vapor como energia motriz. A segunda, em fins do século XIX, inicia-se a partir do uso da eletricidade para a movimentação de máquinas e equipamentos de uma forma mais aperfeiçoada. A terceira, no período entre as grandes guerras mundiais, refere-se à adoção de novos métodos de produção, como a linha de montagem e a produção em série e, finalmente, a partir dos anos 60, ocorre a introdução da automação e da robotização em vários setores industriais.

Ao longo deste processo, a crescente diversidade de aspectos envolvidos no funcionamento das indústrias fez com que o número de áreas organizacionais se multiplicasse tremendamente no interior das empresas, abrigando áreas de conhecimento e funções altamente especializadas.

Contraditoriamente, ao mesmo tempo em que este processo possibilitou o crescimento acelerado das indústrias, a elevação do grau de complexidade das estruturas criou problemas que, por vezes, chegam a fechar algumas delas. Não são raros os conflitos

observados nos valores, estratégias e metas adotados em diferentes funções presentes nas empresas.

É devido a isto que as organizações vêm empreendendo grande esforço na busca da redução dos níveis hierárquicos e na transformação das antigas estruturas organizacionais, onde as funções trabalhavam de forma isolada, para estruturas mais modernas em que os diversos setores da empresas se vêm como parte de um processo, com o foco de suas atividades voltado permanentemente para a maximização dos resultados de todo o conjunto, através do tratamento integrado dos problemas inerentes ao negócio.

É claro que problemas que envolvem diversas funções dentro da empresa possuem a tendência natural de serem complexos, não só pelo número, mas também pela natureza diferenciada das variáveis manipuladas e, por isto, requerem um processo de tomada de decisão adequadamente projetado e sistematizado.

1.3.2 Tomada de decisão nas grandes organizações

Um processo adequado de solução de um problema requer, antes de tudo, o reconhecimento do seu grau de complexidade.

Por outro lado, a complexidade de um problema pode ser observada nos diversos aspectos que o cercam, tais como as suas várias dimensões (técnica, econômica, financeira, social etc), os interesses das partes envolvidas no processo de decisão, nas incertezas presentes no problema e na urgência da obtenção da solução.

São diversos os métodos que podem ser adotados no processo de tomadas de decisão.

SHOEMAKER e RUSSO (1993) classificaram quatro principais formas de decisão, as quais podem ser representadas por meio de uma pirâmide, conforme apresentado na figura a seguir.

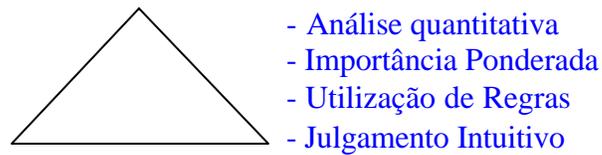


Figura 1.1: Processos de decisão

Enquanto no topo da pirâmide encontra-se a forma mais precisa, complexa, cara e menos usada, na base está a mais usada e normalmente aplicada às decisões menos importantes.

Na análise quantitativa observa-se um maior grau de refinamento das técnicas de ponderação, onde todos os fatores que influem no problema são considerados de forma mais acurada e onde os diferentes graus de importância dos mesmos podem ser identificados.

A rotina diária das atividades presentes nas indústrias em geral está repleta de situações onde são requeridas tomadas de decisão que, todavia, não necessitam da mesma atenção. A grande maioria dos problemas na verdade dispensa processos de análise ou aplicação de métodos sofisticados para obtenção da solução.

Alguns problemas não merecem atenção, pois acredita-se que os recursos utilizados não são devidamente recompensados através da solução encontrada. Outros não apresentam possibilidades concretas de solução e, portanto, são ignorados.

O problema apresentado neste trabalho possui dimensões e características que envolvem e permeiam vários departamentos de uma empresa, especialmente as áreas de produção e manutenção, além do marketing e da logística.

A principal vantagem observada na implementação de uma metodologia para solucioná-lo concentra-se, principalmente, na agregação de valor obtida através da visão integrada

destas diferentes áreas sobre o mesmo.

O planejamento das atividades a médio e longo prazos é uma área que vem ganhando atenção crescente devido, principalmente, ao aumento do grau de conscientização de que as incertezas do futuro não desobrigam os gestores de delinear um cuidadoso e consistente plano de operações para as suas empresas. Muito pelo contrário, as decisões de curto prazo devem sempre estar condicionadas às perspectivas de resultado esperado para um horizonte razoável de tempo, buscando sempre o atendimento da função objetivo predominante que deve ser a maximização do valor da empresa.

Por outro lado, em relação aos riscos que uma empresa correria ao adotar uma das três diferentes estratégias competitivas genéricas - liderança em custos, diferenciação e enfoque - PORTER, 1980, destaca a importância de se atentar para a permanente busca da melhor posição possível em custos, mesmo que na estratégia escolhida não se tenha priorizado esta rota. Os riscos de não se posicionar adequadamente em custos podem relacionar-se tanto com a reação dos compradores, optando por um produto mais barato e sacrificando qualidade ou serviço, quanto dos concorrentes, eliminando as vantagens de um alvo estreito de mercado.

Entretanto, a estratégia de liderança em custos citada por Porter não pode ser ingenuamente simplificada. O conceito de custo total, levando-se em conta, simultaneamente, todos os aspectos que têm interferência sobre a cadeia de produção e suprimento, deve estar sempre presente nas decisões. A simples adoção de medidas que reduzem os custos operacionais de uma fábrica no curto prazo, mas que comprometem irreversivelmente os resultados em seguida, obviamente não atende aos objetivos pretendidos por esta estratégia competitiva.

1.3.3 Relacionamento entre os planos de manutenção e de produção

Embora não se pretenda discutir em detalhes o que poderia ser considerado como um processo ideal de elaboração de uma política de manutenção para uma indústria, algumas questões correlatas devem ser abordadas visando dar a exata dimensão do escopo deste

trabalho e o contexto onde o mesmo está inserido, ou seja, a ligação entre os planos de manutenção e de produção.

A maximização do aproveitamento das oportunidades de mercado e o atendimento aos compromissos de vendas dependem, substancialmente, de uma capacidade produtiva distribuída de forma adequada, através de planos de produção e de manutenção construídos em sintonia.

KELLY e HARRIS (1980) propõem um procedimento para formulação do plano e da organização de manutenção onde mostram que os programas de manutenção preventiva relacionam-se diretamente com os programas de produção, "trocando constantemente inputs e outputs". Percebe-se, claramente, ser impossível conceber um plano de manutenção preventiva desligado dos planos de produção ou vice-versa.

Dentro das empresas, entretanto, diferentes políticas de manutenção podem ser implementadas, isoladamente ou de forma combinada.

Resumidamente, as principais políticas de manutenção que podem ser aplicadas são:

- a- manutenção a intervalos pré-fixados;
- b- manutenção baseada na condição de parâmetro;
- c- operar até falhar;
- d- manutenção por oportunidade;
- e- modificações de projeto.

Exceto quanto a política "e", que ocorre normalmente por uma iniciativa da atividade de engenharia, havendo eventualmente a necessidade de a organização da manutenção estar preparada para tratá-la, todas as demais têm como principal objetivo a minimização do efeito da falha.

O aprimoramento das rotinas de inspeção e os avanços tecnológicos na área de instrumentação e controle têm, cada vez mais, facilitado a implantação de sistemas de

monitoração dos parâmetros de deterioração de equipamentos ou de seus componentes, reduzindo a influência do efeito probabilístico na previsão da falha e, conseqüentemente, maximizando a vida do útil dos mesmos.

Para alguns ítems específicos que operam em condições de redundância com equipamento reserva, ou mesmo para sistemas ou unidades produtivas mais simples que operam com folga de capacidade ou de forma descontínua, a política da manutenção baseada em condições de parâmetro (b) é implantada com sucesso, desde que atenda uma relação custo - benefício adequada.

Entretanto, em que pese todo o esforço voltado para o aumento da vida útil dos equipamentos através do aprimoramento da estratégia de manutenção por condição de parâmetro, que por sua vez, sempre que necessário, dispara um processo de manutenção corretiva planejada, a manutenção preventiva ainda tem um espaço importante na indústria de um modo geral e, particularmente, em alguns segmentos.

PINTO e XAVIER (1998) citam como os principais fatores que influenciam na adoção de uma política de manutenção preventiva:

- a- a impossibilidade de aplicar a manutenção preditiva;
- b- aspectos relacionados com a segurança pessoal ou da instalação que tornam a intervenção obrigatória, normalmente para substituição de componentes;
- c- aproveitamento de oportunidades, em equipamentos de difícil liberação operacional;
- d- riscos de agressão ao meio ambiente.

Sistemas complexos de produção contínua, compostos por equipamentos de variadas características, dimensões e condições de trabalho, operando em conjunto e compondo uma unidade produtiva, encontram-se usualmente repletos de situações operacionais apresentando os fatores acima.

Apesar da dificuldade em se determinar o tempo ótimo de campanha para sistemas

complexos como um todo, em face da baixa probabilidade de se obter um padrão de falha típico, em diversos casos a estratégia adotada é a definição de um componente crítico, cujo desempenho compromete todo o conjunto, para servir de balizador para a campanha do subsistema. Ao se retirar o componente crítico para manutenção, todos os demais estão, "por oportunidade", potencialmente disponíveis para inspeção e manutenção, dependendo apenas de condições técnicas e econômicas que indiquem se é realmente o momento favorável.

Extrapolando-se o conceito de manutenção por oportunidade para componentes de um mesmo subsistema produtivo, em determinados tipos de sistemas de produção podemos correlacionar diferentes subsistemas segundo sua interdependência produtiva, fornecendo ou recebendo produtos intermediários, que faltarão na ausência de um dos subsistemas. Surge, então, o conceito de manutenção por oportunidade de subsistemas, tema deste trabalho.

1.4 Limitações

Este trabalho não pretende propor políticas de manutenção conforme tradicionalmente esta expressão é tratada pelos especialistas desta área. Parte-se do princípio que o tipo de fábrica em estudo é composta de subsistemas produtivos que devem sofrer paradas gerais de manutenção de tempos em tempos, por diversos motivos, conforme será detalhado dentro deste trabalho.

Desta forma, não se pretende ampliar o foco do trabalho através da abordagem de áreas de pesquisa específicas como, por exemplo, análises de confiabilidade, técnicas para previsão de falha ou, tampouco, por meio do uso de variáveis associadas a estas áreas.

Pressupõe-se que, para cada subsistema composto de vários equipamentos, dos mais diferentes tipos, dimensões e condições de trabalho, um intervalo pré-fixado de campanha foi definido a partir de estudos e critérios específicos. Estes "tempos máximos de campanha", ou "tempos de campanha", como serão doravante denominados, serão

adotados, portanto, como premissas para o presente trabalho, tornando-se então restrições de destaque a serem respeitadas no desenvolvimento do processo de otimização do plano de manutenção preventiva.

Nada impede, entretanto, que dentro da sistemática de solução proposta, diferentes tempos de campanha possam ser simulados e conseqüentemente possam ser avaliados os retornos resultantes.

Em relação ao tempo de campanha, para os fins ao qual o presente trabalho se dispõe, assume-se que a eficiência da planta industrial em estudo não sofre alterações significativas ao longo de todo o período de operação. Portanto, os rendimentos e custos de produção utilizados representam a média de desempenho operacional observada durante as campanhas das unidades.

Pretende-se abordar e discutir os aspectos logísticos que influenciam na solução completa e integrada do problema de planejamento de manutenções preventivas, porém, estes aspectos ainda não estarão sendo considerados na proposta de metodologia para obtenção da solução para o problema.

Por outro lado, vale adiantar que o modelo proposto poderá ser utilizado como um simulador, auxiliando em avaliações de ganhos que o sistema produtivo poderia obter a partir de alterações nos referidos tempos de campanha.

1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho encontra-se subdividido em 6 capítulos.

No primeiro capítulo são apresentados os objetivos do trabalho, a importância do tema escolhido, as limitações da abordagem proposta na formulação do problema e os fatos e justificativas que deram origem ao mesmo.

O segundo capítulo está reservado à revisão bibliográfica realizada durante a elaboração desta dissertação. Este capítulo encontra-se subdividido em tópicos que tratam basicamente das duas linhas de pesquisa que foram desenvolvidas, ou seja, a problemática das políticas de manutenção nas indústrias e as técnicas de modelagem e busca de solução para problemas de planejamento e programação.

No terceiro capítulo o problema é conceitualmente descrito. São apresentados detalhes relevantes do mesmo através de croquis e diagramas, assim como as condições de contorno e os resultados almejados são definidos. Os aspectos relevantes que interferem na busca da solução do problema são descritos e discutidos neste capítulo através de reflexões efetuadas sobre diferentes situações simuladas em um modelo de planta industrial genérica.

No quarto capítulo são descritas a modelagem do problema e a técnica empregada na sua solução. Neste capítulo são apresentados os parâmetros, variáveis e restrições consideradas na modelagem desenvolvida.

O quinto capítulo é dedicado ao estudo de caso do planejamento de paradas de manutenção em uma refinaria de petróleo, através da ferramenta desenvolvida. É feita uma breve descrição do processo produtivo típico de uma refinaria e dos sistemas operacionais ou unidades de produção envolvidas no estudo.

No sexto e último capítulo estão registradas as conclusões e recomendações do trabalho, destacando as oportunidades identificadas para o desenvolvimento futuro do procedimento de solução proposto, não só através do maior aprofundamento e detalhamento da modelagem como também pela ampliação dos aspectos considerados.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Considerações iniciais

O tema abordado neste trabalho tem como uma de suas principais características a busca da integração de diferentes áreas e visões presentes no interior das empresas acerca da questão da manutenção preventiva. Pode-se inclusive alterar-se o ângulo de visão sobre o problema e definí-lo como "um plano de operações, considerando as necessidades de manutenção preventiva" ou, inversamente, como "um plano de manutenção preventiva, subordinado à otimização do processo de produção como um todo".

Desta forma, a pesquisa não pôde ater-se somente à consulta de trabalhos especificamente voltados para uma determinada área de especialização e de atuação da engenharia. A proposta do trabalho determinou a ampliação do foco das consultas para duas principais linhas de pesquisa, procurando tanto os trabalhos que tratassem das questões relacionadas com a problemática da manutenção industrial, particularmente para aqueles que tratavam diretamente da discussão e implementação de políticas de manutenção, quanto, com maior ênfase, para os que tratavam das questões ligadas com o planejamento e a programação de produção em sistemas de maior complexidade.

A maioria das publicações, artigos e trabalhos relacionados com a questão específica da manutenção concentram-se na definição do sistema de manutenção propriamente dito, analisando muito mais as variáveis intrinsecamente ligadas à performance dos equipamentos e da atividade de manutenção do que da produção. Desta forma, são bastante explorados os tempos médios de falha dos equipamentos e componentes, tempos médios de reparos, custos com mão de obra de manutenção, tamanho e número de equipes de manutenção, etc.

Como regra geral, os trabalhos voltados para esta área procuram determinar os tempos de ciclo para manutenção preventiva do equipamento considerando principalmente a elevação da probabilidade de falha com o tempo de operação e conseqüentemente a tendência de

aumento do número de intervenções corretivas. Via de regra, os modelos propostos procuram balancear estas duas políticas de intervenção (corretiva e preventiva) otimizando a utilização das mesmas e, desta forma, definindo uma política de manutenção.

São vários os trabalhos que ressaltam a importância de se integrar os planos de produção e de manutenção porém, em sua grande maioria, não se observa uma proposta que sistematize objetivamente este processo de integração.

Na pesquisa realizada, foram poucos os trabalhos onde se observou a exploração da capacidade e do mix de produção como variáveis de otimização do plano de manutenção. Da mesma forma, são raras as propostas de otimização que levam em conta situações onde a parada de determinados componentes, equipamentos ou subsistemas alteram diferentemente o modo de operação de outros componentes, equipamentos ou subsistemas do mesmo processo de produção.

2.2 Políticas de manutenção

NAPIERALA (1999) propõe um modelo para sistemas complexos, compostos por vários componentes, buscando atingir uma política ótima de manutenção. Seu objetivo é determinar um tempo ótimo de manutenção preventiva de componentes críticos de veículos de transporte, considerando a probabilidade de falha dos mesmos.

Este trabalho possui uma extensa pesquisa bibliográfica voltada, porém, em sua grande maioria, para a determinação da política ótima de manutenção com foco na probabilidade de falha do equipamento e na conseqüente definição do momento e da maneira mais adequados para realizar a intervenção.

Dada a vasta quantidade dos modelos de manutenção existentes, o trabalho propõe ainda uma classificação da bibliografia acerca do assunto segundo um "grid" multidimensional, com as seguintes ordenadas:

- a) estados do sistema: nível de deterioração, idade, número de objetos de reserva,

- número de unidades em serviço, número de variáveis de estado etc.;
- b) ações disponíveis: conserto, substituição, substituição por oportunidade, substituição de objetos de reserva, monitoramento contínuo, inspeções discretas, inspeções destrutivas etc.;
 - c) horizonte de tempo envolvido: finito ou infinito e discreto ou contínuo;
 - d) conhecimento do sistema: completo ou parcial envolvendo procedimentos de observação de ruídos dos estados, custos desconhecidos, distribuições desconhecidas de falha etc.;
 - e) modelos estocásticos ou determinísticos;
 - f) objetivos do sistema: mínimo custo médio esperado, a longo prazo, por unidade de tempo, mínimo custo total previsto, descontado, mínimo custo total, etc.;
 - g) métodos de solução: programação linear, programação dinâmica, multiplicadores generalizados de Lagrange, etc.

