



MODELOS PARA PLANEJAMENTO DE LONGO PRAZO DE
MANUTENÇÕES PREVENTIVAS EM USINAS HIDRELÉTRICAS COM
GRANDE NÚMERO DE UNIDADES GERADORAS E REGIME
HIDROLÓGICO BEM DEFINIDO

Rafael Rigamonti

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas e Computação, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Sistemas e Computação.

Orientador: Nelson Maculan Filho

Rio de Janeiro
Setembro de 2012

MODELOS PARA PLANEJAMENTO DE LONGO PRAZO DE
MANUTENÇÕES PREVENTIVAS EM USINAS HIDRELÉTRICAS COM
GRANDE NÚMERO DE UNIDADES GERADORAS E REGIME
HIDROLÓGICO BEM DEFINIDO

Rafael Rigamonti

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE
SISTEMAS E COMPUTAÇÃO.

Examinada por:

Prof. Nelson Maculan Filho, D.Sc.

Prof. José Koiller, Ph.D.

Prof. Marcia Helena Costa Fampa, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
SETEMBRO DE 2012

Rigamonti, Rafael

Modelos para Planejamento de Longo Prazo de Manutenções Preventivas em Usinas Hidrelétricas com Grande Número de Unidades Geradoras e Regime Hidrológico Bem Definido/Rafael Rigamonti. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.

XII, 77 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Nelson Maculan Filho

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 74 – 75.

1. Manutenção. 2. Planejamento. 3. Regime Hidrológico. 4. Otimização. I. Maculan Filho, Nelson. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Sistemas e Computação. III. Título.

Para Marcella e Bubu.

Agradecimentos

Agradeço ao Professor Maculan pela orientação deste trabalho e por todo apoio e atenção dedicada ao longo da minha permanência no PESC-UFRJ.

Agradeço à Lilian Laubenbacher Sampaio que deu todo o apoio, incentivo e condições necessárias para a realização deste trabalho.

Agradeço ao Fábio da Silva Lacerda, da Eletrobras Furnas, que forneceu toda a base de dados utilizada neste trabalho. Agradeço também seu apoio e atenção dispensada ao longo do desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço à Professora Marcia Helena Costa Fampa por suas contribuições e participação da banca examinadora.

Agradeço ao Professor José Koiller por suas contribuições e participação da banca examinadora.

Agradeço aos meus pais, Roberto Rigamonti e Maria Helena Gon Rigamonti, por todo apoio, incentivo e condições que me deram ao longo da vida, tornando possível chegar até aqui.

Agradeço a todos os professores e funcionários do Programa de Engenharia de Sistemas e Computação da COPPE.

Agradeço à Eletrobras, que permitiu a realização deste curso.

Agradeço ao Helder Manoel Venceslau por suas valiosas contribuições.

Agradeço aos amigos e colegas de trabalho que me ajudaram muito na elaboração da apresentação deste trabalho.

Agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

MODELOS PARA PLANEJAMENTO DE LONGO PRAZO DE
MANUTENÇÕES PREVENTIVAS EM USINAS HIDRELÉTRICAS COM
GRANDE NÚMERO DE UNIDADES GERADORAS E REGIME
HIDROLÓGICO BEM DEFINIDO

Rafael Rigamonti

Setembro/2012

Orientador: Nelson Maculan Filho

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

Apresenta-se neste trabalho três modelos para o problema de planejamento de longo prazo de manutenções preventivas das unidades geradoras em usinas hidrelétricas com grande número de unidades geradoras e um regime hidrológico com períodos de cheia e seca bem definidos. Aborda-se o problema do planejamento de longo prazo com discretização temporal mensal. Utiliza-se uma abordagem por programação linear inteira mista multi período e o software de otimização AIMMS para resolver o problema. Aplica-se estes modelos para o caso da UHE SANTO ANTÔNIO que possui 44 unidades geradoras e um regime hidrológico com períodos úmidos e secos bem definidos.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

MODELS FOR LONG-TERM PLANNING OF PREVENTIVE MAINTENANCE
IN HYDRO POWER PLANTS WITH A LARGE NUMBER OF GENERATING
UNITS AND WELL DEFINED HYDROLOGICAL REGIME

Rafael Rigamonti

September/2012

Advisor: Nelson Maculan Filho

Department: Systems Engineering and Computer Science

In this work, we present three models for the problem long-term planning of preventive maintenance of the generating units in hydro power plants with large number of generating units and a hydrologic regime with dry and wet periods well defined. The problem of long-term planning is addressed with monthly discretization. It is used a multi period mixed integer programming approach and for solve the problem it is used the optimization software AIMMS. We apply these models to the case of SANTO ANTÔNIO dam which has 44 generating units and a hydrologic regime with wet and dry periods well defined.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	3
2.1 O Problema de Planejamento da Manutenção Preventiva em Usinas Hidrelétricas	3
2.2 Abordagem do Problema de Planejamento da Manutenção Preventiva na Literatura	4
2.3 A Utilização da Programação Inteira Mista Multi Período	6
3 Caso Exemplo - A Usina Hidrelétrica de Santo Antônio	8
4 Método Proposto	14
4.1 Parâmetros de Entrada e Premissas	14
4.2 Formulação Matemática do Problema	17
4.2.1 Formulação 1 - Manutenção em Intervalos de Tempo Pré-fixados	18
4.2.2 Formulação 2 - Manutenção em Função das Horas de Operação Acumulada	24
4.2.3 Formulação 3 - Problema Dividido em Duas Etapas	32
4.3 Software de Otimização AIMMS	40
4.4 Interface AIMMS e EXCEL	42
5 Resultados e Discussões	46
5.1 Formulação 1 (F1) - Manutenção em Intervalos de Tempo Pré-fixados	46
5.2 Formulação 2 (F2) - Manutenção em Função das Horas de Operação .	52
5.3 Formulação 3 (F3) - Problema Dividido em Duas Etapas	59
5.4 Comparação das Formulações	67
6 Conclusões	72

Referências Bibliográficas	74
A Série de Vazões Médias Mensais Históricas - (m³/s)	76

Lista de Figuras

3.1	Perspectiva da UHE Santo Antônio	8
3.2	Principais estruturas	10
3.3	Turbina bulbo e suas principais estruturas	11
3.4	Turbina bulbo de Santo Antônio	11
3.5	Perfil da vazão média mensal do Rio Madeira	12
4.1	Período para a realização das manutenções preventivas	16
4.2	Exemplo de partição de intervalo	30
4.3	Exemplo de tela do software AIMMS	41
4.4	Planilha <i>DadosDeEntrada.xlsx</i> - Dados Gerais	42
4.5	Planilha <i>DadosDeEntrada.xlsx</i> - Unidades Geradoras	43
4.6	Planilha <i>DadosDeEntrada.xlsx</i> - Série de Vazões	43
4.7	Planilha <i>Resultados.xlsx</i> - Despacho das Unidades Geradoras	44
4.8	Planilha <i>Resultados.xlsx</i> - Cronograma Detalhado	44
4.9	Planilha <i>Resultados.xlsx</i> - Gráfico do Cronograma	45
5.1	Cronograma de manutenção - F1	47
5.2	Horas de operação acumulada mínima, média e máxima das unidades geradoras em cada manutenção - F1	50
5.3	Uso das máquinas de 5 e 4 pás - F1	51
5.4	Uso das máquinas por casa de força - F1	51
5.5	Cronograma de manutenção - F2	54
5.6	Horas de operação acumulada mínima, média e máxima das unidades geradoras em cada manutenção - F2	57
5.7	Uso das máquinas de 5 e 4 pás - F2	58
5.8	Uso das máquinas por casa de força - F2	58
5.9	Cronograma de manutenção - F3	60
5.10	Horas de operação acumulada mínima, média e máxima das unidades geradoras em cada manutenção - F3	63
5.11	Uso das máquinas de 5 e 4 pás - F3	64
5.12	Uso das máquinas por casa de força - F3	64

5.13	Comparação das Horas de Operação Acumulada da 1ª Etapa com a 2ª Etapa	66
5.14	Comparação das Horas de Operação Acumulada da Manutenção 1 . . .	68
5.15	Comparação das Horas de Operação Acumulada da Manutenção 2 . . .	69
5.16	Comparação das Horas de Operação Acumulada da Manutenção 3 . . .	69
5.17	Comparação das Horas de Operação Acumulada da Manutenção 4 . . .	70

Lista de Tabelas

3.1	Distribuição das UGs de 4 e 5 pás.	13
4.1	Vazão máxima turbinada das unidades geradoras	14
4.2	Manutenções preventivas a serem realizadas.	15
4.3	Número de manutenções consecutivas por manutenção.	16
4.4	Ordem de despacho das unidades geradoras.	17
4.5	Número de profissionais necessários por manutenção	17
5.1	Características do problema e tempo de execução - F1	46
5.2	Quantidade de técnicos necessários para o cronograma proposto - F1	47
5.3	Resumo do total de manutenções realizadas nos meses - F1	48
5.4	Cronograma detalhado das manutenções com mês e horas de operação acumulada de cada UG - F1	49
5.5	Manutenções preventivas a serem realizadas - F2	52
5.6	Características do problema e tempo de execução - F2	52
5.7	Quantidade de técnicos necessários para o cronograma proposto - F2	53
5.8	Resumo do total de manutenções realizadas nos meses - F2	55
5.9	Cronograma detalhado das manutenções com mês e horas de operação acumulada de cada UG - F2	56
5.10	Manutenções preventivas a serem realizadas - F3	59
5.11	Características do problema e tempo de execução - F3	59
5.12	Quantidade de técnicos necessários para o cronograma proposto - F3	60
5.13	Resumo do total de manutenções realizadas nos meses - F3	61
5.14	Cronograma detalhado das manutenções com mês e horas de operação acumulada de cada UG - F3	62
5.15	Comparação entre a quantidade de técnicos necessários para o crono- grama proposto	67
A.1	Vazões Médias Mensais (m^3/s)	77

Capítulo 1

Introdução

A base da geração de energia elétrica no Brasil vem das usinas hidrelétricas, que utilizam os potenciais de queda e o volume de água dos rios para movimentar turbinas e transformar esta energia cinética em energia elétrica. Atualmente tem-se explorado o potencial hidráulico da região norte do país, conhecida também como região amazônica. Porém a região amazônica tem grande importância para o Brasil e para o mundo, sendo assim, para que seja possível realizar a construção de aproveitamentos hidrelétricos com o mínimo impacto possível são necessários avanços da engenharia. Esses avanços estão ocorrendo e são perceptíveis nos atuais empreendimentos de geração hídrica. As usinas hidrelétricas de Santo Antônio e Jirau são um exemplo dessa evolução. Estas usinas se caracterizam por possuírem uma baixa queda e um grande volume de água. Seus reservatórios também não apresentam regularização plurianual, diminuindo assim a área alagada.

Com uma baixa queda e um grande volume de água, as turbinas indicadas são turbinas do tipo kaplan de eixo horizontal, também conhecidas como turbinas tipo bulbo, pois o gerador fica abrigado em uma cápsula que fica submersa no fluido. Devido aos aspectos construtivos da máquina, não é possível fabricar unidades geradoras de potência elevada. Antes da construção de Santo Antônio, a maior turbina bulbo em operação se encontrava no Japão, na usina de Tadami, com um rotor de 6,70 m de diâmetro e 65,8 MW de potência. Com a entrada em operação da UHE Santo Antônio estarão em operação turbinas bulbo de 7,5 m de diâmetro e 71,6 MW de potência.

Os estudos técnicos realizados para a usina de Santo Antônio concluíram pela instalação de 44 unidades geradoras bulbo, totalizando uma potência de 3.150 MW. Para a usina de Jirau, indicaram a instalação de 50 unidades geradoras bulbo, totalizando uma potência de 3.750 MW. Ressalta-se que este número de unidades geradoras seria tanto maior quanto menor fosse a potência unitária das turbinas.

Além de possuir um grande número de unidades geradoras, estas usinas, assim como outras usinas localizadas na região norte, possuem um regime hidrológico bem

característico e marcante, isto é, os períodos de cheia e seca são bem definidos e existe uma grande variação das vazões. Com isso, tem-se que no período de cheia todas unidades geradoras estarão em operação, e, no período seco, menos da metade das máquinas irão operar.

Nas portarias, emitidas pelo Ministério de Minas e Energia, que definem a garantia física do empreendimento, isto é, o montante de energia que uma usina poderá comercializar no mercado, ficou estabelecido que todas as manutenções preventivas serão realizadas no período hidrológico seco, não causando assim indisponibilidade programada de máquina para a geração de energia. Caso esta determinação não seja cumprida, o empreendedor será multado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Neste trabalho são propostas três modelagens para o problema de planejamento de longo prazo da manutenção preventiva das unidades geradoras de usinas hidrelétricas com grande número de turbinas e um regime hidrológico com períodos de cheia e seca bem definidos, de modo a auxiliar a área de manutenção na elaboração do cronograma de manutenção, dimensionamento de equipes, material necessário e contratação de serviços.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 O Problema de Planejamento da Manutenção Preventiva em Usinas Hidrelétricas

As manutenções podem ser divididas em três tipos: manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva [1]. A manutenção corretiva é necessária quando ocorre uma falha em uma determinada parte da unidade de geração ou equipamento auxiliar, impossibilitando o funcionamento da unidade. Assim, é necessário que seja realizada uma manutenção para que o problema seja corrigido e a unidade de geração volte a funcionar normalmente. A manutenção preventiva é a manutenção realizada para reduzir ou evitar falhas, obedecendo um planejamento baseado em intervalos definidos de tempo, ou outra grandeza, como número de horas de funcionamento do equipamento. A manutenção preditiva envolve um conjunto de atividades de acompanhamento das variáveis ou parâmetros que indicam a performance ou desempenho dos equipamentos, de modo sistemático, visando definir a necessidade ou não da intervenção.

Neste trabalho é abordado o problema de planejamento da manutenção preventiva em usinas hidrelétricas. Este problema é de natureza complexa, pois, envolve diversas variáveis e condicionantes. Um bom planejamento traz como benefício um menor custo de manutenção e diminuição de falhas do equipamento.

Em usinas hidrelétricas, normalmente as manutenções preventivas são executadas de acordo com o número de Horas de Operação Acumulada (HOA) das unidades geradoras. Assim, são definidas as paradas da unidade geradora para a realização de inspeções, revisões e trocas de peças de acordo com número de HOA. É de se esperar que com o aumento do número de HOA da máquina, as manutenções se tornem mais demoradas e exijam um número maior de profissionais na sua execução.

Segundo o Guia de Manutenção Preventiva de Unidades Geradoras [2], da

CESP¹, a filosofia para programação e periodicidade das manutenções dos equipamentos e instalações leva em consideração os resultados dos ensaios, análises, inspeções, desempenho, regime de operação, número de operações, condições ambientais, ano de fabricação e tempo à disposição da operação. O cronograma de manutenções preventivas leva em consideração também as características próprias de cada usina.

2.2 Abordagem do Problema de Planejamento da Manutenção Preventiva na Literatura

Na literatura encontra-se diversos artigos que abordam o problema de planejamento da manutenção preventiva de unidades geradoras em usinas hidrelétricas. Em sua maioria, foram publicados na década de 70 e 80, todavia artigos recentes abordam o assunto aplicando técnicas de otimização desenvolvidas nos últimos anos.

O problema de planejamento da manutenção preventiva em unidades geradoras pode ser abordado do ponto de vista local, ou do ponto de vista sistêmico segundo Silva e Morozowski [3]. Do ponto de vista local, o planejamento da manutenção preventiva considera objetivos e restrições que levam em conta apenas a instalação e as características locais, tais como: período adequado para a manutenção, disponibilidade de mão de obra, peças de reposição, equipamentos e ferramentas. Já o ponto de vista sistêmico aborda objetivos e restrições que levam em conta o conjunto de usinas que compõem o sistema, bem como a manutenção da continuidade do atendimento à demanda com adequado nível de confiabilidade.

Aqui no Brasil, o planejamento da manutenção preventiva é desenvolvido em duas etapas. Na primeira etapa, cada agente gerador² elabora um cronograma preliminar de manutenções preventivas das unidades geradoras de suas usinas. Esses cronogramas são enviados ao Operador Nacional do Sistema (ONS)³, que é o responsável pela realização da segunda etapa do processo, ou seja, a otimização com enfoque sistêmico da manutenção preventiva das unidades geradoras que compõem o sistema.

Yamayee, em [4], faz uma descrição do problema de programação da manutenção, levantando aspectos relevantes e características do problema. Realiza também um levantamento de artigos que abordam o assunto, classificando-os por tipo de Função Objetivo, abordagem determinística ou estocástica e, finalmente, por técnica de

¹Companhia de Energética de São Paulo

²Titular de autorização, concessão ou permissão para fins de geração de energia elétrica.

³O ONS é responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)

otimização ou heurísticas.

Devido a problemas relacionados à capacidade de processamento, armazenamento e memória dos computadores no início da década de 70, muitos artigos publicados nesta época utilizam heurísticas para resolver o problema de planejamento da manutenção preventiva. Os métodos heurísticos tem a vantagem de serem de fácil implementação, possuem baixo esforço computacional e fornecem soluções rápidas. Porém os métodos heurísticos algumas vezes falham em encontrar uma solução viável para o problema, e a solução encontrada pode as vezes estar distante do ponto ótimo.

No artigo de Christiaanse e Palmer [5], é utilizada uma heurística baseada em uma busca sistemática, onde todas unidades geradoras, para as quais se pretende estabelecer um cronograma de manutenção, são agrupadas segundo algum critério, que pode ser, agrupar todas as unidades geradoras de uma usina hidrelétrica, ou agrupar todas as unidades geradoras de todas as usinas hidrelétricas de uma determinada região. Apenas uma unidade geradora do grupo pode entrar em manutenção em uma determinada semana, ou seja, estes grupos também representam o limite de mão de obra disponível para a realização da manutenção. O cronograma de manutenção é estabelecido para cada grupo independentemente dos demais. Os grupos são ordenados de acordo com o total de potência, em megawatt, que será retirado do sistema, e o cronograma dos grupos com maior potência são realizados primeiramente. Para cada grupo, é definida a sequência de manutenções das unidades geradoras atendendo às restrições estabelecidas, como tempo mínimo e máximo para a realização da manutenção, potência máxima a ser retirada do sistema, etc. A vantagem desse método é a rapidez com que um problema de grande porte é resolvido. Todas as restrições podem ser utilizadas, e a inserção de novas restrições, por mais complexas que sejam, não afeta consideravelmente o tempo de solução do problema.

Mais recentemente, em [6], é aplicada a técnica de algoritmos evolucionários, mais especificamente o algoritmo de evolução diferencial (*Differential Evolution*), para resolver o problema de cronograma de manutenção preventiva. Neste artigo, o problema de programação da manutenção é formulado juntamente com o problema de despacho econômico das unidades geradoras, isto é, dado que deverão ser realizadas certas manutenções ao longo do ano, resolve-se um problema de cronograma de manutenção visando a minimização dos custos de operação e manutenção do sistema.

Porém, devido à natureza discreta do problema, a utilização de técnicas de programação matemática parece ser mais adequada à solução deste problema. Nesse sentido, Dopazo e Merrill [7] apresentam uma abordagem por programação inteira 0-1. É apresentada uma solução do problema baseado no algoritmo de enumeração

implícita de Balas, com garantia de encontrar um cronograma de manutenção que satisfaça as restrições. O método permite a utilização de vários critérios para o ótimo do problema, como: programação de mínimo custo, realização da manutenção o mais cedo possível e desvio mínimo de uma programação existente.

Na dissertação de mestrado de Fortunato [8], tem-se uma proposta metodológica para a obtenção de cronogramas de manutenções preventivas que considera tanto as restrições locais de cada usina quanto as restrições sistêmicas. Neste trabalho os modelos propostos utilizam a abordagem por programação inteira, porém devido às limitações de hardware naquela época, a aplicação da metodologia ficou restrita a um sistema de porte reduzido, como o subsistema Sul.

No artigo de Zurn e Quintana [9], é utilizada a técnica de programação dinâmica para resolver o problema de cronograma da manutenção preventiva. Para isso é definida uma variável de estado $X_i(k)$ que representa a quantidade de manutenções realizadas na unidade geradora i até o período k , por exemplo, se $X_1(50) = 1,5$ isso significa que até a semana 50, na unidade geradora 1, realizou-se uma manutenção completa e uma segunda manutenção está em andamento, com 50% dela já concluída. Para contornar o mal da dimensionalidade do problema, é proposto no artigo a utilização da técnica de aproximações sucessivas de programação dinâmica e um critério de agrupamento de unidades geradoras.

No projeto de PD desenvolvido pela Universidade Federal de Santa Catarina e Tractebel Energia [10], em 2004, é feito um trabalho didático da modelagem matemática do problema de programação da manutenção preventiva e é proposta a metodologia de solução do problema por Relaxação Lagrangeana.

2.3 A Utilização da Programação Inteira Mista Multi Período

A modelagem do problema por programação inteira mista multi período surgiu naturalmente devido às características do problema, onde a cada estágio do problema decidi-se quais unidades geradoras estarão em operação, quais estarão em manutenção e quais estarão paradas. No artigo de Johnson et al [11], é citado o crescimento do uso da programação inteira mista na modelagem e soluções de problemas práticos e os avanços alcançados nas áreas de modelagem, algoritmo, software e hardware, que possibilitam hoje a resolução de problemas com milhares de variáveis inteiras em computadores pessoais. O artigo aborda várias técnicas de implementação e algoritmos de soluções que hoje equipam os softwares comerciais. Como referência para o aprendizado da disciplina e desenvolvimento da modelagem apresentada neste trabalho citam-se os livros: Otimização Linear de Nelson Maculan

e Marcia Fampa [12] e Integer Programming de Laurence A. Wolsey [13].

Capítulo 3

Caso Exemplo - A Usina Hidrelétrica de Santo Antônio

A UHE Santo Antônio está localizada no Rio Madeira, no estado de Rondônia. O empreendimento fica a 7 km de distância do centro da cidade de Porto Velho. A usina de Santo Antônio foi leiloadada em dezembro de 2007, tendo como vencedor o consórcio Madeira Energia S.A., formado por Odebrecht (17,6%), Eletrobras Furnas (39%), Construtora Noberto Odebrecht (1%), Andrade Gutierrez (12,4%), Cemig (10%), e um fundo de investimentos formado por Banif e Santander (20%). Após o leilão foi criada a Sociedade de Propósito Específico Santo Antônio Energia. As obras da usina se iniciaram em agosto de 2008, um investimento de R\$ 15,1 bilhões e estará totalmente concluída no início de 2016. Sua geração de energia se iniciou em março de 2012, quando entrou em operação comercial a primeira unidade geradora da usina. A usina de Santo Antônio terá uma potência instalada de 3.150,4 MW, dividida em 44 unidades geradoras do tipo bulbo. A figura 3.1 mostra uma perspectiva do projeto e os números indicam as principais estruturas.

