

O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE EQUIPES DE CERTIFICAÇÃO DE UNIDADES FIXAS DE CIMENTAÇÃO

Arthur Rios de Souza Moreira¹, Leonard Barreto Moreira²

Faculdade Professor Miguel Ângelo da Silva Santos – FeMASS

R. Aloísio da Silva Gomes, 50 - Granja dos Cavaleiros, Macaé - RJ, 27930-560

¹arthur.rsmoreira@yahoo.com.br, ²leonardbarreto@gmail.com

Fermín Alfredo Tang Montané

Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF

Av. Alberto Lamego, 2000, Pq. Califórnia, Campos dos Goytacazes, RJ, 28013-602

alfredot71@gmail.com

RESUMO

O processo de alocação de pessoal é um dos problemas chave na gestão de recursos humanos. Especificamente no mercado offshore, esta situação mostra-se como um dos grandes desafios, visto que tais ambientes apresentam relações de trabalho dinâmicas e heterogêneas. Assim, o presente trabalho tem por objetivo propor dois modelos matemáticos para o auxílio na tomada de decisões de programação de equipes para a certificação de unidades de cimentação em plataformas de petróleo. A construção de modelos distintos justifica-se pelos diferentes cenários adotados no trabalho, essencialmente relacionados ao número de equipes e o balanceamento de trabalho entre elas. O estudo de caso é baseado em dados simulados referentes à escala das equipes e prazos para execução dos serviços nas plataformas, mantendo, no entanto, características semelhantes às observadas na empresa objeto de estudo. Com o apoio de técnicas de Pesquisa Operacional, os modelos propostos foram implementados utilizando o software de otimização LINGO.

PALAVRAS CHAVE. Alocação de Pessoal, Certificação de Unidades de Cimentação, Otimização.

Tópicos. PO em Serviços, PO na Área de Petróleo e Gas, Outras aplicações em PO.

ABSTRACT

The staff scheduling process is one of the key problems in human resources management. Specifically in the offshore market, this shows up as a major challenge, as such environments present dynamic and heterogeneous labor relations. Thus, this paper aims to propose two mathematical models to aid in making teams programming decisions for cementing units certification on oil platform. The construction of different models is justified by the different scenarios adopted at work, mainly related to the number of teams and the work of balancing between them. The case study is based on simulated data on the scheduling of the teams and deadlines to deliver the services on the platforms, keeping, however, characteristics similar to those observed in the company subject to study. With the support of Operations Research techniques, the proposed models have been implemented using the optimization software LINGO.

KEYWORDS. Staff Scheduling. Cementing Unit Certification. Optimization.

Paper Topics. OR in Services, OR in Oil and Gas, Other Applications in OR.

1. Introdução

Medidas preventivas como certificações de equipamentos, treinamento de pessoal e planos de contingência são essenciais para garantir que o processo de extração e produção de petróleo seja executado ininterruptamente, com qualidade e sem riscos à segurança, à saúde ou ao meio ambiente. Quanto à certificação de equipamentos a bordo das plataformas, vale ressaltar que na maioria dos casos, faz-se necessário o deslocamento até a plataforma de uma equipe técnica capacitada para realizar essas certificações. Essa mobilização envolve uma cadeia logística de pessoal e material que deve ser preparada de forma antecipada. Este processo aplica-se também ao problema da certificação de unidades de cimentação nas plataformas de exploração de petróleo, que é objeto de estudo.

Uma unidade de cimentação é utilizada para os serviços de cimentação das fases de um poço, para fazer tampões, *squeezes* (injeção de cimento em um ou mais pontos específicos) e para testes de pressão. A certificação destas unidades consiste em testes de medição e inspeções para assegurar a sua integridade e bom funcionamento durante um período de tempo especificado.

Uma vez que o processo para certificar uma unidade a bordo traz custos com pessoal, material e mobilização de ambos, deseja-se dimensionar a quantidade ótima de funcionários de modo a realizar a certificação em tempo hábil. Dessa forma, será mantido um equilíbrio entre conseguir realizar as certificações de todas as unidades antes de seus devidos vencimentos e evitar ociosidade de sua mão de obra devido a excesso de pessoal disponível para trabalho. Neste contexto, é de suma importância a obtenção de um plano logístico capaz de permitir que todo o processo de certificação seja executado com eficiência dentro dos prazos corretos. No entanto, o problema de alocação de pessoal apresenta-se com um dos grandes desafios em diversos setores da indústria, dada a natureza das relações de trabalhos que englobam acordos laborais flexíveis, equidade de turno, preferências de pessoal e de trabalho em tempo parcial. [Ernst et al. 2004] apresentam um estudo sobre métodos e modelos para resolução problemas de alocação de pessoal em áreas de aplicação específicas. De maneira similar, o trabalho de [Usmani 2012] aborda técnicas de otimização aplicadas ao problema de escala de engenheiros em plataformas de petróleo.

Uma forma de estabelecer um plano logístico eficiente para esse problema é traçá-lo de acordo com um modelo matemático baseado em técnicas de Pesquisa Operacional. Esse modelo irá auxiliar na tomada de decisões relacionadas a programação de equipes necessárias para fazer a certificação das unidades de cimentação, conseqüentemente, otimizando esse planejamento de forma a sempre manter em dia os certificados de cada um desses equipamentos.