Ao longo deste estudo são relacionados, descritos e classificados diversos modelos de manutenção. Na verdade, são observadas diferentes classificações para os modelos segundo diferentes aspectos. A primeira classificação diz respeito a unidade de tempo usada no modelo, que define o momento das intervenções, segundo a seguinte classificação:

- a) Modelos de Inspeção;
- b) Modelos de Manutenção de Tempo Discreto, subdividindo-os em:
 - b.1) Mod. com informação completa
 - b.2) Mod. com informação incompleta
 - b.3) Mod. com manutenção de inventário de peças e sobressalentes;
- c) Modelos de Manutenção de Tempo Contínuo, subdividindo-os em:
 - c.1) Mod. da teoria de controle
 - c.2) Mod. de substituição por idade
 - c.3) Mod. de conserto mínimo
 - c.4) Mod. de atividades de conserto interativas, que, por sua vez, traduzem-se em políticas de manutenção por oportunidade, de canibalização, de substituição de multiestágios e de taxa de conserto variável;
 - c.5) Mod. com informação incompleta

Dentre os modelos acima citados destacam-se os de conserto mínimo, os de atividade de conserto interativa e a política de aproveitamento de oportunidades.

Os modelos de conserto mínimo, são normalmente aplicados em sistemas complexos com vários componentes que recebem tratamento, para os fins de manutenção, como unidades únicas. Quando um componente do sistema complexo falha, normalmente esta falha reflete-se em todo o sistema. Nestes modelos, havendo falha, ocorre a substituição ou reparo do componente falhado, retornando com o sistema a operação, mantendo porem a taxa de falha do sistema como antes do evento. Como a taxa de falha da maioria dos sistemas complexos aumenta com a idade, este tipo de política tende a ter custo crescente devido ao aumento do número de consertos mínimos. Estudos mais recentes procuram justamente definir o momento mais vantajoso para substituir todo o sistema ao invés de executar consertos mínimos.

Nos modelos de atividade de conserto interativa em um sistema composto de várias unidades, o conserto ou substituição de uma unidade pode, por vezes, levar em consideração o que ocorre com as demais unidades. Conforme citado anteriormente, as principais formas de interação ocorrem através do aproveitamento de oportunidades, do processo de canibalização, do processo de substituição multiestágios e da política de taxa de conserto variável.

A política de aproveitamento de oportunidades, procura explorar economias de escala no reparo ou atividade de substituição. Este ganho de escala, entretanto, concentra-se na estratégia de acumulação de componentes falhados e parte-se do pressuposto que duas ou mais atividades de conserto de mesma natureza realizadas em conjunto podem custar menos do que se elas fossem realizadas separadamente. Os ganhos de escala portanto são obtidos na redução dos custos diretos da manutenção e não na atuação sobre os impactos no perfil de produção do sistema.

Outra classificação ainda é proposta para os modelos de manutenção:

- a) Modelos determinísticos;

- b) Modelos estocásticos sob o risco (com informação), subdividindo-os em:
 - b.1) Mod. de manutenção preventiva de sistemas simples (periódico e seqüencial);
 - b.2) Mod. de manutenção preditiva de sistemas simples (periódico e seqüencial);
 - b.3) Mod. de manutenção preventiva de sistema complexo (oportunistica, periódica e seqüencial);
 - b.4) Mod. de manutenção preditiva de sistema complexo (periódica, seqüencial e oportunistica)
- c) Modelos estocásticos sob a incerteza (sem informação)
 - c.1) Mod. de manutenção preventiva para sistemas simples e complexos;
 - c.2) Mod. de manutenção preditiva para sistemas simples e complexos

2.3 Planejamento e programação

No contexto dos processos químicos, Planejamento (Planning) e Programação (Scheduling) referem-se a procedimentos de alocação de recursos e equipamentos para executar o processamento de tarefas de natureza química ou física, necessárias para a manufatura de produtos (PEKNY E ZENTNER, 1994).

PINTO (2000) ressalta o interesse crescente das empresas, e particularmente da indústria de processos químicos, pelas áreas de Planejamento e Programação (controle) da produção devido ao grande impacto que estas atividades reconhecidamente possuem e à motivação, do ponto de vista teórico, resultante dos imensos desafios causados pela complexidade e dimensão destes problemas.

Segundo BIREWAR (1989) o Planejamento trata de problemas no nível macroscópico e normalmente estão relacionados à definição de metas de produção para períodos mais longos (meses ou anos) considerando previsões de mercado (preços e demandas), os recursos disponíveis (equipamentos, mão-de-obra, energia etc.) e estoques.

Já a Programação é definida como uma função de refinamento (PELHAM E PHERRIS,

1996), onde os problemas são tratados num nível mais microscópico (BIREWAR, 1989), com o objetivo de gerar informações detalhadas sobre decisões de seqüenciamento de tarefas e alocação destas aos equipamentos disponíveis visando atender metas específicas definidas pelo Planejamento. De modo geral, a Programação lida com a alocação de recursos disponíveis ao longo do tempo a fim de realizar uma coleção de tarefas.

Observa-se, portanto, que, via de regra, a disponibilidade de equipamentos é um dado de entrada do problema, constituindo-se desta forma em uma restrição a ser respeitada no processo de otimização. Na realidade, processo semelhante também pode ocorrer nos problemas de Planejamento.

No contexto da Engenharia Química, Programação refere-se às estratégias de alocação no tempo dos equipamentos (ou sistemas produtivos), utilidades (energia, vapor, água, etc) e mão-de-obra para executar tarefas de processamento requeridas para a manufatura de um ou mais produtos.

Na literatura da última década observa-se um crescimento significativo dos modelos de otimização desenvolvidos. Apesar do progresso atingido, na representação dos problemas de Programação em modelos matemáticos, os principais desafios na área continuam basicamente concentrados em:

- a) lidar com o aspecto combinatorial que potencializa o número de possibilidades a serem analisadas;
- b) representar adequadamente o domínio do tempo.

Por esta razão foi criada uma série de modelos de Programação nos quais há aparentemente falta de aspectos em comum. Apesar, entretanto, da inexistência de um Modelo absolutamente geral para a Programação de processos químicos, três componentes principais estão sempre presentes (REKLAITIS, 1992). São eles:

- a) alocação de tarefas a equipamentos;
- b) seqüenciamento de atividades;
- c) sincronização do uso de equipamento e recursos para cada tarefa de processamento.

Outro aspecto importante e que merece destaque é a possibilidade da presença de transições dependentes da seqüência, ou seja, a interface entre duas atividades em seqüência pode requerer tratamento adequado na modelagem em função de problemas normalmente relacionados com a adequada preparação dos equipamentos.

Em relação ao horizonte de tempo abordado nos problemas de Programação, apesar de normalmente trabalhar com menores períodos de tempo (dias ou semanas), observa-se que eventualmente alguns dos objetivos específicos desta atividade podem ser requeridos em problemas que envolvem visões de longo prazo. Como se verá mais a frente, é o caso específico deste trabalho.

2.4 Aplicação e classificação dos problemas de Programação (Scheduling)

Os chamados problemas de scheduling são observados geralmente em duas situações que podem ser consideradas típicas.

A primeira ocorre nas tarefas de curto prazo, quando a planta industrial deve atender a ordens de clientes individuais que possuem um padrão de demanda variável em diferentes períodos de planejamento. A segunda é o chamado scheduling cíclico, importante para plantas que operam em mercado estável e onde as demandas evoluem a taxas constantes. É bastante considerado em estudos de planejamento a longo prazo.

A figura 3.1 (PINTO, 2000) apresenta um "road map" para classificação de problemas de scheduling o qual pode servir como guia na obtenção de uma melhor compreensão dos modelos matemáticos utilizados. A similaridade entre os equipamentos e a conectividade das unidades definem a topologia da planta.

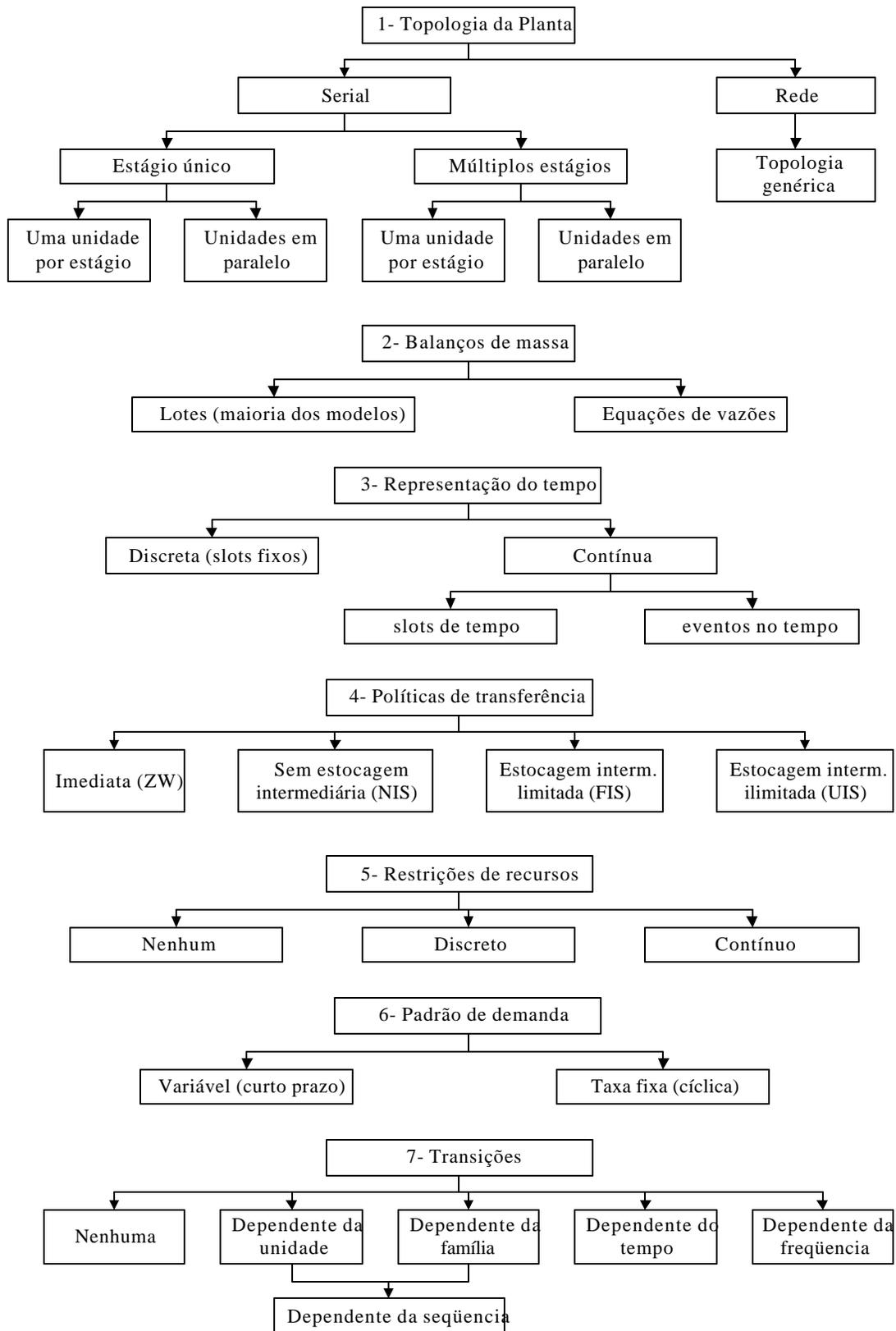


Figura 2.1: Road map para problemas de *scheduling*

Um aspecto fundamental em modelos de scheduling diz respeito à representação do domínio do tempo.

A abordagem mais comum nos modelos é a definição de slots de tempo (ou janelas de tempo), isto é, intervalos de tempo para a alocação de tarefas. Para representação contínua de tempo os slots têm comprimento variável; para representação discreta de tempo os slots possuem tamanho fixo ou igual.

PINTO e GROSSMAN (1998) identificaram três classes de modelos de scheduling, em função das restrições de alocação das relações temporais.

Na primeira classe encontram-se os modelos nos quais a alocação ordem-máquina é pré-definida. Possuem uma estrutura mais simples, com plantas multipropósito sequencial (múltiplos estágios de produção), com uma unidade por estágio. Os produtos são obtidos sequencialmente, em cada estágio. Estes tipos de plantas são conhecidas na literatura de pesquisa operacional como "flow shop" (FRENCH, 1982). Um caso particular é a situação com apenas uma única máquina. Uma estrutura mais complexa ocorre quando a seqüência de produção não é mais a mesma em todos os estágios. Neste caso a planta é conhecida como do tipo "job shop". Para estas situações, os modelos possuem a estrutura "TSP - travelling salesman problem" (GUPTA, 1976).

A Segunda classe engloba as plantas seriais com unidades paralelas, isto é, com tarefas que podem ser executadas em mais de uma máquina e onde portanto há a necessidade de alocar produtos a unidades. Existem estudos desenvolvidos para um ou mais estágios.

Na terceira classe encontram-se as redes de produção com topologia arbitrária. KONDILI ET AL (1993) sugere que estes modelos devem basear-se na discretização do domínio do tempo em intervalos iguais. A representação STN (State Task Network) é típica nestes modelos (KONDILI, 1993 e SHAH, 1993).

2.5 Métodos de solução para os problemas de programação (scheduling)

Em todas as classes citadas anteriormente os modelos foram geralmente formulados como MIPs (Mixed Integer Programming ou Programação Inteira Mista), e na maioria com estrutura linear. Aplicações de MINLP (não lineares) também podem ser encontradas.

PINTO (2000), apresenta os métodos mais conhecidos para resolver os MINLP. São eles:

- a) Algoritmos de enumeração implícita, cuja idéia básica é a de estabelecer critérios para eliminar soluções, reduzindo o conjunto de alternativas a ser analisado, sendo que o mais conhecido é o branch and bound com relaxação LP;
- b) Algoritmos cutting planes, que são derivados do método Simplex de programação linear;
- c) Programação dinâmica, que na realidade não é um algoritmo generalizado como os anteriores; foi concebido originalmente para a otimização de processos seqüenciais de decisão;
- d) Métodos de decomposição, onde a idéia é resolver adequadamente uma seqüência de subproblemas LP, após a decomposição do problema original, tanto em termos de variáveis quanto de restrições;
- e) Métodos baseados em lógica, apoiados na equivalência entre variáveis binárias e booleanas;
- f) Métodos meta-heurísticos de busca local ou global, como por exemplo, simulated annealing, algoritmos genéticos e busca tabu.

Para a solução do problema de scheduling proposto no presente trabalho será testada a utilização combinada de um método tradicional de programação linear para preparar uma base de dados que é utilizada na solução do problema de scheduling propriamente dito, através do uso de algoritmo genético.

2.6 Modelos de otimização da política de manutenção preventiva

O problema de determinação da política ótima de manutenção preventiva para unidades que operam continuamente e isoladas, usualmente envolve determinar a frequência e a intensidade da manutenção e, em alguns casos, quando trocar a unidade.

Para formular políticas de manutenção, os benefícios da manutenção (redução da taxa de falha) devem ser pesados contra os custos dos recursos empregados e as perdas de produção decorrentes.

As técnicas descritas na literatura tipicamente dividem o horizonte de tempo em slots (janelas), usualmente delimitados por atividades de manutenção preventiva ou corretiva. O fator chave relacionado com a lucratividade é o tempo previsto de unidade operando em cada slot, ou seja, o período em que a unidade contribuiu positivamente para o valor adicionado líquido. Em geral assume-se uma taxa de valor adicionado constante para quando a unidade está operando.

O problema de otimização estocástico é usualmente transformado em um equivalente determinístico, baseado em períodos de unidade em operação e em manutenção.

BARLOW e HUNTER (1960) apresentaram o impacto que a manutenção tem sob a lucratividade da planta, considerando o problema da determinação da política ótima de manutenção preventiva para uma única unidade, nos seguintes casos:

- a) máximo reparo, onde a unidade volta as condições de nova;
- b) mínimo reparo, onde a unidade retorna as condições de antes da falha.

São deduzidas expressões para tempo esperado de operação entre falhas, usadas para determinar a política que otimiza a eficiência limitante, definida como uma fração de tempo de operação no longo prazo.

Vários trabalhos têm sido desenvolvidos para determinação da política de manutenção de

uma única unidade, sendo que as abordagens diferem-se, principalmente, em relação aos seguintes aspectos:

- a) premissas assumidas sobre a influencia da manutenção no comportamento da falha da unidade;
- b) o objetivo da otimização;
- c) os pressupostos de contribuição dos custos das falhas e da manutenção.

JARDINI (1973) generalizou a política de manutenção de BARLOW, HUNTER e MALIK (1979), introduzindo a noção de que a "efetiva redução de idade" do equipamento é um tratamento mais realista para o resultado da aplicação da manutenção preventiva, do que a premissa usualmente adotada de "boa como nova".

MURTHY (1984) trata o problema com sendo de controle ótimo, sendo contínuo e variando no tempo com a "taxa de esforço" de manutenção, que possui o efeito de reduzir a taxa de falha.

O problema de determinar a política ótima de manutenção para plantas contínuas, integralmente, recebeu atenção no passado. A maioria dos trabalhos são aplicados sobre plantas de geração de energia, com variadas abordagens, sendo o principal objetivo a determinação dos períodos, para um longo horizonte de planejamento, em que as plantas são paradas para manutenção, minimizando custo e mantendo um satisfatório nível global de suprimento de eletricidade.

Na área das industrias de processo a maioria das publicações descreve aspectos organizacionais do problema.