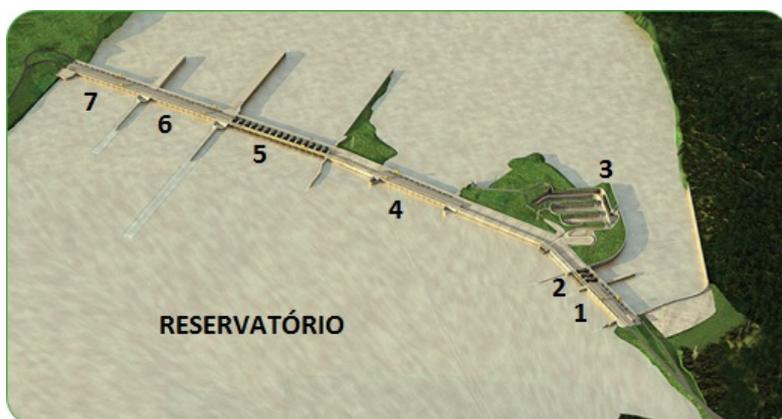


Figura 3.1: Perspectiva da UHE Santo Antônio

Principais estruturas:

1. Casa de Força 1 - UG 01 a UG 08
As Casas de Força 1, 2, 3 e 4 formam os quatro grupos de geração da usina. Estas casas de força abrigam as turbinas hidráulicas do tipo bulbo responsáveis pela geração de energia. A água do rio Madeira passa pelas turbinas, e gira as hélices, que movimentam o eixo ligado ao gerador. É o gerador que transforma energia hidráulica em energia elétrica. No total, a usina de Santo Antônio terá 44 turbinas bulbo.
2. Vertedouro Complementar
Localizado na margem direita do rio Madeira, é composto por uma estrutura de três vãos e auxilia o vertedouro principal a escoar a água excedente na barragem.
3. Sistema de Transposição de Peixes (STP)
Fica localizado na margem direita do rio Madeira. A estrutura permitirá que os peixes subam o rio, ultrapassando a barragem da Usina e seguindo normalmente o seu curso, na época da piracema. O STP garante a permanência da desova de diversas espécies e da atividade pesqueira na região.
4. Casa de Força 4 - UG 33 a UG 44
5. Vertedouro Principal
Grande estrutura de concreto responsável pelo escoamento do excesso de água da barragem nos períodos de cheia. O vertedouro principal fica no centro da Usina e é composto por 15 vãos com comportas segmento localizados em sua estrutura, que, no total, permitem a passagem de uma vazão de até 84 mil m³/s de água.
6. Casa de Força 2 - UG 09 a UG 20
7. Casa de Força 3 - UG 21 a UG 32



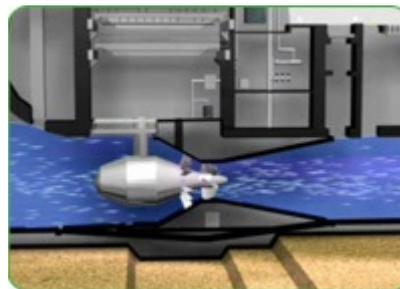
(a) Vertedouro principal



(b) Sistema de Transposição de Peixes



(c) Grupo de Geração



(d) Casa de Força

Figura 3.2: Principais estruturas

As turbinas do tipo bulbo são indicadas para aproveitamentos hidrelétricos em rios de grande vazão e baixa queda. As turbinas bulbo instaladas em Santo Antônio serão pioneiras, pois serão as turbinas bulbo de maior potência do mundo, com 71,6 MW cada. Essas turbinas recebem este nome por possuírem uma cápsula que abriga o gerador e toda esta estrutura fica submersa na água. A figura 3.3 mostra uma turbina bulbo com suas principais estruturas, e a figura 3.4 mostra uma ilustração da turbina bulbo que será instalada em Santo Antônio com suas principais características.

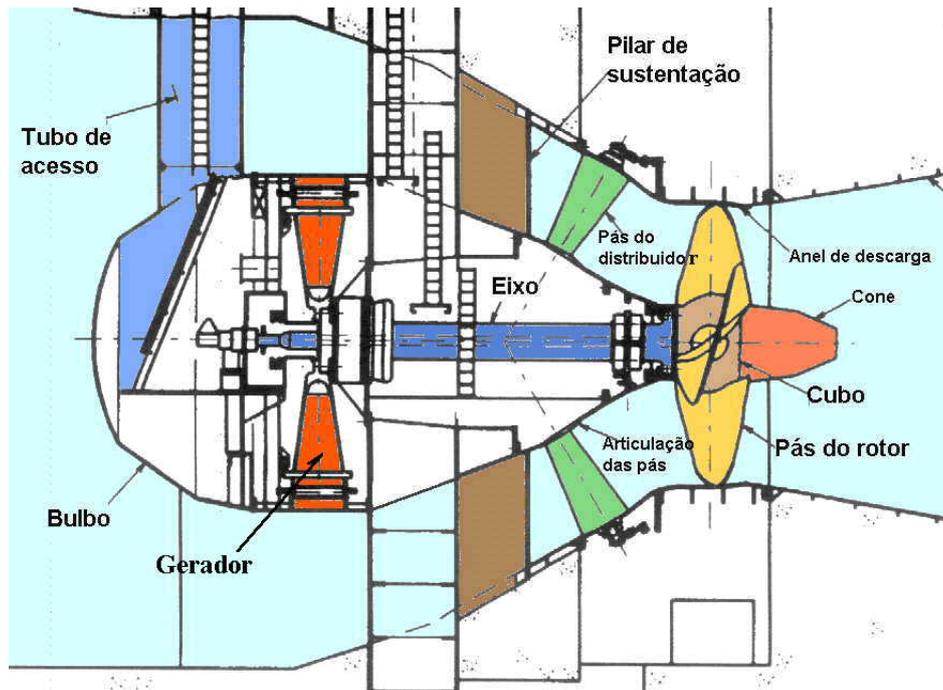


Figura 3.3: Turbina bulbo e suas principais estruturas

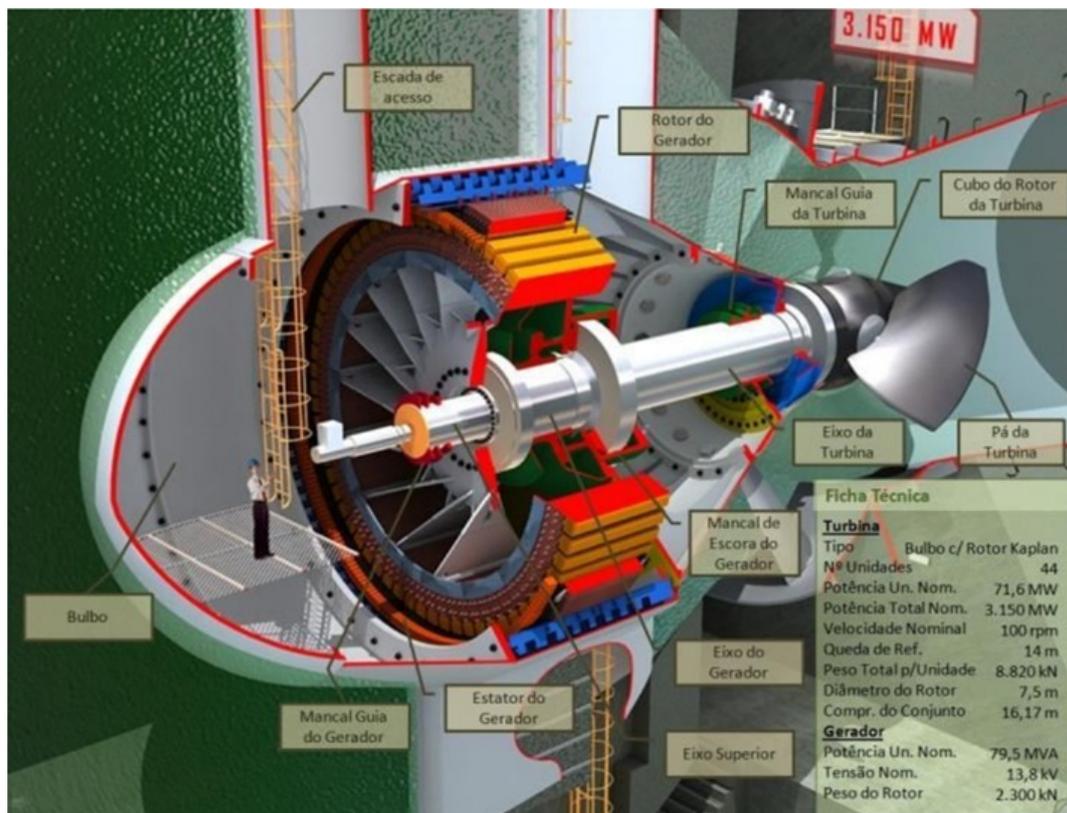


Figura 3.4: Turbina bulbo de Santo Antônio

As vazões do Rio Madeira, assim como outros rios localizados na região norte, possuem uma diferença marcante entre os períodos de cheia e seca, isto é, vazões

muito elevadas no período de cheia e vazões reduzidas no período de seca. A figura 3.5 mostra o perfil das vazões médias mensais do rio Madeira no período de 1931 a 2005. Nota-se que no período úmido as vazões atingem picos de 35.000 m³/s e no período de seca as vazões atingem patamares de 5.000 m³/s, uma redução de 85%.

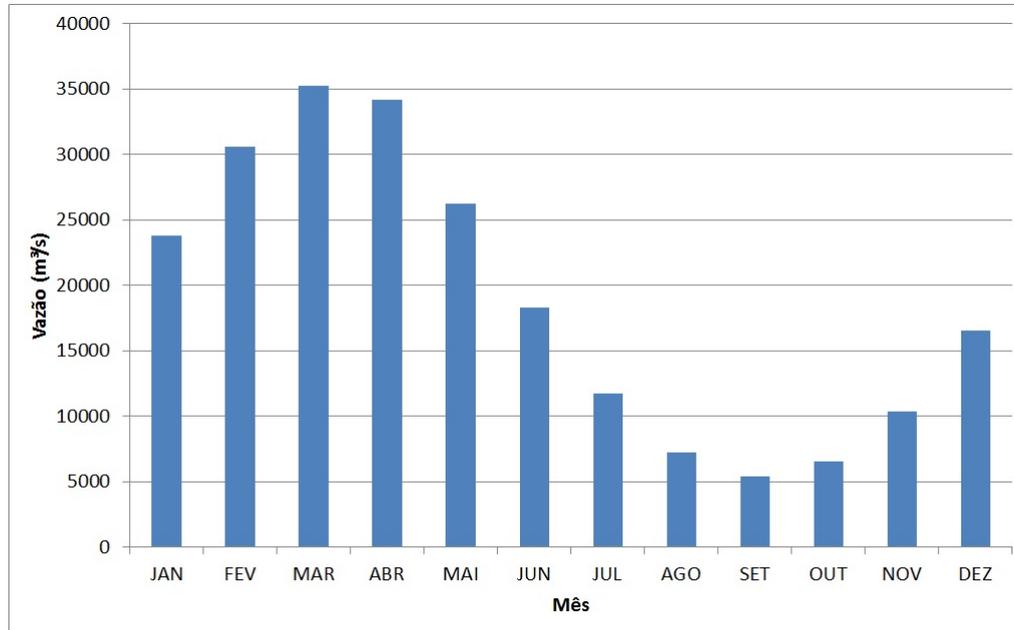


Figura 3.5: Perfil da vazão média mensal do Rio Madeira

Devido a essa característica do Rio Madeira, a usina de Santo Antônio possuirá dois tipos de turbina, uma de quatro pás e uma de cinco, sendo as unidades geradoras de quatro pás projetadas para operarem com maior eficiência no período de grandes vazões e as unidades geradoras de cinco pás para operarem no período de baixas vazões. Tem-se um total de 24 unidades de quatro pás e 20 unidades de cinco pás. A tabela 3.1 mostra como estão distribuídas as unidades geradoras de quatro e cinco pás nas quatro casas de força. A vazão máxima turbinada pelas unidades geradoras é de 609 m³/s para as turbinas de quatro pás e de 579 m³/s para as turbinas de cinco pás.

Tabela 3.1: Distribuição das UGs de 4 e 5 pás.

Casa de Força 1 UG - Turbina	Casa de Força 2 UG - Turbina	Casa de Força 3 UG - Turbina	Casa de Força 4 UG - Turbina
1 - 5 pás	9 - 5 pás	21 - 5 pás	33 - 5 pás
2 - 5 pás	10 - 5 pás	22 - 5 pás	34 - 5 pás
3 - 5 pás	11 - 5 pás	23 - 4 pás	35 - 5 pás
4 - 5 pás	12 - 5 pás	24 - 4 pás	36 - 5 pás
5 - 5 pás	13 - 4 pás	25 - 4 pás	37 - 4 pás
6 - 5 pás	14 - 4 pás	26 - 4 pás	38 - 4 pás
7 - 5 pás	15 - 4 pás	27 - 4 pás	39 - 4 pás
8 - 5 pás	16 - 4 pás	28 - 4 pás	40 - 4 pás
	17 - 4 pás	29 - 4 pás	41 - 4 pás
	18 - 4 pás	30 - 4 pás	42 - 4 pás
	19 - 4 pás	31 - 5 pás	43 - 4 pás
	20 - 4 pás	32 - 5 pás	44 - 4 pás

Devido à grande extensão de sua barragem, a sequência de entrada em operação das casas de força e, nestas, as unidades geradoras segundo seu número de pás, influencia diretamente a produção energética da usina. Os fatores ambientais relacionados à conveniência de manutenção do fluxo no leito natural do rio e em regiões próximas às entradas dos Sistemas de Transposição dos peixes, além dos limites operacionais das turbinas e a disposição dos tipos de unidades (4 e 5 pás) em cada casa de força condicionam a definição da sequência de entrada e saída de operação. Com isso, estudos de otimização do despacho da usina definiram a seguinte regra para a entrada em operação das unidades geradoras:

- Primeiramente, entrarão em operação as unidades geradoras da casa de força 4;
- Em seguida, entrarão em operação as unidades geradoras da casa de força 1;
- Em terceiro lugar, entrarão em operação as unidades geradoras da casa de força 3;
- Em quarto lugar, entrarão em operação as unidades geradoras da casa de força 2.

Com relação às unidades de 4 e 5 pás, apenas considerou-se a restrição de inoperabilidade das unidades geradoras de 4 pás para vazões afluente abaixo de 7.500 m³/s.

Capítulo 4

Método Proposto

4.1 Parâmetros de Entrada e Premissas

Nesta seção serão apresentados os parâmetros de entrada e premissas comuns às três formulações. Os parâmetros e premissas exclusivos de cada formulação serão apresentados em suas respectivas seções. Todos os dados utilizados neste trabalho foram disponibilizados pela ELETROBRAS FURNAS, empresa responsável pela operação e manutenção da UHE Santo Antônio.

SÉRIE DE VAZÕES

O registro histórico de vazões da usina de Santo Antônio compreende o período de janeiro de 1931 a dezembro de 2005, ou seja, 74 anos. Nas formulações apresentadas, considerou-se um período de operação da usina de 180 meses, ou seja, 15 anos. Como a primeira unidade geradora entrou em operação comercial ao final de março de 2012, adotou-se o período hidrológico de abril de 1931 a março de 1946 (180 meses) como o período para a simulação das três formulações. A série de vazões utilizada neste trabalho é apresentada no Anexo I.

VAZÃO MÁXIMA TURBINADA

A tabela 4.1 mostra a vazão máxima turbinada (engolimento máximo) para as unidades geradoras de 4 e 5 pás.

Tabela 4.1: Vazão máxima turbinada das unidades geradoras

Unidade Geradora	4 Pás	5 Pás
Engolimento Máximo (m^3/s)	609	579

INTERVALO PARA AS MANUTENÇÕES PREVENTIVAS

No primeiro ano de operação das unidades geradoras, serão realizadas todas as manutenções e revisões exigidas pelo fabricante, portanto, somente a partir do primeiro ano de operação serão contabilizados os anos de operação ou as horas de operação acumulada que definiram as manutenções preventivas a serem realizadas pelo empreendedor. Com a finalidade de facilitar a comparação dos resultados e simplificar o problema, foram definidas apenas a realização de quatro manutenções preventivas em cada unidade geradora. As manutenções previstas e suas respectivas durações são apresentadas na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Manutenções preventivas a serem realizadas.

Manutenção	Período de Operação	Duração
1	1 ano	3 dias
2	2 anos	7 dias
3	3 anos	3 dias
4	4 anos	10 dias

PERÍODO PARA A REALIZAÇÃO DAS MANUTENÇÕES

De acordo com o regime hidrológico do Rio Madeira, adotou-se como período possível para a realização das manutenções preventivas os meses de Julho, Agosto, Setembro, Outubro e Novembro, pois nesses meses o volume de vazão afluente à usina é inferior ao seu engolimento máximo. A figura 4.1 ilustra este fato. Os meses de junho e dezembro também poderiam ser utilizados para a realização das manutenções, porém, como estes meses representam meses de transição de períodos de cheia e seca, podem ocorrer anos em que nestes meses tenha-se vazões próximas ou superiores à vazão máxima turbinada pela usina. Sendo assim, preferiu-se adotar uma postura mais conservadora e segura de desconsiderar estes meses para realização das manutenções preventivas.

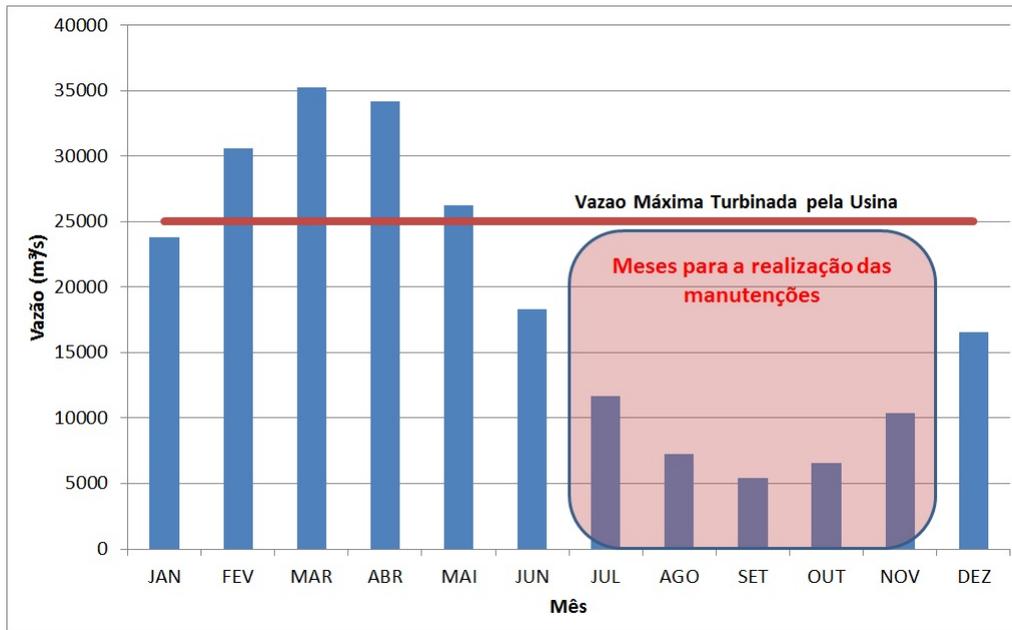


Figura 4.1: Período para a realização das manutenções preventivas

MANUTENÇÕES CONSECUTIVAS

O prazo de execução das manutenções está definido em dias, porém o intervalo de tempo considerado nas três formulações do problema é mensal. Com isso, há a necessidade de se definir o número de manutenções que podem ser executadas de forma consecutiva, sem a necessidade de uma equipe adicional, no intervalo de tempo de um mês. Considerando que em média temos aproximadamente 22 dias úteis em um mês, calculou-se o número de manutenções consecutivas, para cada tipo de manutenção, dividindo o número de dias úteis do mês (22) pelo número de dias de duração de cada manutenção e arredondando este resultado para o número inteiro inferior mais próximo. Os resultados são apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Número de manutenções consecutivas por manutenção.

Manutenção	Duração	Número de Manutenções Consecutivas
1	3 dias	7
2	7 dias	3
3	3 dias	7
4	10 dias	2

PRIORIDADE DE DESPACHO

A regra de despacho que a usina de Santo Antônio deverá seguir é: manter o fluxo prioritariamente no leito do rio e próximo ao sistema de transposição de peixes.

Com isso, um estudo de otimização de despacho da usina, realizado pelo empreendedor, definiu a ordem de entrada em operação das unidades geradoras mostrada na tabela 4.4. Conforme apresentado no capítulo 3, para que o modelo respeitasse essa sequência de despacho, foram atribuídas penalidades a cada unidade geradora, de forma que seja mais caro despachar as unidades com menor prioridade.

Tabela 4.4: Ordem de despacho das unidades geradoras.

Prioridade	Casa de Força	Penalidade
1	CF 4	1
2	CF 1	2
3	CF 3	3
4	CF 2	4

MÃO DE OBRA NECESSÁRIA

Para cada manutenção foram definidas as atividades de reparo e revisão a serem realizadas e o número de profissionais necessários para a execução destes serviços. Basicamente, são necessários dois tipos de profissionais com dois níveis de experiência. A tabela 4.5 resume o tipo de profissional requerido e a quantidade por tipo de manutenção.

Tabela 4.5: Número de profissionais necessários por manutenção

Manutenção	Primeira	Segunda	Terceira	Quarta
Eletromecânico Sênior	2	4	2	4
Eletromecânico Júnior	2	4	2	4
Eletroeletrônico Sênior	0	2	0	2
Eletroeletrônico Júnior	0	2	0	2

4.2 Formulação Matemática do Problema

Ao longo dos estudos desenvolvidos neste trabalho, foram propostas três formulações do problema. A primeira formulação considera intervalos fixos para a realização da manutenção preventiva, tornando sua implementação mais simples. A segunda formulação já considera o número de Horas de Operação Acumulada (HOA) para definir o período de realização da manutenção preventiva, tornando o problema mais complexo. A terceira formulação é uma simplificação da segunda, onde divide-se o problema em duas etapas, garantindo assim uma solução aproximada e rápida para o problema. Nos itens seguintes serão detalhadas as três formulações desenvolvidas. Com a finalidade de facilitar a comparação dos resultados e simplificar o problema

foram consideradas apenas a realização de quatro manutenções preventivas em cada unidade geradora.

4.2.1 Formulação 1 - Manutenção em Intervalos de Tempo Pré-fixados

Nesta formulação do problema, considerou-se que as manutenções preventivas são realizadas em intervalos de tempo pré-fixados. Por exemplo, a primeira manutenção é realizada após um ano de operação da unidade geradora, independente do número de horas que esta unidade tenha operado. Nesta abordagem do problema, realiza-se uma otimização simplificada do despacho da usina, gerando o máximo de energia possível, alocando as manutenções preventivas nas janelas de tempo pré-fixadas pelo planejador.

CONJUNTOS:

U

Conjunto de unidades geradoras da usina hidrelétrica considerada.

T

Conjunto de meses que compõem o período de planejamento do cronograma de manutenção.

ÍNDICES:

$u \in \mathbf{U}$

Representa uma unidade geradora pertencente ao conjunto U .

$t \in \mathbf{T}$

Representa um determinado mês pertencente ao conjunto T .

PARÂMETROS DE ENTRADA:

$VAZ_{(t)}$, para todo $t \in \mathbf{T}$.

Vazão Mensal Afluente em m^3/s .

$ENG_{(u)}$, para todo $u \in \mathbf{U}$.

Engolimento Máximo das unidades geradoras em m^3/s .

$$PRD_{(u)}, \text{ para todo } u \in \mathbf{U}.$$

Penalidade associada a cada unidade geradora u que definirá a prioridade de despacho das turbinas.

$$NHM_{(t)}, \text{ para todo } t \in \mathbf{T}.$$

Número de horas do mês t .

$$PMAN1_{(u,t)}$$

$$PMAN2_{(u,t)}$$

$$PMAN3_{(u,t)}$$

$$PMAN4_{(u,t)}$$

Para todo $u \in \mathbf{U}$ e todo $t \in \mathbf{T}$

Período permitido para a realização de cada manutenção.

$$EMS1 \quad EMJ1 \quad EES1 \quad EEJ1$$

$$EMS2 \quad EMJ2 \quad EES2 \quad EEJ2$$

$$EMS3 \quad EMJ3 \quad EES3 \quad EEJ3$$

$$EMS4 \quad EMJ4 \quad EES4 \quad EEJ4$$

Os parâmetros acima representam o número de técnicos necessários para cada tipo de manutenção.

$$NMC1 \quad NMC2 \quad NMC3 \quad NMC4$$

Estes parâmetros representam o número de manutenções consecutivas que podem ser realizadas em um mês para cada tipo de manutenção.

VARIÁVEIS DO PROBLEMA:

$$DSP_{(u,t)} \in \{0, 1\}$$

Variável binária que representa se a máquina u foi despachada no mês t .

$$HOA_{(u,t)} \in [0, \infty)$$

Variável real positiva que representa o número de horas de operação acumulada de cada máquina u até o início do mês t .

$$VRT_{(t)} \in [0, \infty)$$

Variável real positiva que representa a vazão vertida ¹ em m^3/s em cada mês t .

$$MAN1_{(u,t)} \in \{0, 1\}$$

$$MAN2_{(u,t)} \in \{0, 1\}$$

$$MAN3_{(u,t)} \in \{0, 1\}$$

$$MAN4_{(u,t)} \in \{0, 1\}$$

Variáveis binárias que representam se a unidade geradora u está realizando a manutenção 1, 2, 3 ou 4 no mês t .

$$QEMS_{(t)} \in \mathbf{I}^+$$

$$QEMJ_{(t)} \in \mathbf{I}^+$$

$$QEES_{(t)} \in \mathbf{I}^+$$

$$QEEJ_{(t)} \in \mathbf{I}^+$$

Variáveis inteiras positivas que representam o total de técnicos necessários em cada especialidade para que o planejamento proposto possa ser executado.