Tendo como base então a Programação Linear (PL), será apresentado um estudo sobre as técnicas utilizadas para a resolução de problemas relacionados a esse tipo de cenário. Observa-se a adoção de um caso particular de PL, denominado problema de designação, para resolução de casos semelhantes ao objeto de estudo do presente trabalho.

Paralelamente foi realizada uma pesquisa acerca do funcionamento do processo de certificação de unidades de cimentação. O estudo é baseado na empresa Halliburton Serviços LTDA, especificamente no setor de cimentação. Foram analisadas informações relativas à composição e forma de trabalho das equipes, plataformas atendidas, bem como todo o processo logístico que engloba o setor citado. Por questões organizacionais, os valores e informações descritos nesse trabalho são simulados, no entanto têm estrutura semelhante ao que foi analisado ao longo do período de observação do trabalho. Com isso foi possível identificar e definir os principais aspectos do problema investigado, auxiliando assim a construção do modelo matemático.

Com base nessas informações foram propostos dois modelos matemáticos que foram implementados e resolvidos utilizando o *software* de otimização LINGO. Os resultados obtidos a partir desta ferramenta serão utilizados para a análise da melhor programação de pessoal. Para efeitos de comparação, serão considerados cinco cenários possíveis: a utilização de uma, duas e três equipes de certificação, sendo que nos dois últimos casos será considerada também o balanceamento do trabalho entre equipes. Desta forma, com apoio da programação temporal

resultante de cada cenário, espera-se mitigar os problemas relacionados à data correta de certificação das unidades de cimentação.

O trabalho é dividido da seguinte forma: a seção 2 apresenta a descrição do problema; a seção 3 apresenta uma breve introdução sobre o problema de designação que serve de base para os modelos propostos na seção seguinte; a seção 4 apresenta os modelos matemáticos propostos para resolver o problema objeto de estudo; os resultados obtidos são apresentados na seção 5; por último, na seção 6 são tecidas as conclusões do trabalho e considerações finais pautados nos resultados alcançados.

2. Descrição do problema

O presente trabalho estuda o problema da certificação de unidades de cimentação que se encontram abordo das plataformas de exploração e produção de petróleo. Em geral, uma unidade de cimentação realiza serviços de cimentação das fases de um poço, de injeção de cimento com a finalidade de fazer tampões, e também são utilizadas em testes de pressão. Este estudo tem como base o processo de certificação seguido na empresa Halliburton Serviços Ltda.

O processo de certificação consiste em enviar uma equipe a bordo de uma plataforma de petróleo, para fazer testes e inspeções a fim de assegurar o funcionamento da unidade, livre de falhas, durante um período de tempo especificado. Segundo procedimentos internos, sabe-se que a certificação desses equipamentos deve ser realizada anualmente.

A empresa que presta serviços de certificação precisa atender a um conjunto de plataformas de petróleo distribuídas nas bacias de Campos, Santos e Espírito Santo em datas diferentes, e deve garantir que o novo processo de certificação se inicie antes da data de vencimento da certificação anterior. Além disso, é desejável que o atendimento aconteça em data próxima da data de vencimento, de forma a aproveitar ao máximo a validade do equipamento. Desse modo, manter o controle sobre todas as datas de vencimento e estabelecer um cronograma ótimo de certificação são desafios a serem superados pela companhia.

O problema abordado pela empresa objeto de estudo, conta com três equipes para realizar a certificação de um total de vinte unidades de cimentação, cada uma delas alocadas em uma plataforma de petróleo nas bacias de Campos, Santos e Espírito Santo. Cabe ressaltar que na programação realizada pela empresa, atualmente, com esse quantitativo de equipes, algumas unidades de cimentação são certificadas após a data de vencimento. Uma unidade de cimentação vencida pode acarretar não somente em multas para a organização por parte do cliente (Petrobras ou qualquer outro), como também aumentar o risco de falhas e incidentes relacionados a segurança. Daí surge a necessidade de certificar todas as unidades de cimentação a tempo antes do vencimento com o número ótimo de equipes.

A decisão a ser tomada é: dentre todas as plataformas em que há uma unidade de cimentação a bordo, e de posse das datas de vencimento de cada uma, qual equipe mandar para uma determinada plataforma e em que período enviá-la?

O estudo consistiu no levantamento de dados oriundos do dia a dia do setor de cimentação dessa organização que são utilizados no processo de tomada de decisões. Por se tratar de uma informação estratégica para a companhia, alguns dados apresentados são simulados. No entanto, mesmo não sendo verídicos em sua totalidade, os valores e informações descritos nesse trabalho têm estrutura semelhante ao que foi analisado ao longo do período de observação.