VAN RIJN (1987), propõe um sistema hierárquico em três níveis para descrever a atividade de manutenção, ranqueando metas de longo prazo para a manutenção e para a execução da manutenção.

GAAL e KOVACS (1985) avaliam a confiabilidade de uma planta química contínua,

construindo um modelo de confiabilidade baseado no fluxograma da planta, onde o comportamento de cada elemento é levado em consideração. Foi usado para avaliar sistemas de processo diferentes, em termos de confiabilidade tempo-dependente, risco econômico e segurança.

BÄCKERT e RIPPIN (1985) consideram o problema de explorar otimamente as paradas da planta e o aproveitamento de tempo ocioso para executar a manutenção preventiva em equipamentos que não falharam (manutenção por oportunidade). O principal objetivo é determinar os itens que devem ser mantidos, de tal forma que a performance global da planta seja otimizada.

TAN e KRAMER (1992) também desenvolvem um método através do qual se propõe uma estratégia de manutenção no longo prazo, baseado em manutenção por oportunidade e fazendo o melhor uso do tempo de parada para reparar e trocar itens velhos. Redes neurais são empregadas para calcular o mínimo custo para políticas de manutenção oportunísticas. Os dados para treinar a rede neural são fornecidos por simulação e Monte Carlo, baseado em modelos de confiabilidade dos componentes e árvore de falha.

DEDOPOULOS e SHAH (1996) propõem uma metodologia para otimização da política de manutenção de longo prazo, em plantas de processo multipropósito. Nestas plantas o problema ganha complexidade quando se leva em conta a programação da produção influenciando a operação do processo, e a flexibilidade oferecida pelo equipamento que pode ser explorada quando se busca reagir a interrupções de disponibilidade.

Para sistemas de unidades únicas e plantas contínuas dedicadas, que podem ser descritas por diagramas de blocos de confiabilidade, a disponibilidade global pode ser diretamente traduzida num lucro esperado.

Para plantas multipropósito, por outro lado, múltiplos produtos são obtidos simultaneamente (ou concorrentemente) e o uso de recursos varia com o tempo. Desta forma, o relacionamento individual entre disponibilidade de recurso e lucro global é muito

mais complexo e indireto, e fornece a chave para determinar a política de manutenção apropriada.

DEDOPOULOS e SHAH descrevem o processo através do qual as políticas de manutenção de todos os equipamentos podem ser determinadas simultaneamente. A abordagem é baseada sobre uma estrutura de planejamento agregado, o qual é necessário por três razões:

- a) a política deve ser otimizada sobre um horizonte de longo prazo;
- b) o efeito da falha do equipamento sobre a lucratividade global é quantificado usando os tempos de operação previstos;
- c) a utilização da recursão (isto é, a modificação dos planos de alocação de recursos quando falhas ocorrem) está implícita na agregação.

O problema é formulado como sendo de programação inteira mista linear ou não linear, multiperiodal, onde cada período é caracterizado pela opção de efetuar a manutenção preventiva em diferentes itens de equipamentos. Para o desenvolvimento da formulação algumas premissas são assumidas em relação à forma de variação da taxa de falha ao longo do tempo e o efeito do reparo sobre a taxa de falha.

O trabalho enfatiza que o plano de produção agregado não é necessariamente aquele que será realmente implementado, pois este plano não considera os detalhes operacionais da planta, minuto a minuto e ressalta o conflito (trade off) existente entre a representatividade e a eficiência da solução de qualquer formulação para um planejamento agregado, indicando que usualmente a representatividade diz respeito à forma através da qual a alocação dos recursos é modelada.

3 Descrição conceitual do problema

3.1 Considerações iniciais

Conforme citado anteriormente, este trabalho pretende propor a solução para o problema da otimização do plano de paradas de manutenção, por meio do estudo de caso de uma refinaria de petróleo.

Entretanto, para a definição e descrição do problema, serão abordados aspectos de um sistema de produção genérico, visando com isto a ampliação das possibilidades de adaptação e uso da metodologia de solução adotada para outros tipos de plantas industriais que possuam características semelhantes.

Neste capítulo, inicialmente são definidas as características de um sistema de produção de alta complexidade, cujo conceito é utilizado ao longo do trabalho. Em seguida, procura-se descrever a problemática da otimização do planejamento da manutenção através de um processo de reflexão sobre os aspectos que, de forma isolada ou combinada, podem influenciar no resultado ótimo.

3.2 Características dos sistemas de produção de alta complexidade

São várias as configurações observadas nos sistemas de produção, dependendo de uma série de fatores, tais como, a natureza da indústria (extrativista, de transformação ou de serviço), a dinâmica da produção (sob encomenda, em lotes ou contínua) as características dos recursos e insumos consumidos (mão-de-obra, matérias-primas, máquinas, equipamentos etc.), a quantidade e tipo de operações realizadas e a diversidade de produtos que podem ser obtidos.

Os sistemas produtivos mais complexos são, obviamente, aqueles que utilizam uma gama mais variada de recursos e um maior número de operações internas, dispostas de uma forma tal que diversos fluxos internos de materiais são criados e vários produtos finais podem ser

obtidos.

O fluxograma apresentado na figura a seguir mostra uma configuração genérica de uma planta industrial complexa.

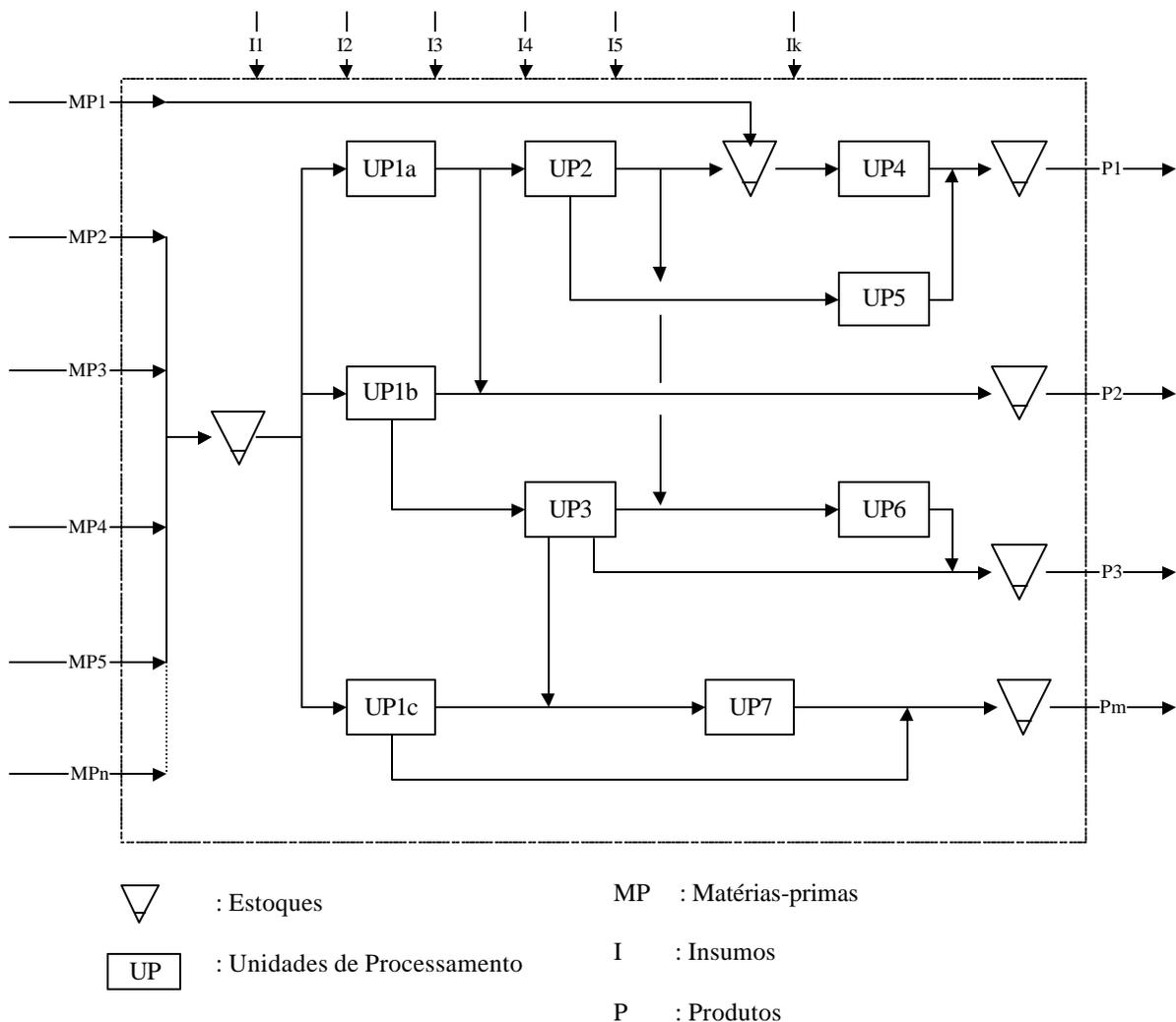


Figura 3.1: Modelo genérico de planta complexa

No modelo genérico de uma planta industrial de alta complexidade apresentado na figura anterior, " MP_n " identifica os tipos de matérias-primas que podem ser utilizadas, " I_k " os vários insumos consumidos e " P_m " a variedade de produtos obtidos. " UP_z " identificam as operações ou os conjuntos de operações que caracterizam uma etapa específica do processo

de produção, tratadas genericamente como Unidades de Processamento.

Buscando caracterizar um aspecto importante presente nestes tipos de plantas, observa-se a existência de unidades de processamento de natureza diferentes cumprindo efetivamente etapas diferenciadas do processo de produção, conforme citado anteriormente, assim como múltiplas unidades de processamento do mesmo tipo, ou seja, responsáveis pela execução da mesma etapa do processo de produção. A ocorrência desta multiplicidade é observada nas *UPIa*, *UPIb* e *UPIc* e pode ser explicada por diversos motivos, sendo os principais:

- Ampliações realizadas na planta através da instalação de novas máquinas e equipamentos ao invés da substituição por novas, de maior capacidade;
- Projetos concebidos para prover maior flexibilidade operacional para a planta.

Outro aspecto que diferencia os sistemas produtivos diz respeito ao fluxo de materiais que permeia a planta, podendo ser classificado como intermitente ou contínuo.

BUFFA (1972) define os sistemas de produção de fluxo contínuo como sendo aqueles onde tanto as instalações como os roteamentos e fluxos de materiais formam um conjunto de operações executadas em uma seqüência padronizada.

Já os sistemas de produção intermitentes são definidos como sendo aqueles nos quais as instalações devem ser suficientemente flexíveis para se tornarem capazes de manipular uma grande variedade de produtos, ou onde a natureza da atividade requer mudanças importantes nas características dos inputs da planta. Nestas circunstâncias considera-se evidentemente que uma única seqüência padronizada de operações não é apropriada.

A existência de estoques de produtos intermediários é uma característica típica das plantas de fluxo intermitente, mas também é bastante comum em plantas de fluxo contínuo como forma de amortecer variações de fluxos entre diferentes processos e operações internas.

No sistema de produção abordado neste trabalho, cada operação representada no modelo

geral, na verdade, se trata de complexas unidades de processamento, compostas por diversos equipamentos, de variados tipos, dimensões e condições de trabalho, responsáveis por etapas específicas do processo de transformação e agregação de valor às matérias-primas. É o caso específico das refinarias de petróleo.

Em uma condição típica, estas plantas industriais podem ser consideradas de fluxo contínuo, cumprindo usualmente uma seqüência padronizada de operações. Porém, quando ocorre a parada de um ou mais processos internos, a planta tem que lançar mão de suas flexibilidades, como a armazenagem de produto intermediário ou as rotas de processamentos alternativos, visando minimizar os impactos negativos que, no mínimo, ocasionam alteração no mix de produtos finais em termos de quantidade ou qualidade.

3.3 Descrição do problema da otimização do plano de paradas de manutenção

A partir do modelo exposto na figura 2.1 (modelo genérico de uma planta industrial complexa) podem ser simuladas situações que demonstram os aspectos e contornos do problema objeto deste trabalho, ou seja, a otimização do planejamento de paradas de manutenção.

Tomando-se como exemplo a parada dos equipamentos que executam a operação 2 (a unidade de processamento 2), quais os impactos que poderão ocorrer na planta como um todo?

- Primeiramente algumas conseqüências são claramente observadas e certamente ocorrerão. A unidade de processamento 5, por exemplo, parará devido à falta da sua matéria prima que é produzida pela unidade de processamento 2, pois não há outra forma de suprimento interna ou externa. A intensidade de outros impactos porem depender do condicionamento interno da planta para operar neste novo quadro e de fatores externos que possam viabilizar rotas alternativas, sendo a atratividade econômica o elemento decisivo.

- Por outro lado, a unidade de processamento 1 poderá continuar em operação? Em que nível de carga? Os tipos de matéria-prima utilizados nesta unidade poderão ser alterados para compensar ou atenuar a falta da unidade de processamento 2?
- A unidade de processamento 4 parará por falta de matéria prima? A possibilidade de aquisição externa desta matéria-prima, conforme pode ser observado no diagrama, viabiliza a sua continuidade operacional? Em que nível de carga?
- A unidade de processamento 6 sofrerá uma redução de carga devido à parada da unidade de processamento 2? De que magnitude?
- A unidade de processamento 4 teria capacidade disponível para produzir (em termos de quantidade e qualidade) que compensasse a ausência da unidade 2?
- Os produtos disponibilizados pelas demais unidades poderão ser totalmente absorvidos na etapa final de "montagem" dos produtos de venda?

Conforme citado em outros capítulos, em determinadas plantas de produção como refinarias e petroquímicas, a parada periódica de subsistemas produtivos (unidades de processamento) para inspeção e manutenção é inevitável.

Como regra geral, é obvio que, do ponto de vista econômico, o melhor é que estas intervenções sejam postergadas o máximo possível, pois significam custos diretos da manutenção propriamente dita (mão de obra e materiais) e custos indiretos (perda de produção).

Partindo-se da premissa de que a parada da unidade de processamento 2 para manutenção dos seus equipamentos (ou ao menos dos mais críticos) deve acontecer em um instante "t" e que, exemplificando novamente, nesta condição, por limitações técnicas ou razões econômicas, a continuidade operacional da unidade de processamento 1 não é viável, pergunta-se:

- Deve-se aproveitar a oportunidade para efetuar a inspeção e manutenção dos equipamentos da unidade de processamento 1 ou é mais interessante programar esta intervenção para outro momento mais adequado?

Na busca de um plano de manutenção otimizado, alocando as paradas ao longo do tempo nos períodos mais adequados, este é o principal tipo de avaliação a ser realizada, ou seja, identificar o melhor aproveitamento das oportunidades.

Por outro lado, a decisão em relação à unidade de processamento 5 parece ser trivial. Por ser totalmente dependente da unidade de processamento 2, a opção provavelmente mais acertada é a vinculação da manutenção destas unidades, embora outros aspectos ainda não abordados possam interferir na escolha desta estratégia.

3.4 Condições de contorno

A exposição das condições de contorno do problema será realizada através dos principais aspectos que influenciam as decisões para a otimização do planejamento de paradas:

- a- Restrições de recursos ou condições técnicas para execução dos trabalhos de manutenção:

Utilizando-se novamente do modelo genérico da figura.2.1, ao considerar-se a parada da unidade de processamento 2 e, em conjunto, por oportunidade, as paradas das unidades de processamento 1 e 5, novas dúvidas podem surgir:

- A equipe de manutenção seria capaz de atuar nas 3 frentes de trabalho de forma eficiente? Mesmo que ocorra a contratação temporária de serviços de manutenção de terceiros, a equipe de supervisores própria teria condições técnicas adequadas para fiscalizar os trabalhos executados pelas firmas contratadas?
- Não havendo condições para implementação das frentes de trabalho nas unidades de processamento 1 e 5, em conjunto com a UP 2, qual seria a melhor opção: executar a

manutenção da UP 1, da UP5, ou aguardar um outro momento mais apropriado para intervir nestas unidades.

- Se a equipe própria atualmente disponível (de execução e / ou supervisão) não consegue atuar nas 3 unidades de processamento simultaneamente, será que é estrategicamente interessante investir na ampliação da capacidade de atuação desta equipe através, por exemplo, do aumento do número de supervisores?

b- Características sazonais dos mercados nos quais a empresa está inserida:

Considerando-se novamente a parada da unidade de processamento 2, em um determinado período P , observa-se, conforme discutido anteriormente, que haverá a parada compulsória da unidade de processamento 5, devido à falta do produto intermediário fornecido pela $UP2$, que é matéria-prima utilizada na $UP5$.

Observando-se o fluxo material da planta, conclui-se que, nesta situação, certamente haverá impacto sobre a produção do produto PI , em termos de quantidade e / ou qualidade.

Novas questões emergem desta nova situação:

- o período P é efetivamente o mais adequado para se provocar uma situação de redução da produção do produto PI ? As variáveis de mercado (preço x demanda) são favoráveis ou existiria um período mais adequado para que esta intervenção fosse realizada?
- Adotando-se a hipótese na qual o período P seja o limite de programação da parada da $UP2$, a antecipação da parada desta unidade seria uma opção interessante, contrapondo-se ao custo financeiro embutido nesta decisão?
- Existem outras plantas dentro da empresa que poderiam suprir, ao menos parcialmente, a demanda do produto PI ?

- Existem recursos de transporte disponíveis que permitam o desenvolvimento de um plano de contingência para o atendimento dos clientes através da entrega do produto tipo *PI* obtido em outros produtores?
- c- Flexibilidade interna ou externa ao sistema de produção para solucionar desbalanceamentos internos de produtos intermediários:

Ao longo de tópicos anteriores discutiu-se sobre a flexibilidade interna de algumas plantas para diferentes alternativas e rotas de produção, resultando em diferentes fluxos de materiais permeando o processo de produção que influencia, inclusive, as possibilidades de variação no mix de produtos.