- QEMS: Quantidade de Técnicos Eletromecânico Sênior
- QEMJ: Quantidade de Técnicos Eletromecânico Júnior
- QEES: Quantidade de Técnicos Eletroeletrônico Sênior
- QEEJ: Quantidade de Técnicos Eletroeletrônico Júnior

RESTRIÇÕES DO PROBLEMA:

$$\sum_{u \in \mathbf{U}} ENG_{(u)} \times DSP_{(u,t)} + VRT_{(t)} \geq VAZ_{(t)}$$

Para todo $t \in \mathbf{T}$

¹Vazão que passa pela barragem e não é aproveitada para a geração de energia. A estrutura por onde passa esta vazão é denominada Vertedouro

Esta restrição garante que a soma do engolimento máximo² das unidades geradoras despachadas adicionada ao vertimento deverá ser maior ou igual à vazão afluyente do mês t .

$$HOA_{(u,t)} = HOA_{(u,t-1)} + DSP_{(u,t-1)} \times NHM_{(u,t-1)}$$

Esta restrição realiza o acúmulo das horas de operação das unidades geradoras. O número de horas de operação acumulada até o início do mês t é igual ao número de horas de operação acumulada até o início do mês anterior $HOA_{(u,t-1)}$, adicionado ao número de horas do mês anterior $NHM_{(u,t-1)}$ multiplicado pela variável despacho $DSP_{(u,t-1)}$.

$$DSP_{(u,t)} \leq 0$$

Para todo u pertencente ao subgrupo de unidades geradoras de 4 pás, e todo t em que a vazão afluyente for menor ou igual a $7.500 \text{ m}^3/s$.

Por motivos técnicos, de caráter construtivo das unidades geradoras de 4 pás, quando se tem vazões afluyentes menores ou iguais a $7.500 \text{ m}^3/s$ o nível de jusante fica abaixo do nível mínimo permitido para seu funcionamento. Com a restrição acima, garante-se que somente as unidades geradoras de 5 pás funcionem nos meses onde a vazão afluyente for menor ou igual a $7.500 \text{ m}^3/s$.

$$DSP_{(u,t)} \leq 1 - MAN1_{(u,t)} - MAN2_{(u,t)} - MAN3_{(u,t)} - MAN4_{(u,t)} \quad \forall u \in \mathbf{U}, \quad \forall t \in T$$

Com esta restrição, garante-se que não será despachada uma unidade geradora que estiver em manutenção.

$$\sum_{t \in \mathbf{T}} MAN1_{(u,t)} = 1 \quad \forall u \in \mathbf{U}$$

$$\sum_{t \in \mathbf{T}} MAN2_{(u,t)} = 1 \quad \forall u \in \mathbf{U}$$

$$\sum_{t \in \mathbf{T}} MAN3_{(u,t)} = 1 \quad \forall u \in \mathbf{U}$$

$$\sum_{t \in \mathbf{T}} MAN4_{(u,t)} = 1 \quad \forall u \in \mathbf{U}$$

Com as quatro restrições acima, garante-se que as manutenções 1, 2, 3 e 4 serão executadas uma vez em todas as unidades geradoras no período avaliado.

²Vazão máxima turbinada

$$\sum_{u \in \mathbf{U}} MAN1_{(u,t)} \times \frac{EMS1}{NMC1} + \dots + \sum_{u \in \mathbf{U}} MAN4_{(u,t)} \times \frac{EMS4}{NMC4} \leq QEMS \quad \forall t \in T$$

$$\sum_{u \in \mathbf{U}} MAN1_{(u,t)} \times \frac{EMJ1}{NMC1} + \dots + \sum_{u \in \mathbf{U}} MAN4_{(u,t)} \times \frac{EMJ4}{NMC4} \leq QEMJ \quad \forall t \in T$$

$$\sum_{u \in \mathbf{U}} MAN1_{(u,t)} \times \frac{EES1}{NMC1} + \dots + \sum_{u \in \mathbf{U}} MAN4_{(u,t)} \times \frac{EES4}{NMC4} \leq QEES \quad \forall t \in T$$

$$\sum_{u \in \mathbf{U}} MAN1_{(u,t)} \times \frac{EEJ1}{NMC1} + \dots + \sum_{u \in \mathbf{U}} MAN4_{(u,t)} \times \frac{EEJ4}{NMC4} \leq QEEJ \quad \forall t \in T$$

As quatro restrições acima limitam o número de manutenções simultâneas que podem ser realizadas dentro de um mês. Esta restrição é função do número de técnicos necessário para a realização de cada manutenção $EMSx$, $EMJx$, $EESx$, $EEJx$ e do número de manutenções consecutivas que podem ser realizadas dentro de um mês $NMCx$.

$$MAN1_{(u,t)} \leq PMAN1_{(u,t)}$$

$$MAN2_{(u,t)} \leq PMAN2_{(u,t)}$$

$$MAN3_{(u,t)} \leq PMAN3_{(u,t)}$$

$$MAN4_{(u,t)} \leq PMAN4_{(u,t)}$$

As quatro restrições acima garantem que as manutenções serão realizadas nos intervalos de tempo pré-fixados pelo planejador. Para isto é necessário que o planejador informe ao modelo os períodos onde se deseja realizar as manutenções. O parâmetro $PMANx_{(u,t)}$ é uma matriz binária que contém zero nos períodos onde não se pode realizar as manutenções e um nos períodos onde é possível e se deseja realizar as manutenções preventivas.

$$DSP_{(1,t)} \leq 0, \text{ para todo } t < t_{e1}.$$

$$DSP_{(2,t)} \leq 0, \text{ para todo } t < t_{e2}.$$

⋮

$$DSP_{(n,t)} \leq 0, \text{ para todo } t < t_{en}.$$

Cada unidade geradora k , possui um mês de entrada em operação definido t_{ek} . As restrições acima garantem que a unidade geradora k somente estará disponível para despacho após o período t_{ek} .

FUNÇÃO OBJETIVO:

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar} \quad \sum_{t \in \mathbf{T}} VRT_{(t)} + \\ & \quad \sum_{t \in \mathbf{T}, u \in \mathbf{U}} DSP_{(u,t)} \times PRD_{(u)} + \\ & (QEMS + QEMJ + QEES + QEEJ) \end{aligned}$$

Neste tipo de problema, o valor da função objetivo não é o mais importante, e sim a viabilidade do problema e o melhor aproveitamento dos recursos. Sendo assim, a função objetivo deste problema é composta de variáveis que queremos minimizar ou penalizar para alcançarmos um planejamento da manutenção preventiva otimizando os recursos e mão de obra disponíveis. Nesta formulação, minimiza-se a variável vertimento, garantindo assim o aproveitamento máximo da vazão afluyente para a geração de energia elétrica. O segundo termo consiste na penalização do despacho das unidades geradoras pelo parâmetro $PRD_{(u)}$, com isso, busca-se garantir que as unidades geradoras despachadas em cada mês atendam a regra de prioridade de despacho ótimo definida pelo usuário. O terceiro termo representa a minimização do número total de técnicos necessários para a realização das manutenções, forçando o modelo a distribuir as manutenções de forma a otimizar o recurso disponível.

4.2.2 Formulação 2 - Manutenção em Função das Horas de Operação Acumulada

Nesta formulação do problema não considera-se um período pré-fixado para a execução das manutenções preventivas. As manutenções são definidas em função do total de horas de operação acumulada. Porém, não se sabe, a priori, quando as unidades geradoras irão atingir o montante de horas de operação acumulada para uma determinada manutenção. Esta grandeza é função do despacho destas unidades geradoras ao longo do período considerado. Sendo assim, com esta formulação do problema, tem-se dois problemas a serem resolvidos e estes problemas tem influência mútua. O primeiro problema é o problema do despacho das unidades geradoras, e o segundo problema é a definição dos meses em que serão realizadas as manutenções programadas destas unidades.

CONJUNTOS:

U

Conjunto de unidades geradoras da usina hidrelétrica considerada.

T

Conjunto de meses que compõem o período de planejamento do cronograma de manutenção.

ÍNDICES:

$u \in \mathbf{U}$

Representa uma unidade geradora pertencente ao conjunto U .

$t \in \mathbf{T}$

Representa um determinado mês pertencente ao conjunto T .

PARÂMETROS DE ENTRADA:

$VAZ_{(t)}$, para todo $t \in \mathbf{T}$.

Vazão Mensal Afluente em m^3/s .

$ENG_{(u)}$, para todo $u \in \mathbf{U}$.

Engolimento Máximo das unidades geradoras em m^3/s .

$$PRD_{(u)}, \text{ para todo } u \in \mathbf{U}.$$

Penalidade associada a cada unidade geradora u que definirá a prioridade de despacho das turbinas.

$$NHM_{(t)}, \text{ para todo } t \in \mathbf{T}.$$

Número de horas dos meses do período de estudo.

$$EMS1 \quad EMJ1 \quad EES1 \quad EEJ1$$

$$EMS2 \quad EMJ2 \quad EES2 \quad EEJ2$$

$$EMS3 \quad EMJ3 \quad EES3 \quad EEJ3$$

$$EMS4 \quad EMJ4 \quad EES4 \quad EEJ4$$

Os parâmetros acima representam o número de técnicos necessários para cada tipo de manutenção.

$$NMC1 \quad NMC2 \quad NMC3 \quad NMC4$$

Estes parâmetros representam o número de manutenções consecutivas que podem ser realizadas em um mês para cada tipo de manutenção.

VARIÁVEIS DO PROBLEMA:

$$DSP_{(u,t)} \in [0, 1]$$

Variável real entre 0 e 1 que representa o percentual da vazão máxima turbinada da unidade geradora u no mês t . Diferentemente da formulação 1, que considerou esta variável binária, nesta formulação esta variável foi relaxada para reduzir o número de variáveis binárias do problema.

$$HOA_{(u,t)} \in [0, \infty)$$

Variável real positiva que representa o número de horas de operação acumulada de cada máquina u até o início do mês t .

$$VRT_{(t)} \in [0, \infty)$$

Variável real positiva que representa a vazão vertida em m^3/s em cada mês t .

$$MAN1_{(u,t)} \in [0, 1]$$

$$MAN2_{(u,t)} \in [0, 1]$$

$$MAN3_{(u,t)} \in [0, 1]$$

$$MAN4_{(u,t)} \in [0, 1]$$

Variáveis reais que representam se a unidade geradora u está realizando a manutenção 1, 2, 3 ou 4 no mês t . Estas variáveis deveriam ser inteiras, porém foram relaxadas para reduzir o número de variáveis binárias do problema.

$$QEMS_{(t)} \in \mathbf{R}^+$$

$$QEMJ_{(t)} \in \mathbf{R}^+$$

$$QEES_{(t)} \in \mathbf{R}^+$$

$$QEEJ_{(t)} \in \mathbf{R}^+$$

Variáveis reais positivas que representam o total de técnicos necessários em cada especialidade para que o planejamento proposto possa ser executado. Estas variáveis também foram relaxadas com o objetivo de diminuir o número de variáveis inteiras do problema.

- QEMS: Quantidade de Técnicos Eletromecânico Sênior
- QEMJ: Quantidade de Técnicos Eletromecânico Júnior
- QEES: Quantidade de Técnicos Eletroeletrônico Sênior
- QEEJ: Quantidade de Técnicos Eletroeletrônico Júnior

RESTRIÇÕES DO PROBLEMA:

$$\sum_{u \in \mathbf{U}} ENG_{(u)} \times DSP_{(u,t)} + VRT_{(t)} \geq VAZ_{(t)}$$

Para todo $t \in \mathbf{T}$

Esta restrição garante que a soma do engolimento máximo das unidades geradores despachadas adicionada ao vertimento deverá ser maior ou igual à vazão afluyente do mês t .

$$HOA_{(u,t)} = HOA_{(u,t-1)} + DSP_{(u,t-1)} \times NHM_{(u,t-1)}$$

Esta restrição realiza o acúmulo das horas de operação das unidades geradoras.

$$DSP_{(u,t)} \leq 0$$

Para todo u pertencente ao subgrupo de unidades geradoras de 4 pás e para todo t em que a vazão afluyente for menor ou igual a $7.500 \text{ m}^3/s$.

$$DSP_{(u,t)} \leq 1 - MAN1_{(u,t)} - MAN2_{(u,t)} - MAN3_{(u,t)} - MAN4_{(u,t)} \quad \forall u \in \mathbf{U}, \quad \forall t \in T$$

Com esta restrição garante-se que não será despachada uma unidade geradora que estiver em manutenção.

$$\begin{aligned} \sum_{t \in \mathbf{T}} MAN1_{(u,t)} &= 1 \quad \forall u \in \mathbf{U} \\ \sum_{t \in \mathbf{T}} MAN2_{(u,t)} &= 1 \quad \forall u \in \mathbf{U} \\ \sum_{t \in \mathbf{T}} MAN3_{(u,t)} &= 1 \quad \forall u \in \mathbf{U} \\ \sum_{t \in \mathbf{T}} MAN4_{(u,t)} &= 1 \quad \forall u \in \mathbf{U} \end{aligned}$$

Com as quatro restrições acima, garante-se que as manutenções 1, 2, 3 e 4 serão executadas uma vez em todas as unidades geradoras no período estudado.

$$\sum_{u \in \mathbf{U}} MAN1_{(u,t)} \times \frac{EMS1}{NMC1} + \dots + \sum_{u \in \mathbf{U}} MAN4_{(u,t)} \times \frac{EMS4}{NMC4} \leq QEMS \quad \forall t \in T$$

$$\sum_{u \in \mathbf{U}} MAN1_{(u,t)} \times \frac{EMJ1}{NMC1} + \dots + \sum_{u \in \mathbf{U}} MAN4_{(u,t)} \times \frac{EMJ4}{NMC4} \leq QEMJ \quad \forall t \in T$$

$$\sum_{u \in \mathbf{U}} MAN1_{(u,t)} \times \frac{EES1}{NMC1} + \dots + \sum_{u \in \mathbf{U}} MAN4_{(u,t)} \times \frac{EES4}{NMC4} \leq QEES \quad \forall t \in T$$

$$\sum_{u \in \mathbf{U}} MAN1_{(u,t)} \times \frac{EEJ1}{NMC1} + \dots + \sum_{u \in \mathbf{U}} MAN4_{(u,t)} \times \frac{EEJ4}{NMC4} \leq QEEJ \quad \forall t \in T$$

As quatro restrições acima limitam o número de manutenções simultâneas que podem ser realizadas dentro de um mês. Esta restrição é função do número de técnicos necessários para a realização de cada manutenção $EMSx$, $EMJx$, $EESx$, $EEJx$ e do número de manutenções consecutivas que podem ser realizadas dentro de um mês $NMCx$.

$$DSP_{(1,t)} \leq 0, \text{ para todo } t < t_{e1}.$$

$$DSP_{(2,t)} \leq 0, \text{ para todo } t < t_{e2}.$$

⋮

$$DSP_{(n,t)} \leq 0, \text{ para todo } t < t_{en}.$$

Cada unidade geradora k , possui um mês de entrada em operação definido t_{ek} . As restrições acima garantem que a unidade geradora k somente estará disponível para despacho após o período t_{ek} .

$$MAN1_{(u,t)} \leq 0$$

$$MAN2_{(u,t)} \leq 0$$

$$MAN3_{(u,t)} \leq 0$$

$$MAN4_{(u,t)} \leq 0$$

Para todo mês t igual a Janeiro, Fevereiro, Março, Abril, Maio, Junho e Dezembro.

As quatro restrições acima garantem que as manutenções somente sejam realizadas entre os meses de julho a novembro.

$$\sum_{t \in \mathbf{T}} MAN2_{(u,t)} \times t - \sum_{t \in \mathbf{T}} MAN1_{(u,t)} \times t \geq 6$$

$$\sum_{t \in \mathbf{T}} MAN3_{(u,t)} \times t - \sum_{t \in \mathbf{T}} MAN2_{(u,t)} \times t \geq 6$$

$$\sum_{t \in \mathbf{T}} MAN4_{(u,t)} \times t - \sum_{t \in \mathbf{T}} MAN3_{(u,t)} \times t \geq 6$$

Para todo $u \in \mathbf{U}$

As três restrições acima garantem que as manutenções 1, 2, 3 e 4 não sejam realizadas em um mesmo ano para uma determinada unidade geradora u .

FUNÇÃO OBJETIVO:

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar} \quad \sum_{t \in \mathbf{T}} VRT_{(t)} + \\ & \quad \sum_{t \in \mathbf{T}, u \in \mathbf{U}} DSP_{(u,t)} \times PRD_{(u)} + \\ & (QEMS + QEMJ + QEES + QEEJ) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{t \in \mathbf{T}, u \in \mathbf{U}} MAN1_{(u,t)} \times t + \\
& \sum_{t \in \mathbf{T}, u \in \mathbf{U}} MAN2_{(u,t)} \times t + \\
& \sum_{t \in \mathbf{T}, u \in \mathbf{U}} MAN3_{(u,t)} \times t + \\
& \sum_{t \in \mathbf{T}, u \in \mathbf{U}} MAN4_{(u,t)} \times t
\end{aligned}$$

Nesta formulação, novamente minimiza-se a variável vertimento, garantindo o aproveitamento máximo da vazão afluyente para a geração de energia elétrica. O segundo termo consiste na penalização do despacho das unidades geradoras pelo parâmetro $PRD_{(u)}$, com isso, busca-se garantir que as unidades geradoras despachadas em cada mês atendam a regra de prioridade de despacho ótimo definida pelo usuário. O terceiro termo representa a minimização do número total de técnicos necessários para as manutenções, forçando o modelo a distribuir as manutenções de forma a otimizar o recurso disponível. Os quatro últimos termos também representam uma penalização da variável manutenção pelo parâmetro t para forçar o modelo a realizar as manutenções preventivas o mais próximo possível do início do intervalo permitido para a realização das manutenções, visto que, quanto mais postergarmos as manutenções preventivas, maior será o risco de ocorrer uma falha no equipamento, ocasionando um parada para manutenção corretiva.

INTERVALOS PARA MANUTENÇÃO

Para que fosse possível realizar as manutenções dentro de um intervalo de horas de operação acumulada especificada pelo planejador, foi proposta a seguinte metodologia. Utilizar a técnica de programação inteira (0,1) para particionar a variável Horas de Operação Acumulada ($HOA_{(u,t)}$) em intervalos onde se deseja encaixar cada manutenção. A figura 4.2 mostra um exemplo onde particionou-se os quatro intervalos de manutenção a cada 8.000 horas. Para isto foi necessária a inclusão das variáveis reais $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_6$, das variáveis binárias w_1, w_2, \dots, w_5 e de 11 restrições.

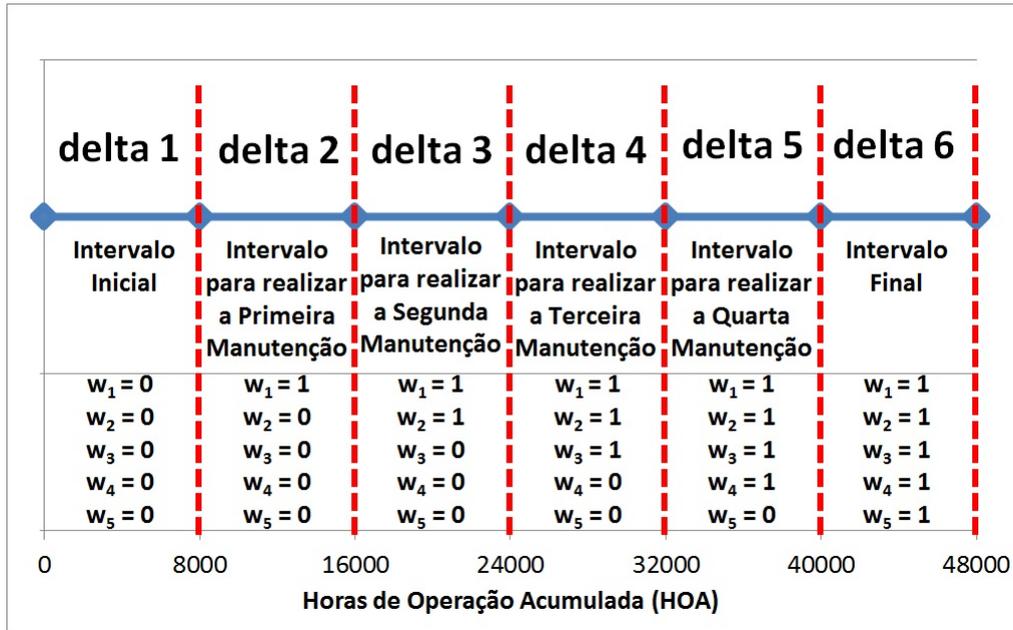


Figura 4.2: Exemplo de partição de intervalo

A formulação desta metodologia para o caso de quatro manutenções é descrita abaixo:

VARIÁVEIS:

$$delta1_{(u,t)}$$

$$delta2_{(u,t)}$$

⋮

$$delta6_{(u,t)}$$

Variáveis reais que representam uma partição do intervalo $HOA_{(u,t)}$.

A variável $delta1_{(u,t)}$ acumula as horas de operação iniciais da máquina, neste período não é permitido fazer nenhum tipo de manutenção. As variáveis $delta2_{(u,t)}$, $delta3_{(u,t)}$, $delta4_{(u,t)}$ e $delta5_{(u,t)}$ acumulam as horas de operação onde são permitidas as realizações das manutenções preventivas 1, 2, 3 e 4 respectivamente. A variável $delta6_{(u,t)}$ acumula as horas de operação finais das unidades geradoras, neste período já foram executadas todas as manutenções programadas. No exemplo da figura 4.2 este período tem a duração de 8.000 horas, porém deve-se atribuir a esta variável um intervalo grande o suficiente para acumular o restante de horas de operação do período de estudo. Para os estudos apresentados neste trabalho atribui-se o valor de 100.000 horas para esta variável.

$$w1_{(u,t)}$$

$$w2_{(u,t)}$$

⋮

$$w5_{(u,t)}$$

Variáveis binárias utilizadas para a formulação das restrições que garantem a partição dos intervalos.

RESTRIÇÕES:

$$w1_{(u,t)} \times NHI1 \leq \text{delta}1_{(u,t)} \leq NHI1$$

$$w2_{(u,t)} \times NHI2 \leq \text{delta}2_{(u,t)} \leq w1_{(u,t)} \times NHI2$$

$$w3_{(u,t)} \times NHI3 \leq \text{delta}3_{(u,t)} \leq w2_{(u,t)} \times NHI3$$

$$w4_{(u,t)} \times NHI4 \leq \text{delta}4_{(u,t)} \leq w3_{(u,t)} \times NHI4$$

$$w5_{(u,t)} \times NHI5 \leq \text{delta}5_{(u,t)} \leq w4_{(u,t)} \times NHI5$$

$$0 \leq \text{delta}6_{(u,t)} \leq w5_{(u,t)} \times NHI6$$

Estas restrições garantem que cada partição $\text{delta}x$ tenha o comprimento de $NHIx$, com $x = 1, 2, \dots, 6$. Onde $NHIx$ representa o número de horas do intervalo x definido pelo usuário.

$$HOA_{(u,t)} = \text{delta}1_{(u,t)} + \text{delta}2_{(u,t)} + \dots + \text{delta}6_{(u,t)}$$

Esta restrição garante a partição da variável Horas de Operação Acumulada nos intervalos de interesse.

$$MAN1_{(u,t)} \leq w1_{(u,t)} - w2_{(u,t)}$$

$$MAN2_{(u,t)} \leq w2_{(u,t)} - w3_{(u,t)}$$

$$MAN3_{(u,t)} \leq w3_{(u,t)} - w4_{(u,t)}$$

$$MAN4_{(u,t)} \leq w4_{(u,t)} - w5_{(u,t)}$$

Estas restrições garantem que as manutenções sejam executadas dentro do intervalo desejado. $MAN1$ será executada no intervalo $\text{delta}2$, $MAN2$ no intervalo $\text{delta}3$, $MAN3$ no intervalo $\text{delta}4$ e $MAN4$ no intervalo $\text{delta}5$.

4.2.3 Formulação 3 - Problema Dividido em Duas Etapas

Esta formulação é uma simplificação da formulação 2, pois, devido ao tamanho do problema, partiu-se para uma modelagem do problema em duas etapas. Na primeira etapa formula-se um problema de despacho das unidades geradoras. Como resultado desta primeira etapa obtem-se o número de horas de operação acumulada de cada unidade geradora, a partir daí, formula-se o problema de alocação das manutenções preventivas de acordo com o número de horas de operação acumulada, obtida na primeira etapa.

CONJUNTOS:

U

Conjunto de unidades geradoras da usina hidrelétrica considerada.

T

Conjunto de meses que compõem o período de planejamento do cronograma de manutenção.

ÍNDICES:

$u \in \mathbf{U}$

Representa uma unidade geradora pertencente ao conjunto U .