As plataformas e suas respectivas unidades de cimentação a bordo, bem como as datas de vencimento no ano de 2014 estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1: Relação de plataformas e datas de vencimento das unidades de cimentação a bordo

Plataforma	Data de vencimento	Plataforma	Data de vencimento
1	02/07/2014	11	09/06/2014
2	03/08/2014	12	27/03/2014
3	18/01/2014	13	05/12/2014
4	16/04/2014	14	14/07/2014
5	29/08/2014	15	18/08/2014
6	16/04/2014	16	04/08/2014
7	03/09/2014	17	02/10/2014
8	02/07/2014	18	11/12/2014
9	24/02/2014	19	08/02/2014
10	21/06/2014	20	20/07/2014

Com relação à equipe de certificação, sabe-se que ela é composta por um total de cinco pessoas: dois medidores, dois certificadores e um inspetor. O serviço a bordo tem duração de cinco dias, e deve-se considerar um dia adicional para a viagem de embarque. De maneira semelhante, a equipe de certificação tem direito a cinco dias de folga, e deve-se considerar um dia adicional para a viagem de desembarque. Dessa forma cria-se um ciclo de trabalho de doze dias. Ao fim do ciclo a equipe está apta para mais um trabalho. Na Figura 1 o ciclo de trabalho descrito é ilustrado.

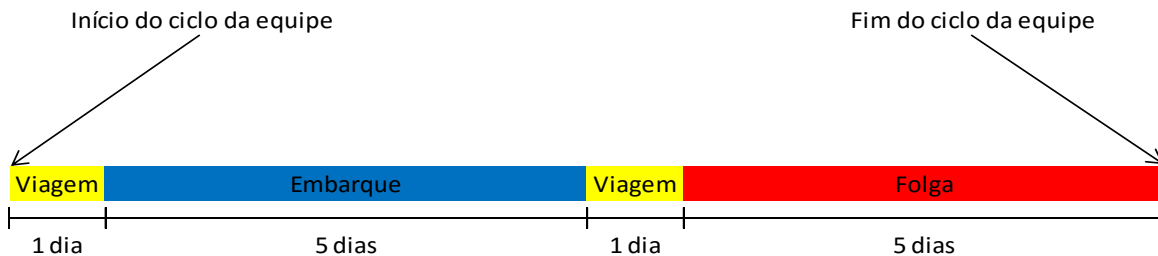


Figura 1: Ciclo de trabalho de uma equipe de certificação

Seguindo a premissa de quanto mais se embarcar a mesma equipe para certificar as unidades de cimentação a bordo mais ela se especializará nesse trabalho, a companhia criou um esquema de trabalho em que o ideal seja enviar uma mesma equipe a todos os trabalhos que forem surgindo em sequência. Em outras palavras, o trabalho só é designado a outro grupo caso o primeiro não possa atender, devido seu ciclo de trabalho não ter terminado. A mesma lógica é usada para designar a terceira equipe a uma certificação. Com isso, pode-se dizer que a primeira equipe é mais especializada que a segunda que por sua vez é mais especializada que a terceira.

3. O problema de designação

Considerado uma classe especial de problema de Programação Linear (PL), o problema de transporte – comumente denominado Hitchcock-Koopmans [Bazaraa et al. 2010] –, geralmente possibilita solucionar importantes problemas reais e são de excelente aplicação prática [Goldbarg e Luna 2005]. De uma maneira geral, esta classe de problemas consiste em determinar a programação de expedição de produtos entre pontos de oferta a centros de demanda de modo a minimizar os custos totais com a expedição, ao mesmo tempo que respeite os limites de oferta e demanda [Taha 2008].

Um caso particular de um problema de transporte, que por sua vez é um caso específico de um problema de PL, é denominado como problema de designação. Conhecido também como problema de alocação (*Staff Scheduling*), de atribuição (*Assignment*) ou de escala de serviço (*Rostering*), essa classe de problemas pode ser entendida essencialmente como o ato de distribuir pessoas para realizar determinadas tarefas com o menor custo possível [Hillier e Lieberman 2013; Arenales et al. 2006].

Estes problemas normalmente ocorrem em diversas áreas de operação (sistemas de comunicação, distribuição de água, designação de pessoal, etc), o que pode ser observado nos trabalhos desenvolvidos por [Vieira et al. 2015], ao programar escala de trabalho de funcionários de restaurantes, e por [Silva et al. 2004], ao criar escalas de plantão para militares. No entanto, outras abordagens são propostas para a elaboração de cronogramas de trabalhos como as baseadas em análise matemática (Método do Caminho Crítico (CPM) e *Program Evaluation and Review Technique* (PERT)), em simulações (Análise Monte Carlo) e em heurísticas (*Critical Chain*, SGS, metaheurísticas). Nesse contexto, cita-se a aplicação do Problema de Escalonamento de Tarefas (PSP – *Project Scheduling Problem*), uma técnica que caracteriza-se por considerar alocações pré-estabelecidas para posterior definição da melhor ordem de execução das tarefas [Rocha 2011]. Nesses casos, tais técnicas não buscam desenvolver cronogramas ótimos de trabalho (considerando a alocação de recursos humanos) ou consideram as alocações pré-estabelecidas, extrapolando, assim, o escopo do presente trabalho.