A nova questão que aqui pode ser colocada refere-se à flexibilidade existente em uma empresa, composta de diferentes plantas, para utilizar rotas alternativas de produção envolvendo duas ou mais destas plantas, através da troca de produtos intermediários entre as mesmas.

Estes aspectos possuem fortes características relacionadas com Logística e com uma visão integral da cadeia de suprimento.

Para melhor ilustrar a situação vale observar que uma mesma empresa, em função de opções estratégicas e do seu histórico de desenvolvimento, pode possuir várias plantas dispersas em uma determinada região, cujos tipos de produtos obtidos em cada uma delas podem ser semelhantes mas, em diversas outras características, podem diferenciar-se consideravelmente.

É o caso da capacidade de processamento existente em cada planta, do número de unidades de processamento existentes, dos tipos de processos disponíveis (diferentes tecnologias), das alternativas internas de rotas de processamento, das capacidades de armazenamento, das linhas de produtos oferecidos, etc.

Fazendo uso mais uma vez do modelo genérico da figura 2.1 e da situação simulada no tópico anterior, com a parada da unidade de processamento 2, a conseqüente parada da unidade de processamento 5 e os impactos sobre a produção do produto *PI*, uma nova questão pode ser levantada:

- Existe alguma outra planta dentro da empresa que esteja planejando a parada de uma unidade de processamento semelhante à unidade 5 e conseqüentemente esteja impactando a produção do produto tipo *PI* neste mesmo período?

Assumindo a hipótese de que isto estivesse ocorrendo, qual seria a melhor alternativa para atendimento aos clientes do produto *PI*:

- 1- Manter o planejamento de paradas e implementar um plano de contingência para o suprimento dos clientes das duas plantas simultaneamente ou
- 2- Alterar os períodos de paradas das unidades de processamento do tipo 5, alocando-as para períodos diferenciados e implementando planos de contingência para cada período em particular?

Dentro de um processo tradicional de tomada de decisão através de estudos de cenários, a escolha passa, primeiramente, pela análise de viabilidade destas alternativas. Para avaliação da alternativa 1, a primeira questão a ser respondida é se o produto *PI* pode ser obtido no volume requerido, dentro do período necessário. A segunda questão refere-se à existência de condições logísticas para efetuar a operação de suprimento dos clientes, principalmente em relação à disponibilidade de transporte.

Para avaliação da alternativa 2, em princípio, a verificação de viabilidade refere-se apenas à possibilidade de descasamento dos períodos de paradas das unidades de processamento do tipo 5 nas duas plantas.

Supondo que as alternativas são viáveis, a segunda etapa do processo consiste em avaliar a

melhor opção do ponto de vista econômico.

Simplificadamente, este seria o processo tradicional de avaliação da melhor escolha.

Ocorre porém que o problema de atendimento aos clientes do produto *PI*, tanto na área de influência da planta A quanto na da planta B, é apenas uma parte do grande problema de otimização de toda a cadeia.

Ampliando o ângulo de visão sobre toda a cadeia pode-se observar outras alternativas que devem ser concomitantemente avaliadas para verificar se existem soluções que, combinadas ou não, possam proporcionar melhores resultados ainda.

Exemplificando, se, na parada da unidade 2 da planta A, o produto fornecido à unidade 5 puder ser suprido por uma capacidade excedente verificada na unidade do tipo 2 da planta B, a parada da unidade 5 da planta A pode deixar de ser compulsória, abrindo espaço para mais uma possível rota de produção a ser considerada.

É claro que, dependendo do grau de complexidade da empresa da cadeia de suprimento como um todo, o número de possibilidades e, portanto, de cenários a serem avaliados pode ser ampliado consideravelmente tornando o problema cada vez mais difícil de ser tratado.

O método tradicional de escolha através da análise e comparação dos cenários alternativos (e eventuais possibilidades de combinações), um a um, pode se tornar muitas vezes inviável e, neste caso, os riscos de subotimização crescem de forma considerável.

d- Unidades de processamento com tempos de campanha diferenciados:

O último aspecto a ser considerado diz respeito à algo que poderíamos denominar como sincronização das campanhas das diversas unidades de processo.

Nas plantas industriais de processamento químico por exemplo, como é o caso de refinarias

de petróleo e petroquímicas, podem ser encontrados os mais diversos tipos de processo, onde as condições de operação variam de forma significativa.

Em cada um destes processos encontram-se os mais variados tipos de equipamentos, tais como reatores, vasos de pressão, colunas de destilação, bombas, compressores, turbinas, motores, milhares de instrumentos de vários tipos e quilômetros de tubulações de diversos diâmetros e materiais, sujeitos a condições extremamente diferenciadas de pressão, temperatura e vazões e expostos a meios onde estão presentes diferentes tipos de compostos químicos, impondo aos equipamentos inúmeros mecanismos de deterioração como corrosão, erosão, fadiga mecânica, fadiga térmica, etc..

Em que pese todo o trabalho empreendido nos projetos destes processos para dotá-los de equipamentos capazes de suportar adequadamente estas condições de operação, é óbvio que cada tipo de processo apresenta diferentes demandas de manutenção.

Vale ressaltar, da mesma forma, o esforço que as atividades de manutenção em conjunto com a operação naturalmente desenvolvem para ampliar o tempo de campanha das unidades de processo, porém, a frequência com que cada unidade de processo deve parar para que seus equipamentos críticos possam ser inspecionados e, se necessário, reparados ou reconicionados para enfrentar uma nova campanha, varia basicamente com a natureza do processo envolvido e do histórico de deterioração observados nos mesmos. Deve-se registrar que determinações legais pode ser outro fator que, por vezes, definem o tempo de campanha de unidades de processo.

Voltando ao modelo da figura 2.1, considere-se inicialmente que, devido às condições operacionais da *UP5* serem extremamente mais severas do que as da unidade 2, os tempos de campanha destas unidades são respectivamente 3 e 5 anos.

Nesta condição, apesar da clara dependência produtiva, a vinculação automática das paradas de manutenção das unidades é algo difícil de ser implementado ao longo de um planejamento de paradas de longo prazo e, desta forma, novas questões podem ser

suscitadas:

- A unidade 2 deverá efetivamente ter campanhas de 5 anos ou, toda vez que ocorre a parada da unidade 5 (a cada 3 anos) a unidade 2 também parará para manutenção?
- Com a parada da unidade 5, o produto intermediário produzido pela unidade 2 poderia ser fornecido para outra planta da empresa e, com isto, continuar em operação?

Os questionamentos levantados estimulam claramente a busca por uma análise integrada nas tomadas de decisão em relação ao planejamento das paradas de manutenção preventiva em sistemas complexos de produção. Esta análise deve ser capaz de visualizar os diferentes aspectos envolvidos no problema e deve conseguir formular uma proposta de plano consistente, respeitando as restrições existentes, e economicamente adequada, balanceando as vantagens e desvantagens das várias alternativas disponíveis.

O problema apresentado ganha dimensões cada vez maiores, na medida em que são acrescentadas unidades de processamento e alternativas de fluxos ao sistema de produção. Situações onde se verificam várias plantas atuando em uma mesma região criam possibilidades de sinergia e aspectos logísticos que requerem um cuidadoso tratamento para o adequado aproveitamento das oportunidades. Portanto, a metodologia a ser utilizada na solução deve ser capaz de lidar de forma apropriada com estas características do problema.

4 Modelo proposto e técnica de solução

4.1 Considerações iniciais

Os trabalhos pesquisados não propõem soluções especificamente voltadas para o tipo de problema apresentado, ou ao menos da forma como ele esta sendo proposto. Em geral, as técnicas de análise e obtenção da solução para o problema da determinação de um plano ótimo de paradas de manutenção apresentados em outros trabalhos, preocupam-se principalmente com o efeito probabilístico das falhas em equipamentos e buscam determinar um plano que consiga balancear adequadamente o risco da falha com o custo de uma intervenção preventiva.

Apesar de não abordar o aspecto relacionado com a probabilidade da falha, o método de solução aqui proposto, além de considerar os custos diretos da manutenção, tem foco fortemente voltado para as perdas de produção inerentes à atividade de manutenção preventiva em sistemas e busca uma técnica que seja capaz de planejar adequadamente as intervenções para os momentos realmente mais oportunos.

4.2 Técnica de solução empregada

Em linhas gerais, a técnica de solução proposta emprega um modelo constituído de dois sub-modelos que resolvem sequencialmente duas etapas distintas do problema, conforme apresentado no fluxograma geral de solução (figura 4.1).

Na primeira etapa são identificados os resultados econômicos de cada uma das possíveis configurações para o conjunto das 9 unidades, ou seja, todas as diferentes 512 (2^9) combinações de "estado" das unidades (parada ou operando). Os resultados econômicos são obtidos a partir de um processo de otimização do perfil de produção em cada configuração, efetuado por meio de um modelo de programação linear construído através do software GAMS. Nesta etapa forma-se, portanto, uma base de dados para todas as possíveis situações, que será utilizada na etapa seguinte.

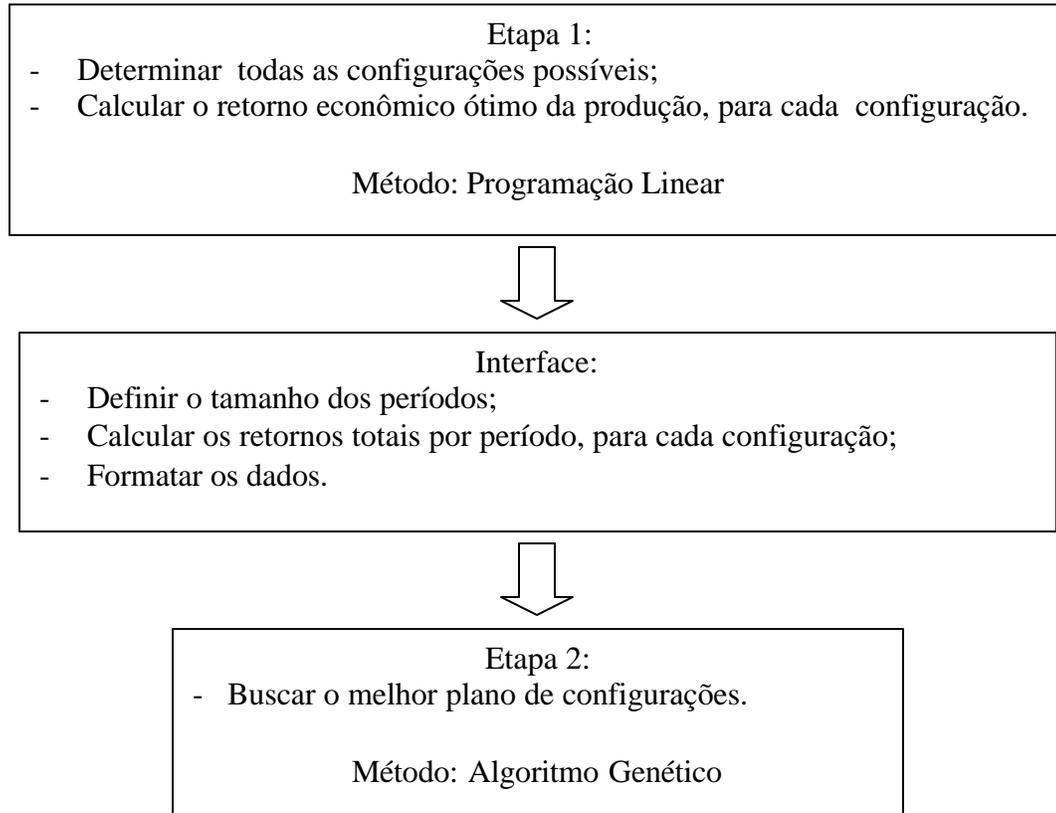


Figura 4.1: Fluxograma geral de solução

Posteriormente, em um segundo submodelo, busca-se a seleção da combinação de configurações que maximize o valor presente do fluxo de caixa, fluxo este gerado a partir do resultado de cada período em particular. Esta seleção é executada através de um modelo que emprega a técnica de busca da solução baseada em Algoritmo Genético.

Entre estas duas etapas, há a necessidade de se calcular o resultado econômico corrigido para cada configuração e formatar adequadamente a base de dados a ser utilizada, compatibilizando e complementando as informações que migram do primeiro para a segundo passo de solução.

4.3 Etapa 1: Determinação das configurações (modelo de Programação Linear)

4.3.1 Visão geral do modelo

Os vários elementos que compõem o sistema de produção a ser otimizado nesta etapa do problema podem ser vistos como componentes de um sistema de "fluxo em rede" e assim caracterizados, conforme pode ser observado na figura abaixo.

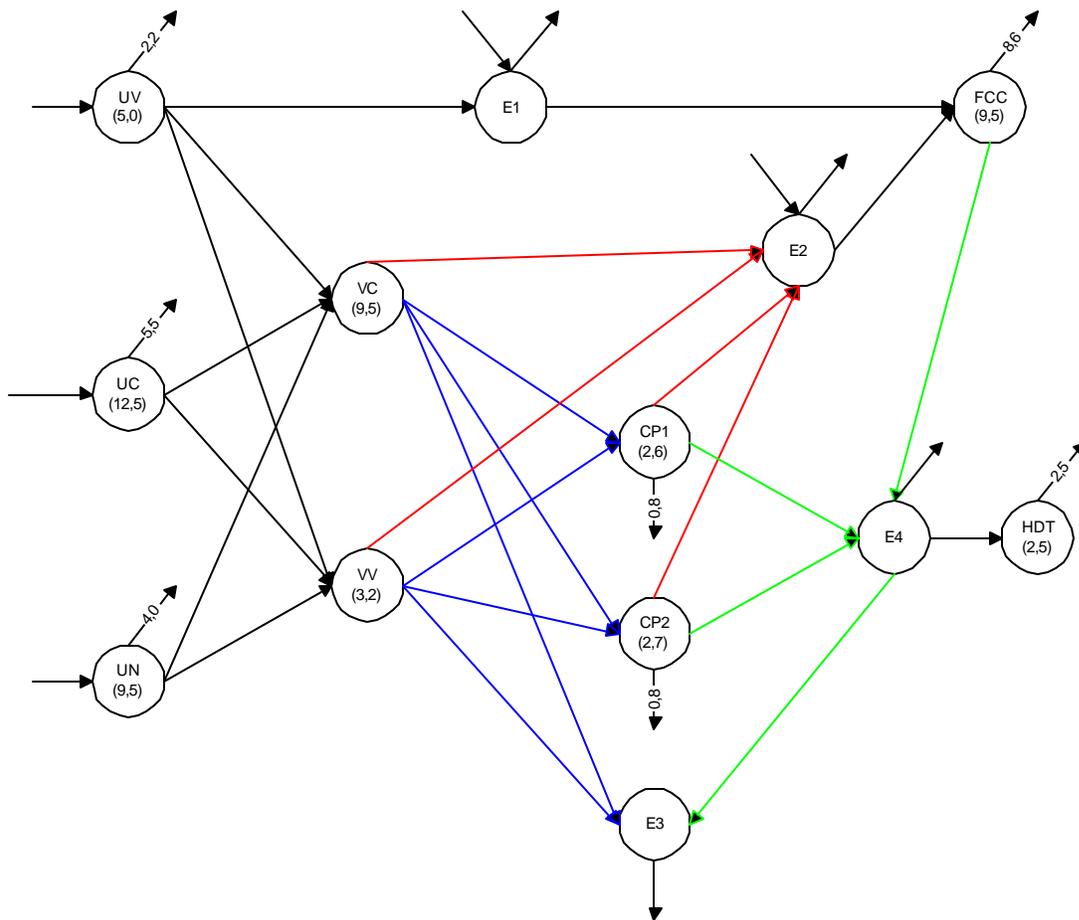


Figura 4.2: Sistema de produção representado através de fluxo em rede

Nesta figura UV, UC, UN, VC, VV, CP1, CP2, FCC e HDT representam as unidades de processamento existentes no sistema e os valores entre parênteses indicam as respectivas capacidades máximas de processamento de matérias primas. Os valores observados nas setas de saída das unidades UV, UC, UN, CP1, CP2, FCC e HDT indicam o rendimento de

produtos para venda obtidos em cada uma delas, quando operando nas suas respectivas capacidades máximas.

Por outro lado, E1, E2, E3 e E4 caracterizam os pontos de armazenagem do sistema onde observam-se possibilidades de recebimento externo ou envio de produtos intermediários para outros sistemas de produção ou ainda para a realização de operações de mistura de diferentes fluxos visando a elaboração de determinados produtos.

As setas interligando os diversos elementos do sistema representam todas as possibilidades de fluxo entre os mesmos.

Desta forma, tanto as unidades produtivas quanto os pontos de armazenagem pertencentes ao sistema, são tratados como os “nós” da rede e a ligação entre estes nós são tratadas como os “arcos”, através dos quais fluem os produtos intermediários de um nó para outro.