$t \in \mathbf{T}$

Representa um determinado mês pertencente ao conjunto T .

PRIMEIRA ETAPA

PARÂMETROS DE ENTRADA:

$VAZ_{(t)}$, para todo $t \in \mathbf{T}$.

Vazão Mensal Afluente em m^3/s

$ENG_{(u)}$, para todo $u \in \mathbf{U}$.

Engolimento Máximo das unidades geradoras em m^3/s

$PRD_{(u)}$, para todo $u \in \mathbf{U}$.

Penalidade associada a cada unidade geradora u que definirá a prioridade de despacho das turbinas.

$$NHM_{(t)}, \text{ para todo } t \in \mathbf{T}.$$

Número de horas do mês t .

VARIÁVEIS DO PROBLEMA:

$$DSP_{(u,t)} \in \{0, 1\}$$

Variável binária que representa se a máquina u foi despachada no mês t .

$$HOA_{(u,t)} \in [0, \infty)$$

Variável real positiva que representa o número de horas de operação acumulada de cada máquina u em cada mês t .

$$VRT_{(t)} \in [0, \infty)$$

Variável real positiva que representa a vazão vertida em m^3/s em cada período t .

RESTRIÇÕES DO PROBLEMA:

$$\sum_{u \in \mathbf{U}} ENG_{(u)} \times DSP_{(u,t)} + VRT_{(t)} \geq VAZ_{(t)}$$

Para todo $t \in \mathbf{T}$

Esta restrição garante que a soma do engolimento máximo das unidades geradoras despachadas adicionada ao vertimento deverá ser maior ou igual à vazão afluyente do mês t .

$$HOA_{(u,t)} = HOA_{(u,t-1)} + DSP_{(u,t-1)} \times NHM_{(u,t-1)}$$

Esta restrição realiza o acúmulo das horas de operação das unidades geradoras.

$$DSP_{(u,t)} \leq 0$$

Para todo u pertencente ao subgrupo de unidades geradoras de 4 pás e para todo t em que a vazão afluyente for menor ou igual a $7.500 m^3/s$.

$$DSP_{(1,t)} \leq 0, \text{ para todo } t < t_{e1}.$$

$$DSP_{(2,t)} \leq 0, \text{ para todo } t < t_{e2}.$$

⋮

$$DSP_{(n,t)} \leq 0, \text{ para todo } t < t_{en}.$$

Cada unidade geradora k , possui um mês de entrada em operação definido t_{ek} . As restrições acima garantem que a unidade geradora k somente estará disponível para despacho após o período t_{ek} .

FUNÇÃO OBJETIVO:

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar } \sum_{t \in \mathbf{T}} VRT_{(t)} + \\ & \sum_{t \in \mathbf{T}, u \in \mathbf{U}} DSP_{(u,t)} \times PRD_{(u)} \end{aligned}$$

Nesta primeira etapa, minimiza-se a variável vertimento, garantindo o aproveitamento máximo da vazão afluyente para a geração de energia elétrica. O segundo termo consiste na penalização do despacho das unidades geradoras pelo parâmetro $PRD_{(u)}$, com isso, busca-se garantir que as unidades geradoras despachadas em cada mês atendam a regra de prioridade de despacho ótimo definida pelo usuário.

SEGUNDA ETAPA

PARÂMETROS DE ENTRADA:

$$VAZ_{(t)}, \text{ para todo } t \in \mathbf{T}.$$

Vazão Mensal Afluyente em m^3/s

$$ENG_{(u)}, \text{ para todo } u \in \mathbf{U}.$$

Engolimento Máximo das unidades geradoras em m^3/s

$$PRD_{(u)}, \text{ para todo } u \in \mathbf{U}.$$

Penalidade associada a cada unidade geradora u que definirá a prioridade de despacho das turbinas.

$$NHM_{(t)}, \text{ para todo } t \in \mathbf{T}.$$

Número de horas do mês t .

$HOA_{(u,t)}$, para todo $u \in \mathbf{U}$ e todo $t \in \mathbf{T}$.

Número de horas de operação acumulada obtidos da primeira etapa.

$EMS1$ $EMJ1$ $EES1$ $EEJ1$

$EMS2$ $EMJ2$ $EES2$ $EEJ2$

$EMS3$ $EMJ3$ $EES3$ $EEJ3$

$EMS4$ $EMJ4$ $EES4$ $EEJ4$

Os parâmetros acima representam o número de técnicos necessários para cada tipo de manutenção.

$NMC1$ $NMC2$ $NMC3$ $NMC4$

Estes parâmetros representam o número de manutenções consecutivas que podem ser realizadas em um mês para cada tipo de manutenção.

VARIÁVEIS DO PROBLEMA:

$DSP_{(u,t)} \in \{0, 1\}$

Variável binária que representa se a máquina u foi despachada no mês t .

$VRT_{(t)} \in [0, \infty)$

Variável real positiva que representa a vazão vertida em m^3/s em cada período t .

$MAN1_{(u,t)} \in \{0, 1\}$

$MAN2_{(u,t)} \in \{0, 1\}$

$MAN3_{(u,t)} \in \{0, 1\}$

$MAN4_{(u,t)} \in \{0, 1\}$

Variáveis binárias que representam se a unidade geradora u está realizando a manutenção 1, 2, 3 ou 4 no mês t .

$QEMS_{(t)} \in \mathbf{I}^+$

$QEMJ_{(t)} \in \mathbf{I}^+$

$QEES_{(t)} \in \mathbf{I}^+$

$$QEEJ_{(t)} \in \mathbf{I}^+$$

Variáveis inteiras positivas que representam o total de técnicos necessários em cada especialidade para que o planejamento proposto possa ser executado.

- QEMS: Quantidade de Técnicos Eletromecânico Sênior
- QEMJ: Quantidade de Técnicos Eletromecânico Júnior
- QEES: Quantidade de Técnicos Eletroeletrônico Sênior
- QEEJ: Quantidade de Técnicos Eletroeletrônico Júnior

RESTRIÇÕES DO PROBLEMA:

$$\sum_{u \in \mathbf{U}} ENG_{(u)} \times DSP_{(u,t)} + VRT_{(t)} \geq VAZ_{(t)}$$

Para todo $t \in \mathbf{T}$

Esta restrição garante que a soma do engolimento máximo das unidades geradoras despachadas adicionada ao vertimento deverá ser maior ou igual à vazão afluyente do mês t .

$$HOA_{(u,t)} = HOA_{(u,t-1)} + DSP_{(u,t-1)} \times NHM_{(u,t-1)}$$

Esta restrição realiza o acumulo das horas de operação das unidades geradoras.

$$DSP_{(u,t)} \leq 0$$

Para todo u pertencente ao subgrupo de unidades geradoras de 4 pás, e todo t em que a vazão afluyente for menor ou igual a $7.500 \text{ m}^3/\text{s}$.

$$DSP_{(u,t)} \leq 1 - MAN1_{(u,t)} - MAN2_{(u,t)} - MAN3_{(u,t)} - MAN4_{(u,t)} \quad \forall u \in \mathbf{U}, \quad \forall t \in \mathbf{T}$$

Com esta restrição garante-se que não será despachada uma unidade geradora que estiver em manutenção.

$$\sum_{t \in \mathbf{T}} MAN1_{(u,t)} = 1 \quad \forall u \in \mathbf{U}$$

$$\sum_{t \in \mathbf{T}} MAN2_{(u,t)} = 1 \quad \forall u \in \mathbf{U}$$

$$\sum_{t \in \mathbf{T}} MAN3_{(u,t)} = 1 \quad \forall u \in \mathbf{U}$$

$$\sum_{t \in \mathbf{T}} MAN4_{(u,t)} = 1 \quad \forall u \in \mathbf{U}$$

Com as quatro restrições acima, garante-se que as manutenções 1, 2, 3 e 4 serão executadas uma vez em todas as unidades geradoras no período estudado.

$$\sum_{u \in \mathbf{U}} MAN1_{(u,t)} \times \frac{EMS1}{NMC1} + \dots + \sum_{u \in \mathbf{U}} MAN4_{(u,t)} \times \frac{EMS4}{NMC4} \leq QEMS \quad \forall t \in T$$

$$\sum_{u \in \mathbf{U}} MAN1_{(u,t)} \times \frac{EMJ1}{NMC1} + \dots + \sum_{u \in \mathbf{U}} MAN4_{(u,t)} \times \frac{EMJ4}{NMC4} \leq QEMJ \quad \forall t \in T$$

$$\sum_{u \in \mathbf{U}} MAN1_{(u,t)} \times \frac{EES1}{NMC1} + \dots + \sum_{u \in \mathbf{U}} MAN4_{(u,t)} \times \frac{EES4}{NMC4} \leq QEES \quad \forall t \in T$$

$$\sum_{u \in \mathbf{U}} MAN1_{(u,t)} \times \frac{EEJ1}{NMC1} + \dots + \sum_{u \in \mathbf{U}} MAN4_{(u,t)} \times \frac{EEJ4}{NMC4} \leq QEEJ \quad \forall t \in T$$

As quatro restrições acima limitam o número de manutenções simultâneas que podem ser realizadas dentro de um mês.

$$DSP_{(1,t)} \leq 0, \text{ para todo } t < t_{e1}.$$

$$DSP_{(2,t)} \leq 0, \text{ para todo } t < t_{e2}.$$

⋮

$$DSP_{(n,t)} \leq 0, \text{ para todo } t < t_{en}.$$

Cada unidade geradora k , possui um mês de entrada em operação definido t_{ek} . As restrições acima garantem que a unidade geradora k somente estará disponível para despacho após o período t_{ek} .

$$MAN1_{(u,t)} \leq 0$$

$$MAN2_{(u,t)} \leq 0$$

$$MAN3_{(u,t)} \leq 0$$

$$MAN4_{(u,t)} \leq 0$$

Para todo mês t igual a Janeiro, Fevereiro, Março, Abril, Maio, Junho e Dezembro.

As quatro restrições acima garantem que as manutenções somente sejam realizadas entre os meses de julho a novembro.

$$MAN1_{(u,t)} \times HOA_{(u,t)} \geq LINFMAN1 \times MAN1_{(u,t)}$$

$$MAN1_{(u,t)} \times HOA_{(u,t)} \leq LSUPMAN1 \times MAN1_{(u,t)}$$

$$MAN2_{(u,t)} \times HOA_{(u,t)} \geq LINFMAN2 \times MAN2_{(u,t)}$$

$$MAN2_{(u,t)} \times HOA_{(u,t)} \leq LSUPMAN2 \times MAN2_{(u,t)}$$

$$MAN3_{(u,t)} \times HOA_{(u,t)} \geq LINFMAN3 \times MAN3_{(u,t)}$$

$$MAN3_{(u,t)} \times HOA_{(u,t)} \leq LSUPMAN3 \times MAN3_{(u,t)}$$

$$MAN4_{(u,t)} \times HOA_{(u,t)} \geq LINFMAN4 \times MAN4_{(u,t)}$$

$$MAN4_{(u,t)} \times HOA_{(u,t)} \leq LSUPMAN4 \times MAN4_{(u,t)}$$

As restrições acima garantem que as manutenções sejam realizadas no intervalo compreendido entre o limite inferior $LINFMANx$ e o limite superior $LSUPMANx$ de horas de operação acumulada informadas pelo planejador.

$$\sum_{t \in \mathbf{T}} MAN2_{(u,t)} \times IMES_{(t)} - \sum_{t \in \mathbf{T}} MAN1_{(u,t)} \times IMES_{(t)} \geq 6$$

$$\sum_{t \in \mathbf{T}} MAN3_{(u,t)} \times IMES_{(t)} - \sum_{t \in \mathbf{T}} MAN2_{(u,t)} \times IMES_{(t)} \geq 6$$

$$\sum_{t \in \mathbf{T}} MAN4_{(u,t)} \times IMES_{(t)} - \sum_{t \in \mathbf{T}} MAN3_{(u,t)} \times IMES_{(t)} \geq 6$$

Para todo $u \in \mathbf{U}$

As três restrições acima garantem que as manutenções 1, 2, 3 e 4 não sejam realizadas em um mesmo ano para uma determinada unidade geradora u .

FUNÇÃO OBJETIVO:

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar} \quad \sum_{t \in \mathbf{T}} VRT_{(t)} + \\ & \quad \sum_{t \in \mathbf{T}, u \in \mathbf{U}} DSP_{(u,t)} \times PRD_{(u)} + \\ & (QEMS + QEMJ + QEES + QEEJ) + \\ & \quad \sum_{t \in \mathbf{T}, u \in \mathbf{U}} MAN1_{(u,t)} \times t + \\ & \quad \sum_{t \in \mathbf{T}, u \in \mathbf{U}} MAN2_{(u,t)} \times t + \end{aligned}$$

$$\sum_{t \in \mathbf{T}, u \in \mathbf{U}} MAN3_{(u,t)} \times t +$$

$$\sum_{t \in \mathbf{T}, u \in \mathbf{U}} MAN4_{(u,t)} \times t$$

Minimiza-se a variável vertimento, garantindo o aproveitamento máximo da vazão afluyente para a geração de energia elétrica. O segundo termo consiste na penalização do despacho das unidades geradoras pelo parâmetro $PRD_{(u)}$, com isso, busca-se garantir que as unidades geradoras despachadas em cada mês atendam a regra de prioridade de despacho ótimo definida pelo usuário. O terceiro termo representa a minimização do número total de técnicos necessários para as manutenções, forçando o modelo a distribuir as manutenções de forma a otimizar o recurso disponível. E os quatro últimos termos também representam uma penalização da variável manutenção pelo parâmetro t para forçar o modelo a realizar as manutenções preventivas o mais próximo possível do início do intervalo permitido para a realização das manutenções, visto que, quanto mais postergarmos a manutenção preventiva, maior será o risco de ocorrer um falha no equipamento, ocasionando um parada para manutenção corretiva.

4.3 Software de Otimização AIMMS

O software AIMMS ³ é uma plataforma para o desenvolvimento de sistemas de decisão baseados em modelos de otimização. Este software possui uma interface gráfica amigável e uma linguagem algébrica genérica que permite a implementação através da definição de conjuntos, subconjuntos, parâmetros, variáveis, períodos, restrições, função objetivo, etc. O AIMMS possui também um ambiente para armazenar todas as informações de entrada associadas a um cenário particular de otimização, facilitando o gerenciamento de simulações de cenários. Permite ao usuário a construção de páginas de interface contendo objetos interativos como gráficos, redes e tabelas. Oferece a utilização de diversos *solvers* para a resolução de problemas de otimização como LP, MIP, QP, NLP, etc. Os *solvers* disponíveis no AIMMS são:

- NetSol
- XA
- CONOPT
- PATH
- MOSEK
- AOA
- BARON
- LGO
- KNITRO
- GUROBI
- Robust Optimization
- CPLEX
- XPRESS (Apenas link para o solver)

Foi utilizada neste trabalho a versão 3.11 (64 bits) do AIMMS e uma licença acadêmica que dá direitos ao uso sem restrições do software. A figura 4.3 mostra um exemplo de tela do AIMMS.

³www.aimms.com

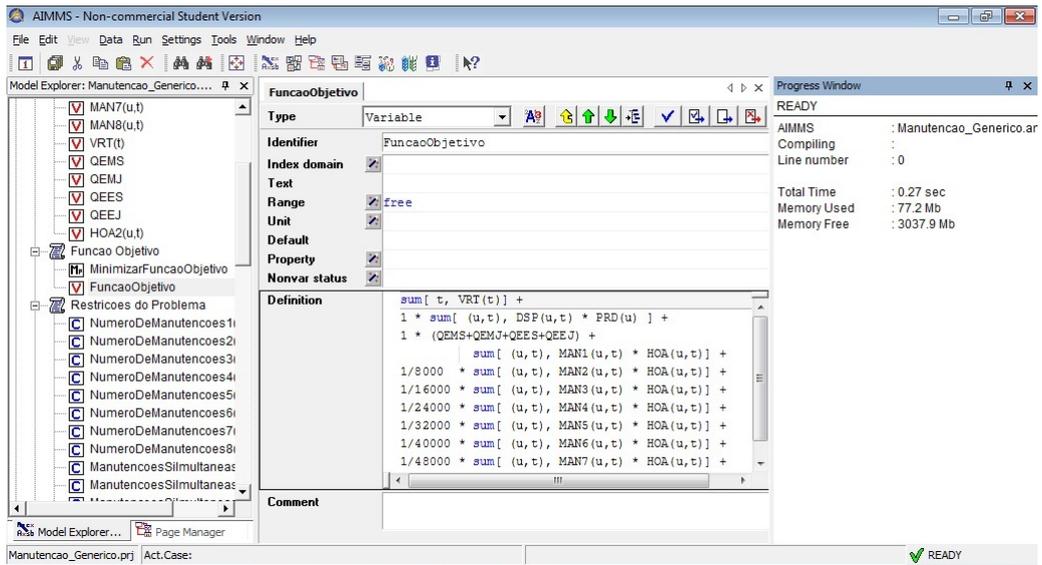
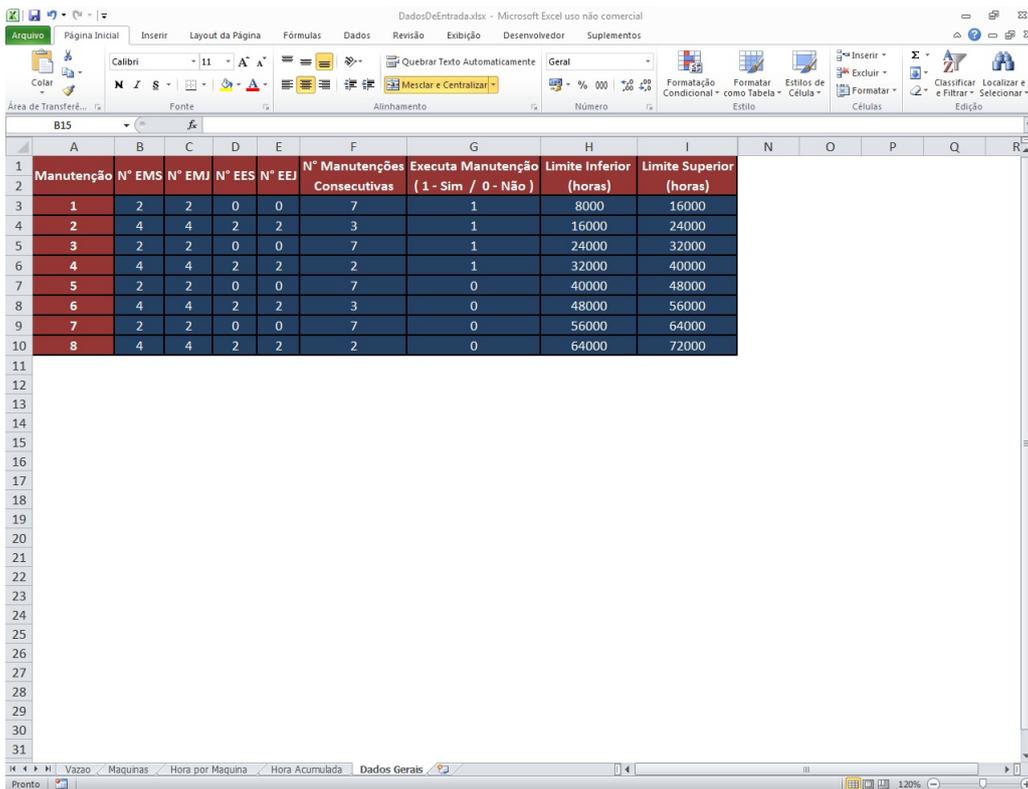


Figura 4.3: Exemplo de tela do software AIMMS

4.4 Interface AIMMS e EXCEL

Para facilitar a utilização do modelo proposto, utilizou-se rotinas disponíveis no AIMMS para que seja possível ler os dados de entrada e disponibilizar os dados de saída em planilhas Excel. Com isso todos os dados de entrada são informados através de uma planilha Excel denominada *DadosDeEntrada.xlsx* e os dados de saída são disponibilizados em uma planilha denominada *Resultados.xlsm*. As figuras 4.4, 4.4 e 4.4 mostram algumas telas da planilha *DadosDeEntrada.xlsx* e as figuras 4.7, 4.8 e 4.9 mostram algumas telas da planilha *Resultados.xlsm*. Também foram desenvolvidas nestas planilhas, principalmente na planilha *Resultados.xlsm*, tabelas, gráficos e *macros* para tratar os dados e disponibilizá-los de maneira que facilite a análise pelo profissional da empresa responsável pelo planejamento da manutenção preventiva. Optou-se pelo uso da ferramenta Excel, por se tratar de um software amplamente utilizado nas empresas, além de fornecer diversas ferramentas que auxiliam no tratamento e visualização de dados.



Manutenção	N° EMS	N° EMJ	N° EES	N° EEJ	N° Manutenções Consecutivas	Executa Manutenção (1 - Sim / 0 - Não)	Limite Inferior (horas)	Limite Superior (horas)	
1	2	2	0	0	7	1	8000	16000	
2	4	4	2	2	3	1	16000	24000	
3	2	2	0	0	7	1	24000	32000	
4	4	4	2	2	2	1	32000	40000	
5	2	2	0	0	7	0	40000	48000	
6	4	4	2	2	3	0	48000	56000	
7	2	2	0	0	7	0	56000	64000	
8	4	4	2	2	2	0	64000	72000	

Figura 4.4: Planilha *DadosDeEntrada.xlsx* - Dados Gerais

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Unidade Geradora	Engolimento (m³/s)	Mês de Entrada	Prioridade								
2	1	579	1	2								
3	2	579	2	2								
4	3	579	2	2								
5	4	579	3	2								
6	5	579	4	2								
7	6	579	4	2								
8	7	579	5	2								
9	8	579	6	2								
10	9	579	6	4								
11	10	579	7	4								
12	11	579	8	4								
13	12	579	9	4								
14	13	609	10	4								
15	14	609	11	4								
16	15	609	12	4								
17	16	609	13	4								
18	17	609	14	4								
19	18	609	15	4								
20	19	609	16	4								
21	20	609	17	4								
22	21	579	18	3								
23	22	579	19	3								
24	23	609	20	3								
25	24	609	21	3								
26	25	609	22	3								
27	26	609	23	3								
28	27	609	24	3								
29	28	609	25	3								
30	29	609	26	3								

Figura 4.5: Planilha *DadosDeEntrada.xlsx* - Unidades Geradoras

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Mês/Ano	Vazão (m³/s)	Horas do Mês	Mês	Índice Mês										
2	jan/31	29770	744	1	1										
3	fev/31	41350	672	2	2										
4	mar/31	45922	744	3	3										
5	abr/31	39931	720	4	4										
6	mai/31	31375	744	5	5										
7	jun/31	22829	720	6	6										
8	jul/31	16131	744	7	7										
9	ago/31	12042	744	8	8										
10	set/31	7342	720	9	9										
11	out/31	8081	744	10	10										
12	nov/31	12864	720	11	11										
13	dez/31	19857	744	12	12										
14	jan/32	31508	744	1	13										
15	fev/32	37388	672	2	14										
16	mar/32	44138	744	3	15										
17	abr/32	42406	720	4	16										
18	mai/32	36131	744	5	17										
19	jun/32	27350	720	6	18										
20	jul/32	20327	744	7	19										
21	ago/32	11428	744	8	20										
22	set/32	6301	720	9	21										
23	out/32	6917	744	10	22										
24	nov/32	17718	720	11	23										
25	dez/32	26900	744	12	24										
26	jan/33	34671	744	1	25										
27	fev/33	43283	672	2	26										
28	mar/33	46540	744	3	27										
29	abr/33	49622	720	4	28										
30	mai/33	37545	744	5	29										