O problema geral da designação tem ainda como características: o mesmo número de tarefas e pessoas; cada pessoa é capaz de atender a uma determinada tarefa à um custo (c_{ij}); somente uma tarefa pode ser designada à uma pessoa; uma pessoa atende somente à uma tarefa. De forma geral, o problema de designação pode ser formulado [Burkard et al. 2012]:

Índices:

i : representa o i -ésimo elemento do conjunto de pessoas;
 j : representa o j -ésimo elemento do conjunto de tarefas;

Parâmetros de custos:

c_{ij} : custo de designar uma pessoa i a uma tarefa j .

Variáveis de decisão:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se pessoa } i \text{ é designada para realizar a tarefa } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (1)$$

Em termos de notação acima, o problema de alocação pode ser formulado como:

$$\min Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} * x_{ij} \quad (2)$$

s.t.

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad , \forall i = \{1, \dots, n\} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad , \forall j = \{1, \dots, n\} \quad (4)$$

A função objetivo em (2) visa minimizar o custo total de designação. Com relação ao conjunto de restrições, o primeiro conjunto de restrições em (3) garante que cada pessoa somente poderá realizar uma tarefa. Enquanto, o segundo conjunto de restrições em (4) exige que uma tarefa somente seja realizada por uma pessoa.

Em muitos casos práticos, as restrições relativas à designação unitária entre oferta e demanda (equações 3 e 4) impostas pelo problema geral, mostram-se incompatíveis com algumas regras de negócio. Nesse estudo em particular, tendo como base o problema geral de designação, é proposto um modelo de decisão de modo que sejam admitidas mais de uma tarefa a cada designado, uma vez que as certificações são realizadas em várias plataformas ao longo do ano. Os

elementos e características pertinentes ao problema em questão serão apresentados na próxima seção.

4. Modelos matemáticos MAEC e MAECB

Para resolver o problema apresentado na seção 2, dois modelos matemáticos foram desenvolvidos a partir do modelo clássico de alocação, descrito na seção anterior. Espera-se que estes modelos possam auxiliar na tomada de decisões referentes à programação das certificações nas plataformas, evitando atrasos, custos associados a multas e riscos desnecessários.

O primeiro modelo matemático proposto, denominado modelo de alocação de equipes de certificação (MAEC), procura determinar a programação temporal das certificações realizadas pelas equipes, visando minimizar a diferença total (em número de dias) entre o início de cada nova certificação e a data de vencimento da certificação antiga. Este modelo não considera o balanceamento entre as tarefas realizadas pelas diferentes equipes. O modelo MAEC é formulado matematicamente com base na seguinte notação:

Índices:

i : representa a i -ésima equipe de certificação;

j : representa a j -ésima plataforma atendida;

k : representa um dia do ano;

Parâmetros:

n : número de equipes de certificação;

m : número de plataformas atendidas;

d : número de dias em um ano;

$dataVerif_j$: define a data de vencimento da certificação na plataforma j ;

As variáveis de decisão do modelo são definidas como:

Variáveis de decisão:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{se a equipe } i \text{ for designada à plataforma } j \text{ com início da certificação no dia } k \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5)$$

Em termos de notação acima, o problema MAEC pode ser formulado como:

$$\min Z = \sum_{j=1}^{20} dataVerif_j - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{20} \sum_{k=1}^{365} x_{ijk} * k \quad (6)$$

sujeito a:

$$\sum_{j=1}^{20} x_{ijk} \leq 1, \quad \forall i = \{1, 2, 3\}, k = \{1, 2, \dots, 365\} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^3 x_{ijk} \leq 1, \quad \forall j = \{1, 2, \dots, 20\}, k = \{1, 2, \dots, 365\} \quad (8)$$

$$x_{ijk} + x_{ijk+1} + \dots + x_{ijk+11} \leq 1, \quad \forall i = \{1, 2, 3\}, k = \{1, 2, \dots, 365\} \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^{365} x_{ijk} = 1, \quad \forall j = \{1, 2, \dots, 20\} \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{20} \sum_{k=1}^{365} x_{ijk} = 20 \quad (11)$$

$$x_{ijk} * k \leq dataVerif_j \quad \forall i = \{1, 2, 3\}, \forall j = \{1, 2, \dots, 20\}, k = \{1, 2, \dots, 365\} \quad (12)$$

O modelo MAEC é descrito a seguir. A função objetivo em (6) minimiza a soma das diferenças entre as datas de vencimento das certificações antigas e as datas em que as novas certificações foram iniciadas nas plataformas.

O conjunto de restrições é descrito a seguir. As restrições em (7) asseguram que uma equipe não inicie uma certificação em plataformas distintas no mesmo dia. O conjunto de restrições em (8), garantem que uma mesma plataforma não receba mais de uma equipe de certificação no mesmo dia. Por outro lado, as restrições em (9) estabelecem que o ciclo de trabalho de cada equipe será de 12 dias. Sendo impossível que uma equipe inicie mais de uma certificação dentre desse período. As restrições em (10), garantem que cada plataforma será certificada exatamente uma vez durante o ano. Já as restrições em (11), estabelecem que o número de certificações realizadas durante o ano deve ser igual ao número de plataformas existentes. O conjunto de restrições em (12) assegura toda nova certificação será iniciada até a data de vencimento da certificação anterior.