4.3.2 Parâmetros do modelo

Os parâmetros que balizam a solução a ser encontrada pelo modelo são:

- CP_i : define a capacidade máxima de fluxo permitido através do nó “i”. Para os nós onde este limite em principio não existe (nós de estoque, por exemplo), define-se valores de capacidade que, em relação aos limites de fluxo dos outros nós, são extremamente elevados e, qualquer que seja a solução de fluxos analisada, jamais seriam atingidos;

- \ddot{a}_i : representa o estado do nó, ou seja, se ele está disponível para operar no período ou se está em manutenção. Efetivamente, para o problema como um todo, é a principal variável a ser definida na solução, afinal o objetivo é determinar o melhor planejamento de paradas das unidades dentro de uma fábrica. Entretanto, nesta primeira etapa, a intenção é determinar os retornos para todas as possíveis configurações de unidades paradas e em operação. Desta forma, para ligado (operando) o parâmetro \ddot{a}_i vale “1” e para desligado (parado) vale “0”. Através de um processo de simulações subseqüentes, as alternativas de configuração, isto é, as diferentes combinações de nós ligados e desligados, são

convenientemente testadas visando calcular o retorno econômico da produção em cada uma. Evidentemente este parâmetro somente será definido para os nós que apresentarem a possibilidade de alteração do estado;

- PV_i : representa o preço médio unitário de produtos vendidos a partir de um determinado nó “ i ”;

- PC_i : representa o preço médio unitário de produtos comprados para um determinado nó “ i ”;

- K_i : representa o custo médio unitário de processamento observado em cada nó “ i ”. Os itens de custo considerados no estudo de caso foram energia e insumos em geral utilizados no processo de produção. No estudo desenvolvido foram incluídos em K_i os custos unitários de aquisição de matéria prima nas unidades “ i ” que as processam.

- RV_i : rendimento de produtos para venda, produzidos no nó “ i ”, em relação à quantidade processada pelo nó “ i ”;

- RI_i^k : rendimento de produtos intermediários produzidos no nó “ i ”, em relação à quantidade de matéria prima processada pelo nó “ i ”, destinado ao processamento em outros nós “ k ”;

- $G(X,A)$: conjunto de nós e arcos que definem a rede, onde:

- $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ é o conjunto de nós, que representam as unidades de processamento, ou sistemas de armazenagem e mistura para transferência, venda e compra de produtos intermediários;

- $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_k, \dots, a_m\}$ é o conjunto de arcos que representam as possibilidades de fluxo entre os nós. Portanto, um arco a_k é definido através de um conjunto de 2 nós, indicando origem e destino do mesmo, ou seja, $\{x_i, x_j\}$.

4.3.3 Variáveis de decisão

- C_i : representa a quantidade de produto comprada para um nó “i”;

- V_i : representa a quantidade vendida de produto a partir de um nó “i”;

- XA_{ij} : representa o fluxo de produto em cada arco, do nó “i” para o nó “j”;

- XN_i : define o fluxo de produto no nó “i”.

4.3.4 Descrição do modelo

Na primeira etapa de solução, o modelo de programação linear proposto para problema de fluxo em rede considera como função objetivo a ser maximizada, o retorno econômico total de cada configuração de paradas, isto é, para cada diferente combinação de valores para o parâmetro "a", em cada nó, como a função objetivo a ser maximizada.

As restrições representadas no modelo referem-se à:

- garantia de fechamento dos balanços materiais nos nós e nos arcos, considerando as entradas e saídas em cada um destes elementos na rede;
- respeito à capacidade máxima de fluxo através dos nós;
- não negatividade de variáveis.

Sendo assim, esta é a formulação matemática para o modelo:

$$f.o. \quad Max \quad RT = \sum PV_i \cdot V_i - \sum PC_i \cdot C_i - \sum K_i \cdot XN_i$$

Sujeito a:

$$a) \quad XN_i \leq CP_i \cdot d_i \quad \forall i$$

$$b) \quad XN_i \cdot RI_i^k = \sum_{j \in S_k} XA_{ij} \quad \forall i, k$$

$$\begin{aligned}
 c) \quad & XN_j = \sum_{(i,j) \in A} XA_{ij} + C_j \quad \forall j \\
 d) \quad & \sum_{(i,j) \in A} XA_{ij} + C_j = \sum_{(j,k) \in A} XA_{jk} + V_j \quad \forall j \in E, \text{ onde } E \subset X \\
 e) \quad & V_i = \mathbf{d}_i \cdot XN_i \cdot RV_i \quad \forall i \\
 f) \quad & \sum_{\substack{(i,E_3) \in A \\ i \neq E_4}}^n XA_{i,E_3} = 2 \cdot XA_{E_4,E_3} \\
 g) \quad & C_i, V_i, XN_i, XA_{ij} \geq 0
 \end{aligned}$$

Descrição das restrições:

- a) Capacidade do nó: limita o fluxo de entrada no nó ao valor da capacidade máxima estabelecida para o mesmo, considerando o seu estado, ou seja, o valor de "ã", definindo se ele encontra-se disponível para operar ou se está em manutenção;
- b) Balanço material da distribuição de produtos intermediários nos arcos: garante que a produção de um determinado produto intermediário obtido em um nó "i" será distribuída adequadamente ao conjunto de nós a jusante "k" que podem efetivamente receber este produto. S_k representa o conjunto de nós "k" localizados a jusante do nó "i", que podem receber o produto intermediário cujo rendimento neste nó é igual a " RI_i^k ";
- c) Balanço material do recebimento de produtos intermediários nos nós: define que a quantidade de produto recebido em um determinado nó "j" é igual ao somatório dos recebimentos de produtos enviados por nós "i" a montante, adicionado ao volume de produtos comprados diretamente para processamento no nó "j";
- d) Balanço material nos nós de armazenamento, transferência, venda e compra de produtos intermediários: define que, nestes nós, o somatório de entradas (recebimentos de nós a montante e compras) deve ser igual ao somatório de saídas (envios para nós a jusante e vendas);

- e) Venda de produtos nos nós de processamento: define a quantidade de produto para vendas a partir de um determinado nó, a partir do fluxo de entrada no nó e do respectivo parâmetro para rendimento de produto final;
- f) Restrição especial: no caso em estudo, foi modelada uma restrição de relação entre fluxos de arcos que se encontram em um mesmo nó, com o objetivo de se respeitar uma proporção entre diferentes fluxos de produtos intermediários que se juntam para compor um único produto final visando especificá-lo para venda.
- g) Não negatividade de variáveis: define as variáveis de decisão que não podem assumir valores menores que zero. Tanto os fluxos nos arcos (XA) e nos nós (XN), quanto as quantidades compradas (C) e vendidas (V), somente poderão assumir valores positivos;

Conforme citado no item 4.3.2 (definição dos “Parâmetros do modelo”), através de simulações subseqüentes e ordenadas, são obtidas os valores da função objetivo em cada configuração possível.

Sendo assim, cada simulação representa uma certa configuração de unidades, caracterizada por um conjunto de parâmetros "ã" indicando a situação de cada unidade de produção e formando uma seqüência de valores “0” (zero) e “1” (um), identificando o estado de cada nó naquela configuração.

Ao número binário formado pelo conjunto de parâmetros "ã" pode ser convenientemente associado o respectivo número decimal, tornando-se um índice através do qual pode ser precisamente identificada uma determinada configuração. Este recurso possibilita ligar à cada configuração, devidamente identificada por um índice, o seu respectivo retorno econômico, formando uma base de dados que facilita a utilização dos mesmos na solução da etapa 2 do problema.

O conjunto de configurações indicando estas características, encontra-se representado na

tabela abaixo.

Nós =>	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Índice	Retorno	
Configurações de estados dos nós: 0 = desligado (em manutenção), 1 = ligado (disponível para operar).	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	\$	
	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	\$	
	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	\$	
	0	0	0	0	0	0	0	1	1	4	\$	
	0	0	0	0	0	0	1	0	0	5	\$	

	1	1	1	1	1	1	0	1	1	508	\$	
	1	1	1	1	1	1	1	0	0	509	\$	
	1	1	1	1	1	1	1	0	1	510	\$	
	1	1	1	1	1	1	1	1	0	511	\$	
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	512	\$	

Figura 4.3: Tabela de configurações

Nesta tabela pode ser verificado, por exemplo, que a configuração de índice 1 é aquela onde todos os 09 nós, ou unidades de processo, encontram-se desligados, ou seja, parados para manutenção. Por outro lado, na configuração de índice 512, todos os nós encontram-se ligados (disponíveis para operar).

O plano de produção é otimizado em cada configuração através do modelo de programação linear e o valor da função objetivo é definido como o retorno associado à configuração.

4.4 Etapa intermediária: Preparo da base de dados para a Etapa 2

Nesta fase intermediária, os resultados econômicos de cada configuração devem ser recalculados, considerando os seguintes aspectos:

- a- os resultados econômicos obtidos para todas as configurações na primeira

etapa, são resultantes de balanços diários de produção. Porém, para longos horizontes de planejamento, o uso desta unidade de tempo traz várias dificuldades no desenvolvimento do modelo para solução da etapa 2, devendo-se portanto ajustá-los para uma unidade de tempo mais adequada. No estudo de caso desenvolvido neste trabalho, a unidade de tempo utilizada no planejamento é o bimestre padrão (60 dias);

- b- como existem unidades com diferentes prazos de paradas (número de dias em manutenção), dentro de um mesmo período (bimestre) podem ser identificados intervalos de tempo com diferentes configurações de paradas, que devem ser levados em consideração na determinação do retorno econômico total do período;
- c- o custo de manutenção, que é calculado em função das paradas previstas, deve ser abatido do resultado econômico da produção, considerando o fator acima.

Portanto, para desenvolvimento da base de dados nesta etapa intermediária, os parâmetros que devem ser considerados, e que referem-se à dois atributos dos padrões de paradas das unidades, são:

- a duração das paradas de manutenção de cada unidade " i ", em dias (t_i);
- o custo de manutenção de cada unidade " i " (CM_i).

A figura a seguir ilustra o ajuste no cálculo do retorno econômico realizado para cada configuração de paradas, em um bimestre. Como premissa adotada neste trabalho, vale observar que, havendo paradas de mais de uma unidade em um determinado período, o início das mesmas se dará sempre no primeiro dia do período.

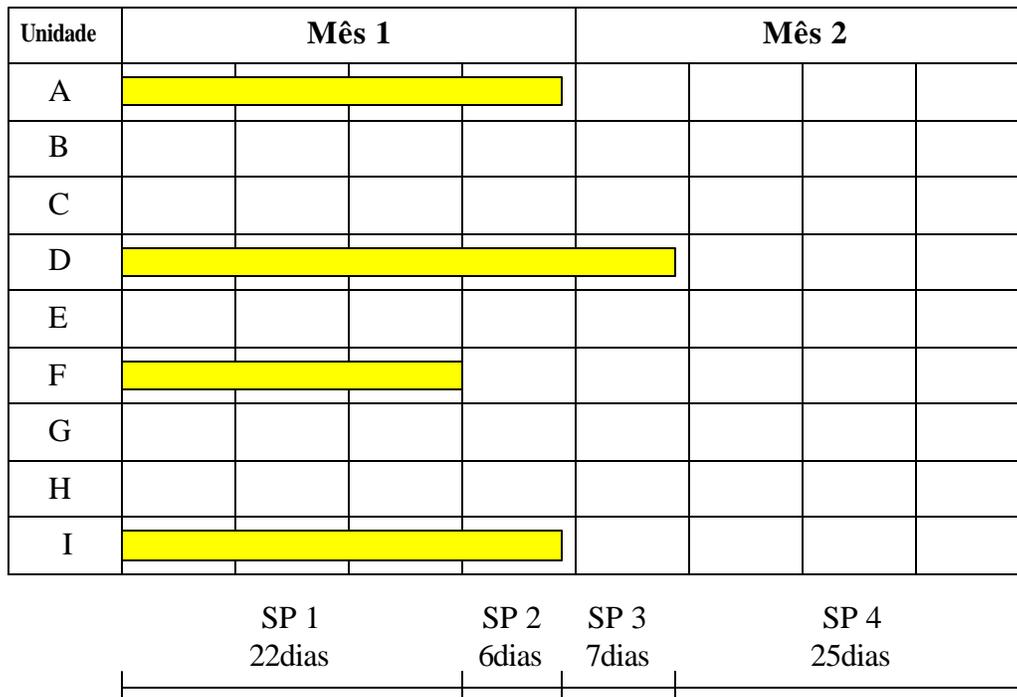


Figura 4.4: Retorno econômico de um período

Através do gráfico de Gantt apresentado na figura, observa-se que, em um bimestre genérico, dos 09 nós existentes, 04 encontram-se com paradas planejadas. Portanto, podemos definir que o bimestre apresentado trata-se da configuração de índice "215", índice este obtido a partir do número binário (0,1,1,0,1,0,1,1,0), formado pelo conjunto de estados dos nós.

Porém, conforme observado no item b acima, verifica-se que ao longo do período exemplificado ocorrem alterações de configurações, onde podem ser destacados 4 diferentes sub-períodos, cada qual com uma configuração de paradas específica.

No sub-período 1, com duração de 22 dias, as unidades A, D, F e I encontram-se paradas para manutenção e todas as demais disponíveis para operar. No período 2, com duração de 06 dias, as unidades A, D e I estão em manutenção e as demais estão disponíveis. Já no período 3, que tem 07 dias, apenas a unidade D está em manutenção e, finalmente, no período 4, todas as unidades estão disponíveis para operar durante os 25 dias finais do

bimestre.

Sendo assim, o retorno econômico de um período que apresenta a configuração de paradas acima, identificada pelo número binário (0,1,1,0,1,0,1,1,0), e portanto pelo índice "215", é, na verdade, resultante do somatório dos retornos econômicos de 4 sub-períodos, cada qual com uma configuração específica:

- sub-período 1: configuração = (0,1,1,0,1,0,1,1,0), índice = 215;
- sub-período 2: configuração = (0,1,1,0,1,1,1,1,0), índice = 223;
- sub-período 3: configuração = (1,1,1,0,1,1,1,1,1), índice = 280;
- sub-período 4: configuração = (1,1,1,1,1,1,1,1,1), índice = 512.

A etapa intermediária da metodologia de solução, consiste em identificar, para cada configuração perfeitamente caracterizada através de um índice, qual é o respectivo retorno econômico para um período completo (bimestre), totalizando os retornos de cada sub-período observado e, em seguida, abatendo os custos de manutenção em cada unidade.

Desta forma, para a configuração de índice "215" acima exemplificada, o cálculo do retorno bimestral ajustado para cada configuração, é o seguinte:

$$RLB_c = (RT_{c1} \cdot t_{c1} + RT_{c2} \cdot t_{c2} + RT_{c3} \cdot t_{c3} + RT_{c4} \cdot t_{c4}) - (CM_A + CM_D + CM_F + CM_I)$$

Onde:

- RLB_c é o retorno econômico líquido bimestral da configuração "c";
- RT_{ci} é o retorno econômico diário das configurações "ci";
- t_{ci} é a duração, em dias, do sub-período que apresenta a configuração "ci";
- CM_i é o custo de manutenção das unidades "i" que têm paradas na configuração "c".

4.5 Etapa 2: Planejamento de Paradas (modelo de Algoritmo Genético)

4.5.1 Visão geral do modelo

Desenvolvido por John Holland, na década de 70, com o objetivo de reproduzir a teoria de evolução das espécies, o algoritmo genético baseia-se em mecanismos encontrados na natureza, através dos quais observa-se que os indivíduos têm suas características aprimoradas ao longo das gerações.

Os mecanismos responsáveis por este aprimoramento são basicamente os processos de seleção e cruzamento (ou crossover). Através do processo de seleção natural os indivíduos mais bem adaptados ao ambiente em que vivem possuem maior capacidade de sobrevivência e se reproduzem com maior frequência. A capacidade de sobrevivência dos indivíduos pode ser medida através de uma característica que indique o seu grau de condicionamento, ou "fitness". O processo de cruzamento transfere para os filhos algumas características dos pais, fazendo com que passem a coexistir, simultaneamente, em um mesmo indivíduo, características "boas ou ruins" que existiam em outros dois indivíduos separadamente. Além dos mecanismos de cruzamento e seleção, observa-se também que, com menor frequência, ocorrem na natureza mutações em alguns indivíduos pertencentes à uma população, rompendo eventuais ciclos e seqüências naturais de transferência de características entre pais e filhos. Este mecanismo também é reproduzido no algoritmo genético.

A caracterização dos indivíduos é verificada através de seus cromossomos, que, por sua vez, podem ser representados como seqüências ordenadas de códigos, informando a presença ou não de determinadas características "boas e ruins".

É possível perceber a semelhança existente entre a estrutura de um cromossomo e a configuração de um plano de paradas. Este último se caracteriza justamente por uma seqüência ordenada de períodos, dentro dos quais podem existir diferentes configurações de unidades, paradas ou em operação, acompanhadas dos respectivos resultados econômicos,

devidamente calculados durante a etapa 1.

Portanto, cada possível plano, ou seja, cada possibilidade de composição de diferentes combinações de configurações por período, representa um “indivíduo”. Um exemplo de um plano (“indivíduo geneticamente caracterizado”) é apresentado na figura a seguir.

Períodos =>		1	2	3	5	6	7
Unidades	A	0	0	1	1	0	1
	B	1	1	1	0	0	0
	C	1	0	1	0	1	0
	D	0	0	0	0	0	0
Retorno econômico =>		123	100	347	50	30	50

Situação das unidades: 0, unidade parada e 1, unidade operando
Horizonte de planejamento: 7 períodos

Figura 4.5: Exemplo de um plano (indivíduo)

O modelo desenvolvido para solucionar a segunda etapa do problema propõe a otimização do plano de paradas, por meio de um processo de aprimoramento de um conjunto (ou população) de planos, com o uso dos mecanismos acima, através do algoritmo genético.

Conforme descrito anteriormente, o processo de aprimoramento dos indivíduos pertencentes a uma população é desenvolvido através dos mecanismos de cruzamento, mutação e seleção. A seleção é baseada na situação dos indivíduos em termos de condicionamento (fitness) para sobrevivência no ambiente onde vivem.