Figura 4.6: Planilha *DadosDeEntrada.xlsx* - Série de Vazões

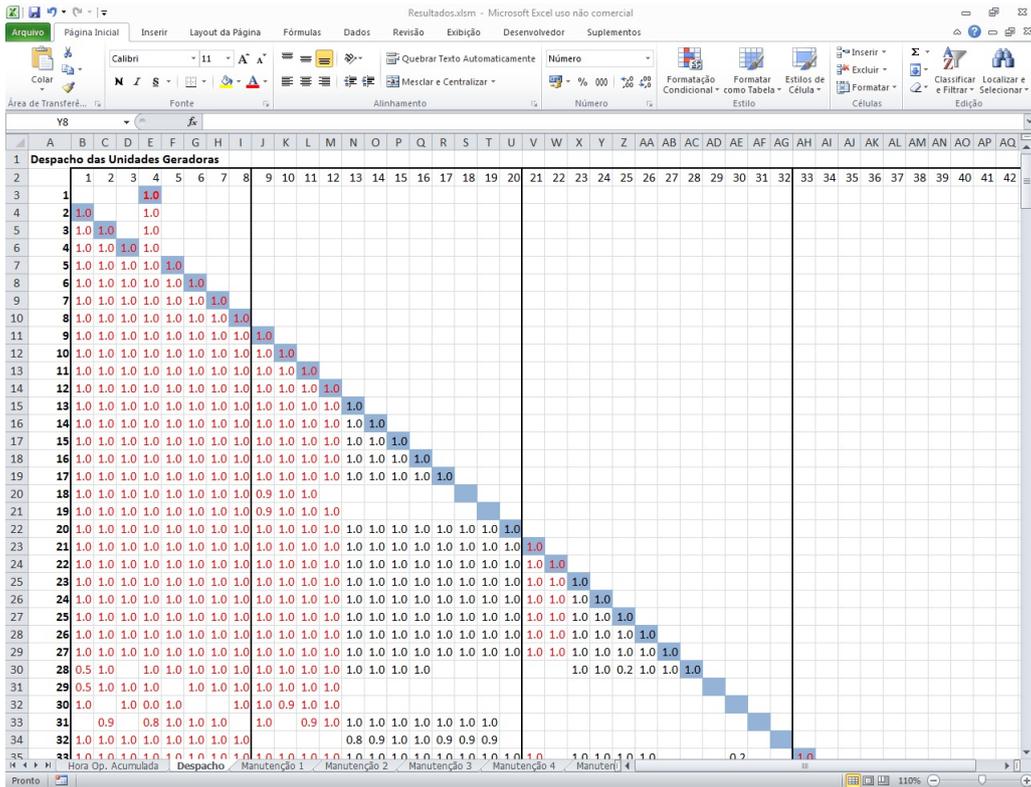


Figura 4.7: Planilha *Resultados.xlsx* - Despacho das Unidades Geradoras

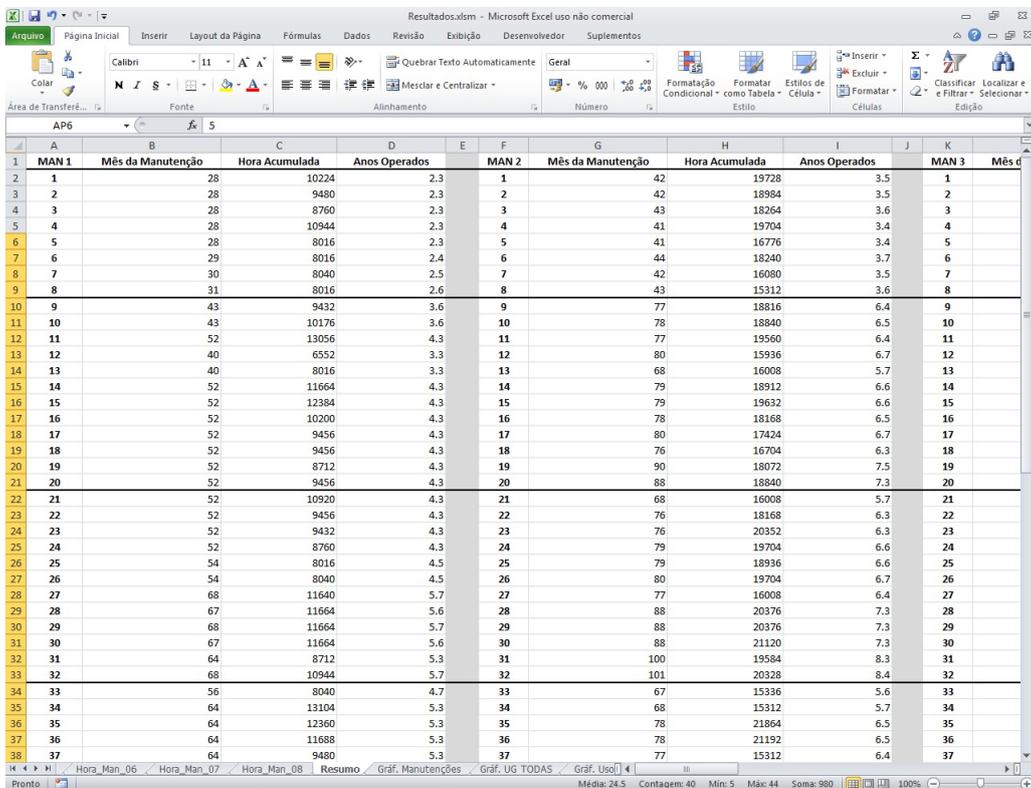


Figura 4.8: Planilha *Resultados.xlsx* - Cronograma Detalhado

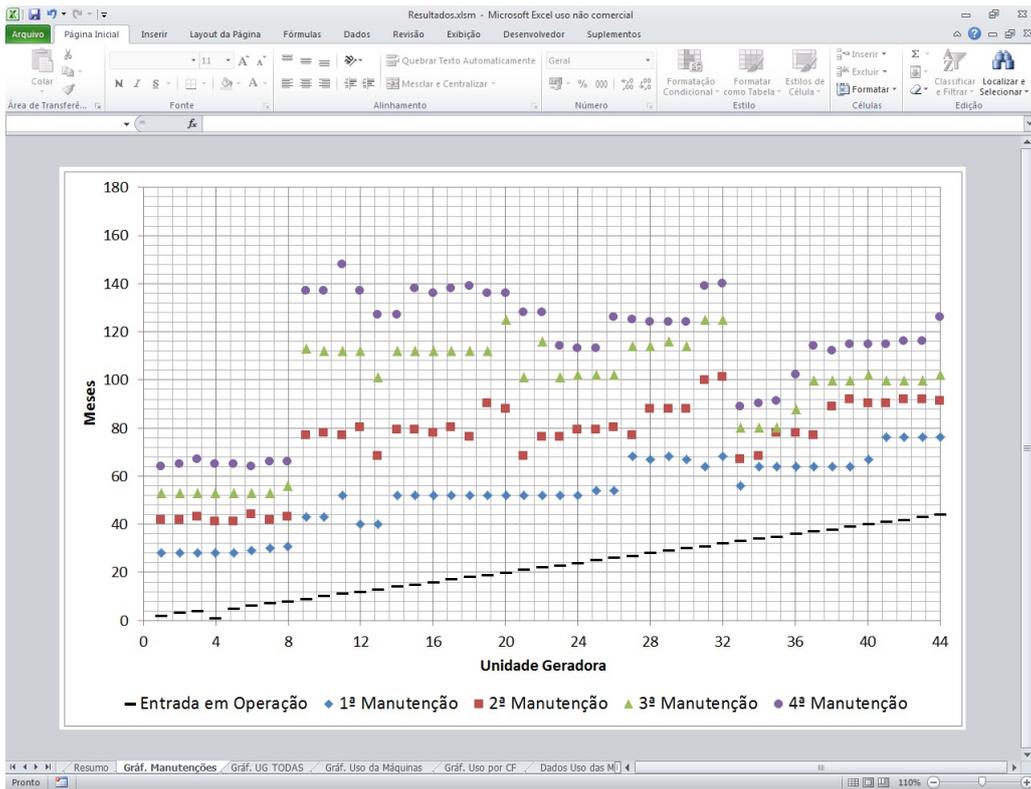


Figura 4.9: Planilha *Resultados.xlsx* - Gráfico do Cronograma

Capítulo 5

Resultados e Discussões

Os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos das simulações do Software AIMMS versão 3.11 (64 bits), utilizando o *solver* CPLEX versão 12.4, em um computador pessoal com as seguintes características:

- Processador: AMD Athlon LE-1620 2.40 GHz
- Memória RAM: 4 GB DDR2 800 MHz
- Sistema Operacional: Windows 7 (64 bits)

5.1 Formulação 1 (F1) - Manutenção em Intervalos de Tempo Pré-fixados

RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

A tabela 5.1 mostra as principais características do problema, como o número de restrições e o número de variáveis, assim como o valor da função objetivo e o tempo de execução.

Tabela 5.1: Características do problema e tempo de execução - F1

Nº de Restrições	297044
Nº de Variáveis Reais	47524
Nº de Variáveis Inteiras	5401
Nº de Iterações	5689
Valor da Função Objetivo	771270
Gap (%)	0.00
Tempo (s)	51.79

O problema foi resolvido de forma exata (Gap = 0) e em menos de um minuto. A tabela 5.2 mostra o número de profissionais necessários, definido pelo modelo, para que o cronograma proposto seja executado.

Tabela 5.2: Quantidade de técnicos necessários para o cronograma proposto - F1

Profissional	Quantidade
Eletromecânico Sênior	9
Eletromecânico Júnior	9
Eletroeletrônico Sênior	4
Eletroeletrônico Júnior	4

A figura 5.1 mostra o cronograma de manutenção proposto. Na tabela 5.3 tem-se um resumo de quantas manutenções são realizadas em cada mês, nos meses onde ocorre ao menos uma manutenção. Observa-se que o número máximo de manutenções ocorrido em um determinado mês foi de 13, sendo 5 manutenções do tipo 1, 4 manutenções do tipo 2 e 4 manutenções do tipo 3. Já em termos de período de manutenção, tem-se o máximo de 44 manutenções realizadas, ocorridas no período compreendido entre os meses 64 e 68, foram realizadas 11 manutenções do tipo 1, 12 manutenções do tipo 2, 12 manutenções do tipo 3 e 9 manutenções do tipo 4. A tabela 5.4 traz o cronograma detalhado, com o mês da realização da manutenção e o número de horas de operação acumulada até o momento da manutenção.

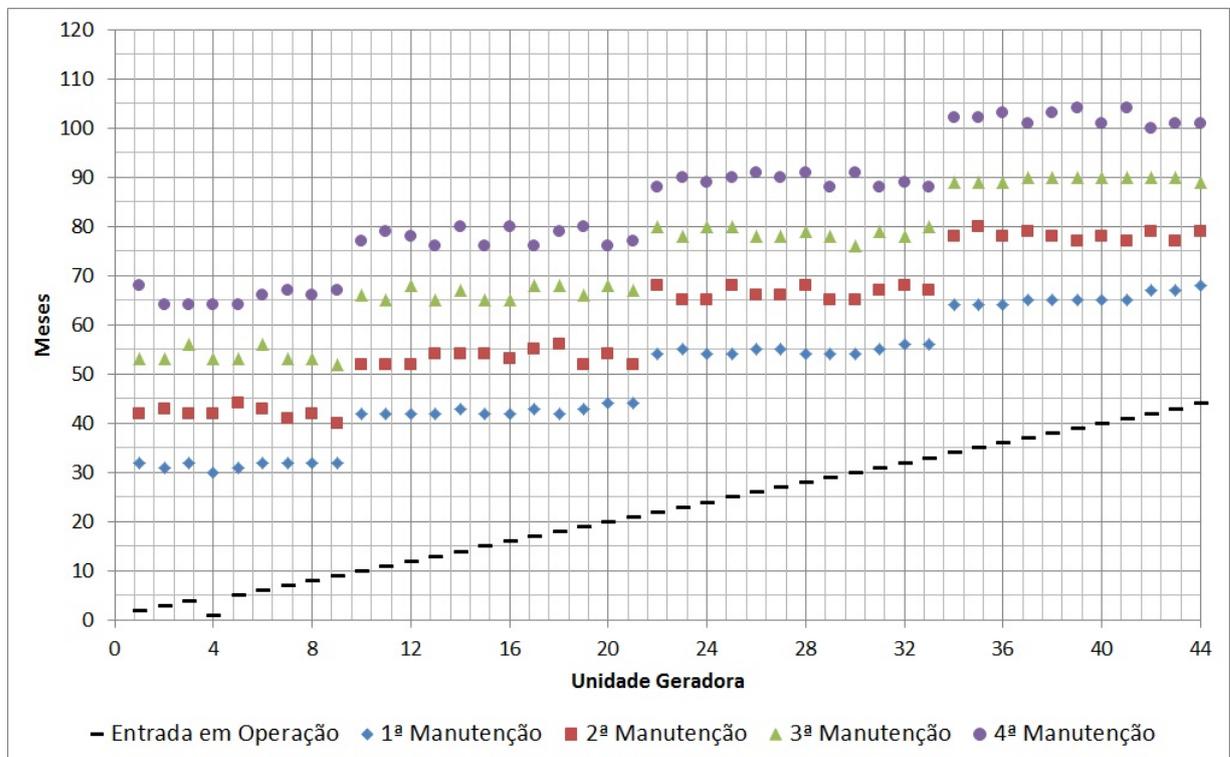


Figura 5.1: Cronograma de manutenção - F1

Tabela 5.3: Resumo do total de manutenções realizadas nos meses - F1

Mês	Man 1	Man 2	Man 3	Man 4	Total
30	1	0	0	0	1
31	2	0	0	0	2
32	6	0	0	0	6
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
40	0	1	0	0	1
41	0	1	0	0	1
42	7	4	0	0	11
43	3	2	0	0	5
44	2	1	0	0	3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
52	0	5	1	0	6
53	0	1	6	0	7
54	6	4	0	0	10
55	4	1	0	0	5
56	2	1	2	0	5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
64	3	0	0	4	7
65	5	4	4	0	13
66	0	2	2	2	6
67	2	2	2	2	8
68	1	4	4	1	10
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
76	0	0	1	4	5
77	0	3	0	2	5
78	0	4	5	1	10
79	0	3	2	2	7
80	0	1	4	3	8
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
88	0	0	0	4	4
89	0	0	4	2	6
90	0	0	7	3	10
91	0	0	0	3	3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
100	0	0	0	1	1
101	0	0	0	4	4
102	0	0	0	2	2
103	0	0	0	2	2
104	0	0	0	2	2

Tabela 5.4: Cronograma detalhado das manutenções com mês e horas de operação acumulada de cada UG - F1

UG	MAN 1		MAN 2		MAN 3		MAN 4	
	MÊS	HOA	MÊS	HOA	MÊS	HOA	MÊS	HOA
1	32	13176	42	19752	53	26304	68	36528
2	31	11688	43	18984	53	25536	64	32808
3	32	11712	42	18288	56	26304	64	31392
4	30	12432	42	19728	53	27024	64	34296
5	31	10224	44	18984	53	24816	64	32088
6	32	10224	43	17520	56	26280	66	32856
7	32	9504	41	15336	53	22632	67	32112
8	32	8760	42	15336	53	22632	66	31392
9	32	5832	40	10176	52	13800	67	15936
10	42	8688	52	12312	66	14472	77	18096
11	42	7224	52	11592	65	13728	79	17352
12	42	7272	52	10896	68	13032	78	16656
13	42	8016	54	12384	65	16008	76	19632
14	43	6552	54	10920	67	14544	80	18168
15	42	5808	54	10896	65	14520	76	18144
16	42	5832	53	10200	65	13824	80	17448
17	43	5088	55	9456	68	12336	76	15960
18	42	4344	56	8712	68	13056	79	16680
19	43	5088	52	9456	66	13800	80	17424
20	44	5832	54	10200	68	14544	76	18168
21	44	5832	52	10200	67	14544	77	18168
22	54	9456	68	13800	80	17424	88	20304
23	55	10176	65	16008	78	21096	90	24720
24	54	9504	65	15336	80	19680	89	23304
25	54	8016	68	13848	80	18216	90	21840
26	55	7296	66	12384	78	16752	91	20376
27	55	6552	66	12384	78	17472	90	21096
28	54	6576	68	12408	79	17496	91	21120
29	54	5088	65	10176	78	15264	88	18888
30	54	5088	65	10920	76	16008	91	19632
31	55	5088	67	9432	79	13056	88	15936
32	56	5856	68	10200	78	13824	89	17448
33	56	8040	67	15336	80	24096	88	29184
34	64	13104	78	22608	89	29904	102	38664
35	64	12360	80	23328	89	29160	102	37920
36	64	11688	78	21192	89	28488	103	37968
37	65	10224	79	16056	90	22608	101	27696
38	65	9504	78	15336	90	21888	103	26976
39	65	8760	77	14592	90	21144	104	26232
40	65	8040	78	13872	90	20424	101	25512
41	65	7296	77	13128	90	19680	104	24768
42	67	6552	79	12384	90	18936	100	24024
43	67	6552	77	12384	90	18936	101	24024
44	68	6552	79	12384	89	18936	101	24024

Na figura 5.2 tem-se um resumo do número de horas de operação acumulada (HOA) mínima, média e máxima das unidade geradoras por tipo de manutenção. Por exemplo, as manutenções do tipo 1 foram realizadas em média com 8.102 HOA, porém o número mínimo de HOA em que foi realizada a manutenção do tipo 1 em uma determinada UG foi de 4.344 HOA e o número máximo foi de 13.176 HOA.

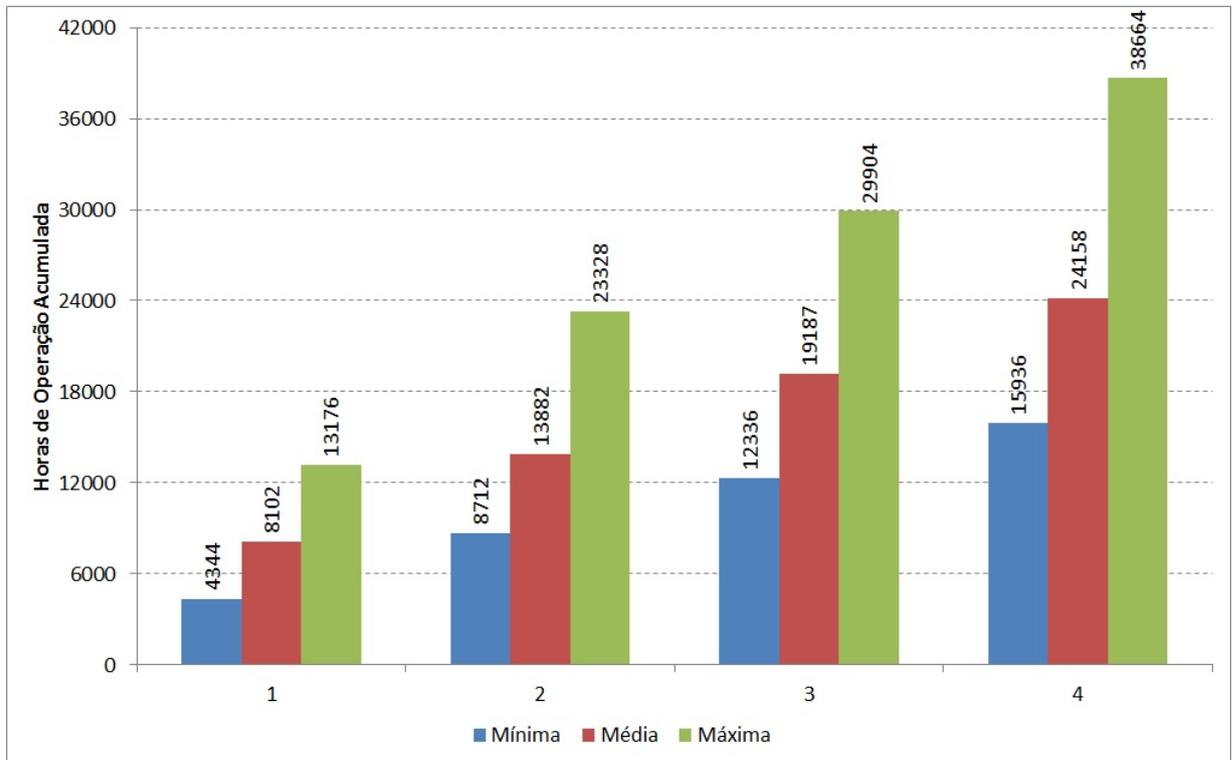


Figura 5.2: Horas de operação acumulada mínima, média e máxima das unidades geradoras em cada manutenção - F1

Na figura 5.3 tem-se a distribuição do uso médio das unidades geradoras de quatro e cinco pás ao longo do ano. Pode-se observar que o modelo está respondendo de forma correta, pois as unidades geradoras de cinco pás estão sendo mais utilizadas no período seco. Já a figura 5.4 mostra a distribuição do uso médio das unidades geradoras por casa de força. Neste gráfico é possível notar que as unidades geradoras da casa de força 1 e 4 são mais utilizadas que as demais, conforme especificado na prioridade de despacho das máquinas.

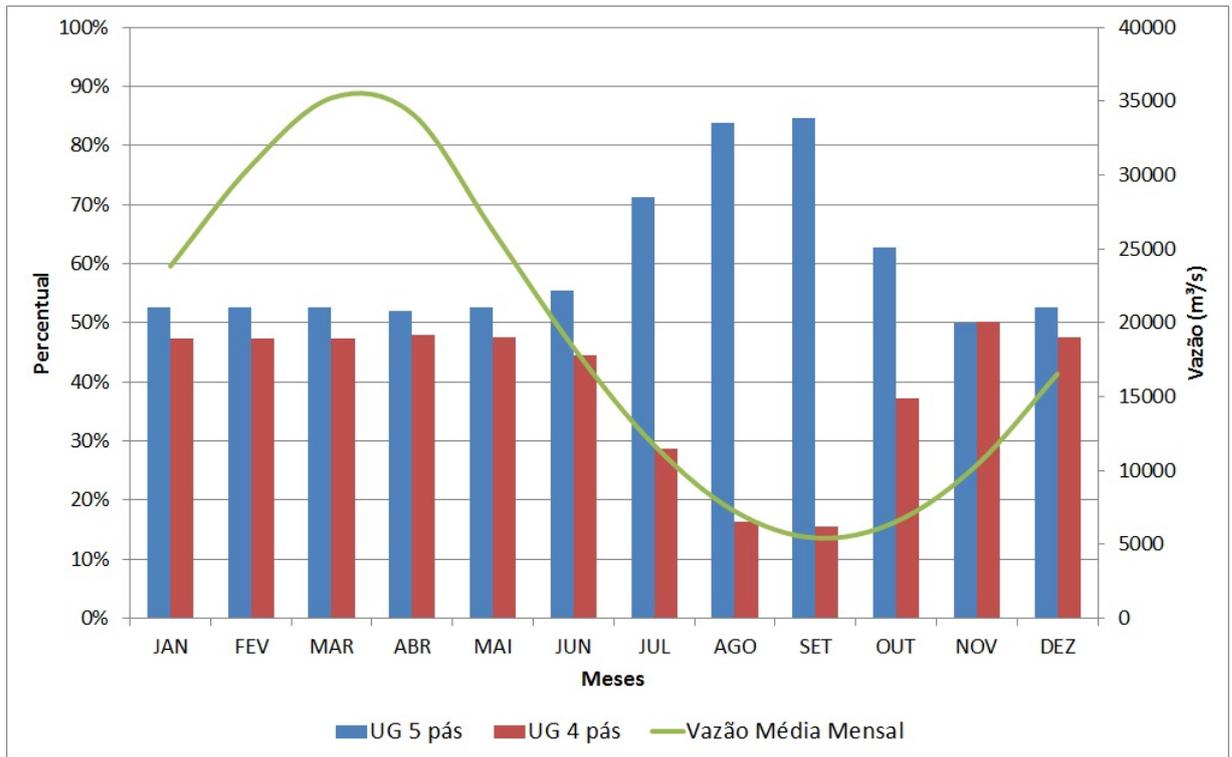


Figura 5.3: Uso das máquinas de 5 e 4 pás - F1

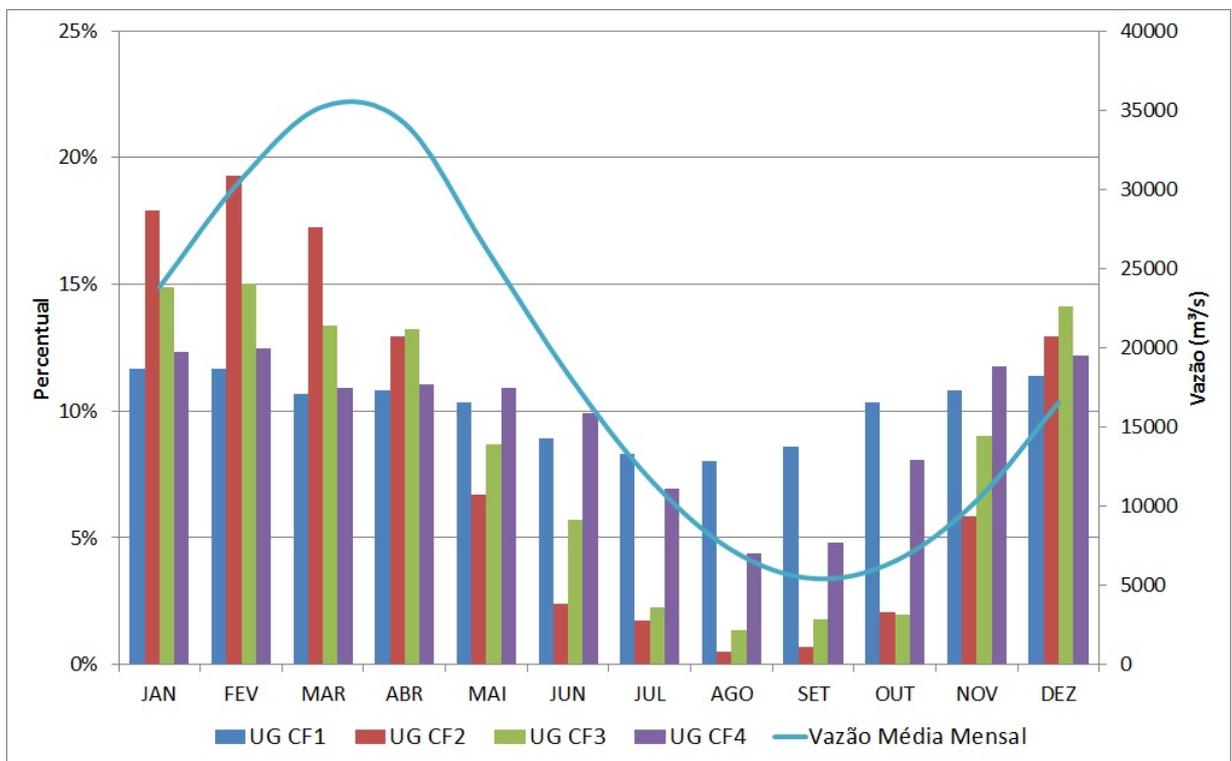


Figura 5.4: Uso das máquinas por casa de força - F1

5.2 Formulação 2 (F2) - Manutenção em Função das Horas de Operação

INTERVALO PARA AS MANUTENÇÕES PREVENTIVAS

Para esta formulação as manutenções preventivas são realizadas após as unidades geradoras atingirem um determinado número de horas de operação. Sendo assim, adotou-se os intervalos apresentados na tabela 5.5 para a realização das manutenções preventivas.