O segundo modelo matemático proposto, denominado modelo de alocação de equipes de certificação com balanceamento (MAECB), é uma extensão do modelo anterior. Este modelo considera um conjunto de restrições adicional que visa garantir o balanceamento na utilização das diferentes equipes de certificação. Neste caso o número máximo de plataformas atendidas por uma equipe é limitado pelo valor médio (arredondado para cima) de plataformas por equipe. Desta forma, a inclusão desta nova restrição (equação 13) ao modelo supracitado compõe um novo modelo denominado MAECB.

$$\sum_{j=1}^{20} \sum_{k=1}^{365} x_{ijk} \leq \lceil m/n \rceil, \quad \forall i = \{1, \dots, n\} \quad (13)$$

Desta forma, este modelo visa uma maior flexibilização na programação de trabalho através de uma divisão de tarefas mais adequada. A implementação do modelo, foi realizada mediante o software de otimização LINGO. Os resultados obtidos são apresentados discutidos na próxima seção.

5. Resultados dos experimentos

Para a realização dos experimentos com os modelos propostos, MAEC e MAECB, utilizou-se a informação referente ao setor de cimentação previamente apresentada na Seção 2. Foram consideradas tanto informações referentes às equipes de certificação quanto a sua forma de escala. Considerou-se um total de 20 plataformas e até 3 equipes de certificação. Utilizaram-se os dados apresentados na Tabela 1, referentes às datas de vencimento da certificação de cada plataforma. Vale observar que para a utilização desses dados nos modelos foi necessário converter as datas em número de dias corridos a partir do início do ano de 2014.

Os experimentos compreendem duas partes. Primeiro a execução do modelo MAEC em três diferentes cenários que diferem pelo número de equipes de certificação, variando de um até três equipes de certificação. Estes experimentos não consideram o balanceamento entre as equipes. O segundo conjunto de testes, compreende a execução do modelo MAECB em dois cenários adicionais com dois e três equipes de certificação, respectivamente e que procuram balancear o uso das equipes de certificação.

5.1 Experimentos com o modelo MAEC

Foram considerados três cenários:

Cenário 1: utilização de uma equipe de certificação

Os resultados obtidos para o Cenário 1 estão sintetizados na Tabela 2. Esta tabela mostra na primeira coluna as plataformas em ordem de atendimento programado pelo modelo. Na segunda coluna, a única equipe de atendimento. Na terceira e quarta colunas as datas de vencimento da certificação e a data limite para conclusão da nova certificação dentro do prazo. As datas de início e fim da nova certificação programada pelo modelo são mostradas na quinta e sexta coluna. Finalmente na última coluna, mostra-se o valor da diferença entre a data de certificação ideal (data de vencimento) e a data programada pelo modelo. Observe que esta diferença é igual a zero quando ambas as datas coincidem. No entanto, pode acontecer a antecipação da certificação programada, neste caso, a diferença contempla os dias transcorridos desde a antecipação até data de certificação ideal. O total de dias antecipados é mostrado na última linha da tabela.

Tabela 2. Resultados do Cenário 1

Plataforma	Equipe	Data de Vencimento	Certificação no Prazo	Início da Certificação Programada	Fim da Certificação Programada	Antecipação (dias)
3	1	18/jan	30/jan	18/jan	30/jan	0
19	1	08/fev	20/fev	08/fev	20/fev	0
9	1	24/fev	08/mar	24/fev	07/mar	0
12	1	26/mar	07/abr	22/mar	03/abr	4
6	1	15/abr	27/abr	03/abr	15/abr	12
4	1	15/abr	27/abr	15/abr	27/abr	0
8	1	01/jul	13/jul	05/mai	17/mai	57
1	1	01/jul	13/jul	17/mai	29/mai	45
11	1	08/jun	20/jun	29/mai	10/jun	10
10	1	20/jun	02/jul	10/jun	22/jun	10
20	1	19/jul	31/jul	22/jun	04/jul	27
14	1	13/jul	25/jul	04/jul	16/jul	9
2	1	02/ago	14/ago	16/jul	28/jul	17
16	1	03/ago	15/ago	28/jul	09/ago	6
15	1	17/ago	29/ago	09/ago	21/ago	8
5	1	28/ago	09/set	21/ago	02/set	7
7	1	02/set	14/set	02/set	14/set	0
17	1	01/out	13/out	01/out	13/out	0
13	1	04/dez	16/dez	28/nov	10/dez	6
18	1	10/dez	22/dez	10/dez	22/dez	0
					Total	218

A tabela mostra que 65% das plataformas (13) terão o serviço de certificação realizado antes da data prevista. Um outro aspecto a se destacar é o alto quantitativo de dias antecipados para realização das certificações (*Total=218*). Considera-se desejável que os valores *Antecipação* e *Total*, estejam próximos de 0 (zero), indicando assim que os serviços foram iniciados próximos ou exatamente na data de vencimento.

Com base nos dados da Tabela 2 foi elaborado um diagrama de Gantt que ilustra a programação temporal das novas certificações ao longo do ano. O diagrama é apresentado na Figura 2. Por limitações de espaço, nem todas as datas de vencimento são apresentadas no

diagrama. Neste diagrama, se faz distinção entre atendimentos programados com antecipação, parcial ou total e períodos de atendimento programados dentro do prazo. Além disso, mostra-se o prazo de atendimento ideal, sempre que houve antecipação.