Fica evidente, portanto, que as regras que definem a classificação do fitness de um indivíduo como bom ou ruim dependem do ambiente onde ele terá que sobreviver. No caso em estudo, o fitness de um determinado plano será representado pelo somatório dos valores presentes dos retornos econômicos verificados em cada período, ao longo do horizonte de planejamento. Ou seja, quanto maior o valor presente, melhor é o plano pois são indivíduos mais “bem adaptados” e portanto deverão ter maiores chances de “sobrevivência” dentro

de uma certa população.

O mecanismo de cruzamento constitui-se basicamente de uma mistura de cromossomos de dois indivíduos pertencentes a uma determinada população, que trocam entre si partes de suas características, gerando outro indivíduo, com grande chance de possuir um valor de fitness diferente daqueles apresentados pelos indivíduos a partir dos quais foi gerado.

No processo de seleção, após o mecanismo de cruzamento ter ocorrido, verifica-se dentro da nova população qual o indivíduo com o pior valor de fitness e, em seguida, o mesmo é descartado, formando uma nova população de indivíduos mais bem condicionados.

De forma iterativa, este processo é repetido seguidas vezes, até que se atinja, segundo limite que venha a ser estabelecido, um padrão de fitness bastante homogêneo para toda a população e onde a melhoria de fitness do melhor indivíduo obtida entre gerações já não mais agregue ganho significativo.

A exemplo do que preconiza a teoria de evolução das espécies, ao longo do processo são introduzidas mutações em indivíduos da população com o objetivo de provocar alterações em suas características, independentemente dos processos de cruzamento que estejam ocorrendo. Tais mutações são efetuadas de forma aleatória, atingindo uma pequena parcela da população e portanto deve ser definido um parâmetro indicando a ocorrência deste mecanismo, dentro do processo de otimização.

4.5.2 Parâmetros da segunda etapa

Para o desenvolvimento desta etapa de solução do problema, alguns parâmetros deverão ser levados em consideração.

- Tempo de campanha: tempo decorrido desde a última parada, no instante zero do plano, informado para cada unidade;

- Período de campanha (ou tempo entre paradas): tempo máximo permitido entre paradas de manutenção geral, informado para cada unidade;
- Custos de paradas das unidades: custos diretos com mão de obra e materiais utilizados durante a parada de manutenção geral em cada unidade;
- Número de períodos do plano: indica o horizonte de planejamento dentro qual deverão ser alocadas as paradas.

Vale destacar que os parâmetros descritos acima referem-se a valores intrinsecamente ligados ao problema do planejamento de paradas. Mais adiante serão indicados outros parâmetros utilizados nesta etapa, mas que estão ligados aos controles do algoritmo desenvolvido, dentro do processo de busca da solução.

4.5.3 Descrição do modelo

Seguindo os conceitos e traduzindo os mecanismos de evolução, o modelo foi desenvolvido e o processo de obtenção da solução foi definido, seguindo as seguintes etapas:

a- Definição da estrutura do cromossomo e desenvolvimento da população

No modelo desenvolvido, o cromossomo R_i representa um plano de paradas, ou seja, um conjunto ordenado de " n " genes " c_i ". Os genes " c_i ", portanto, representam as configurações de unidades apresentadas no tópico anterior, ou seja, os conjuntos de combinações de estado das unidades (paradas ou disponíveis para operar) em um período, identificado pelo seu índice (i) e o respectivo retorno econômico líquido para um bimestre (RLB_c), obtidos nas etapas anteriores. Sendo assim, um conjunto ordenado de genes (configurações) forma um cromossomo. Cada gene ou configuração está associado a um período j no horizonte de planejamento, composto, portanto, de " n " períodos. Desta forma, o cromossomo é assim representado:

$$R_i = (c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{ij}, \dots, c_{in})$$

Conforme será visto adiante, no estudo de caso desenvolvido neste trabalho, um cromossomo R_i será composto de 60 genes c_i ($n = 60$), representando um plano de paradas com horizonte de 10 anos, subdividido em 60 bimestres. Todos os genes (configurações) que podem compor um cromossomo (plano de paradas) estão na base de dados formada na etapa intermediária de solução do problema (cap. 4.4) e encontram-se perfeitamente identificados através de seus índices, lembrando novamente que, nesta base de dados, a cada índice está associado o seu respectivo retorno econômico.

Durante a formação dos cromossomos para composição da população inicial pode ser conveniente fazer-se uma pré seleção de configurações viáveis, devido, a limitações de recursos para execução de um grande volume de trabalhos ou necessidade de garantir um determinado nível mínimo de atendimento ao mercado. Desta forma, considera-se de antemão, que determinadas combinações de paradas não devem ocorrer e, portanto, não são configurações que poderão fazer parte de um plano. Para o estudo de caso deste trabalho foi desenvolvido um teste de viabilidade, através do qual são definidos limites máximos para simultaneidade de paradas de unidades pertencentes a um mesmo grupo.

A população inicial é um conjunto de m cromossomos, construídos de forma aleatória. A partir desta população inicial, serão desenvolvidas as gerações futuras de cromossomos, através dos processos de cruzamento, mutação e seleção. Desta maneira, a população de cromossomos pode ser assim definida:

$$R = (R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_m)$$

b- Avaliação do fitness de um cromossomo R_i

A capacidade de adaptação ao meio em que vive um cromossomo R_i será representada pelo valor presente líquido (VPL) do fluxo de caixa do plano de paradas, com horizonte de tempo de " n " períodos, que ele representa. Para o cálculo deste VPL é considerado o retorno econômico RLB_c observado em cada período j , e uma taxa de desconto I .

Desta forma:

$$VPL(R_i) = \sum_{j=1}^n RLB(c_{ij}).(1+I)^{-j}$$

Entretanto, períodos de campanha superiores aos limites estabelecidos como parâmetros do problema não devem ser permitidos e, portanto, no cálculo do fitness, este aspecto deve ser considerado. A estratégia adotada no modelo foi a aplicação de um parâmetro de controle que penaliza o VPL, e conseqüentemente reduz o valor de fitness de planos que apresentam este problema de violação de período de campanha.

Sendo assim, o cálculo final do valor de fitness é:

$$Fitness (R_i) = VPL_i . PA^k$$

onde:

- PA é o parâmetro de controle para penalização do fitness; no modelo desenvolvido foi adotado o valor de 0,8;
- k indica o número de configurações que apresentam violações ao período de campanha.

Desta forma, quanto maior for o $Fitness (R_i)$ melhor é o plano de paradas e maiores serão as chances de sobrevivência do indivíduo R_i . Esta estratégia de cálculo do fitness através do VPL valoriza um aspecto importante nos planos de paradas que é a idéia de se postergar ao máximo as paradas de manutenção, devido ao evidente interesse de minimizar estas intervenções ao longo tempo, sem deixar de lado, entretanto, ganhos econômicos que eventuais manutenções por oportunidade podem provocar no resultado global da produção.

c- Processo de seleção, cruzamento e mutação

No modelo proposto, o processo de seleção é definido através da escolha aleatória de dois

cromossomos quaisquer, R_k e R_z , pertencentes à população. A operação de cruzamento (crossover) é desenvolvida através da combinação de genes dos cromossomos selecionados. A partir de um ponto de corte, definido aleatoriamente e localizado entre dois genes que ocupam a mesma posição nos dois cromossomos, os mesmos são divididos em duas partes. Completando o processo de crossover, um novo indivíduo R_n é formado a partir da união da primeira parte do cromossomo R_k à segunda parte do cromossomo R_z .

Sendo assim, esta é expressão que representa a operação de crossover:

$$R_n = \text{Crossover}(R_k, R_z) = (s_{k1}, s_{k2}, \dots, s_{kj}, s_{zj+1}, \dots, s_{zn})$$

A operação de mutação insere pequenas modificações no indivíduo gerado. No modelo desenvolvido foram definidos dois mecanismos de mutação. No primeiro, ocorre a substituição de um gene do cromossomo, por outro gene escolhido de forma aleatória, dentro das possibilidades de configurações existentes. No segundo mecanismo de mutação do cromossomo gerado, ocorre a troca de posição entre dois genes quaisquer, escolhidos ao acaso.

Finalmente, após serem realizadas as operações de cruzamento e mutação, a nova população possui um novo indivíduo que pode estar mais bem adaptado, ou seja, pode ter melhor fitness do que os indivíduos pertencentes à população anterior. No processo de aprimoramento geral da população, os indivíduos da nova população são ranqueados e o de pior fitness é descartado.

c- Obtenção da solução

Processos sucessivos de seleção, cruzamento e mutação tenderão a criar uma população cada vez mais homogênea, ou seja, composta de indivíduos com valores de fitness mais "parecidos".

Considera-se que a busca do melhor plano de produção foi encerrada, quando a diferença

relativa de fitness entre o melhor e o pior indivíduo é suficientemente pequena e o desenvolvimento de novas gerações já não agrega valor significativo ao melhor indivíduo. Obviamente o melhor plano é o cromossomo que possui o melhor fitness, no momento em que a busca se encerra.

Em cada ciclo desenvolvido, o grau de homogeneidade da população e a agregação de valor entre gerações são medidos através do cálculo das diferenças percentuais entre, respectivamente, o melhor e o pior indivíduo e o melhor indivíduo da última geração e o melhor indivíduo da geração imediatamente anterior. No modelo desenvolvido, para avaliar se o processo deve ser encerrado, estes percentuais calculados são comparados à limites previamente definidos.

O apêndice I apresenta o processo de busca da solução através de um diagrama que descreve, passo a passo, a metodologia de algoritmo genético empregada nesta etapa do problema.

5 Estudo de caso

5.1 Considerações iniciais

Conforme citado nos capítulos iniciais, a aplicação do modelo proposto só faz sentido em plantas cujo grau de complexidade exija um esforço considerável na definição de um plano de paradas para manutenção preventiva, ou seja, em situações onde o número de equipamentos, subsistemas e a própria topologia do processo produtivo impeçam a obtenção de uma solução adequada para o problema através de métodos triviais.

O presente trabalho utiliza-se do processo de planejamento de paradas de manutenção geral preventiva em unidades operacionais de uma refinaria de petróleo considerada de alta complexidade, e visa a obtenção de uma sistemática estruturada de avaliação do plano ótimo de manutenções planejadas para um horizonte de tempo de dez anos.

5.2 Estudo piloto

Antes de tudo, para entendimento da lógica que rege a elaboração do plano de paradas de manutenção de uma refinaria, torna-se necessário uma visão geral do seu processo produtivo.

5.2.1 Descrição do processo produtivo e dos subsistemas componentes

Em geral o petróleo é definido como uma mistura de substâncias compostas por moléculas de carbono e hidrogênio, ou hidrocarbonetos, que por sua vez apresentam-se nestas misturas com diferentes números de átomos e com variadas formas de arranjo dos mesmos. Esta valiosa matéria prima, responsável por uma parte considerável da matriz energética mundial, é encontrada na natureza em diferentes formações geológicas, podendo ser observadas variações significativas nas características físicas e químicas de petróleos vindos de diferentes regiões produtoras.

Desde os primórdios desta indústria, as refinarias em geral utilizam-se da mesma tecnologia para o processamento inicial do petróleo. É através das unidades de destilação atmosférica que se separam fisicamente as primeiras correntes de misturas de hidrocarbonetos, genericamente classificadas como gases, leves, médias e pesadas.

Os gases são compostos por hidrocarbonetos (HC) com moléculas de até 2 átomos de carbono. Como produtos leves são classificados o gás liquefeito de petróleo, ou glp, e a nafta. Enquanto o glp é composto por HCs de 3 e 4 átomos de carbono, a nafta é composta por uma mistura de HCs com 5 a 12 átomos de carbono. São classificados como produtos médios o querosene e o diesel, que são misturas de HCs contendo de 13 a 30 átomos de carbono. A corrente mais pesada, normalmente escura e viscosa, é o chamado resíduo atmosférico, composto por misturas de HC com moléculas de mais de 30 átomos de carbono. O rendimento obtido de cada uma destas correntes pode variar significativamente dependendo do tipo de petróleo processado.

A partir destes derivados primários outros produtos podem ser obtidos através de vários processos físicos e químicos de transformação, separação e mistura, visando a obtenção de produtos com valor comercial.

As capacidades de produção e os tipos de processos existentes em uma refinaria de petróleo dependem basicamente do histórico de desenvolvimento ocorrido na planta industrial, dos tipos de matérias primas processadas e dos objetivos de produção. Por outro lado, estes fatores são consequência do perfil de demanda dos mercados onde a refinaria atua, do estágio de desenvolvimento destes mercados para cada um dos diferentes produtos comercializados, das mudanças tecnológicas introduzidas na planta para atender a estas demandas e das exigências do ambiente político e social no qual a refinaria está inserida.

Desta forma, além das próprias plantas de destilação atmosférica que podem variar quanto ao número de unidades disponíveis e quanto à capacidade de processamento de petróleo, vários outros processos podem estar presentes em uma refinaria. Dentre estes processos destacam-se a destilação à vácuo do resíduo atmosférico, o craqueamento catalítico de

gasóleos e resíduos, o coqueamento retardado de resíduos submetidos à craqueamento térmico, a desasfaltação de gasóleos e de resíduos, a reforma catalítica de naftas, a alquilação e a isomerização além de vários outros processos de transformação ou separação de compostos ou correntes. O diagrama de blocos apresentado no apêndice II mostra os processos presentes em uma refinaria considerada de alta complexidade.

Ainda deve ser lembrada a presença das unidades de tratamento, que visam a melhoria da qualidade dos produtos através de processos que removem ou modificam compostos precursores de poluição ou de degradação das características do derivado.

Em suma, considerando-se as exigências do mercado, tanto as ligadas aos aspectos ambientais quanto de desempenho dos produtos, todos estes processos estão de uma forma ou outra sempre voltados à transformação de correntes menos nobres, com menor interesse comercial, em produtos de maior valor agregado.

5.2.2 Descrição da refinaria escolhida para o estudo de caso

Visando adequar o grau de complexidade do problema ao estritamente necessário para o desenvolvimento do trabalho, a envoltória do estudo foi reduzida às unidades de processamento consideradas mais importantes.

Para a seleção das unidades foram adotados os seguintes critérios:

- a- Unidades que apresentassem forte interdependência em termos de rentabilidade e de continuidade operacional (unidades operando em série) e que, ao mesmo tempo, não permitissem vinculação automática das paradas. Como vinculação automática entende-se o relacionamento entre duas (e somente duas) unidades onde não existe armazenagem intermediária e capacidade produtora excedente (ou disponibilidade externa) de matéria prima, suficientes para sustentar a unidade a jusante, durante todo o período de parada da unidade a montante;

- b- Unidades cuja ausência do processo provocassem sérios impactos no esquema de refino, tanto na capacidade total de produção como na composição de produtos finais, e forte desbalanceamento de produtos intermediários de difícil gerenciamento, não só de déficits como também de excedentes.

Sendo assim, para o desenvolvimento do trabalho na refinaria em questão, foram escolhidas as seguintes unidades:

- 1 unidade de destilação atmosférica com capacidade de 12500 m³/d (UC);
- 1 unidade de destilação atmosférica com capacidade de 9500 m³/d (UN);
- 1 unidade de destilação atmosférica com capacidade de 5000 m³/d (UV);
- 1 unidade de destilação a vácuo com capacidade de 9500 m³/d (UVC);
- 1 unidade de destilação a vácuo com capacidade de 3200 m³/d (UVV);
- 1 unidade de craqueamento catalítico com capacidade de 9500 m³/d (UFCC);
- 1 unidade de coqueamento retardado com capacidade de 2600 m³/d (CP1);
- 1 unidade de coqueamento retardado com capacidade de 2700 m³/d (CP2);
- 1 unidade de hidrotratamento de instáveis com capacidade de 5000 m³/d (HDT);

A configuração do esquema produtivo da refinaria, com as ligações entre as unidades de processamento acima citadas e as respectivas correntes de produção, é apresentada através do diagrama de blocos mostrado na figura 5.1. Os valores observados no diagrama referem-se aos fluxos de carga e de produção considerando-se a capacidade nominal das unidades, e o elenco de petróleos tipicamente processados na refinaria, expressos em "mil m³/dia".

Observa-se no diagrama que, entre a unidade de destilação atmosférica "UV" e a unidade de craqueamento catalítico, "FCC", foi representada a existência de armazenagem para o resíduo atmosférico (RAT). Da mesma forma foram consideradas armazenagens disponíveis no gasóleo para craqueamento (GOP), igualmente carga do "FCC", e no gasóleo leve (GOL), carga do "HDT".