Tabela 5.5: Manutenções preventivas a serem realizadas - F2

Manutenção	HOA Mínima	HOA Máxima	Duração
1	8.000	16.000	3 dias
2	16.000	24.000	7 dias
3	24.000	32.000	3 dias
4	32.000	40.000	10 dias

RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

A tabela 5.6 mostra as principais características do problema, como o número de restrições e o número de variáveis, assim como o valor da função objetivo e o tempo de execução.

Tabela 5.6: Características do problema e tempo de execução - F2

Nº de Restrições	548277
Nº de Variáveis Reais	95225
Nº de Variáveis Inteiras	39600
Nº de Iterações	1733382
Valor da Função Objetivo	976858,1976
Gap (%)	0.11
Tempo (s)	89751.38

O problema foi interrompido após 25 horas e encontrou uma solução com um Gap de 0,11%. Devido a relaxação realizada nas variáveis, algumas variáveis relacionadas à manutenção ($MANx_{(u,t)}$) apresentaram valores reais entre 0 e 1. Para resolver este problema, aplicou-se a seguinte regra: se o valor da variável for menor que 0.5 atribui-se valor 0 (zero) para a variável, e se o valor da variável for maior ou igual a 0.5 atribui-se valor 1 (um) para a variável. Isto ocorreu apenas com 13 de um total de 176 variáveis, sendo 8 variáveis relacionadas à manutenção do tipo 1 e 5 variáveis relacionadas à manutenção do tipo 2.

A tabela 5.7 mostra o número de profissionais necessários para a realização do cronograma de manutenção proposto. Arredondando-se os valores, serão necessários 11 eletromecânicos sênior, 11 eletromecânicos júnior, 5 eletroeletrônicos sênior e 5 eletroeletrônicos júnior.

Tabela 5.7: Quantidade de técnicos necessários para o cronograma proposto - F2

Profissional	Quantidade
Eletromecânico Sênior	10,3
Eletromecânico Júnior	10,3
Eletroeletrônico Sênior	5
Eletroeletrônico Júnior	5

A figura 5.5 mostra o cronograma de manutenção proposto. Na tabela 5.8 tem-se um resumo de quantas manutenções são realizadas em cada mês, nos meses onde ocorre ao menos uma manutenção. Observa-se que o número máximo de manutenções ocorrido em um determinado mês foi de 14, sendo 2 manutenções do tipo 1, 6 manutenções do tipo 2 e 6 manutenções do tipo 3. Já em termos de período de manutenção, tem-se dois períodos com o máximo de 29 manutenções realizadas. No primeiro período, compreendido entre os meses 52 e 56, foram realizadas 12 manutenções do tipo 1, 8 manutenções do tipo 2, 9 manutenções do tipo 3 e nenhuma manutenções do tipo 4. No segundo período, compreendido entre os meses 64 e 68, foram realizadas 8 manutenções do tipo 1, 13 manutenções do tipo 2, 1 manutenções do tipo 3 e 7 manutenções do tipo 4. A tabela 5.9 traz o cronograma detalhado, com o mês da realização da manutenção e o número de horas de operação acumulada até o momento da manutenção.

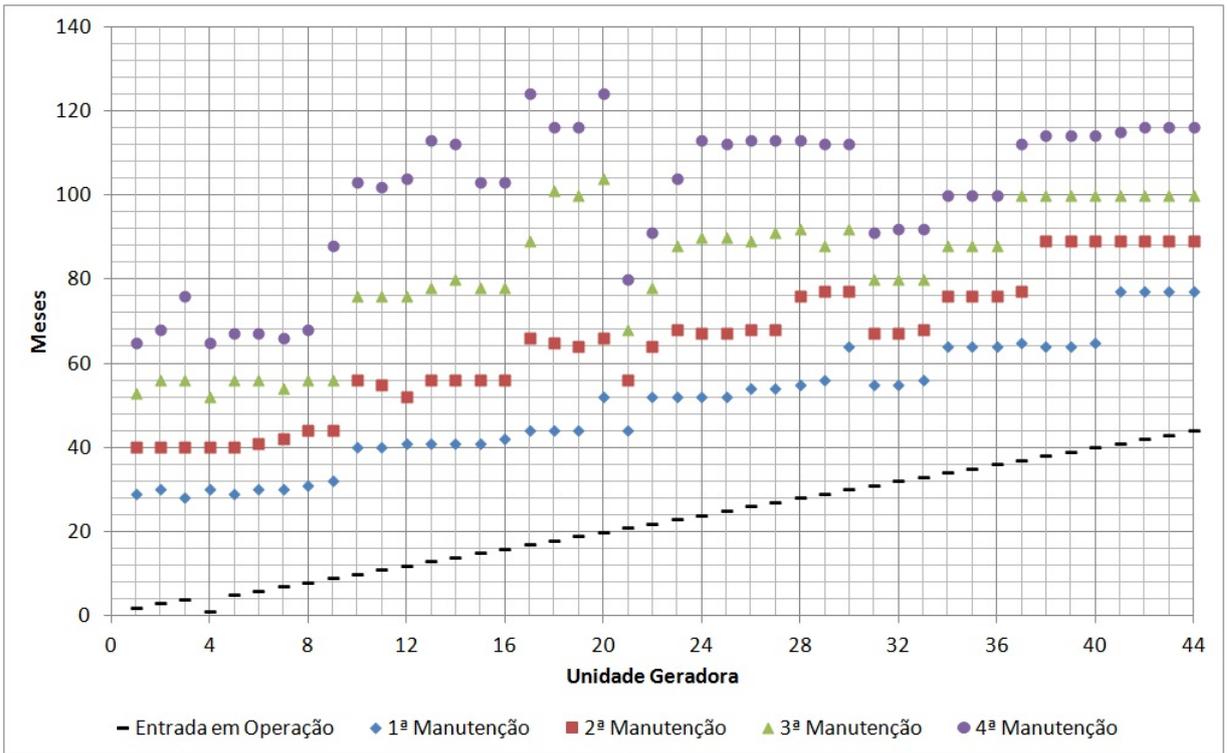


Figura 5.5: Cronograma de manutenção - F2

Tabela 5.8: Resumo do total de manutenções realizadas nos meses - F2

Mês	Man 1	Man 2	Man 3	Man 4	Total
28	1	0	0	0	1
29	2	0	0	0	2
30	4	0	0	0	4
31	1	0	0	0	1
32	1	0	0	0	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
40	2	5	0	0	7
41	4	1	0	0	5
42	1	1	0	0	2
43	0	0	0	0	0
44	4	2	0	0	6
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
52	5	1	1	0	7
53	0	0	1	0	1
54	2	0	1	0	3
55	3	1	0	0	4
56	2	6	6	0	14
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
64	6	2	0	0	8
65	2	1	0	2	5
66	0	2	0	1	3
67	0	4	0	2	6
68	0	4	1	2	7
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
76	0	4	3	1	8
77	4	3	0	0	7
78	0	0	4	0	4
79	0	0	0	0	0
80	0	0	4	1	5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
88	0	0	5	1	6
89	0	7	2	0	9
90	0	0	2	0	2
91	0	0	1	2	3
92	0	0	2	2	4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
100	0	0	9	3	12
101	0	0	1	0	1
102	0	0	0	1	1
103	0	0	0	3	3
104	0	0	1	2	3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
112	0	0	0	5	5
113	0	0	0	5	5
114	0	0	0	3	3
115	0	0	0	1	1
116	0	0	0	5	5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
124	0	0	0	2	2

Tabela 5.9: Cronograma detalhado das manutenções com mês e horas de operação acumulada de cada UG - F2

UG	MAN 1		MAN 2		MAN 3		MAN 3	
	MÊS	HOA	MÊS	HOA	MÊS	HOA	MÊS	HOA
1	29	5649	40	17496	53	24000	65	32000
2	30	10968	40	17464	56	24736	68	32000
3	28	8760	41	537	56	24000	76	32000
4	30	12383	40	18818	52	24720	65	32000
5	29	8760	40	16000	56	24704	67	32000
6	30	8760	41	16056	56	24704	67	32000
7	30	8040	42	16080	54	24000	66	32000
8	31	8016	44	16492	56	24000	68	32000
9	32	8040	44	16000	56	24000	88	32000
10	40	11600	56	16000	76	24000	103	32000
11	41	500	55	16000	76	24000	102	32000
12	41	10381	52	16000	76	24000	104	32000
13	41	10045	56	16000	78	24000	113	32000
14	41	9424	56	16000	80	24000	112	32000
15	41	8747	56	16000	78	24000	103	32000
16	42	7768	56	16000	78	24000	103	32000
17	44	8000	66	16000	89	24000	124	32720
18	44	8000	65	16000	101	24000	116	32000
19	44	8000	64	16000	100	24710	116	32000
20	52	10880	66	16000	104	24000	124	33464
21	44	8000	56	16000	68	24000	80	32000
22	52	10208	64	16000	78	24040	91	32000
23	52	10459	68	16000	88	26912	104	32000
24	52	9722	67	16000	90	24000	113	32008
25	52	9480	67	16000	90	24000	112	32000
26	54	8940	68	16000	89	24000	113	32431
27	54	8737	68	16000	91	24000	113	32712
28	55	8000	77	375	92	24000	113	32355
29	56	8000	77	18192	88	24000	112	32000
30	64	11616	77	17448	92	24000	112	32000
31	55	8000	67	16000	80	24744	91	32000
32	55	8016	67	16000	80	24744	92	32000
33	56	8000	68	16000	80	24040	92	32000
34	64	8764	76	16000	88	24016	100	32000
35	64	8000	76	16016	88	24032	100	32000
36	64	8490	76	16056	88	24072	100	32000
37	65	9403	77	16000	100	27055	112	32143
38	64	8000	89	20157	100	25464	114	32040
39	64	8000	89	19024	100	25424	114	32000
40	65	8000	89	19024	100	25424	114	32000
41	77	13064	89	19616	100	24704	115	32000
42	77	12360	89	18912	100	24000	116	32040
43	77	12360	89	18912	100	24000	116	32040
44	77	12360	89	18912	100	24000	116	32040

Na figura 5.6 tem-se um resumo do número de horas de operação acumulada (HOA) mínima, média e máxima das unidades geradoras por tipo de manutenção. Por exemplo, as manutenções do tipo 1 foram realizadas em média com 9.552 HOA, porém o número mínimo de HOA em que foi realizada a manutenção do tipo 1 em uma determinada UG foi de 8.000 HOA e o número máximo foi de 13.064 HOA.

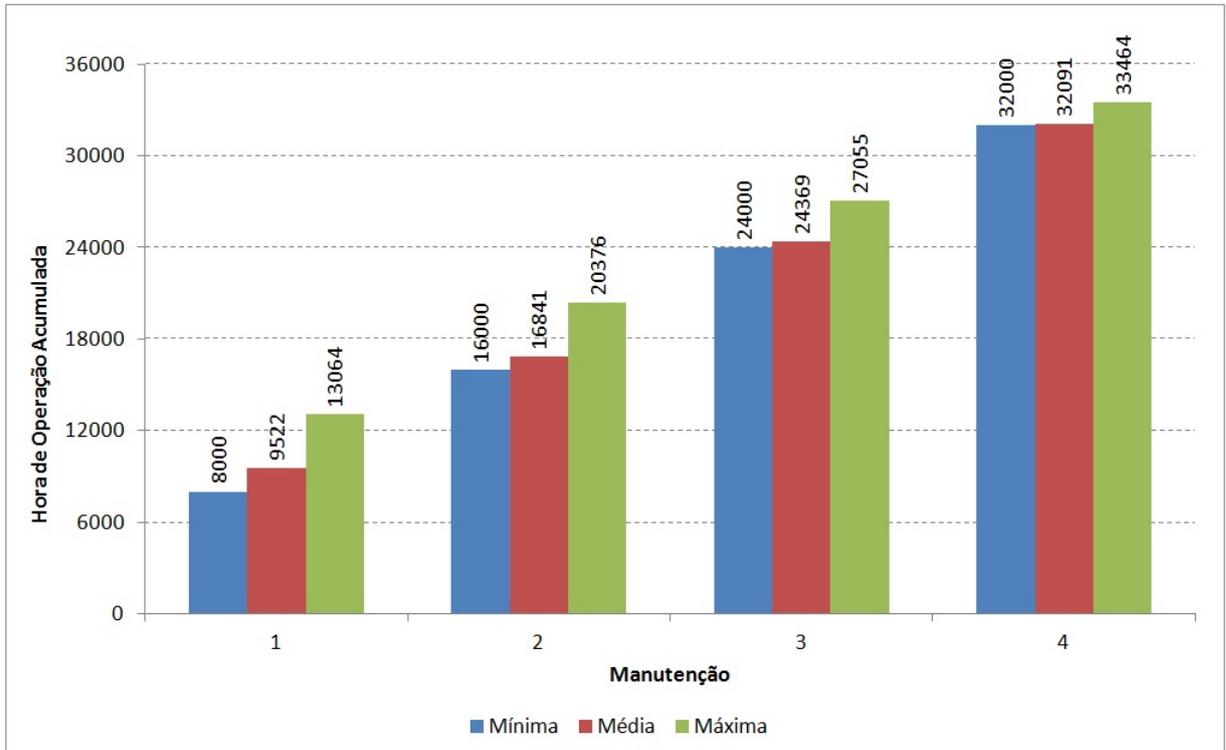


Figura 5.6: Horas de operação acumulada mínima, média e máxima das unidades geradoras em cada manutenção - F2

Na figura 5.7 tem-se a distribuição do uso médio das unidades geradoras de quatro e cinco pás ao longo do ano. Pode-se observar que o modelo está respondendo de forma correta, pois, as unidades geradoras de quatro pás são pouco utilizadas no período seco. Já a figura 5.8 mostra a distribuição do uso médio das unidades geradoras por casa de força. Neste gráfico é possível notar que as unidades geradoras da casa de força 1 e 4 são mais utilizadas que as demais, conforme especificado na prioridade de despacho das máquinas.

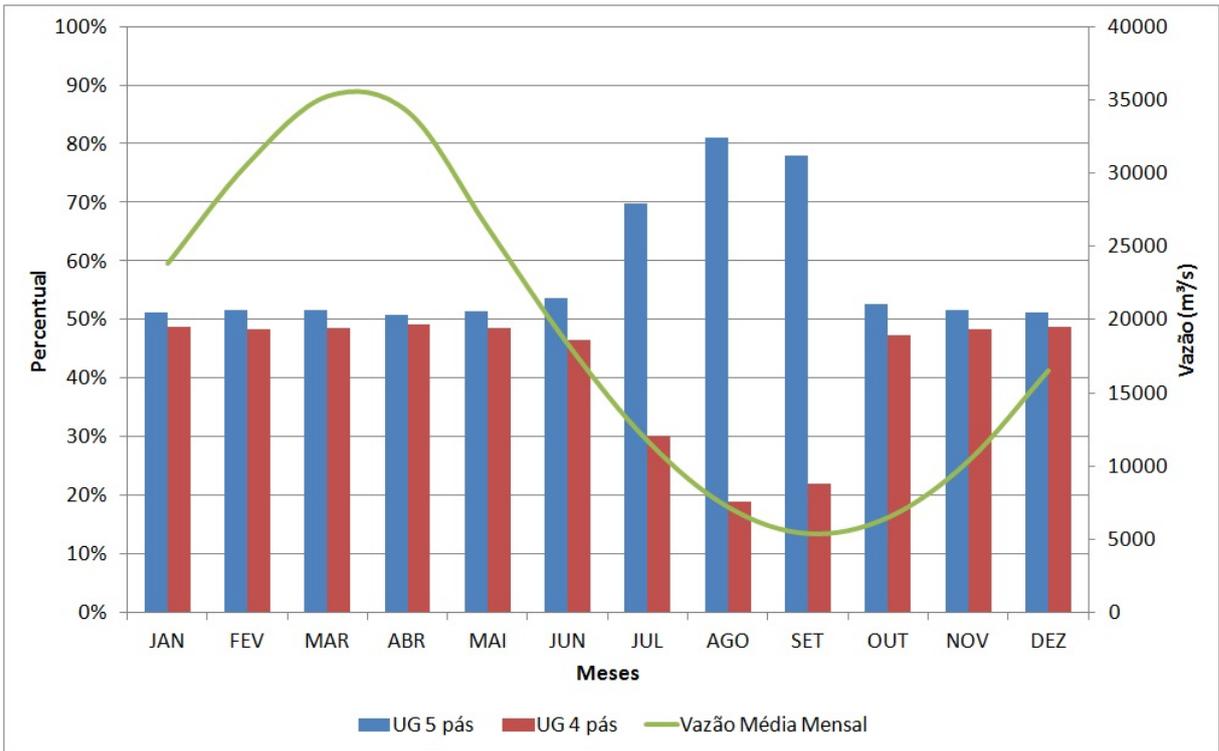


Figura 5.7: Uso das máquinas de 5 e 4 pás - F2

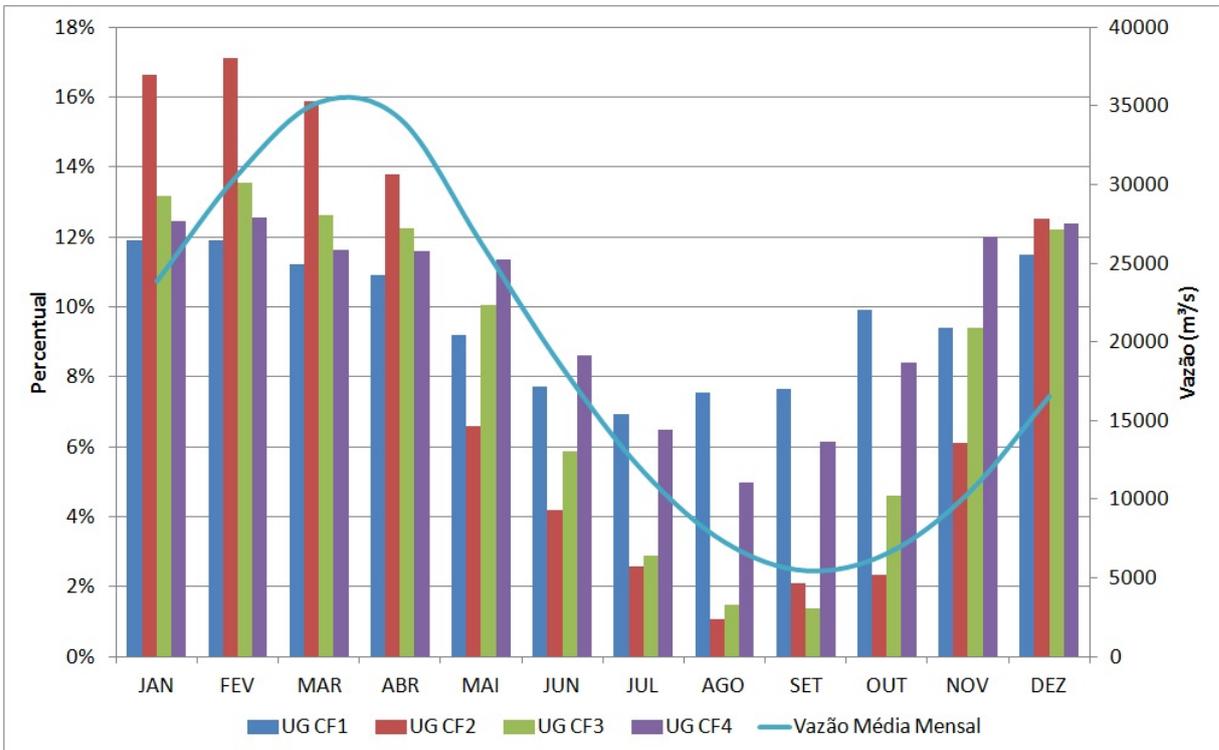


Figura 5.8: Uso das máquinas por casa de força - F2

5.3 Formulação 3 (F3) - Problema Dividido em Duas Etapas

INTERVALO PARA AS MANUTENÇÕES PREVENTIVAS

Para esta formulação as manutenções preventivas são realizadas após as unidades geradoras atingirem um determinado número de horas de operação. Sendo assim, adotou-se os intervalos apresentados na tabela 5.10 para a realização das manutenções preventivas.

Tabela 5.10: Manutenções preventivas a serem realizadas - F3

Manutenção	HOA Mínima	HOA Máxima	Duração
1	8.000	16.000	3 dias
2	16.000	24.000	7 dias
3	24.000	32.000	3 dias
4	32.000	40.000	10 dias

RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

A tabela 5.11 mostra as principais características do problema, como o número de restrições e o número de variáveis, assim como o valor da função objetivo e o tempo de execução.

Tabela 5.11: Características do problema e tempo de execução - F3

Parâmetro	Primeira Etapa	Segunda Etapa
Nº de Restrições	372.421	572.207
Nº de Variáveis Reais	8.101	8.101
Nº de Variáveis Inteiras	7.920	71.284
Nº de Iterações	1	14.547
Valor da Função Objetivo	963.501	1391928,194
Gap (%)	0.00	0.00
Tempo (s)	1,26	51.59

Tanto o problema da primeira etapa, quanto o da segunda foram resolvidos de maneira exata. O problema da primeira etapa é resolvido em menos de 2 segundos, já o problema da segunda etapa foi resolvido em 52 segundos.

A tabela 5.12 mostra a quantidade de técnicos necessários para a realização do cronograma proposto.

Tabela 5.12: Quantidade de técnicos necessários para o cronograma proposto - F3

Profissional	Quantidade
Eletromecânico Sênior	12
Eletromecânico Júnior	12
Eletroeletrônico Sênior	6
Eletroeletrônico Júnior	6

A figura 5.9 mostra o cronograma de manutenção proposto. Na tabela 5.13 tem-se um resumo de quantas manutenções são realizadas em cada mês, nos meses onde ocorre ao menos uma manutenção. Observa-se que o número máximo de manutenções ocorridas em um determinado mês foi de 18, e este fato ocorreu em dois meses, sendo que na primeira ocorrência foram realizadas 13 manutenções do tipo 1 e 5 manutenções do tipo 3, já na segunda ocorrência foram realizadas 2 manutenções do tipo 2, 14 manutenções do tipo 3 e 2 manutenções do tipo 4. Já em termos de período de manutenção, tem-se o máximo de 25 manutenções realizadas no período compreendido entre os meses 112 e 116, sendo 15 manutenções do tipo 3 e 12 manutenções do tipo 4. A tabela 5.14 traz o cronograma detalhado, com o mês da realização da manutenção e o número de horas de operação acumulada até o momento da manutenção.