Observa-se que, por haver somente uma equipe para realizar todas as certificações, o modelo organiza as tarefas de forma que seja possível realizá-las antes do prazo de vencimento. A equipe tem uma escala de trabalhos sucessivos que consegue realizar os atendimentos, praticamente sem folgas entre eles.

O alto número de dias operacionais antecipados é oriundo da proximidade (12 ou menos dias de diferença) entre as datas de vencimento das certificações entre as plataformas, o que pode ser comprovado ao se analisar as referidas datas de vencimento de certificação das plataformas 1-10, 14-20, 2-16, 5-15, 5-7 e 13-18.

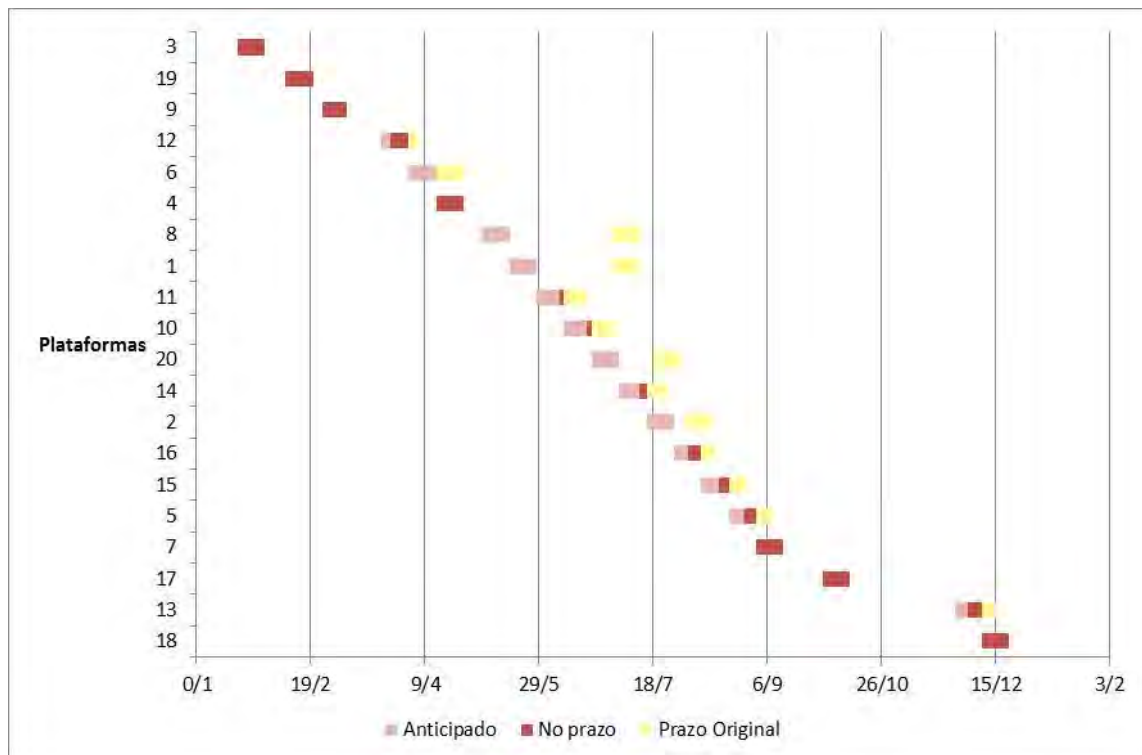


Figura 2. Programação temporal resultante do Cenário 1

Cenário 2: utilização de duas equipes de certificação

Os resultados obtidos para o Cenário 2 poderiam ser apresentados em uma tabela semelhante a Tabela 2. No entanto, para evitar a repetição das informações, resumiremos os resultados mais importantes. Em primeiro lugar, a ordem de atendimento das plataformas muda neste cenário como mostrado na Tabela 3. Esta tabela também mostra a alocação das plataformas às equipes de certificação.

Tabela 3. Resultados do Cenário 2

Ordem de atendimento das Plataformas																			
3	19	9	12	4	6	11	10	1	8	14	20	2	16	15	5	7	17	13	18
Designação das Equipes																			
1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2

Os resultados obtidos neste cenário foram muito melhores que no cenário anterior. Neste caso, somente houve antecipação de atendimento em apenas uma plataforma (plataforma 10).

Além disso, a antecipação foi de apenas 1 dia ($Total=1$). Observa-se também certo equilíbrio na divisão das certificações, com doze serviços realizados pela equipe 1 (60%) e oito pela equipe 2 (40%). É importante frisar que tal comportamento não foi modelado para esse cenário.

Cenário 3: a utilização de três equipes de certificação

A possibilidade de eliminar o número de antecipações programadas ($Total=0$) foi o resultado mais importante neste cenário. Já a ordem de atendimento das plataformas foi idêntica àquela do cenário anterior, enquanto que a alocação das plataformas às equipes de certificação mudou conforme ilustrado na Tabela 4. No que tange ao equilíbrio na divisão das certificações entre as equipes, pode-se observar que a equipe 1 trabalha mais que as outras duas, realizando 13 serviços (65%), enquanto a equipe 2 realiza apenas um trabalho (5%) e a equipe 3 realiza 6 trabalhos (30%).