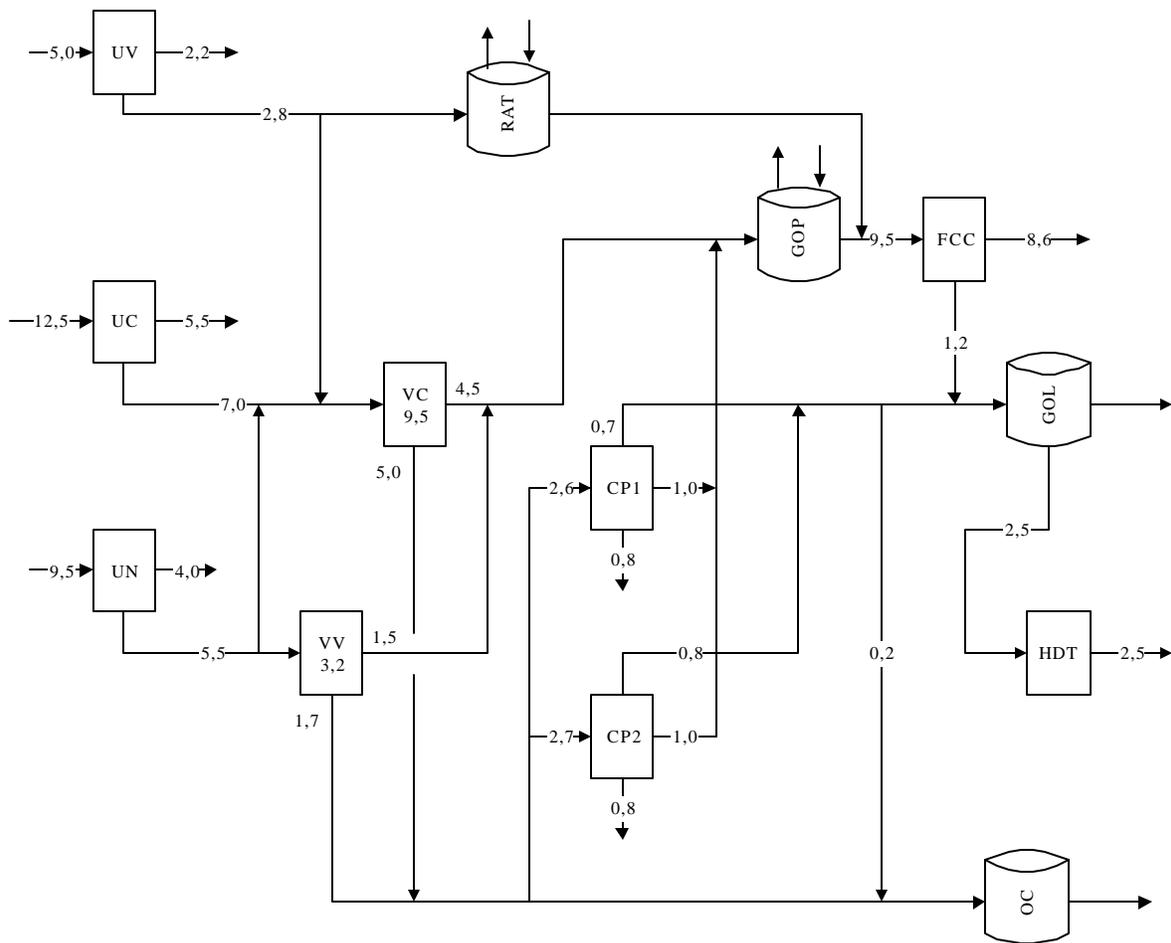


Fig. 5.1: Fluxograma de produção da refinaria

Conforme citado anteriormente, considerando-se o tratamento dado ao modelo proposto como sendo um problema de fluxo em rede, na realidade estes "nós" são os pontos através dos quais podem ser efetuadas os fluxos de vendas ou compras dos respectivos derivados como forma de compensar eventual desequilíbrio interno de oferta e demanda, resultante do próprio esquema de refino, ou da parada de manutenção em alguma(s) unidade(s).

A armazenagem apresentada para o Óleo Combustível (OC) desempenha o papel de um "nó" da rede onde são efetuadas as misturas com diluente, o gasóleo leve (GOL), visando a correção de viscosidade para posterior fluxo de venda.

5.2.3 Apresentação dos dados

Os dados utilizados no estudo de caso serão apresentados considerando-se distintamente as duas etapas utilizadas na solução do problema, conforme capítulo 4.2.

5.2.3.1 Dados utilizados na primeira etapa

Capacidades de cada unidade (nó): representam restrições relativas aos limites máximos de processamento de matéria prima das unidades de produção consideradas no modelo. Encontram-se expressos em mil m³/dia. Para os demais nós considerados no modelo (de armazenagem, mistura e venda de produtos intermediários e óleo combustível), os valores de capacidade registrados na realidade indicam não haver limites de fluxo nestes nós, ou seja, o modelo teria liberdade para estabelecer a utilização necessária que otimizasse o valor da função objetivo.

Custos de produção das unidades: para a maioria das unidades consideradas no modelo foram considerados os principais itens de custos variáveis das mesmas, devidamente totalizados. Os itens de custo considerados foram energia, produtos químicos mais importantes (particularmente, catalisador para a UFCC) e gás natural (utilizado na produção de hidrogênio para a HDT) e encontram-se expressos em dólares por metro cúbico de matéria prima processada. Especificamente para as unidades de destilação atmosférica, foram incluídos os custos da matéria prima processada em cada unidade, considerando-se a média de custos da cesta de petróleos normalmente processados, para o esquema típico de refino usualmente adotado pela refinaria em estudo.

Preços da venda das produções de derivados: de forma simplificada representam os preços médios ponderados conseguidos na venda dos produtos comercializáveis obtidos em cada unidade. Observa-se que algumas unidades não possuem valor de venda diretamente indicados para os seus produtos, devido ao fato de normalmente produzirem apenas correntes que servirão como matéria-prima para processos ou sistemas que se encontram a jusante. No caso em estudo, é a situação das unidades de destilação à vácuo.

Preço de compra de derivados intermediários: representam os preços a serem pagos pela compra de produtos a serem utilizados como matéria prima de unidades, devido à déficits gerados pela parada ou redução de carga ocorridas em outras unidades a montante produtoras destas correntes.

Para determinados derivados intermediários como o resíduo atmosférico para craqueamento, o gasóleo para craqueamento e o diluente de óleo combustível, existe tanto a possibilidade de venda quanto de compra, permitindo a operação das unidades, mesmo em situação de déficits ou superávites. Para evitar-se distorção de resultados, foi estabelecido para estes produtos um diferencial entre os preços de compra e venda, impedindo ao modelo a implementação de soluções que representassem a compra e venda de um mesmo produto, em um mesmo período, como forma de aumentar os ganhos operacionais, fato que seria totalmente inconsistente com as práticas operacionais usuais de uma refinaria.

A tabela 5.1, resume os valores dos parâmetros acima apresentados.

Unidades de processo	Capacidades de processamento das unidades	Custos de produção das unidades	Preços de venda das produções de derivados	Preço de compra de derivados intermediários
	m3/dia x 1000	\$/m3	\$/m3	\$/m3
UV	5,0	110,2	128,9	-
UC	12,5	106,2	129,2	-
UN	9,5	106,4	129,2	-
VV	3,2	2,7	0,0	-
VC	9,5	2,6	0,0	-
CP1	2,6	3,0	50,0	-
CP2	2,7	3,0	50,0	-
FCC	9,5	7,0	132,2	-
HDT	2,5	6,7	133,0	-
E1	1000,0	-	104,0	108,0
E2	1000,0	-	107,0	111,0
E3	1000,0	-	100,0	-
E4	1000,0	-	115,0	-

Obs.: os valores de capacidade de processamento registrados para os nós E1, E2, E3 e E4, na verdade indicam não haver limitação de fluxo para estes nós.

Tabela 5.1: Dados utilizados na etapa 1

Rendimentos de produtos: representam os rendimentos de cada derivado (ou de um

conjunto de derivados) obtido(s) a partir da matéria-prima processada em uma determinada unidade. São expressos como uma fração ou percentual da carga processada na referida unidade. Como uma determinada unidade pode produzir produtos finais para venda ou derivados intermediários para posterior processamento em outras unidades, cada uma delas tem o seu conjunto de específico de rendimentos. Estes rendimentos encontram-se definidos na tabela 5.2.

Unidades de processo	Rendimentos (% Vol)					
	Produtos finais p/ venda	Resíduo atmosférico BTE	Res. atm. p/ craqueamento	Gasóleo e nafta p/ craqueamento	Resíduo de vácuo	Gasóleo leve
UV	44,0	-	56,0	-	-	-
UC	44,0	56,0	-	-	-	-
UN	42,1	57,9	-	-	-	-
VV	-	-	-	46,9	53,1	-
VC	-	-	-	47,4	52,6	-
CP1	30,8	-	-	-	38,5	26,9
CP2	29,6	-	-	-	37,0	29,6
FCC	90,5	-	-	-	-	12,6
HDT	100,0	-	-	-	-	-

Tabela 5.2: Rendimentos de produtos nas unidades

5.2.3.2 Dados utilizados na fase intermediária e na etapa final

Tempo entre paradas: trata-se do período máximo que é permitido entre duas paradas de manutenção planejada, consecutivas, para cada unidade, expresso em meses.

Tempo de manutenção: tempo de duração da parada de manutenção, padronizado para cada unidade, expresso em dias.

Custo da manutenção: refere-se ao custo global padrão para a manutenção de cada unidade, incluindo materiais, mão de obra e serviços utilizados. É importante lembrar que a parcela referente ao lucro cessante causado pela interrupção da produção da unidade, é adequadamente contabilizada na primeira etapa, pois, os retornos econômicos obtidos para cada configuração, espelham os impactos das paradas sobre a lucratividade operacional da

planta.

Tempo de campanha: período decorrido desde a última parada de manutenção realizada, no instante zero do planejamento.

A tabela 5.3 mostra os dados utilizados como parâmetros do modelo de algoritmo genético desenvolvido nesta etapa de solução do problema.

Unidades de processo	Custo da manutenção	Tempo de manutenção	Tempo entre paradas	Tempo de campanha
	\$	dias	meses	meses
UV	1308	26	60	6
UC	2336	26	60	55
UN	2167	26	60	50
VV	2534	30	60	25
VC	1681	30	60	6
CP1	2222	32	48	24
CP2	3650	32	48	40
FCC	11250	45	36	20
HDT	1958	35	24	20

Tabela 5.3: Dados sobre as paradas das unidades

5.2.4 Análise dos resultados

O procedimento de validação desenvolvido leva em consideração a natureza do método escolhido para a busca da solução para o problema, o algoritmo genético, através do qual não se consegue efetivamente garantir o alcance da solução ótima.

Dentro do processo de validação do modelo proposto, os resultados obtidos foram analisados e avaliados considerando-se os seguintes enfoques:

- a- Respeito às restrições estabelecidas e comparação da solução obtida com o método usual de elaboração do planejamento de paradas;
- b- Estabilidade dos resultados comparando soluções obtidas a partir de diferentes

corridas do modelo, considerando as características do método de solução empregado;

- c- Coerência das soluções apontadas em diferentes cenários construídos através da alteração de parâmetros.

Em relação ao primeiro aspecto, foi observado que as restrições de tempo máximo entre paradas foram respeitadas em todas as soluções encontradas nas diversas corridas desenvolvidas, inclusive durante os testes de sensibilidade com alteração de parâmetros. Desta forma, considera-se que a estratégia de penalização do fitness dentro do modelo de algoritmo genético, consegue garantir o atendimento à esta restrição.

Nas soluções apontadas pelo modelo foi observado que, em sua grande maioria, as paradas foram planejadas para períodos próximos do limite de tempo entre paradas, evidenciando a tendência de postergá-las o máximo possível, sem, entretanto, violar o prazo máximo estabelecido para cada unidade.

Algumas corridas, entretanto, indicaram planos com possibilidades de melhoria na solução. Verificou-se em determinados planos a existência de paradas desnecessárias em algumas unidades, ou seja, manutenções que, se eliminadas, não violariam limites de tempos máximos entre paradas e, por outro lado, trariam os ganhos resultantes da operação da unidade e da não realização dos custos de parada.

Esta evidência indica, portanto, a necessidade de se pesquisar e testar alternativas, dentro dos mecanismos do algoritmo, que permitam conduzir ao aprimoramento do processo de busca de soluções.

Ao mesmo tempo, esta observação confirma a necessidade de uma análise crítica das soluções indicadas pelo modelo, buscando, preferencialmente, o desenvolvimento de um conjunto de corridas, a partir das quais se possa efetuar uma escolha mais adequada do planejamento de paradas.

As análises de sensibilidade realizadas tiveram como principal objetivo a verificação da coerência entre as direções apontadas pelas alterações realizadas em parâmetros do problema e as soluções efetivamente encontradas pelo modelo.

As mudanças de parâmetros que configuraram cada teste realizado encontram-se descritas no apêndice III.

Em todos os testes de sensibilidade, as soluções obtidas foram comparadas a um plano base resultante de uma corrida desenvolvida com os parâmetros originais do problema. Os parâmetros de controle do algoritmo de solução propriamente dito, tais como, tamanho da população, penalidade de fitness e homogeneidade da população, foram mantidos constantes. Os planos de parada obtidos em cada teste bem como o plano do caso base, usado para comparação, encontram-se apresentados através de cronogramas no apêndice IV.

No primeiro teste realizado, buscou-se verificar a resposta do modelo à uma padronização dos períodos de campanha e de tempos entre paradas. Desta forma foram estabelecidos valores idênticos para estes parâmetros em todas as unidades.

A expectativa era que o modelo respondesse com soluções onde as unidades apareceriam agrupadas, com paradas simultâneas, em determinados períodos dentro do horizonte de planejamento. Nos cronogramas apresentados no apêndice IV, observa-se claramente que o modelo respondeu exatamente desta forma, respeitando, porém, aos critérios de viabilidade estabelecidos como restrição dentro do modelo que limitam o número e tipo de unidades que podem parar simultaneamente.

O segundo teste teve como objetivo verificar a sensibilidade do modelo quanto ao valor dos custos das paradas, lembrando que estes custos referem-se apenas aos materiais, equipamentos e mão de obra empregados diretamente na manutenção das unidades. Estes custos, nos valores originais do problema, apesar de elevados, têm um significado relativamente pequeno nos resultados totais. Ao elevá-los, igualmente, em todas as

unidades, para valores significativamente mais altos, observou-se em várias unidades a tendência de postergação das paradas, mostrando maior sensibilidade do modelo para captar os custos financeiros de paradas realizadas antes do prazo limite.

No terceiro teste o objetivo foi avaliar a tendência de vinculação de paradas na solução do modelo, a partir de mudanças no perfil de rentabilidade das unidades da refinaria. Desta forma procedeu-se a redução do preço de venda de produto a partir de EST3, que é o óleo combustível.

Ao se reduzir o preço de venda de EST3, diminui-se o custo de oportunidade da carga das unidades CP1 e CP2, o resíduo de vácuo, aumentando a importância destas unidades na lucratividade da refinaria. Neste novo contexto de preços, esperava-se que a maior capacidade de agregação de valor destas unidades ao resíduo de vácuo passasse a indicar uma maior importância do aproveitamento das oportunidades de vinculação de paradas entre estas unidades e as unidades de destilação (atmosférica ou a vácuo), que são produtoras do resíduo de vácuo. Da mesma forma, esperava-se maior possibilidade de vinculação entre as unidades de coque e a unidade de hidrotratamento, que agrega valor a uma das correntes produzidas pelas unidades CP1 e CP2, o gasóleo leve.

Efetivamente isto ocorreu. Observa-se no cronograma que, enquanto no caso base ocorreram três vinculações de paradas com as unidades de coque (CP1 e CP2), no teste 3 são verificadas quatro.

O quarto teste pretendeu aferir a resposta do modelo às alterações simultâneas nos parâmetros dos tempos de campanha e entre paradas, repetindo os valores considerados no primeiro teste, e no perfil de capacidade das unidades, tornando a refinaria mais simétrica. Sendo assim, as unidades de destilação atmosférica, UC e UN, passaram a ter capacidades de processamento iguais de 11000 m³/dia, cada. Da mesma maneira, em cada unidade de destilação a vácuo, VC e VV, a capacidade de processamento passou para 6500 m³/dia e na unidade de coque CP1, a capacidade passou a ser de 2700 m³/dia, igual portanto à capacidade da CP2.

Em relação ao teste 1, a solução apresentada pelo modelo não se diferenciou substancialmente. Deve-se ressaltar, entretanto, a menor dispersão de paradas no segundo bloco de manutenções verificado no cronograma. Observa-se também neste cronograma que a unidade FCC, possuidora do maior custo de parada (em média, cerca de 5 vezes o valor das demais), teve sua parada alocada de forma diferenciada, para o final do prazo de realização. Acredita-se entretanto que, em relação ao teste 1, o teste 4 não inseriu alterações de parâmetros que pudessem justificar tal tendência e, sendo assim, supõe-se que este resultado está ligado às características da metodologia de busca da solução implementada.

6 Conclusões, recomendações e oportunidades de desenvolvimento

6.1 Conclusões e recomendações

Conforme comentado anteriormente, a natureza combinatorial do problema de planejamento proposto neste trabalho, que também apresenta características típicas de problemas de *scheduling*, amplia significativamente o número de diferentes possibilidades de cronogramas, dificultando sobremaneira a definição de uma solução perfeitamente adequada aos objetivos pretendidos. Observa-se mesmo assim que, nas soluções encontradas através dos testes de sensibilidade, os cronogramas obtidos apresentaram uma alocação de paradas das unidades ao longo do tempo bastante coerente, mostrando a capacidade que a sistemática desenvolvida possui para formular planos de paradas consistentes e, desta forma, ser utilizada como ferramenta de apoio para a tomada de decisões nesta área. Portanto, considera-se que este objetivo específico do trabalho foi atingido, sendo necessário entretanto considerar as características da metodologia empregada e fazer uso da ferramenta com visão crítica.