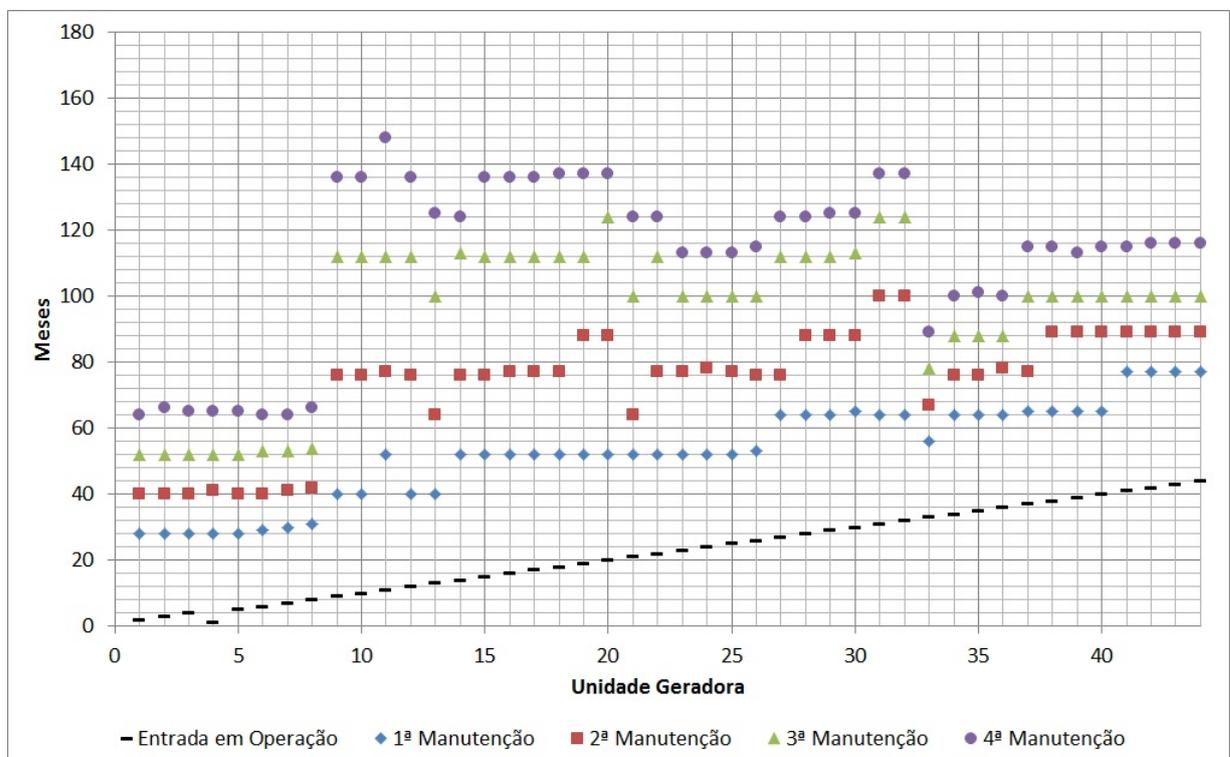


Figura 5.9: Cronograma de manutenção - F3

Tabela 5.13: Resumo do total de manutenções realizadas nos meses - F3

Mês	Man 1	Man 2	Man 3	Man 4	Total
28	5	0	0	0	5
29	1	0	0	0	1
30	1	0	0	0	1
31	1	0	0	0	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
40	4	5	0	0	9
41	0	2	0	0	2
42	0	1	0	0	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
52	13	0	5	0	18
53	1	0	2	0	3
54	0	0	1	0	1
55	0	0	0	0	0
56	1	0	0	0	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
64	8	2	0	3	13
65	5	0	0	3	8
66	0	0	0	2	2
67	0	1	0	0	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
76	0	9	0	0	9
77	4	8	0	0	12
78	0	2	1	0	3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
88	0	5	3	0	8
89	0	7	0	1	8
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
100	0	2	14	2	18
101	0	0	0	1	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
112	0	0	13	0	13
113	0	0	2	4	6
114	0	0	0	0	0
115	0	0	0	5	5
116	0	0	0	3	3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
124	0	0	3	5	8
125	0	0	0	3	3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
136	0	0	0	6	6
137	0	0	0	5	5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
148	0	0	0	1	1

Tabela 5.14: Cronograma detalhado das manutenções com mês e horas de operação acumulada de cada UG - F3

UG	MAN 1		MAN 2		MAN 3		MAN 3	
	MÊS	HOA	MÊS	HOA	MÊS	HOA	MÊS	HOA
1	28	10224	40	18240	52	24792	64	32064
2	28	9480	40	17496	52	24048	66	33552
3	28	8760	40	16776	52	23328	65	32088
4	28	10944	41	19704	52	25512	65	34272
5	28	8016	40	16032	52	23328	65	31368
6	29	8016	40	15288	53	24048	64	31320
7	30	8040	41	15336	53	22632	64	29904
8	31	8016	42	15312	54	23352	66	30672
9	40	10176	76	19560	112	26784	136	34752
10	40	10176	76	18840	112	26064	136	33288
11	52	13800	77	20304	112	27528	148	39120
12	40	7296	76	16680	112	23904	136	32592
13	40	8016	64	16008	100	24720	125	33408
14	52	10920	76	18168	113	27552	124	31152
15	52	12384	76	19632	112	28992	136	38424
16	52	10200	77	18168	112	27528	136	36960
17	52	9456	77	17424	112	25392	136	34080
18	52	10200	77	17448	112	25344	137	34776
19	52	9456	88	18816	112	25296	137	35472
20	52	10200	88	19584	124	29736	137	34824
21	52	10920	64	16008	100	26880	124	38520
22	52	9456	77	20376	112	30480	124	37752
23	52	9432	77	20352	100	27600	113	33432
24	52	8760	78	18960	100	26208	113	32040
25	52	8016	77	19680	100	26928	113	32760
26	53	8040	76	18960	100	26208	115	33504
27	64	11640	76	16008	112	28344	124	34176
28	64	11664	88	19632	112	28344	124	34176
29	64	10920	88	19632	112	28344	125	36360
30	65	10920	88	19632	113	29088	125	35640
31	64	9456	100	20328	124	32688	137	37776
32	64	9456	100	19584	124	31944	137	37776
33	56	8040	67	15336	78	22632	89	29928
34	64	13104	76	21120	88	29136	100	37152
35	64	12360	76	20376	88	28392	101	37152
36	64	11688	78	21192	88	27744	100	35760
37	65	10224	77	16056	100	27696	115	34992
38	65	9504	89	21888	100	26976	115	34272
39	65	8760	89	21144	100	26232	113	32064
40	65	8040	89	20424	100	25512	115	32808
41	77	13128	89	19680	100	24768	115	32064
42	77	12384	89	18936	100	24024	116	32064
43	77	12384	89	18936	100	24024	116	32064
44	77	12384	89	18936	100	24024	116	32064

Na figura 5.10 tem-se um resumo do número de horas de operação acumulada (HOA) mínima, média e máxima das unidades geradoras por tipo de manutenção. Por exemplo, as manutenções do tipo 1 foram realizadas em média com 10.101 HOA, porém o número mínimo de HOA em que foi realizada a manutenção do tipo 1 em uma determinada UG foi de 7.296 HOA e o número máximo foi de 13.800 HOA.

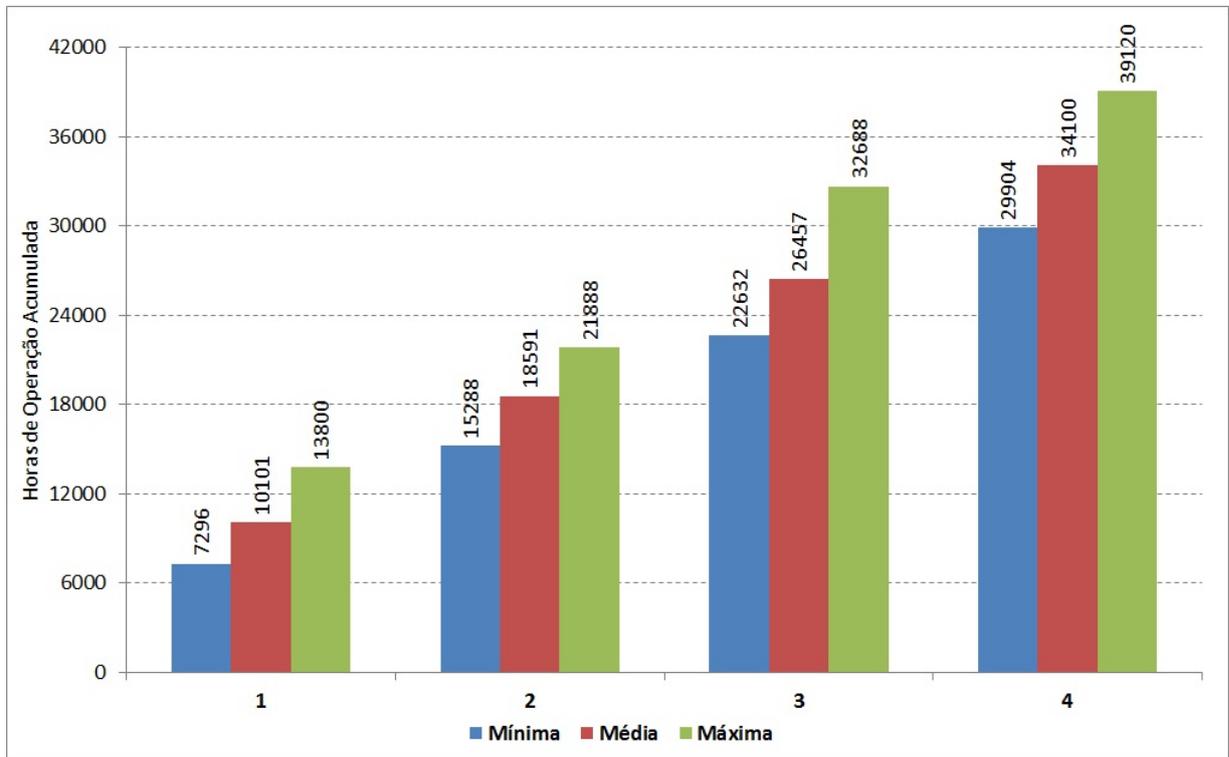


Figura 5.10: Horas de operação acumulada mínima, média e máxima das unidades geradoras em cada manutenção - F3

Na figura 5.11 temos a distribuição do uso médio das unidades geradoras de quatro e cinco pás ao longo do ano. Pode-se observar que o modelo está respondendo de forma correta, pois, as unidades geradoras de cinco pás estão sendo mais utilizadas no período seco. Já a figura 5.12 mostra a distribuição do uso médio das unidades geradoras por casa de força. Neste gráfico é possível notar que as unidades geradoras da casa de força 1 e 4 são mais utilizadas que as demais, conforme especificado na prioridade de despacho das máquinas.

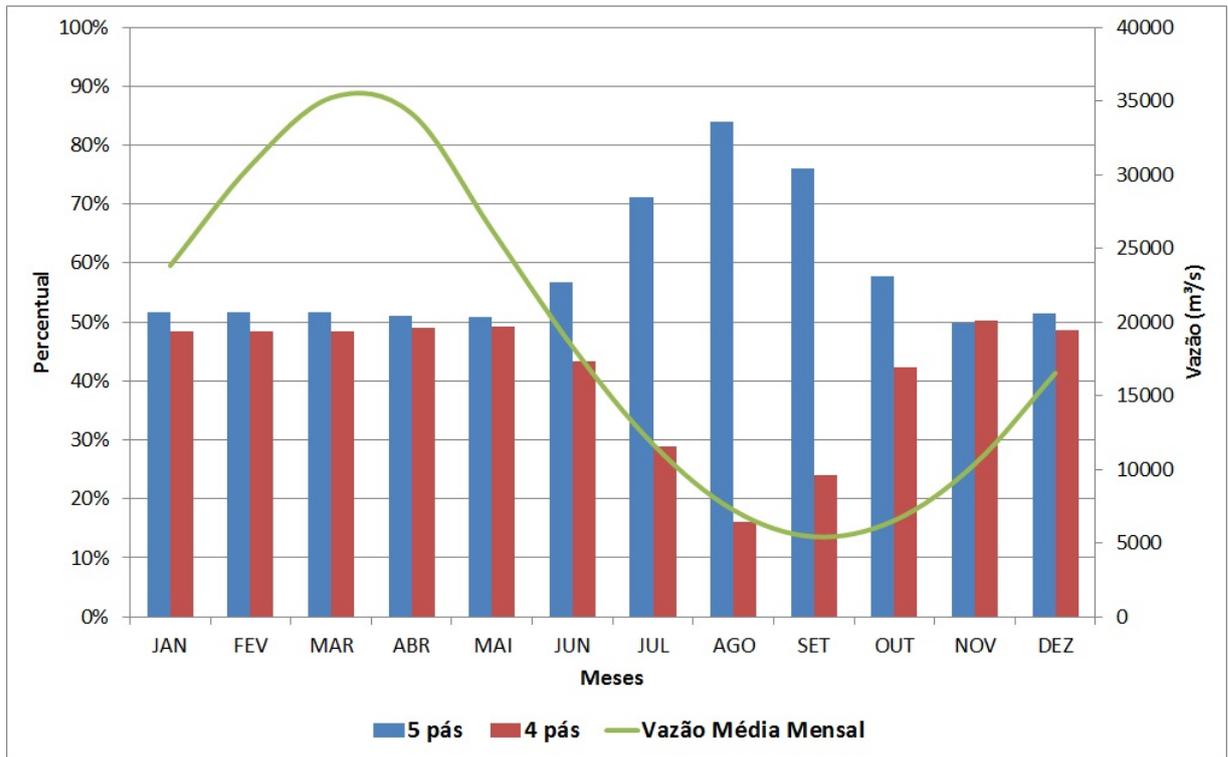


Figura 5.11: Uso das máquinas de 5 e 4 pás - F3

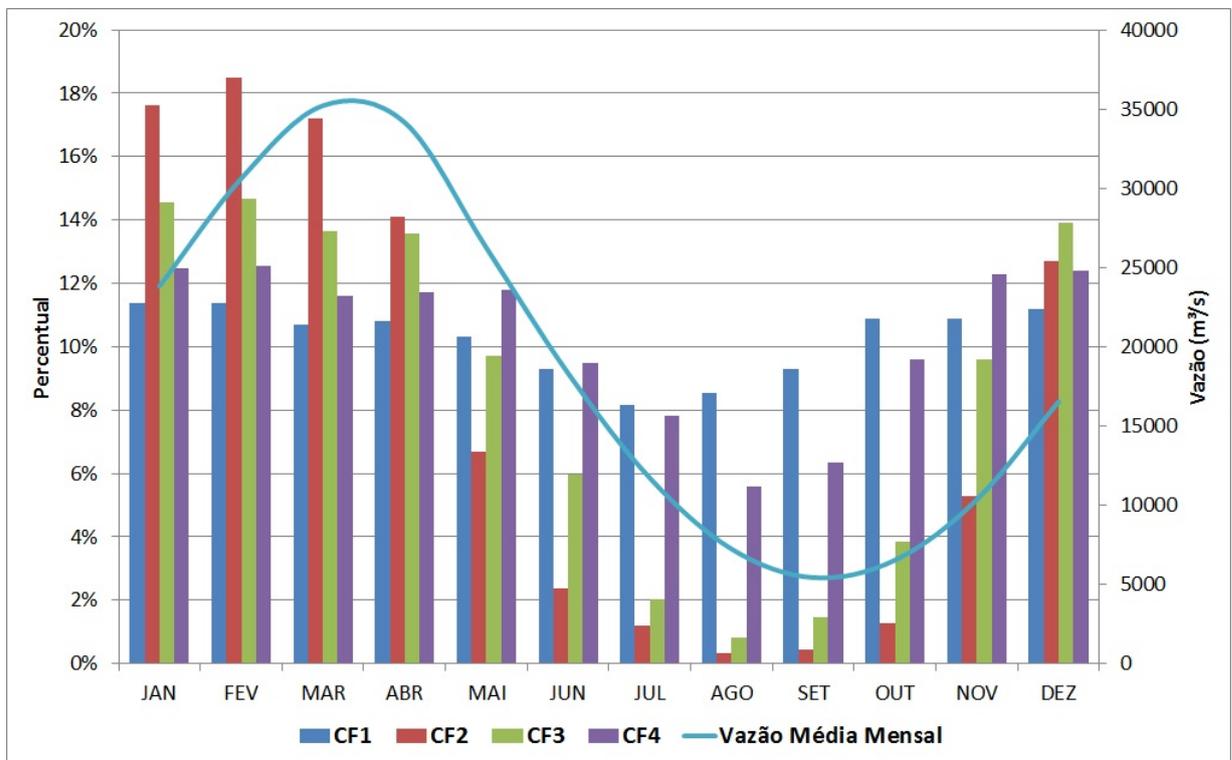


Figura 5.12: Uso das máquinas por casa de força - F3

A figura 5.13 mostra a diferença que ocorre no número de horas de operação acumulada entre a primeira e a segunda etapa. Observou-se que 26 unidades gera-

doras tiveram uma redução no número de HOA, 3 unidades não tiveram alteração e 15 unidades geradoras tiveram um aumento no número de HOA. De modo geral as unidades geradoras com maior prioridade de despacho tiveram seu número de HOA reduzido, pois, tiveram que parar em 4 meses ao longo do período analisado para a realização das manutenções preventivas. Consequentemente, as unidades geradoras com menor prioridade de despacho tiveram seu número de HOA aumentado, pois essas unidades foram despachadas em substituição das unidades de maior prioridade.

CASA DE FORÇA	UNIDADE GERADORA	HOA 1ª ETAPA	HOA 2ª ETAPA	DIFERENÇA (2ª ETAPA - 1ª ETAPA)	DIFERENÇA EM MESES	
CASA DE FORÇA 1	UG1	110856	107928	↓	-2928	-4.1
	UG2	111648	108672	↓	-2976	-4.1
	UG3	106560	107904	↑	1344	1.9
	UG4	112368	110808	↓	-1560	-2.2
	UG5	108624	107976	↓	-648	-0.9
	UG6	109416	107184	↓	-2232	-3.1
	UG7	106464	108000	↑	1536	2.1
	UG8	104304	104304	→	0	0.0
	MÉDIA	108780	107847	↓	-933	-1.3
CASA DE FORÇA 2	UG9	42576	45552	↑	2976	4.1
	UG10	43320	42600	↓	-720	-1.0
	UG11	41112	45552	↑	4440	6.2
	UG12	42648	42648	→	0	0.0
	UG13	50688	50784	↑	96	0.1
	UG14	50736	49248	↓	-1488	-2.1
	UG15	47112	51432	↑	4320	6.0
	UG16	48528	49248	↑	720	1.0
	UG17	48528	46368	↓	-2160	-3.0
	UG18	47808	47064	↓	-744	-1.0
	UG19	47760	48504	↑	744	1.0
	UG20	45624	47856	↑	2232	3.1
	MÉDIA	46370	47238	↑	868	1.2
CASA DE FORÇA 3	UG21	57384	57384	→	0	0.0
	UG22	53688	59568	↑	5880	8.2
	UG23	67632	63936	↓	-3696	-5.1
	UG24	64728	63288	↓	-1440	-2.0
	UG25	64728	65448	↑	720	1.0
	UG26	64008	65448	↑	1440	2.0
	UG27	63960	60336	↓	-3624	-5.0
	UG28	59592	59616	↑	24	0.0
	UG29	61032	62472	↑	1440	2.0
	UG30	61800	60336	↓	-1464	-2.0
	UG31	49344	53760	↑	4416	6.1
	UG32	48600	52272	↑	3672	5.1
	MÉDIA	59708	60322	↑	614	0.9
CASA DE FORÇA 4	UG33	98520	95592	↓	-2928	-4.1
	UG34	97776	94800	↓	-2976	-4.1
	UG35	96312	94056	↓	-2256	-3.1
	UG36	96360	92688	↓	-3672	-5.1
	UG37	76536	75792	↓	-744	-1.0
	UG38	75816	75072	↓	-744	-1.0
	UG39	75072	74328	↓	-744	-1.0
	UG40	74352	73608	↓	-744	-1.0
	UG41	73608	72864	↓	-744	-1.0
	UG42	72864	72144	↓	-720	-1.0
	UG43	72864	72144	↓	-720	-1.0
	UG44	72864	72144	↓	-720	-1.0
	MÉDIA	81912	80436	↓	-1476	-2.1
TOTAL	3126120	3118728	↓	-7392	-10.3	

Figura 5.13: Comparação das Horas de Operação Acumulada da 1ª Etapa com a 2ª Etapa

5.4 Comparação das Formulações

A tabela 5.15 mostra uma comparação entre o número de técnicos necessários para a execução do cronograma proposto por cada uma das três formulações apresentadas neste trabalho. Observa-se que a Formulação 3 foi a que apresentou um maior número de profissionais, 36 ao todo, já a formulação 2 apresentou o segundo maior número, sendo 32 profissionais ao todo, um resultado bem próximo da formulação 3, e a formulação 1 foi a que apresentou o menor número de profissionais, necessitando de uma equipe de 26 profissionais. A formulação 3 apresentou a maior equipe, pois foi a que apresentou um cronograma com o maior número de manutenções a serem realizadas em um único mês: 18 manutenções.

Tabela 5.15: Comparação entre a quantidade de técnicos necessários para o cronograma proposto

Profissional	Formulação 1	Formulação 2	Formulação 3
Eletromecânico Sênior	9	11	12
Eletromecânico Júnior	9	11	12
Eletroeletrônico Sênior	4	5	6
Eletroeletrônico Júnior	4	5	6

A figura 5.14 mostra o número de horas de operação acumulada (HOA) mínima, média e máxima obtida em cada formulação para a primeira manutenção. Observa-se que na média, a formulação 1 apresentou o menor valor de HOA, porém é a formulação que apresenta a maior intervalo entre o número mínimo de HOA e o número máximo. As formulações 2 e 3 apresentaram resultados bem semelhantes para os valores médios e máximos, porém a formulação 2 apresenta um valor mínimo maior, o que faz esta formulação apresentar o menor intervalo entre o número mínimo e máximo de HOA.

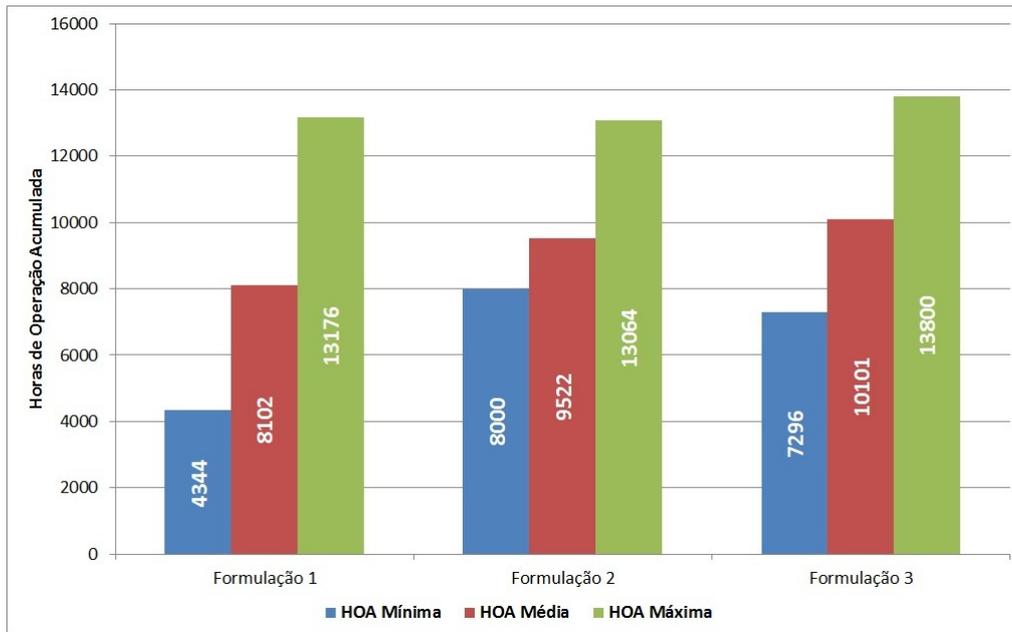


Figura 5.14: Comparação das Horas de Operação Acumulada da Manutenção 1

A figura 5.15 mostra os mesmos dados para a segunda manutenção. A formulação 1 continua apresentando a menor média e a maior diferença entre o valor de HOA mínima e máxima. A formulação 2 apresentou um valor médio menor que a formulação 3 e o menor intervalo entre HOA mínima e máxima. Nota-se que a média da formulação 2 está bem próximo do valor mínimo permitido para a realização da manutenção, o que mostra que grande parte das unidades geradoras estão parando no início do período, diminuindo o risco de falhas do equipamento por atraso na manutenção preventiva.