Tabela 4. Resultados do Cenário 3

Ordem de atendimento das Plataformas																			
3	19	9	12	4	6	11	10	1	8	14	20	2	16	15	5	7	17	13	18
Designação das Equipes																			
1	1	1	1	3	1	1	1	2	3	3	1	3	1	1	3	1	1	1	3

5.2 Experimentos com o modelo MAECB

Foram considerados dois cenários com balanceamento de tarefas, de forma que a carga de trabalho seja distribuída igualmente entre as equipes de certificação.

Cenário 4: a utilização de duas equipes de certificação

Neste cenário, observa-se um resultado idêntico ao obtido no cenário 2, no que se refere a ordem dos atendimentos e ao número de antecipações na data da certificação. Excetuando-se a plataforma 10, todas as unidades de cimentação têm suas certificações realizadas exatamente na data de vencimento ($Total=1$). Por outro lado, no que refere-se ao balanceamento de tarefas, observa-se uma melhora na divisão de tarefas para as equipes 1 e 2. Neste caso, 11 plataformas (55%) foram designadas para atendimento pela equipe 1, enquanto 9 plataformas (45%) foram designadas para atendimento pela equipe 2. Os resultados obtidos para o Cenário 4 estão sintetizados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados do Cenário 4

Ordem de atendimento das Plataformas																			
3	19	9	12	4	6	11	10	1	8	14	20	2	16	15	5	7	17	13	18
Designação das Equipes																			
1	1	1	2	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1

Cenário 5: a utilização de três equipes de certificação

Neste cenário, observa-se um resultado idêntico ao obtido no cenário 3, no que se refere a ordem dos atendimentos e ao número de antecipações na data da certificação. Neste caso, todas as unidades de cimentação têm suas certificações realizadas exatamente na data de vencimento ($Total=0$). No que tange a divisão de tarefas, observa-se um bom balanceamento entre as equipes 1, 2 e 3, o que representa uma melhoria com relação ao cenário 3. Neste caso, 7 plataformas (35%) foram designadas para atendimento pela equipe 1, outras 7 plataformas (35%) foram

designadas para atendimento pela equipe 2, enquanto 6 plataformas (30%) foram designadas para atendimento pela equipe 3. Os resultados obtidos para o Cenário 5 estão sintetizados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados do Cenário 5

Ordem de atendimento das Plataformas																			
3	19	9	12	4	6	11	10	1	8	14	20	2	16	15	5	7	17	13	18
Designação das Equipes																			
1	3	1	2	1	2	3	1	2	3	3	1	1	2	2	3	2	3	1	2

O diagrama Gantt para o Cenário 5 é mostrado na Figura 3. O diagrama mostra a distribuição das tarefas de certificação ao longo do ano. Observa-se que existe um bom balanceamento na divisão de tarefas entre as três equipes. Além disso, a carga de trabalho está bem distribuída no tempo, não existindo grande concentração de trabalho para uma equipe específica. Os resultados obtidos neste cenário foram os melhores de todos os testes realizados.