Em relação aos objetivos do trabalho de análise e ajuste do plano de paradas das refinarias desenvolvido pela atividade de Logística, citados no capítulo de introdução deste trabalho, verifica-se que o emprego da sistemática proposta pode vir a atendê-los. As preocupações com a ocorrência de sobreposição de paradas de unidades do mesmo tipo em uma determinada região, a concentração excessiva de paradas em um determinado período e a disponibilidade adequada de recursos de transporte são aspectos que estão essencialmente incorporados à metodologia de solução proposta. Para incorporá-las será necessário ampliar o sistema de produção a ser otimizado inserindo as unidades de processamento pertencentes a outras refinarias de uma certa região e considerar os arcos do modelo de fluxo em rede que representam recursos de transporte (oleodutos) como elementos adicionais que podem estar disponíveis para operação ou em manutenção, exatamente como são tratadas as unidades de processamento. Todavia, deve-se atentar para o fato de que a incorporação de novos elementos aumenta exponencialmente as possibilidades de configurações de paradas (genes) para os quais deverão ser calculados os retornos econômicos do plano de

suprimento devidamente otimizados pelo modelo de programação linear na primeira etapa de solução do problema, intensificando o uso de recursos computacionais.

Conforme acima observado, o estudo de caso e os testes de sensibilidade realizados indicam que o modelo desenvolvido possui a capacidade de formular um plano de paradas consistente. A tendência de agrupar algumas paradas, observada na maioria dos planos simulados, tem consistência com os aspectos operacionais da planta e com a parcela de agregação de valor de cada unidade no processo produtivo. Da mesma forma, as alterações de parâmetros realizadas nos testes de sensibilidade resultaram, na sua maioria, em cronogramas de paradas coerentes com as modificações efetuadas.

Observou-se, entretanto, que algumas possibilidades de melhoria encontram-se presentes nas soluções indicadas pelo modelo e, desta forma, a abordagem e os recursos adotados na solução do problema não podem ser considerados totalmente esgotados. Ao contrário, são diversas as possibilidades de desenvolvimento da sistemática, sendo que as mesmas vão desde a implantação de melhorias na representação do sistema de produção no modelo de programação linear até a introdução de mecanismos que permitam ao algoritmo genético a obtenção de melhores soluções.

6.2 Oportunidades de desenvolvimento

Dentre as diversas áreas que poderiam ser alvo de desenvolvimento da metodologia, destaca-se, conforme citado anteriormente, a integração de aspectos logísticos ao problema. Através desta integração, poderiam estar sendo agregadas ao modelo outras plantas de produção que atuassem em uma mesma área de mercado, bem como os recursos de transporte utilizados na região, principalmente oleodutos.

Outro aspecto relevante refere-se à representação de sazonalidades de mercado no modelo, capacitando-o para a avaliação e escolha de diferentes épocas do ano que possam ser mais convenientes para a execução da parada de manutenção de uma determinada unidade, em função do seu perfil de produção e das demandas de produtos.

Quanto ao modelo de programação linear utilizado na primeira etapa para a otimização da produção da planta, são diversas as possibilidades de detalhamento do processo de produção, inserindo características não contempladas neste trabalho e que podem ser consideradas relevantes em determinados cenários. Dentre estas possibilidades destacam-se:

- flexibilidade para escolha de diferentes matérias primas (petróleos), com diferentes rendimentos de produtos e preços. Esta flexibilidade pode alterar a otimização da planta nos momentos em que ocorre parada de uma unidade e, conseqüentemente, há alteração no perfil de capacidade de produção da planta como um todo;
- representação adequada dos aspectos relacionados à qualidade dos produtos obtidos e às especificações de venda. Ao representar de forma mais acurada estes aspectos, algumas restrições podem direcionar para soluções diferenciadas;
- maior detalhamento das operações de mistura de correntes para formação de produtos de venda. Esta etapa do processo de produção permite o ajuste das características dos produtos, podendo, portanto, influenciar na otimização da planta, principalmente em situações de unidades paradas.

Em relação ao processo de obtenção do plano de paradas propriamente dito (segunda etapa da sistemática proposta), algumas melhorias podem ser vislumbradas.

Buscando simplificar o processo de desenvolvimento do modelo proposto, assumiu-se a premissa que qualquer parada tem seu início no primeiro dia de cada período. Portanto, em qualquer configuração com mais de uma unidade parada, todas iniciam a manutenção no primeiro dia do período. Entretanto, seria necessário verificar se esta é efetivamente a melhor distribuição de paradas dentro da janela de programação. Portanto, uma oportunidade de desenvolvimento seria inserir o processo de otimização da distribuição das paradas dentro dos períodos de programação, identificando o melhor arranjo para cada configuração.

Conforme identificado no capítulo anterior, algumas soluções apresentaram possibilidades de melhoria no arranjo das paradas, identificando a necessidade de pesquisar e testar mecanismos que permitam ao algoritmo a obtenção de melhores soluções.

O horizonte de longo prazo tratado no problema, permite supor que mudanças estruturais podem ocorrer na planta, como, por exemplo, novos projetos ou alterações de capacidade nas unidades. Portanto, o tratamento deste aspecto do problema é outra área que pode vir a merecer atenção e requerer tratamento e adaptação do método proposto.

Referências bibliográficas

BÄCKERT, W., RIPPIN, D. W. T., *Comp. Chem. Engng*, 1985.

BARLOW, R. E., HUNTER, L. C. Optimum Preventive Maintenance Policies. *Operations Research*, 8, 90-100, 1960.

BIREWAR, D. B., *Design, planning and scheduling of multiproduct batch plants*. Ph.D. Thesis 194p., Department of Chemical Engineering, Carnegie Mellow University, Pittsburg (PA), 1989.

BUFFA, E. S., *Operations Management: problems and models*, 1972

DEDOPOULOS, SHAH, Long-term maintenance policy optimization in multipurpose process plant, *Transactions of the Institute of Chemical Engineers*, 74-A, p.307-320, London, UK, 1996.

FRENCH, S., *Sequencing and scheduling: an introduction to the mathematics of the job-shop*, Ellis Horwood Ltd, London, UK, 1982.

GAAL, Z., KOVACS, Z. *Hungarian J. Ind. Chem.*, p.13, 1985

GUPTA, J. N. D., Optimal flowshop schedules with no intermediate storage space, *Naval Research Logistics Quarterly*, 23, p.235-243, 1976.

JARDINI, A. K. S., *Maintenance, Replacement and Reliability*, New York, 1973.

KELLY, A. e HARRIS, M.J. *Administração da Manutenção Industrial*, IBP, 1980

KONDILI, E., PANTELIDES, C. C., SARGENT, R. W. H., A general algorithm for short-term scheduling of batch operations, I, MILP formulation, *Computers Chem. Engineering*

17(2), p.211-227, 1993.

MURTHY, D. P. N., *Int. J. Systems Sci.*, 1984

NAPIERALA, H., *Manutenção de Equipamentos com Múltiplos Componentes: um modelo de Programação Dinâmica*, 1999.

PEKNY, J. F., ZENTNER, M. G., Learning to solve process scheduling problems: the role of rigorous knowledge acquisition frameworks. *Foundations of Computer Aided Process Operations*, 1994.

PELHAM, R., PHERRIS, C., Refinery operation and control: a future vision. *Hydrocarbon Processing*, p.89-94, 1996.

PINTO, J. M., *Planejamento e Programação de Operações de Produção e Distribuição em Refinarias de Petróleo*, Tese 160p., Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

PINTO, J. M., GROSSMAN, I. E., Assignment and sequencing models for the scheduling of chemical processes. *Annals of Operations Research* 81, p.433-466, 1998.

PORTER, M. E., *Competitive Strategy*, 1980.

REKLAITIS, G.V., Overview of scheduling and planning of batch process operations. *NATO Advanced Study Institute - Batch Process System Engineering*, Antalya, Tukey, 1992.

SHAH, N., PANTELIDES, C. C., SARGENT, R. W. H., A general algorithm for short-term scheduling of batch operations, II, Computational issues, *Computers Chem. Engineering* 17(2), p.229-244, 1993.

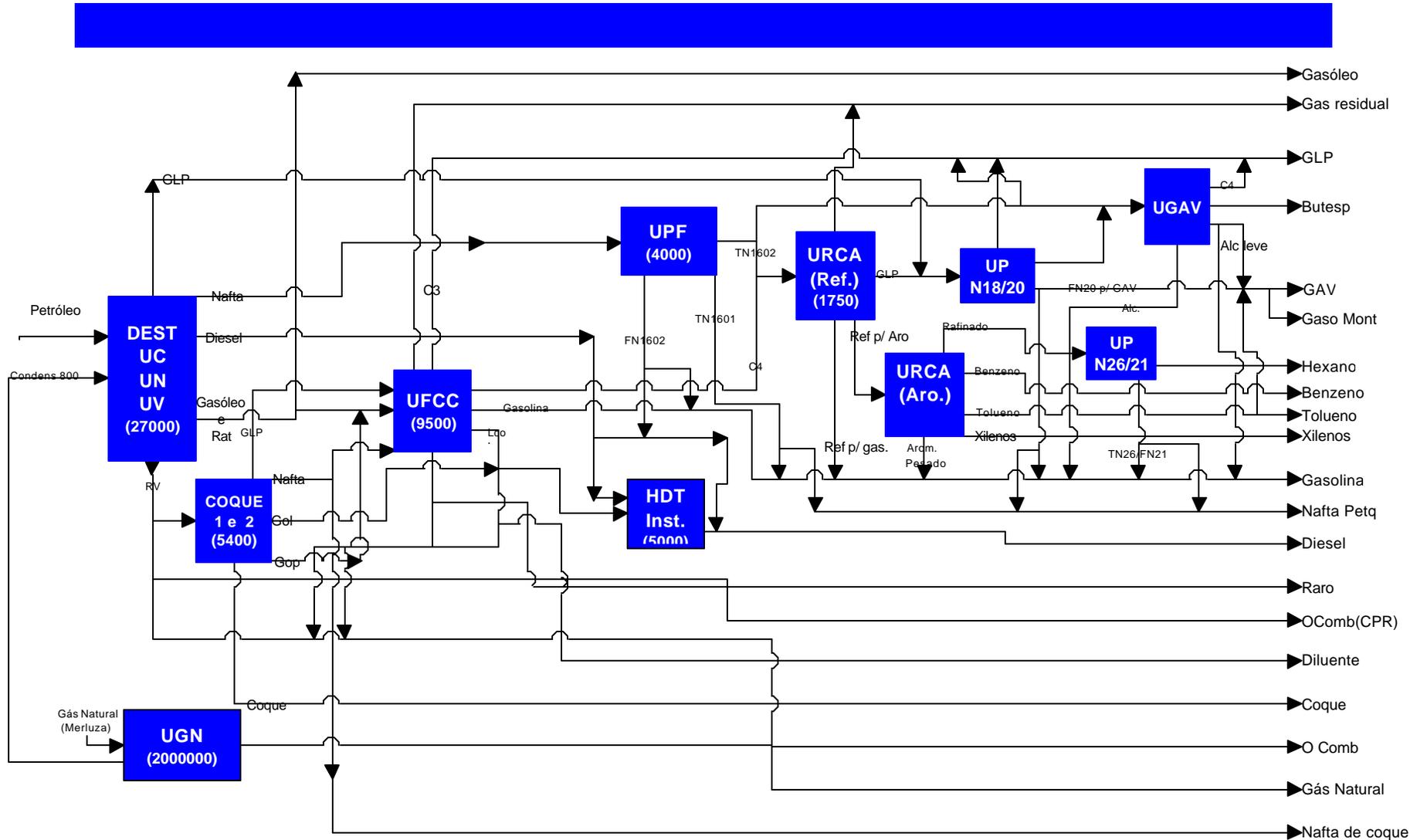
SHOEMAKER, Paul J.H.,RUSSO, J. Edward, A Pyramid of Decision Approaches.

California: *Management Review*, Fall, p.9-31, 1993.

TAN, J. S., KRAMER, M. A., A reliability approach to safety monitoring and maintenance advising, *Ann AIChE Mtg.*, Miami Beach, Florida, 1992.

VAN RIJN, F. H., *Proc. First International Conference of Computer-Aided Proc Operations*, Park City, Utah, 1987.

APÊNDICE II: Fluxograma de produção de uma refinaria complexa



APÊNDICE III: Testes de sensibilidade do modelo - alteração de parâmetros

	Unidade	Parâmetros da Etapa 1: Configurações (LP)				Parâmetros da Etapa 2: Solução (GA)			
		Capacidade m ³ /dia x 1000	Preço de venda \$/m ³	Preço de compra \$/m ³	Custo de produção \$/m ³	Custo da parada \$ x 1000	Tempo de manutenção dias	Tempo entre paradas meses	Tempo de campanha meses
Caso Base: Valores originais. População: 3000.	UV	5,0	128,90	-	110,20	1.308	26	60	6
	UC	12,5	129,20	-	106,20	2.336	26	60	55
	UN	9,5	129,20	-	106,40	2.167	26	60	50
	VC	9,5	-	-	2,70	2.534	30	60	25
	VV	3,2	-	-	2,60	1.681	30	60	6
	CP1	2,6	50,00	-	3,00	2.222	32	48	24
	CP2	2,7	50,00	-	3,00	3.650	32	48	40
	FCC	9,5	132,20	-	7,00	11.250	45	36	20
	HDT	2,5	133,00	-	6,70	1.958	35	24	20
	EST1	1000,0	104,00	108,00	-	-	-	-	-
	EST2	1000,0	107,00	111,00	-	-	-	-	-
	EST3	1000,0	100,00	-	-	-	-	-	-
	EST4	1000,0	115,00	-	-	-	-	-	-
Teste 1: Uniformizados os parâmetros de tempo de campanha e tempo entre paradas. Objetivo: verificar tendência de distribuição homogênea das paradas ao longo do planejamento e ganho obtido. População: 3000	UV	5,0	128,90	-	110,20	1.308	26	60	10
	UC	12,5	129,20	-	106,20	2.336	26	60	10
	UN	9,5	129,20	-	106,40	2.167	26	60	10
	VC	9,5	-	-	2,70	2.534	30	60	10
	VV	3,2	-	-	2,60	1.681	30	60	10
	CP1	2,6	50,00	-	3,00	2.222	32	60	10
	CP2	2,7	50,00	-	3,00	3.650	32	60	10
	FCC	9,5	132,20	-	7,00	11.250	45	60	10
	HDT	2,5	133,00	-	6,70	1.958	35	60	10
	EST1	1000,0	104,00	108,00	-	-	-	-	-
	EST2	1000,0	107,00	111,00	-	-	-	-	-
	EST3	1000,0	100,00	-	-	-	-	-	-
	EST4	1000,0	115,00	-	-	-	-	-	-
Teste 2: Elevados os custos de paradas. Objetivo: verificar sensibilidade do modelo quanto à antecipação de paradas. População:3000.	UV	5,0	128,90	-	110,20	20.000	26	60	6
	UC	12,5	129,20	-	106,20	20.000	26	60	55
	UN	9,5	129,20	-	106,40	20.000	26	60	50
	VC	9,5	-	-	2,70	20.000	30	60	25
	VV	3,2	-	-	2,60	20.000	30	60	6
	CP1	2,6	50,00	-	3,00	20.000	32	48	24
	CP2	2,7	50,00	-	3,00	20.000	32	48	40
	FCC	9,5	132,20	-	7,00	20.000	45	36	20
	HDT	2,5	133,00	-	6,70	20.000	35	24	20
	EST1	1000,0	104,00	108,00	-	-	-	-	-
	EST2	1000,0	107,00	111,00	-	-	-	-	-
	EST3	1000,0	100,00	-	-	-	-	-	-
	EST4	1000,0	115,00	-	-	-	-	-	-
Teste 3: reduzido o preço de venda de EST3. Objetivo: verificar sensibilidade do modelo para vinculação de paradas das unidades UCP1 e UCP2, considerando o aumento do valor marginal da operação destas unidades, considerando a redução do custo de oportunidade de sua MP. População: 3000.	UV	5,0	128,90	-	110,20	1.308	26	60	6
	UC	12,5	129,20	-	106,20	2.336	26	60	55
	UN	9,5	129,20	-	106,40	2.167	26	60	50
	VC	9,5	-	-	2,70	2.534	30	60	25
	VV	3,2	-	-	2,60	1.681	30	60	6
	CP1	2,6	50,00	-	3,00	2.222	32	48	24
	CP2	2,7	50,00	-	3,00	3.650	32	48	40
	FCC	9,5	132,20	-	7,00	11.250	45	36	20
	HDT	2,5	133,00	-	6,70	1.958	35	24	20
	EST1	1000,0	104,00	108,00	-	-	-	-	-
	EST2	1000,0	107,00	111,00	-	-	-	-	-
	EST3	1000,0	90,00	-	-	-	-	-	-
	EST4	1000,0	115,00	-	-	-	-	-	-
Teste 4: Alteradas as capacidades das unidades (maior simetria da planta) e uniformizados os parâmetros de tempo de campanha e entre paradas. Objetivo: verificar tendência de distribuição mais uniforme das paradas ao longo do planejamento. População:3000.	UV	5,0	128,90	-	110,20	1.308	26	60	10
	UC	11,0	129,20	-	106,20	2.336	26	60	10
	UN	11,0	129,20	-	106,40	2.167	26	60	10
	VC	6,5	-	-	2,70	2.534	30	60	10
	VV	6,5	-	-	2,60	1.681	30	60	10
	CP1	2,7	50,00	-	3,00	2.222	32	60	10
	CP2	2,7	50,00	-	3,00	3.650	32	60	10
	FCC	9,5	132,20	-	7,00	11.250	45	60	10
	HDT	2,5	133,00	-	6,70	1.958	35	60	10
	EST1	1000,0	104,00	108,00	-	-	-	-	-
	EST2	1000,0	107,00	111,00	-	-	-	-	-
	EST3	1000,0	100,00	-	-	-	-	-	-
	EST4	1000,0	115,00	-	-	-	-	-	-