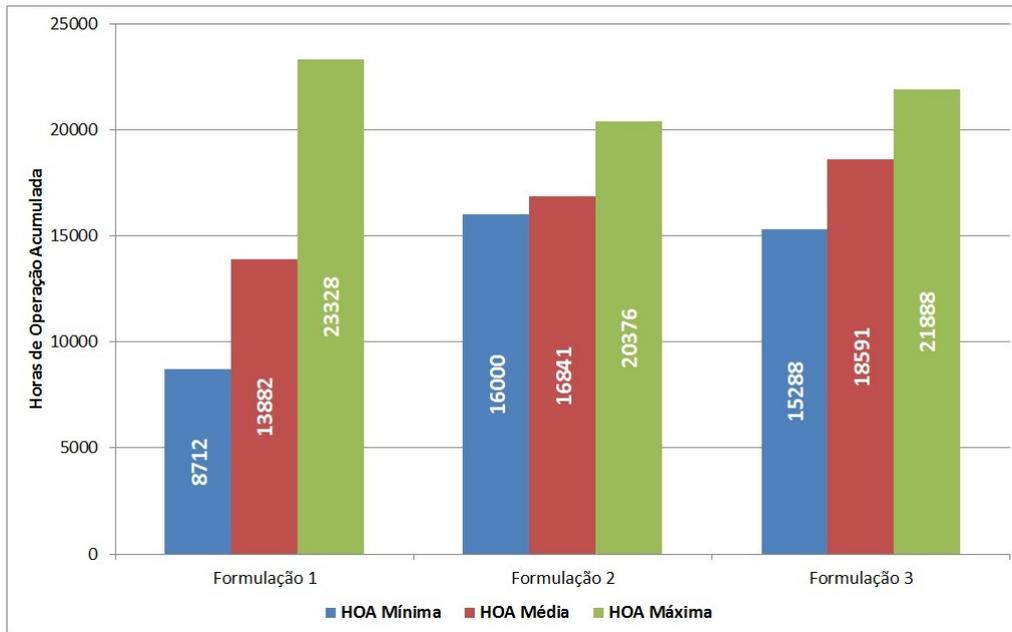


Figura 5.15: Comparação das Horas de Operação Acumulada da Manutenção 2

A figura 5.16 mostra os mesmos dados para a terceira manutenção. A formulação 1 apresentou a menor média e o maior intervalo entre mínimo e máximo. A formulação 2 apresentou melhor média que a formulação 3 e o menor intervalo, e o valor médio se aproximou mais do valor mínimo.

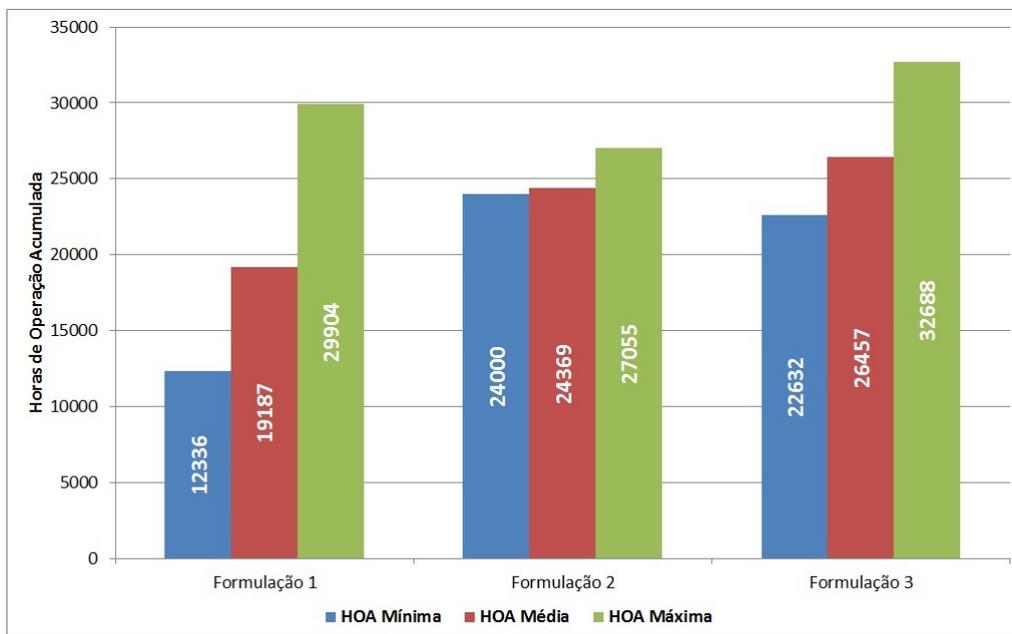


Figura 5.16: Comparação das Horas de Operação Acumulada da Manutenção 3

A figura 5.17 mostra os mesmos dados para a quarta e última manutenção. A formulação 1 apresentou a menor média e o maior intervalo entre mínimo e máximo. A formulação 2 apresentou melhor média que a formulação 3 e o menor intervalo.

Nesta manutenção, o valor médio é praticamente igual ao valor mínimo e o valor máximo se afasta do mínimo em apenas 1.400 horas, ou seja, dois meses. A formulação 3 foi a que apresentou a maior média, porém uma diferença entre o valor mínimo e máximo menor que a formulação 1.

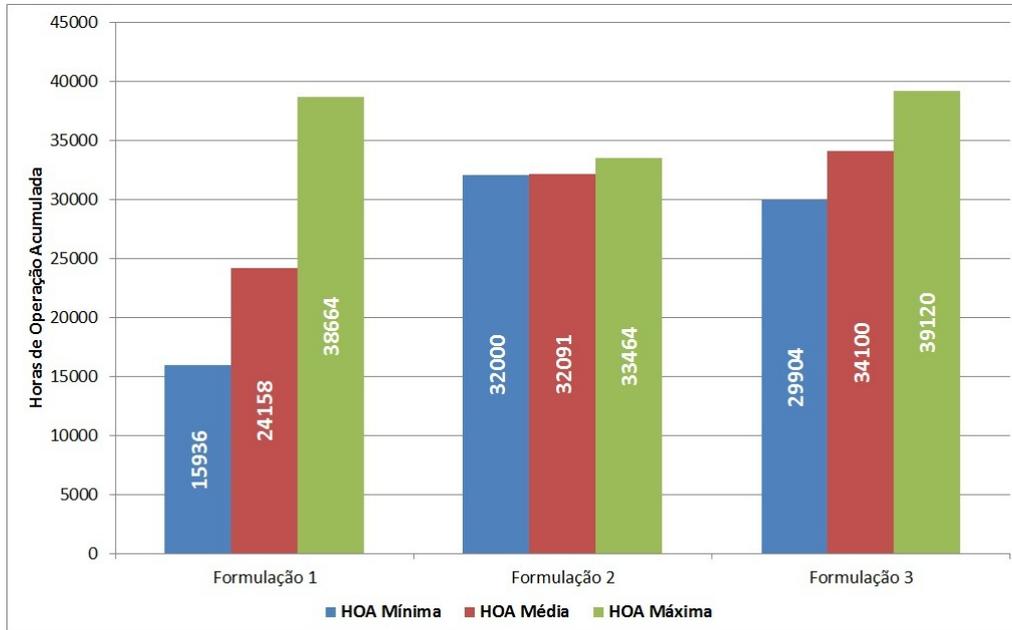


Figura 5.17: Comparação das Horas de Operação Acumulada da Manutenção 4

Na formulação 1, tem-se que o número de HOA é uma consequência, pois as manutenções são pré-fixadas de acordo com o número de anos de operação. Como as unidades geradoras possuem uma prioridade de despacho, em um mesmo intervalo de tempo, tem-se unidades que são mais solicitadas ao despacho que outras. Isto justifica a grande diferença entre o número de HOA mínima e máxima das unidades geradoras em cada manutenção. Já a formulação 2 e 3, pelo fato de possuírem um cronograma baseado no número de HOA, o fato de algumas unidades serem despachadas mais do que outras não implica em um número de HOA maior na execução da manutenção, e sim que as manutenções serão realizadas mais cedo nas unidades que são mais solicitadas e mais tarde nas unidades menos solicitadas.

A diferença entre a formulação 2 e 3 está na simplificação que cada uma carrega. Na formulação 2, foram simplificadas as variáveis inteiras relacionadas ao despacho ($DSP_{(u,t)}$), à manutenção ($MAN1_{(u,t)}$, $MAN2_{(u,t)}$, $MAN3_{(u,t)}$ e $MAN4_{(u,t)}$) e ao número de profissionais exigidos ($QEMS$, $QEMJ$, $QEES$ e $QEEJ$). A simplificação da variável relacionada ao despacho, faz com que não seja contabilizada corretamente as horas de operação da unidade geradora, quando esta variável assume valores entre 0 e 1. Por exemplo, se em um determinado mês uma unidade geradora tem a variável DSP igual a 0.9, será contabilizado apenas 90% das horas deste mês. Porém, pelos resultados, constatou-se que este fracionamento da variável

ocorre, na maioria dos casos, na última unidade geradora despachada, minimizando o impacto desta simplificação. Com relação à simplificação das variáveis relacionadas à manutenção, observa-se que, no ótimo, estas variáveis serão inteiras. Nos resultados aqui apresentados, apenas 13 variáveis, de um total de 176, não foram inteiras, e seus valores, quando fracionados, ocorriam em dois meses, sendo que em um mês o valor estava bem próximo de 1, e no outro mês o valor estava bem próximo de zero. Quanto à simplificação das variáveis relacionadas à quantidade de profissionais necessários para a realização do cronograma proposto, resolve-se este problema arredondando os valores fracionados para o inteiro superior mais próximo.

Na formulação 3, a simplificação é realizada dividindo-se o problema. Mantêm-se todas as variáveis inteiras, porém resolve-se o problema em duas etapas, na primeira etapa resolve-se o problema do despacho das unidades geradoras e na segunda etapa resolve-se o problema do cronograma de manutenções, utilizando na segunda etapa o número de HOA obtido na primeira etapa. Este é o motivo desta formulação apresentar valores médios de HOA superiores à formulação 2, e uma maior diferença entre os valores mínimos e máximos. Como na segunda etapa inclui-se as manutenções preventivas, o número de HOA das unidades geradoras na segunda etapa não será o mesmo obtido na primeira etapa. A vantagem desta simplificação está no tempo de solução do problema, enquanto a formulação 2 foi interrompida após 25 horas de simulação, a formulação 3 é resolvida em menos de 1 minuto.

Capítulo 6

Conclusões

A formulação 1 não se mostrou muito adequada às características da UHE Santo Antônio, pois, devido as regras de prioridade de despacho e a diferença de unidades geradoras de 4 e 5 pás, um cronograma de manutenção baseado em intervalo de tempo fixo faz com que sejam executadas manutenções preventivas muito precocemente nas unidades geradoras com menor prioridade de despacho e muito tardiamente nas unidades com maior prioridade de despacho. Isso implica em gastos desnecessários com manutenções realizadas precocemente e um aumento na probabilidade de falha das unidades mais despachadas. Contudo, é a formulação que gera um cronograma de manutenções que requer a menor equipe de manutenção, 26 profissionais ao todo, enquanto que a formulação 2 necessita de uma equipe de 32 profissionais e a formulação 3 necessita de uma equipe de 36. Como na formulação 1 realiza-se obrigatoriamente uma manutenção preventiva por ano, evita-se a ocorrência de manutenções simultâneas de longa duração (manutenções 2 e 4).

A utilização do número de horas de operação acumulada como referência para a definição das manutenções preventivas, ao invés de se utilizar intervalos fixos, mostrou ser mais adequada em usinas hidrelétricas com as características da UHE Santo Antônio, pois o modelo aproveita as baixas afluências e o grande número de unidades geradoras para realizar as manutenções o mais próximo possível do número de HOA definido. Isso foi observado nos resultados obtidos com as formulações 2 e 3.

Entre as formulações 2 e 3, a formulação 2 foi a que apresentou os melhores resultados do ponto de vista do cronograma de manutenções, pois não permitiu que as manutenções fossem realizadas antes do limite mínimo de HOA, e também não deixou que as manutenções fossem postergadas por muito tempo. Observou-se que, com a entrada de novas unidades geradoras, o problema da postergação das manutenções foi diminuindo, pois com um maior número de unidades, aumenta-se a flexibilidade de despacho da usina.

Um ponto negativo da formulação 2 é o seu tempo de execução. Porém, estu-

dos para a definição de cronogramas de manutenção, dimensionamento de equipes, e outras análises relacionadas ao planejamento da manutenção preventiva não são estudos que necessitam de uma resposta rápida. Possui-se tempo para a realização das simulações e análise dos resultados. Outro ponto importante é que as simulações apresentadas neste trabalho foram realizadas em um computador pessoal com um processador de baixo custo. Acredita-se que em computadores mais robustos, esse tempo deva cair bastante. No entanto, se o usuário quiser realizar análises de sensibilidade alterando-se alguns parâmetros e necessitar de uma resposta rápida, mas não tão precisa, ele pode utilizar a formulação 3 que reduziu consideravelmente o tempo de solução do problema e apresentou resultados próximos à alternativa 2.

A utilização desta ferramenta trará um grande ganho para a área de manutenção de Furnas que hoje realiza o cronograma de manutenções de suas usinas sem o auxílio de um modelo de apoio a decisão. Este trabalho também irá auxiliar na definição da taxa de indisponibilidade programada¹ utilizada nos estudos de viabilidade e projeto básico de novas usinas hidrelétricas.

As formulações apresentadas neste trabalho se limitam a usinas hidrelétricas do tipo a fio d'água, isto é, usinas hidrelétricas que não possuem reservatório de regularização. Para aplicar estas formulações em usinas hidrelétricas com reservatórios de regularização é necessária a definição, e inserção no modelo, de uma regra de operação de reservatórios. Devido as características específicas de cada usina hidrelétrica, referentes tanto ao aspecto construtivo quanto ao aspecto operativo, a utilização das formulações apresentadas neste trabalho para outras usinas implicará em modificações na modelagem, com o objetivo de adaptar o modelo matemático às características da usina em análise.

Neste trabalho não foi abordada a questão da variabilidade das vazões, isto é, toda a análise realizada neste trabalho foi baseada em uma única série histórica de vazões. Para agregar mais confiabilidade aos resultados, sugere-se a simulação para diversos cenários hidrológicos, ou mesmo a melhoria da formulação para uma abordagem estocástica do problema.

¹Valor percentual que define o montante de energia que uma determinada usina deixa de gerar por estar realizando as manutenções preventivas

Referências Bibliográficas

- [1] XAVIER, J. N. *Manutenção - Tipos e Tendências*. Nota técnica, TECÉM - Tecnologia Empresarial LTDA, Belo Horizonte - MG, 2004.
- [2] CESP. *Guia de Manutenção Preventiva de Unidades Geradoras*. Nota técnica, CESP - Companhia Energética de São Paulo, São Paulo - SP, 2007.
- [3] SILVA, E. L., MOROZOWSKI, M. F. “Programação da Manutenção de Unidades Geradoras em Sistemas Multi-área com base em Métodos Probabilísticos”, *XIII SNPTEE*, 1995.
- [4] YAMAYEE, Z. A. “Maintenance Scheduling: Description, Literature Survey, and Interface with Overall Operations Scheduling”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-101, n. 8, pp. 2770–2779, 1982.
- [5] CHRISTIAANSE, W. R., PALMER, A. H. “A Technique for the Automated Scheduling of the Maintenance for Generating Facilities”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-91, n. 1, pp. 137–144, 1972.
- [6] YARE, Y., VENAYAGAMOORTHY, G. K., SABER, A. Y. “Economic Dispatch of a Differential Evolution Based Generator Maintenance Scheduling of a Power System”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 2009.
- [7] DOPAZO, J. F., MERRILL, H. M. “Optimal Generator Maintenance Scheduling Using Integer Programming”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-94, n. 5, 1975.
- [8] FORTUNATO, L. A. M. *Coordenação de Programas de Manutenção Preventiva de Unidades Geradoras em um Sistema de Energia Elétrica*. M. Sc. dissertação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1985.

- [9] ZURN, H. H., QUINTANA, V. H. “Generator Maintenance Scheduling Via Successive Approximations Dynamic Programming”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-94, n. 2, 1975.
- [10] FINARDI, E. C. *Alocação de Unidades Geradoras Hidrelétricas Utilizando Relaxação Lagrangeana e Programação Quadrática Sequencial*. Relatório Técnico Interno LabPlan RT - 03/2004, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- [11] JOHNSON, E. L., NEMHAUSER, G. L., SAVELSBERGH, M. W. P. “Progress in Linear Programming-Based Algorithms for Integer Programming: An Exposition”, *Inform Journal on Computing*, v. 12, n. 1, 2000.
- [12] MACULAN, N., FAMPA, M. H. C. *Otimização Linear*. 1 ed. Rio de Janeiro, UNB, 2006.
- [13] WOLSEY, L. A. *Integer Programming*. 1 ed. New York, John Wiley Sons, INC., 1998.

Apêndice A

Série de Vazões Médias Mensais Históricas - (m^3/s)

ANO	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1931	29770	41350	45922	39931	31375	22829	16131	12042	7342	8081	12864	19857
1932	31508	37388	44138	42406	36131	27350	20327	11428	6301	6917	17718	26900
1933	34671	43283	46540	49622	37545	23178	11726	6061	4602	8666	8563	15545
1934	23350	36448	39686	40082	30198	22297	17313	8725	3372	4261	10834	32611
1935	39787	46041	45312	41713	24283	17874	12280	9591	6401	7267	10034	15601
1936	24207	29428	28626	25332	22843	20385	11933	6767	5510	5638	6276	15560
1937	32446	38401	47805	43373	26417	15399	11459	6587	5612	7136	9183	11044
1938	19299	29056	29877	26597	19657	10903	8379	4067	2663	3950	6486	9198
1939	15520	21839	27564	30885	20134	8487	3808	2351	1407	4339	6906	16495
1940	26482	30941	37240	33822	26434	21998	18314	17673	15822	9055	13281	20087
1941	20472	30970	47902	44064	36311	24090	15179	12296	10837	13615	16640	22664
1942	25976	38772	38955	38627	34840	30819	20404	12750	11776	12595	13656	13378
1943	17742	27099	35173	33920	28494	20192	12949	7827	5619	6940	15759	21533
1944	26286	34557	42406	38207	23684	16138	10876	7318	5748	7023	16531	18115
1945	24336	34890	39049	40013	28759	13999	6351	5471	6136	8117	13351	19853
1946	24869	29966	36984	37523	25945	21248	16397	11235	8432	9426	11264	21877
1947	29710	32406	34858	28150	21006	12785	7990	5725	4971	5758	12876	15161
1948	18336	23801	28772	31104	26105	19288	12767	7941	4793	4444	7158	14098
1949	20339	27358	32620	32992	26487	19008	12685	8008	4804	5278	9331	14502
1950	22101	29122	35309	34523	27291	19105	11524	6217	4138	5444	10034	15291
1951	21414	28613	32865	31175	24685	17249	11110	6687	5520	6811	10928	16429
1952	22241	30191	34094	31841	25292	18059	11669	7529	4865	5937	9182	14892
1953	20892	26406	29499	29505	23966	17051	10666	6102	3879	5023	9080	16581
1954	23815	30263	36427	35863	27776	18640	11220	5916	3388	3633	6584	11669
1955	16435	24614	30629	32015	25776	17673	10777	6275	3732	3750	6902	12581
1956	21749	29765	31504	28811	22625	15467	9956	6307	5111	6957	10077	15939
1957	20626	25892	29766	30068	25129	17839	11554	8250	6421	8025	11872	18399
1958	26165	31395	33754	33362	25826	17465	10578	6489	4129	6192	10778	17451
1959	26305	33479	35949	35531	27630	18231	10844	5946	4029	5191	8819	14848
1960	22189	28675	31969	31906	27015	19130	11574	6675	4753	6083	10326	15460
1961	19266	23023	26454	27725	24632	18331	11771	6553	3836	4034	8687	16582
1962	24027	29894	31722	30500	24084	16467	9577	5419	3539	4826	6772	11306
1963	19234	26519	31280	31009	24350	16727	10480	5799	3265	3702	5492	9145
1964	16676	22809	29874	32643	27398	19237	11920	6756	5083	8663	12952	17930
1965	24931	30093	31873	31004	24145	15879	9621	6121	4041	5371	8805	14566
1966	20015	24579	26687	27381	22030	17623	13236	8759	5620	6591	9491	13040
1967	18416	23678	29240	29999	16917	12063	6807	5170	3812	4053	7722	9950
1968	13618	24268	32747	25804	13772	7075	4862	3732	4956	4915	7334	11858
1969	22614	25543	25575	24618	15545	12167	7777	4959	4391	11182	6589	13656
1970	16705	22442	28253	28232	23709	17284	9828	5541	4882	4872	6208	9675
1971	18871	29210	32736	26630	17464	10279	7835	4773	4320	6564	9128	14906
1972	19916	27405	34489	34288	23019	16533	8960	7669	9899	10476	9738	19784
1973	24335	33283	37676	36420	27731	20739	13209	8906	6769	6884	12789	20564
1974	29354	34839	41039	35254	28254	19155	11967	7611	5419	6018	10660	13561
1975	21546	30769	36365	33842	24674	16931	13001	6871	4957	7701	8550	17857
1976	26750	35183	38409	34991	26626	18032	9556	5360	4566	4869	8239	12727
1977	24870	28921	39322	35442	28626	19237	12200	7610	5889	7563	12923	19456
1978	26794	32780	39445	33623	25098	17869	12715	6016	3803	4621	8243	20442
1979	29831	35467	37490	40595	33388	21550	11814	6475	5221	5338	6908	11125
1980	20417	26162	34128	34980	27887	22771	13622	8247	7301	8296	9177	12444
1981	18191	28534	35597	35567	28969	23737	12146	6189	4668	7134	12802	19828
1982	30010	36723	42178	45639	38171	27384	19583	10932	6853	12285	18416	22791
1983	25494	30746	34781	31018	30277	24375	21144	13126	6785	5723	8655	13265
1984	25190	33864	41140	47069	39476	26749	16482	8188	5458	5726	15259	21259
1985	29214	34031	34813	35450	33436	23698	14731	10588	7505	8812	12542	16506
1986	25476	35328	41899	43985	34430	26646	17491	11239	9274	10326	8979	17692
1987	26383	31491	28331	24079	22420	14257	8519	5892	4234	5282	10810	21036
1988	25987	32420	35037	40148	31328	22065	13181	6305	3893	4231	5810	10085
1989	21786	28769	32210	31327	24307	15612	10725	6187	5876	5181	6529	10342
1990	21244	28166	29043	24797	22610	18899	12833	6746	5437	6751	15129	19672
1991	27422	34162	36130	34196	26026	19886	12266	8018	6097	7188	10991	16141
1992	25324	26899	38048	36543	32349	24577	20310	10413	12608	15455	16754	22889
1993	30745	39244	42727	43573	32883	20319	11318	7712	7082	6923	12557	19385
1994	25179	32614	33770	33936	25830	15240	8992	6024	3651	5518	13601	21204
1995	25926	28947	36415	34855	24530	15018	8902	7101	3762	3779	5464	13793
1996	19101	28422	29752	31571	20849	14245	8656	4685	4720	6161	13940	17290
1997	24798	32589	43169	44207	33883	23306	14167	8087	4999	6814	9755	17178
1998	21736	24241	33440	34188	21647	12230	7308	4693	4400	6126	13942	21221
1999	26606	33933	34299	33174	22667	14511	10349	5329	3738	4275	5906	13684
2000	19444	25650	31004	27552	19109	13900	8857	5639	6341	4559	9794	15839
2001	24029	32829	40935	35490	25626	18139	10605	6609	4469	5527	11493	16978
2002	23067	27904	35724	29905	23005	16998	9211	5722	4707	5877	8684	15235
2003	21897	29124	32677	32937	21950	15329	8253	5095	3926	6010	7490	13499
2004	26948	29717	26884	26380	20749	13328	8881	6287	4248	4649	8902	15221
2005	21627	24493	29097	25731	16126	12563	6924	3552	2626	4063	8735	15263
Mínima	13618	21839	25575	24079	13772	7075	3808	2351	1407	3633	5464	9145
Média	24027	29894	34781	33822	25776	18032	11524	6587	4956	6018	9738	15839
Máxima	39787	46041	47902	49622	39476	30819	21144	17673	15822	15455	18416	32611