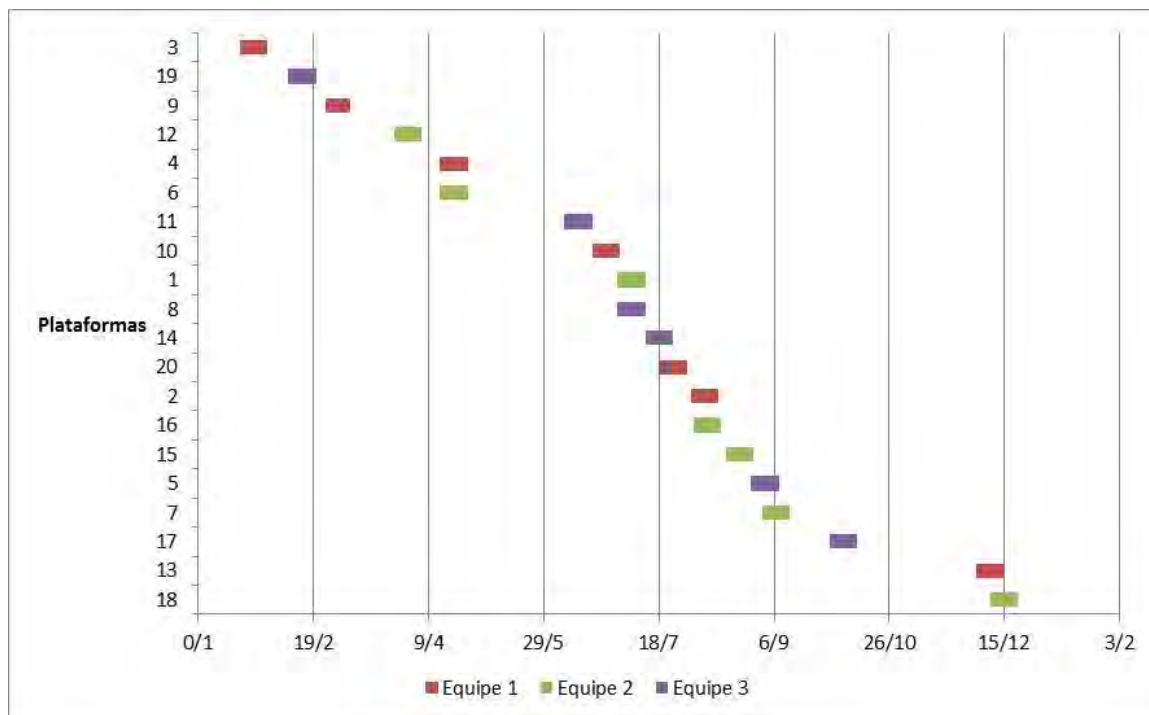


Figura 3. Programação temporal resultante do Cenário 5

6. Conclusões e Considerações finais

Pautados nos resultados obtidos pela execução dos modelos propostos, MAEC e MAECB, para cada um dos cinco cenários apresentados, conclui-se que atualmente o controle feito pela empresa sobre os serviços de certificação de unidades de cimentação não é satisfatório e pode ser melhorado, principalmente no que se refere à necessidade da certificação ser feita na data de vencimento. Sabe-se que a programação ótima para esse serviço leva em consideração três fatores: execução do serviço com início até antes da data de vencimento, equilíbrio de tarefas entre as equipes e uma boa distribuição dos serviços durante o ano.

Nos testes realizados, o cenário 1, revelou que o uso de apenas uma equipe de certificação gera sobrecarga para essa equipe, sendo que os atendimentos precisam ser programados com muita antecedência à data de vencimento da certificação. Este problema não acontece quando são utilizadas duas ou três equipes de certificação (cenários 2 à 5). Em geral, o uso de três equipes eliminou por completo a ocorrência de antecipação nos atendimentos (cenários 3 e 5). Porém,

vale observar que o uso de apenas duas equipes já produz resultados satisfatórios (cenários 2 e 4), com apenas um dia de antecipação em uma plataforma.

Os melhores resultados foram obtidos pelo modelo MAECB, nos cenários 4 e 5, uma vez que esse modelo resolveu uma deficiência do modelo MAEC, que é a falta de balanceamento na divisão de tarefas entre as equipes. Em geral o melhor resultado corresponde ao cenário 5, seguido pelo cenário 4.

A criação de um modelo matemático requer um esforço grande para que quando desenvolvido ele retrate fielmente o problema analisado. Ao utilizar o problema da designação para programar diversas equipes que realizarão serviços em locais e períodos diferentes, como apresentado neste trabalho, o volume de variáveis geradas pelo modelo bem como o número de restrições é muito grande, tornando complexa a análise e tabulação dos resultados.

No que diz respeito ao *software* utilizado, o LINGO proporcionou de forma simples o desenvolvimento do modelo matemático assim como a rapidez na resolução e geração dos resultados. Pela dimensão do modelo, a forma com que os resultados são representados pela ferramenta pode ser considerada um dos grandes desafios para a análise e sintetização dos valores obtidos.

Referências

Arenales, M., Armentano, V., Morabito, R. e Yanasse, H. (2006). Pesquisa Operacional para Cursos de Engenharia. Editora Elsevier. 1ª. ed. Rio de Janeiro.

Bazaraa *et al.* (2010). Linear Programming and Network Flows. Editora John Wiley & Sons. 4ª. ed. New Jersey.

Burkard, R. *et al.* (2012) Assignment Problems. Editora SIAM. Philadelphia.

Goldbarg, M. C. e Luna, H. P. L. (2005). Otimização Combinatória e Programação Linear: modelos e algoritmos. Editora Elsevier, 2ª. ed., Rio de Janeiro.

Hillier, F. S. e Lieberman, G. J. (2013). Introdução à Pesquisa Operacional. Editora McGraw-Hill, 9ª ed., São Paulo.

LINDO Systems Inc. (2014) LINGO: The Modeling Language an Optimizer. 2013. Disponível em: <<http://www.lindo.com/downloads/PDF/LINGO14.PDF>>. Acesso em: 26 abr. 2014

Rocha, I. M. (2011). Uma abordagem otimizada para o problema de alocação de equipes e escalonamento de tarefas para a obtenção de cronogramas eficientes. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Ceará.

Silva, T. C. L. *et al.* (2004) Determinação de escalas de plantão para militares considerando preferências e hierarquia. *Pesquisa Operacional*, Rio de Janeiro, v. 24, n. 3, p.373-391, set. 2004.

Taha, Hamdy A. (2008). Pesquisa Operacional. Editora Pearson Prentice Hall, 8ª Edição, São Paulo.

Usmani, Y (2012). Field Engineers' Scheduling at Oil Rigs: a Case Study. *Engineering, Technology & Applied Science Research*; Vol. 2 Issue 1, p155.

Vieira, C. L. dos S., Pimentel, C.E., Mayerle, S.F. e Luna, M.M.M (2015). Determinação de escalas de trabalho de funcionários de restaurantes considerando preferências. *Produção em Foco*; Vol. 6.n.1.